

## بررسی اثر تغییر شکل سطح مقطع یک مانع بیضوی بر رسوب میکرو ذرات داخل کانال به روش شبکه بولتزمن

بابک روشنی و احمدرضا رحمتی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸)

DOI: 10.47176/jcme.43.1.1027

**چکیده** - در کار حاضر رسوب میکروذرات برای جریان در کانال با مانع بیضوی با مساحت ثابت اما با ضریب شکل‌های متفاوت بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی به روش شبکه بولتزمن به همراه روش لاگرانژی برای مسیریابی ذرات انجام شده است. مدل شبکه‌ی استفاده شده در کار حاضر مدل دو بعدی و ۹ سرعته، Q2D9، است. از شرط مرزی منحنی شکل برای مرز موانع استفاده شده است. ذرات با شرایط استاندارد در ورودی کانال تزریق شده‌اند. گرانج، نیروی دراگ، نیروی براونی و نیروی لیفت سافمن در معادله حرکت ذرات در نظر گرفته شده است. پارامتر هندسی نسبت اقطار مانع که به عنوان ضریب شکل در نظر گرفته می‌شود با پارامترهای جریان مانند عدد رینولدز برای رسوب و پراکندگی ذرات در نظر گرفته شده‌اند. نتایج مورد نظر برای هر دو متغیر ضریب شکل و عدد رینولدز با ۸ ضریب شکل و ۵ عدد رینولدز مختلف بررسی شده‌اند. نتایج نشان از تأثیر ضریب شکل بر روی جریان سیال با ممانعت از عبور جریان و تغییر در نوع جریان دارد. این تغییر در اعداد رینولدز مختلف نیز قابل مشاهده است. همچنین تغییر ضریب شکل با تغییر در نوع جریان و مکانیزم‌های رسوب باعث تغییر در نیروهای وارده بر ذرات و رسوب ذرات می‌شود. به‌طور کلی تأثیر متغیرهای مورد نظر با تعداد ذرات رسوب شده تفسیر شده است.

واژه‌های کلیدی: روش شبکه بولتزمن، مسیریابی ذرات، مکانیزم رسوب، ضریب شکل.

## Investigating the Effect of Changing the Shape of the Cross Section of an Elliptical Obstacle on the Deposition of Micro Particles Inside the Channel Using the Boltzmann Network Method

B. Roshani and A. R. Rahmati\*

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

**Abstract:** In the current study, transportation of the microparticles deposition through a channel has been investigated where elliptical obstacle with constant cross sectional area but different shape factors was assumed in the channel. Numerical simulation was conducted using lattice Boltzmann method, and Lagrange method was used for particle tracking. A two-dimensional and nine-velocity model was used as the network model. A curved boundary condition was applied for the obstacle

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ar\_rahmati@kashanu.ac.ir

boundaries. In the designed model, particles at standard condition were injected at the inlet of the channel. Gravity force, drag force, Brownian force and Soffman lift force were applied in the motion equation of the particles. The effect of shape factor as a geometrical parameter, which was defined as the ratio of the diameters of elliptical obstacle, and the flow parameters such as Reynolds' number was examined on the particle deposition and particle scattering. Results were examined at eight different shape factors and five different Reynolds numbers. Results revealed that the change in the shape factor varies the effect of the obstacle in the flowing stream, and also changes the flow regime. This variation was obtained at different Reynolds numbers. Furthermore, changes of the shape factor associated with variations in the flow regime and deposition mechanisms, changes the forces exerted on the particles. Generally, the effect of the mentioned parameters can be interpreted based on the number of the precipitated particles.

**Keywords:** lattice Boltzmann method, Particle Tracking, Deposition Mechanism, Shape Factor.

### فهرست علائم

مؤلفه سرعت در جهت X	$u$	مساحت مانع	$A$
مؤلفه سرعت در جهت Y	$v$	معیار همگرایی	$CC$
بردار سرعت	$V$	ضریب اصلاح لغزش کانینگهام	$C_c$
ضریب وزنی برای میدان جریان	$w$	سرعت صوت	$C_s$
	<b>علائم یونانی</b>	خطای محاسباتی	$Er$
چگالی	$\rho$	مؤلفه بردار سرعت در مقیاس شبکه در جهت $i$	$e_i$
فاصله ی بی بعد شده	$\Delta$	ضریب شکل	$F$
طول آزاد میانگین	$\lambda$	نیروی دراگ	$F_d$
لزجت دینامیکی	$\mu$	تابع توزیع چگالی در جهت $i$	$f_i$
زمان آسایش	$\tau$	تابع توزیع تعادلی در جهت $i$	$f_i^{eq}$
لزجت سینماتیکی	$\nu$	نیروی سافمن	$f_{saff}$
فرکانس برخورد	$\omega$	شتاب گرانشی در جهت $i$	$g_i$
	<b>زیر نویس</b>	ارتفاع کانال	$H$
سیال	$f$	بیان کننده جرم ذرات	$m$
ذرات سیال	$p$	تعداد جهات گسسته سازی شده سرعت	$M$
فرکانس برخورد	$w$	نیروی براونی	$n_i$
نقاط جامد مانع	$b$	عدد رینولدز	$Re$

### ۱- مقدمه

توانایی تأثیر گذاشتن بر وضعیت آب و هوایی بلکه توانایی اثر بر روی کیفیت زندگی و سلامت بشر را نیز دارند. ذرات معلق درون هوا نمونه هایی از آئروسول هستند. یک آئروسول به صورت ذرات معلق مایع یا جامد معلق در هوا تعریف می شود. آئروسول یک سیستم دوفاز است که از ذرات معلق و هوای اطراف آنها به وجود می آید. آئروسول دامنه ی بزرگی از پدیده ها را در خود

انواع مختلفی از ذرات معلق در هوا وجود دارد. ذرات معلق خاک، دود ناشی از تولید برق، ذرات متشکل از مواد فتوشیمیایی، نمک موجود در فضای اطراف آب اقیانوس ها و ابرهای آبی موجود در فضا به همراه ذرات آب و یخ موجود در آن از انواع معمولی از این ذرات هستند. این ذرات نه تنها

در محیط انتشار پیدا کرده‌اند که آن‌ها در این مطالعه به روش رها شدن، ساختار آن و انتقال آن پرداخته‌اند. یکی از مواردی که توجه به ذرات آئروسول را افزایش داده است پاندمی کرونا در چند سال گذشته است که تحقیقات زیادی نیز در مورد آن انجام گرفته است. لی و همکاران [۵] به بررسی احتمال انتقال ذرات آئروسول عفونی کرونا در سوپر مارکت‌ها و اماکن کوچک پرداختند. آن‌ها در این تحقیق پنج فروشگاه بزرگ و ۲۱ فروشگاه کوچک را مورد بررسی قرار داده و عوامل تأثیرگذار را به دو فاکتور داخلی و خارجی تقسیم کرده‌اند. منظور از فاکتور داخلی عوامل غیرقابل کنترل در انتقال بیماری‌ها و فاکتور خارجی به عوامل قابل کنترل یا تا حدی قابل کنترل اطلاق شده است. آن‌ها که در این تحقیق از مدل‌های انتقال آئروسول‌ها برای شبیه‌سازی تحقیق استفاده کرده‌اند، از متغیرهایی مانند مساحت فروشگاه‌ها، تعداد مشتریان، مدت زمان حضور مشتری در فروشگاه و قطر ذرات معلق در هوا استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که غلظت ویروس در مغازه‌های کوچک پایدارتر است. همچنین احتمال مبتلا شدن مشتری در مغازه  $1/4 \times 10^{-6}$  در مقابل  $6/22 \times 10^{-6}$  برای فروشگاه‌ها است. شینده و همکاران [۶] بر روی تأثیرگذاری انواع ماسک و جلوگیری آن‌ها از ابتلا به بیماری فعالیت کردند. استفاده از ماسک بعد از واکسن به عنوان مهم‌ترین عامل جلوگیری از ابتلا به بیماری شناخته می‌شود. به همین دلیل به بررسی تأثیر سه نوع ماسک N95، ماسک‌های جراحی و ماسک‌های پارچه‌ای پرداخته‌اند که نتایج آن‌ها نیز بسیار مورد توجه قرار گرفت و تأییدی بود بر استفاده از ماسک‌های N95. در واقع بهترین توصیه بدین صورت است که برای اماکن پرخطر و در معرض شدید ویروس بهترین ماسک برای استفاده ماسک N95 است. همچنین برای اماکن پرخطر اما بدون ویروس ماسک جراحی و برای اماکن عمومی ماسک‌های پارچه‌ای می‌توانند مؤثر باشند. در این موقعیت مائو و همکاران [۷] بررسی انتقال و مکانیزم‌های مربوط به ویروس‌های آئروسول مانند و انتشار آن‌ها در زمان تنفس،

جای می‌دهد. گرد و خاک، بخار، دود، غبار، مه، ابر و مه غلیظ انواع آن هستند. اگرچه واژه آئروسول به صورت تخصصی برای مواد خارج شده از اسپری‌ها استفاده می‌شود اما به صورت یک توافق بین‌المللی برای ذرات معلق در هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

مطالعه انتقال و جذب ذرات در شاخه‌های مختلف علوم مورد توجه پژوهشگران واقع شده است. مطالعات آلودگی هوا، کنترل نشست ذرات بر روی میکروتراشه‌های الکترونیکی، طراحی اتاق‌های تمیز، دارورسانی هدفمند و بررسی ذرات استنشاقی، روکش کردن سطوح به کمک رسوب ذرات و فیلتراسیون بخشی از پژوهش‌های مربوط به پخش و جذب ذرات را به خود اختصاص می‌دهند. الگوی رسوب و انتقال ذرات همچنین راندمان رسوب و خط مسیر ذرات برای بهینه کردن طراحی محیط و کار بسیار مهم هستند [۱].

مهم‌ترین زمینه‌ی تحقیق، بررسی و شناخت ذرات آئروسول به دلیل تأثیر این ذرات بر روی سلامت انسان است. در این مسیر مطالعه رفتار و نحوه جداسازی این ذرات بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اختلالات ریوی در بالغین، از جمله شایع‌ترین بیماری‌هایی هستند که هر پزشکی با آن‌ها برخورد می‌کند. حداقل ۴ مورد از ۱۰ علت مرگ و میر ناشی از بیماری‌های طبی در ایالات متحده آمریکا، به نوعی مرتبط با اختلالات عملکرد ریه هستند [۲]. در مطالعات ما و همکاران [۳] اشاره شده است که سالانه مرگ حدود ۴/۲ میلیون از انسان‌ها به دلیل بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا است و در آینده به مهم‌ترین دلیل مرگ و میر در انسان‌ها تبدیل می‌شود و به همراه همکارانش به بررسی تهدید آلودگی هوا بر سلامت و اکوسیستم در چین پرداخته است. مطالعاتی که نشان از افزایش ۲/۶ برابری آلودگی‌ها در بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ دارد. وانگ و همکاران [۴] با توجه به مصرف سالانه‌ی ۲/۸ میلیارد تنی زغال سنگ برای تأمین انرژی در سال ۲۰۱۹ در چین به بررسی سرب آزاد شده در آن پرداخته‌اند. در صورت مصرف این مقدار از زغال سنگ در حدود ۶۴ هزار تن از ذرات سرب

روش‌های عددی در مهندسی، سال ۴۳، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳

صحبت کردن، سرفه کردن و عطسه کردن پرداخته‌اند.

به واسطه‌ی ضرورت‌های ذکر شده در بالا و اهمیت مسئله پژوهش‌های زیادی انجام شده که به دنبال شبیه‌سازی مناسب برای رفتار ذرات آئروسول بوده است. همچنین در هر کدام از این تحقیق‌ها زوایای خاصی مورد بررسی قرار گرفته است که هر کدام به نوبه‌ی خود اهمیت خاصی را دارا است. آزمایش‌ها و مطالعات عددی فراوانی در مورد انتقال و رسوب ذرات آئروسول در جریان داخل کانال برای موانع با اشکال مختلف از جمله استوانه، کره، مربع و بیضی انجام شده است. به عنوان مثال می‌توان همکاران به بررسی آزمایشگاهی رسوب ذرات آئروسول بر روی مانع با اشکال استوانه، کره و دیسک پرداخته‌اند. این آزمایش که در تونل باد و با استفاده از سرنگ برای تزریق انجام شده است، برای ذرات  $20,30$  و  $40$  میکرومتری در سرعت‌های  $2/2$ ،  $3/1$ ،  $4/5$  و  $6/2$  متر بر ثانیه‌ای انجام شده است. وانگ و همکاران نیز کاری مشابه بر روی موانع بیضی شکل به عنوان فیلتر را با روش فاز گسسته در فلونت انجام داده‌اند [۸ و ۱۰]. یک وجه تمایز دیگر، بررسی نیروهای وارده است که به طور مثال در بسیاری از تحقیقات نیروی براونی مورد بررسی قرار نگرفته است. براندون و آگروال انتقال و نشست ذرات را بر روی یک مانع با مقطع مربع و با نسبت عرض مانع  $0/2$  را برای اعداد رینولدز بین  $50$  تا  $100$  بررسی کرده‌اند. آن‌ها در این تحقیق همانند وانگ و همکاران تأثیر نیروی براونی را بررسی کرده‌اند [۹ و ۱۰]. به دلیل اهمیت نیروی براونی یک سری از مطالعات به دنبال فهم تأثیر نیروی براونی هستند [۱۱-۱۳]. پرژکوپ و گاردو [۱۱] رسوب و فیلتراسیون نانوذرات در کامپوزیت‌هایی با اندازه فیلتر نانو مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها در این پژوهش یک فیلتر دولایه را شبیه‌سازی کرده‌اند که لایه‌ی اول آن با اندازه نانومتر و دومی میکرومتر است. در این تحقیق توانسته‌اند راندمان فیلتراسیون و افت فشار را در بازه‌های بزرگی از اعداد نادسن و پکلت را به دست آورده‌اند. که روش شبکه بولتزنم روشی مناسب برای این مطالعه است. جعفری و همکاران [۱۲] تأثیر گردابه به وجود آمده در پایین

دست مانع مربع شکل را بر رسوب و انتقال ذرات مورد مطالعه قرار داده‌اند. این پژوهش مدل‌های اغتشاش مختلف را برای جریان آشفتة درون کانال در حضور یک مانع مربعی با ضریب انسداد  $0/25$  را با نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی کرده است و نتایج خود را بر اساس عدد استوکس ارائه داده است. همچنین حسینی و تفرشی [۱۳] با استفاده از فلونت و تأثیر مقطع مانع برای فیلتر با در نظر گرفتن نیروی براونی رسوب میکروذرات را بررسی کرده‌اند. آن‌ها برای اعداد رینولدز بسیار پایین جریان حاوی میکروذرات در عبور از موانعی به شکل دایره، بیضی، مربع و سه گوش را بررسی کرده‌اند. که در حل خود از معادلات ناویراستوکس استفاده شده است. در این مطالعه که از نرم‌افزار فلونت استفاده شده از معادلات ماکسول برای معادلات سرعت لغزش و برای رهگیری ذرات نیز از روش لاگرانژی استفاده شده است.

در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزنم در تحلیل جریان سیال به‌عنوان راه کارآمد جایگزین برای روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، رشد چشمگیری داشته است، به طوری که همییکا و همکاران به شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در بیمارستان پرداخته‌اند. آن‌ها به دلیل آرایش‌های مختلف اتاق‌ها از الگوهای مختلفی از تخت‌های بیمارستان و پارتیشن‌بندی‌های بین آن‌ها برای ورودی و خروجی از سقف در اعداد رینولدز متفاوت به روش شبکه بولتزنم انجام داده‌اند [۱۴]. مزیت این روش در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، سهولت اعمال شرایط مرزی، محاسبات ساده‌تر و قابلیت موازی شدن است که برای حل مسائلی با هندسه پیچیده دارای کاربرد فراوانی است [۱۵].

با شبیه‌سازی عددی جریان سیال می‌توان دقت در محاسبه خط مسیر ذرات را به دست آورد. در کار حاضر رویکرد مورد نظر در روش شبکه بولتزنم که هم اکنون استفاده زیادی در بررسی انواع جریان [۱۲، ۱۳ و ۱۶] شامل جریان‌های آرام و مغشوش [۱۶ و ۱۷]، غیرنیوتنی [۱۸ و ۱۹] و جریانات در مقیاس میکرو و نانو مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲، ۱۳ و ۲۰].

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = \quad (2)$$

$$f_i(x, t) - [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] / \tau + F_i$$

در معادله‌ی بالا  $\tau$  زمان آسایش بی‌بعد است که نرخ تعادلی موضعی ( $f_i$ ) را کنترل می‌کند، به عبارت دیگر بیان‌کننده گرانروی سیال است. ارتباط زمان آسایش و گرانروی برای مدل D2Q9 استفاده از معادله شبکه بولتزمن به صورت  $v = C_s^2(\tau - 0.5)$  تعریف شده است. با قرار دادن معادل سرعت صوت

$$C_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

$$f_i^{eq} = \quad (4)$$

$$\rho \omega_i \left[ 1 + 3(e_i \cdot u) + \frac{9}{2}(e_i \cdot u)^2 - \frac{3}{2}u^2 \right] f$$

$$\omega_i = \frac{4}{9}, \omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \frac{1}{9}, \quad (5)$$

$$\omega_5 = \omega_6 = \omega_7 = \omega_8 = \frac{1}{36}$$

سرعت موضعی ذرات،  $e_i$ ، به صورت زیر تعریف شده است.

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

برای هندسه‌ی موانع مسئله از موانع منحنی‌الشکل استفاده شده است و تأثیر تغییر سطح عمود بر جریان برای موانع با مساحت ثابت بررسی شده است. به همین دلیل موانع به صورت بیضی‌هایی با طول اقطار مختلف اما با حاصل ضرب برابر در نظر گرفته شده است. در این صورت به دلیل آنکه مساحت بیضی به صورت  $A = \pi ab$  تعریف شده است مساحت اشغال شده از طرف مانع ثابت است اما سطح عمود و موازی جریان تغییر کرده است. این متغیر با نسبت قطر عمودی بر افقی به صورت ضریب شکل تعریف شده است. مساحت استفاده شده در مسئله با در نظر گرفتن قطرهای بیضی به صورت ضرایبی از ارتفاع کانال ( $H$ ) برابر با  $A = \pi H^2 / 36$  در نظر گرفته شده است.

این روش باعث بالا رفتن دقت شبیه‌سازی جریان سیال در مسیریابی ذرات می‌شود. شرایط مرزی و خروجی پیاده‌سازی شده در مسئله باعث افزایش ساده‌سازی شبیه‌سازی عددی در حین حفظ دقت حل مسئله و همگرایی مسئله می‌شود [۲۰].

با توجه به کارهای انجام شده، در کار حاضر تأثیر خواص سیال از جمله عدد رینولدز و هندسه مانع (ضریب شکل بیضی) بر روی رسوب و پخش ذرات برای جریان داخل کانال در حضور مانع با ضرایب شکل مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. تغییر در ضریب شکل مانع مورد نظر در واقع بیان‌کننده تأثیرات یک مانع با مساحت برابر است. منظور از مساحت برابر این است که مانع مورد نظر در تمام حالات بررسی شده سطح یکسانی از کانال را اشغال می‌کند اما با تغییر در قطرهای آن تأثیر تغییر مساحت عمود و موازی جریان به عنوان یک متغیر جدید بررسی شده است. قابل ذکر است که در حل این مسئله ذرات رها شده تحت تأثیر چهار نیروی دراگ، گرانش، براونی و سافمن هستند. علاوه بر این پیاده‌سازی شرایط مرزی منحنی شکل نیز بهبود یافته است.

## ۲- روش مسئله

### ۲-۱- شبیه‌سازی جریان سیال با روش شبکه بولتزمن

روش شبکه بولتزمن دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان سیال استفاده شده است. در این روش جریان سیال با تابع  $f_i(x, t)$  که تابع توزیع چگالی ذرات در مکان  $x$  و زمان  $t$  است تفسیر شده است:

$$(1)$$

$M$  نشان دهنده تعداد جهات گسسته‌سازی شده سرعت در شبکه است. در کار حاضر مدل D2Q9 مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل نشان دهنده مدل دو بعدی با نه سرعت گسسته شده است که در این حالت  $M=8$  است. معادله شبکه بولتزمن از گسسته‌سازی معادله بولتزمن به وجود آمده که ترم برخورد در آن با روش‌های مختلفی تخمین زده شده است. در میان این روش‌ها روش BGK بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷].

روش‌های عددی در مهندسی، سال ۴۳، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳

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

با تغییر در نسبت اقطار مسئله برای ۸ ضریب شکل ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۴۴، ۰/۷۵، ۱/۴۴، ۲/۲۵، ۴، ۴/۸۴ بررسی شده است.

## ۲-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی ورودی و خروجی با استفاده از روش ارائه شده در مطالعات زو و همکاران [۲۰] در نظر گرفته شده است و سرعت ورودی با پروفیل سهموی برای ورودی کانال در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی به صورت زیر است [۲۰]:

$$f_i(x_b + c_i \Delta t, t + \Delta t) = \quad (13)$$

$$(1 - \chi) f_i(x_f + c_i \Delta t, t + \Delta t) + \chi f^*(x_b, t) \quad (14)$$

$$f_i^{eq}(x_f, t) + \omega_i \rho(x_f, t) \frac{\chi}{c_i} e_i (u_{bf} - u_f) \quad (15)$$

$$\begin{cases} u_{bf} = \left[ 1 - \frac{\chi}{\tau \Delta} \right] u_f + \frac{\chi}{\tau \Delta} & \text{and } \chi = \frac{\tau \Delta - 1}{\tau + \frac{1}{\chi}} & \text{for } \Delta \geq \frac{1}{\chi} \\ u_{bf} = u_{ff} & \text{and } \chi = \frac{\tau \Delta - 1}{\tau - \chi} & \text{for } \Delta < \frac{1}{\chi} \end{cases}$$

تمامی فرمول‌های استفاده شده در بالا و اثبات روابط فوق در مراجع [۲۲-۲۴] به صورت مفصل شرح داده شده است.

## ۲-۳- معادله حرکت ذرات

ذرات تزریق شده در سیال ذرات استاندارد با شکل کره و چگالی آب مایع هستند که تحت تأثیر ۴ نیروی دراگ، گرانش، براونی و سافمن هستند. مهم‌ترین این نیروها نیروی دراگ است که باعث پیروی ذرات از جریان سیال می‌شود. بنابراین معادله حرکت ذرات به صورت رابطه‌ی (۱۶) است [۲۵]:

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

u نشان دهنده سرعت ذره، t نماینده زمان، m بیان کننده جرم ذرات، g\_i شتاب گرانشی در جهت iام، F\_D نیروی دراگ، F\_B و F\_saffman نشان دهنده نیروی سافمن و براونی هستند که نیروی دراگ و سافمن به ترتیب به صورت زیر هستند:

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

$$f_{saff} = \quad (18)$$

$$\frac{3}{4} \cdot 0.84 \frac{\rho_f}{\rho_p} v_f^{-1} d_p^{-1} (u_f - u_p) \left| \frac{du_f}{dy} \right|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn} \left( \frac{du_f}{dy} \right)$$

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

$$\begin{cases} f_\delta = f_v - \frac{1}{\chi} (f_v - f_r) + \frac{1}{\epsilon} \rho u \\ f_r = f_r + \frac{\chi}{\tau} \rho u \end{cases} \quad (8)$$

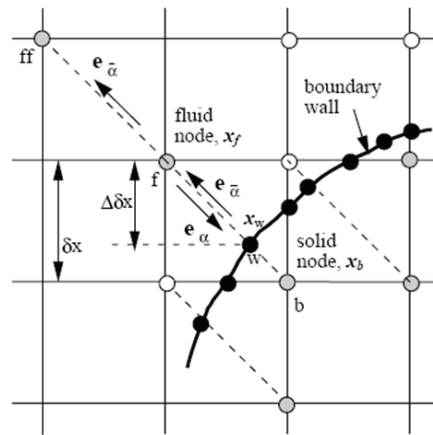
$$\begin{cases} f_\lambda = f_f + \frac{1}{\chi} (f_r - f_f) + \frac{1}{\epsilon} \rho u \\ f_v = f_\delta + \frac{1}{\chi} (f_r - f_v) - \frac{1}{\epsilon} \rho u \\ f_r = f_r - \frac{\chi}{\tau} \rho u \\ f_f = f_\lambda - \frac{1}{\chi} (f_r - f_f) - \frac{1}{\epsilon} \rho u \end{cases} \quad (9)$$

شرط مرزی برگشت پذیر که دارای دقت مناسبی است برای دیواره‌ها در نظر گرفته شده است [۲۰].

$$\begin{cases} f_\delta = f_v \\ f_r = f_r \\ f_\lambda = f_f \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_v = f_\delta \\ f_r = f_r \\ f_f = f_\lambda \end{cases} \quad (11)$$

شرط مرزی برای مانع مسئله با استفاده از مطالعات قبلی [۲۰-۲۳] که برای خطوط منحنی است در نظر گرفته شده است. در این حالت فاصله‌ی بی بعد شده بین نقاط سیال و مرز جامد با  $\Delta$  معرفی شده است:



شکل ۱- شرط مرزی دیواره منحنی شکل مانع

خطوط جریان را ندارند و امکان انحراف آنها از خط جریان و برخورد آنها با موانع و دیواره وجود دارد.

۴-۲-۲- رسوب گرانشی

این رسوب همان‌طور که مشخص است در اثر نیروی وزن ذرات به وجود می‌آید. به دلیل تأثیرگذاری عامل وزن بر رسوب گرانشی اندازه‌ی ذرات عامل تأثیر گذار بر مکانیزم رسوب گرانشی است.

۴-۲-۳- 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.

۴-۲-۴- رسوب مماسی

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

سرعت سیال،  $u_p$  سرعت ذرات سیال،  $\rho$  و  $\nu$  نشان‌دهنده چگالی و گرانیوی و  $\tau$  بیان کننده زمان آسایش هستند.

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

$$(20)$$

$$C_c = \begin{cases} 1 + 2/52 \frac{\lambda}{d} & d \geq 0.1 \mu m \\ 1 + \frac{\lambda}{d} \left[ 2/4 + 1/0.5 \exp\left(-0.39 \frac{d}{\lambda}\right) \right] & d < 0.1 \mu m \end{cases}$$

$d$  قطر ذره،  $\lambda$  مسیر آزاد متوسط مولکول گاز و  $C_c$  ضریب تصحیح استوکس کانینگهام هستند [۱ و ۲۶]. شبیه‌سازی نیروی براونی به وسیله فرایند احتمالی اختلال گوسی انجام می‌شود که توضیحات دقیق آن در مطالعات احمدی [۲۷ و ۲۸] آمده است. با توجه به نیروهای وارد شده و سایر عوامل محیطی، رسوب ذرات بر طبق چهار مکانیزم اینرسیال، گرانشی، براونی و مماسی انجام می‌شود.

۴-۲-۴- مکانیزم‌های رسوب

۴-۲-۱- رسوب اینرسیال

رسوب اینرسیال یا برخوردی اغلب برای ذرات با لختی زیاد اتفاق می‌افتد. این مکانیزم زمانی که در خطوط جریان تغییر جهت زیاد و ناگهانی اتفاق بیفتد خود را در ذرات بزرگ‌تر نشان می‌دهد. بدین صورت که ذرات به علت لختی زیاد توانایی دنبال کردن

### ۳- پارامترهای شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های مورد نظر برای اعداد رینولدز ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ انجام شده است. سیال هوا به عنوان سیال در نظر گرفته شده است و مشخصات استاندارد برای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. در اعداد رینولدز در نظر گرفته شده قطر عمودی لوزی به عنوان طول مشخصه به خاطر تأثیرگذاری بر مساحت مانع و سرعت ورودی به عنوان سرعت مشخصه در نظر گرفته شده است. در هر عدد رینولدز هشت نسبت مختلف از قطرهای لوزی مورد مطالعه قرار گرفته است که به عنوان ضریب شکل با F نشان داده شده است. برای هر کدام از ضریب شکل‌ها تعداد ۱۰۰ ذره در ورودی کانال رها شده است. به دلیل بالا بودن مقدار و عکس‌های اطلاعات به دست آمده نتایج به صورت خلاصه و بر طبق توضیحات داده شده آورده شده‌اند. در ضمن تمامی نتایج به صورت جدول در جدول ۱ آورده شده است.

### ۴- صحت‌سنجی شبیه‌سازی و اعتبار‌سنجی مسئله

این بخش به دنبال تأیید مناسب بودن روش حل مسئله، سپس تطابق نتایج به دست آمده با مطالعات قبلی است. به همین منظور مرحله‌ی اول برای مستقل بودن مسئله از تعداد شبکه در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن استقلال از تعداد شبکه چهار ترکیب شبکه متفاوت ۱۴۰×۷۰، ۱۶۰×۸۰، ۲۲۰×۱۱۰ و ۲۴۰×۱۲۰ استفاده شده و نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. در شکل‌های مورد نظر اندیس‌های d, c, b, a به ترتیب از شبکه‌های پایین به سمت بالا هستند. برای مقایسه‌ی نتایج به دست آمده شبیه‌سازی مسئله برای حالت عبور ذرات در مانع با ضریب شکل ۰/۴۴ و عدد رینولدز ۱۰۰ در چهار شبکه متفاوت که در بالا به آن‌ها اشاره شد انجام شده است. در ابتدا وضعیت جریان سیال و رسوب ذرات برای حالت اصلی مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود هر چهار شبکه جدید نیز شبیه‌سازی جریان را مانند شبکه اصلی

است انجام داده‌اند. در شکل ۳ که رسوب ذرات را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که نتایج همه منطبق بر هم و تعداد ذرات رسوب کرده نیز منطبق بر تعداد مشاهده شده در جدول است. در حل مسئله و شبیه‌سازی در نظر گرفته شده دو عامل دیگر شامل خطای حل مسئله Er و معیار همگرایی CC برای تأیید محاسبات در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی برای محاسبات مورد نظر به صورت تابعی از توابع توزیع در جهات مختلف و روی همه گره‌های دامنه حل مسئله تعریف شده است که در معادله زیر قابل مشاهده است:

(۲۱)

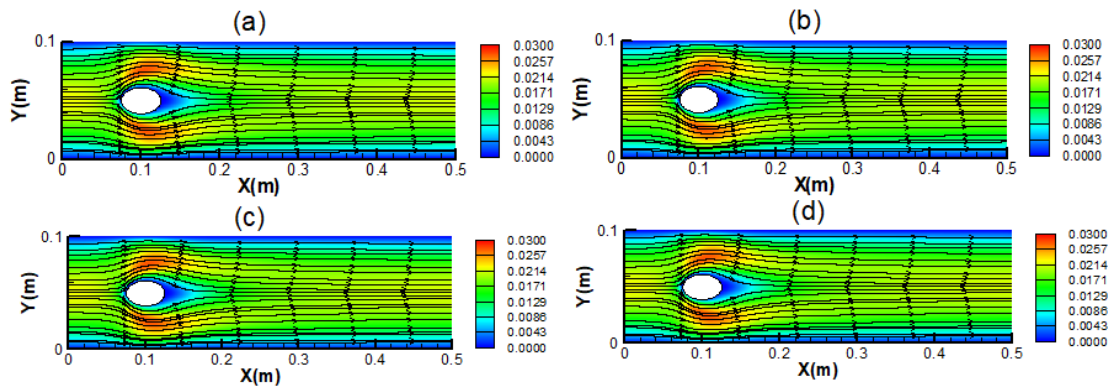
$$CC = \left| \frac{\sum_{i=1}^{n^r} \sum_{\alpha=1}^{\Lambda} f_{\alpha}(x_i, t) - \sum_{i=1}^{n^r} \sum_{\alpha=1}^{\Lambda} f_{\alpha}(x_i, t - \delta t)}{\sum_{i=1}^{n^r} \sum_{\alpha=1}^{\Lambda} f_{\alpha}(x_i, t - \delta t)} \right|$$

طبق پیش‌بینی‌ها برای هر دو معیار در نظر گرفته شده برای تمامی شبکه‌های در نظر گرفته شده دارای روندی مشابه با هم هستند و تأییدی بر صحت روش حل مسئله است.

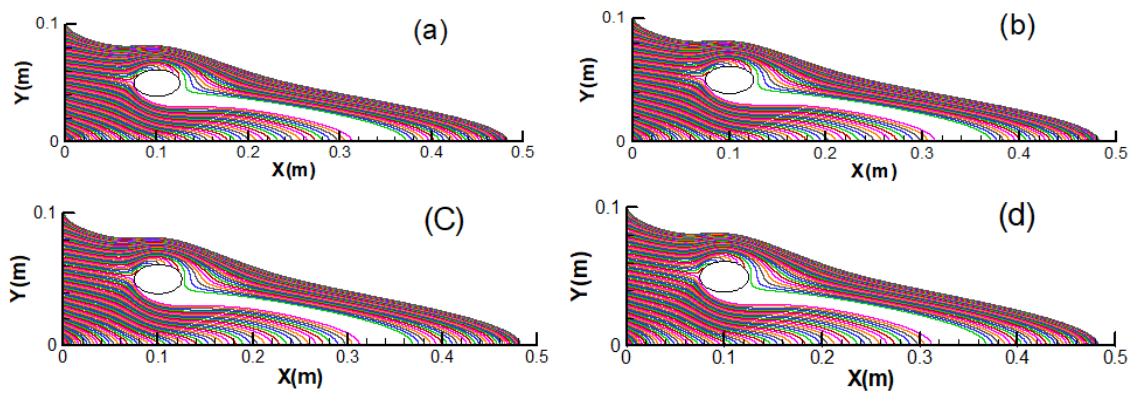
با توجه به نتایج به دست آمده میدان اندازه سرعت و خطوط جریان به‌ازای اعداد رینولدز و ضریب شکل‌های مختلف جریان سیال برای اعداد رینولدز بالای ۲۰۰ دارای گردابه‌هایی نامتقارن در پایین دست مانع است. این نتایج نشان از تطابق آن‌ها با مطالعات تریتون دارد که تقریباً برای عدد رینولدز ۲۰۰ و بالاتر در پایین دست جریان گردابه‌ها شروع به شکل گرفتن می‌کنند [۲۹] تأیید این نتیجه را می‌توان در مطالعات براندون و آگراوال [۹] و تهرانی [۳۰] نیز مشاهده کرد. در اعداد رینولدز پایین‌تر این گردابه‌ها مشاهده نمی‌شوند که با شکل‌های ۴ و ۵ که از مطالعات براندون و همین‌طور سلمانزاده هستند تطابق دارد. برای نشان دادن تطابق میدان سرعت و خطوط جریان ذکر شده شبیه‌سازی عبور جریان در شکل ۶ مطابق مطالعات آگراوال و براندون برای مانع مربع شکل انجام داده شده است که نشان از تطابق مناسب روش حل مسئله با مطالعات ذکر شده دارد.

با توجه به اطلاعات به دست آمده از جدول ۱ مشخص می‌شود که افزایش طول مانع در جهت عمود بر

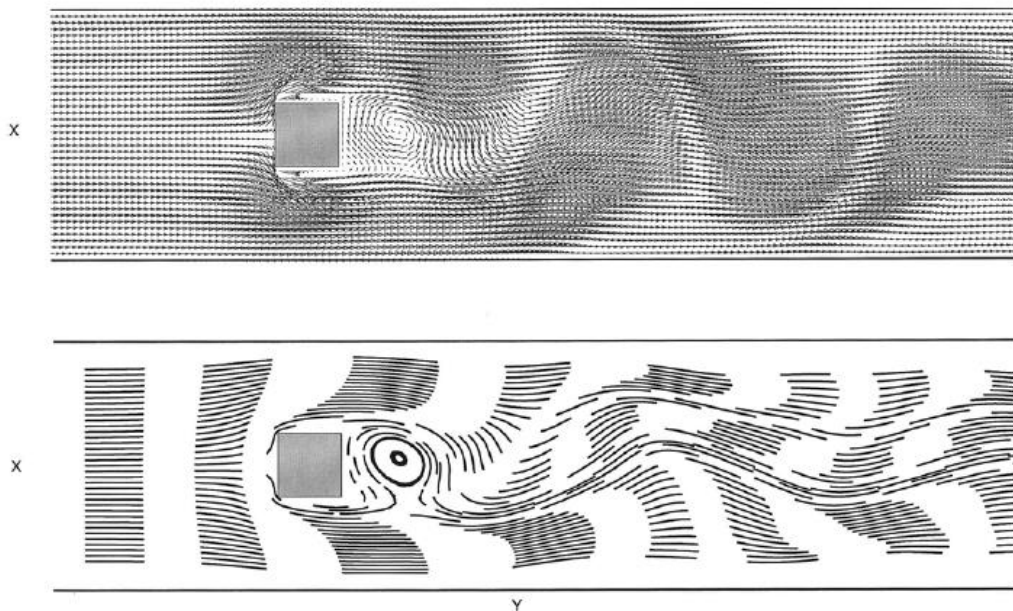




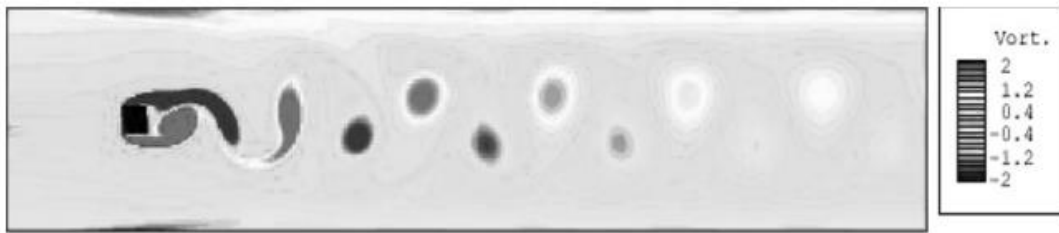
شکل ۲- میدان سرعت و خطوط جریان برای چهار شبکه متفاوت از شبکه اصلی



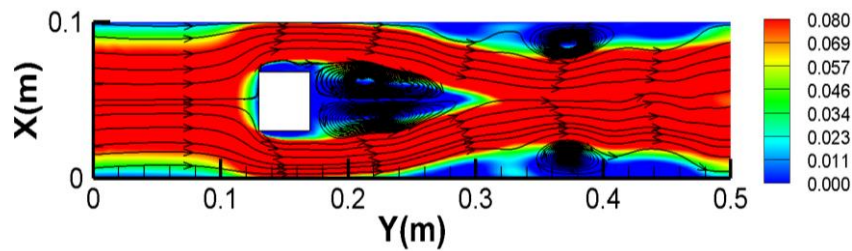
شکل ۳- خطوط مسیر ذرات برای چهار شبکه متفاوت از شبکه اصلی



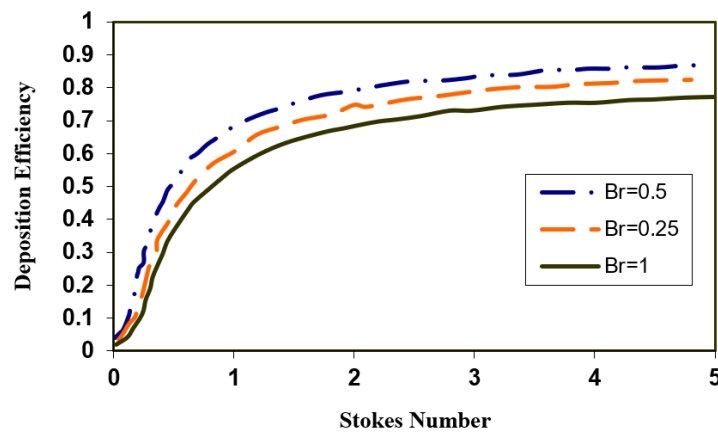
شکل ۴- میدان سرعت و خطوط جریان، ایجاد گردابه‌های نامتقارن در پایین دست مانع در عدد رینولدز ۱۰۰۰ [۹]



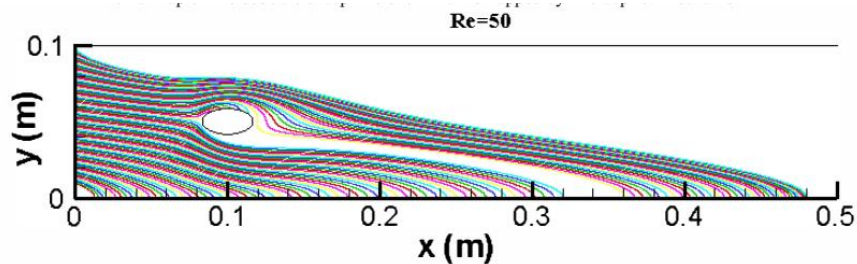
شکل ۵- ایجاد گردابه‌های لحظه‌ای در میدان گردابی تشکیل شده در پشت مانع در عدد رینولدز ۲۰۰ [۳۱]



شکل ۶- میدان سرعت و خطوط جریان، ایجاد گردابه‌های نامتقارن در پایین دست مانع در عدد رینولدز ۱۰۰۰



شکل ۷- تغییر راندمان رسوب ذرات با عدد استوکس برای نسبت سطح‌های اشغال شده متفاوت [۳۱]



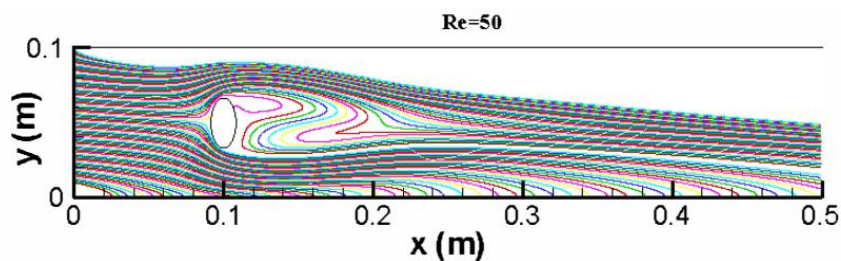
شکل ۸- درصد رسوب ذرات برای مانع در عدد رینولدز ۵۰ و نسبت اقطار ۰/۵ برای ۱۰۰ ذره ۱۰ میکرونی ۶ درصد است [۳۰].

دارد که این نتایج منطبق بر مطالعات سلمانزاده و همکاران [۳۱] در شکل ۷ و مطالعه تهرانی [۳۰] در شکل‌های ۸ و ۹ است.

جریان تأثیر چندانی بر روی رسوب ذرات ندارد در صورتی که تغییر سطح در جهت جریان تأثیر فراوانی بر روی رسوب ذرات

جدول ۱- اثر تغییر ضریب شکل و عدد رینولدز بر تعداد ذرات رسوب کرده بر مانع، دیواره و خروجی از کانال

عدد رینولدز					وضعیت ذرات	مقدار ضریب شکل (F)	وضعیت مانع
۸۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰			
۷۴	۶۱	۴۳	۰	۰	خروج		افقی
۲	۳	۵	۱۱	۳۳	رسوب بر مانع	۰/۲۰	
۲۴	۳۶	۵۲	۸۹	۶۷	رسوب بر دیوار		
۷۴	۶۲	۴۳	۰	۰	خروج		
۲	۲	۵	۹	۳۲	رسوب بر مانع	۰/۲۵	
۲۴	۳۶	۵۲	۹۱	۶۸	رسوب بر دیوار		
۷۸	۶۴	۴۵	۰	۰	خروج		
۱	۱	۳	۷	۲۹	رسوب بر مانع	۰/۴۴	
۲۱	۳۵	۵۲	۹۳	۷۱	رسوب بر دیوار		
۷۵	۶۸	۴۶	۰	۰	خروج		
۱	۱	۳	۵	۲۳	رسوب بر مانع	۰/۷۰	
۲۴	۳۱	۵۱	۹۵	۷۷	رسوب بر دیوار		
۷۳	۶۸	۵۳	۰	۰	خروج		عمودی
۱	۱	۱	۴	۱۳	رسوب بر مانع	۱/۴۴	
۲۳	۲۸	۴۶	۹۶	۸۷	رسوب بر دیوار		
۷۲	۶۳	۵۳	۰	۰	خروج		
۱	۱	۱	۳	۱۱	رسوب بر مانع	۲/۲۵	
۲۳	۳۰	۴۶	۹۷	۸۹	رسوب بر دیوار		
۷۰	۶۲	۴۷	۰	۰	خروج		
۱	۲	۱	۲	۸	رسوب بر مانع	۴	
۲۵	۳۱	۴۹	۹۸	۹۳	رسوب بر دیوار		
۷۰	۶۲	۴۳	۰	۰	خروج		
۱	۱	۲	۳	۸	رسوب بر مانع	۴/۸۴	
۲۵	۳۳	۵۳	۹۷	۹۲	رسوب بر دیوار		



شکل ۹- درصد رسوب ذرات برای مانع در عدد رینولدز ۵۰ و نسبت افطار ۲ برای ۱۰۰ ذره ی ۱۰ میکرونی ۲ درصد است [۳۰].

در نتیجه با وجود عدد رینولدز بزرگ، گردابه‌های تشکیل شده در پایین دست جریان پایا هستند. پایا بودن گردابه‌های تشکیل شده به دلیل همسویی زیاد هندسه مانع با خطوط جریان است. در بیضی‌های افقی فقط زمانی گردابه‌ها تشکیل شده و جریان به صورت ناپایا می‌شود که مسئله دارای بیشترین ضریب شکل در حالت افقی و بیشترین عدد رینولدز باشد (شکل ۱۱).

برای بیضی‌های عمودی در اعداد رینولدز پایین روند پایا بودن خطوط جریان ادامه دارد (شکل ۱۲). اما به تدریج به دلیل بالا بودن ضریب شکل تقریباً در عدد رینولدز ۲۰۰ گردابه‌ها در پایین دست مانع تشکیل می‌شوند (شکل ۱۳). با بالا رفتن عدد رینولدز با توجه به ضریب شکل مانع امکان افزایش تولید گردابه‌ها و ناپایا شدن جریان افزایش می‌یابد. این گردابه‌های ناپایای به وجود آمده هم می‌توانند از اختلال نسبتاً زیاد ناشی از مانع به دلیل سطح انسداد زیاد مانع (شکل ۱۴) و هم افزایش عدد رینولدز به وجود آیند (شکل ۱۵). در واقع در ضریب شکل‌های بالا، انسداد زیاد مانع باعث انحراف بیش از حد خطوط جریان و ایجاد اختلال و گردابه‌ها در جریان می‌شود. همین‌طور برای اعداد رینولدز بالا حتی در ضریب شکل‌های متوسط و پایین به دلیل افزایش سرعت جریان امکان افزایش ایجاد گردابه‌ها افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۱۶ تا ۲۰ نتایج تصویر شده از رهگیری ذرات هستند که طبق آن می‌توان ذرات را رهگیری کرده و نشست و انتقال آن‌ها را شناسایی کرد. مجموع تمام اجراها برای تمامی اعداد رینولدز و ضریب شکل‌ها برای ذره‌ی ۱۰ میکرومتری در جدول ۱ آمده است.

برای تفسیر دلیل رسوب ذرات، دو متغیر اصلی یعنی عدد رینولدز و ضریب شکل باید در نظر گرفته شوند. همچنین برای تفسیر تأثیر مکانیزم‌های رسوب باید به اندازه ذرات نیز توجه شود. برای جدول ۱ با توجه به اندازه ذرات ۱۰ میکرومتری در تمام موانع فارغ از اندازه ضریب شکل برای متغیر عدد رینولدز همواره با افزایش عدد رینولدز تعداد ذرات رسوب کرده کاهش و ذرات خروجی افزایش می‌یابند (جدول ۱).

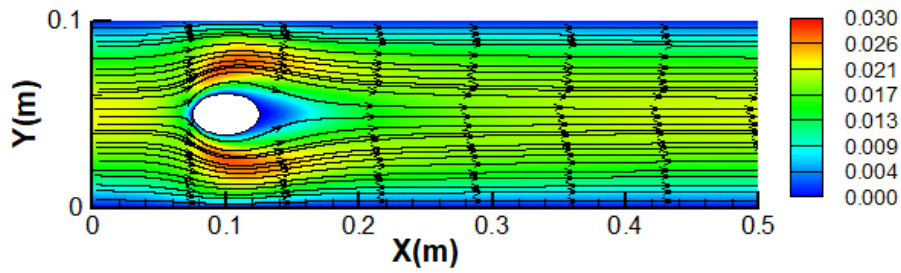
با توجه به جدول ۱ در اعداد رینولدز پایین بسیاری از ذرات قبل از مانع رسوب می‌کنند و نیروی گرانش تأثیر زیادی بر روی رسوب ذرات قبل از مانع دارد یعنی در این منطقه رسوب گرانشی یکی از مکانیزم‌های غالب است. این نتایج را می‌توان در مطالعات سلمانزاده و همکاران [۳۱] و جعفری و همکاران [۱۲] مشاهده کرد. پس می‌توان بیان کرد که تأثیر نیروی گرانش بر روی رسوب ذرات تحت تأثیر عدد رینولدز است، که در مطالعات تهرانی [۳۰] نیز قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، جدول ۱ نشان می‌دهد برای ضریب شکل‌های بالا (مانع عمودی) یکی از مکانیزم‌های غالب رسوب مکانیزم برخوردی است که با افزایش ضریب شکل تأثیر مکانیزم برخوردی افزایش یافته (که باعث کاهش سهم مکانیزم گرانشی در رسوب ذرات بر روی مانع می‌شود) و تعداد ذرات رسوب کرده بر روی مانع نیز کاهش یافته است. این نتایج در تطابق با مطالعات سلمانزاده و همکاران [۳۱] و همچنین تهرانی [۳۰] است.

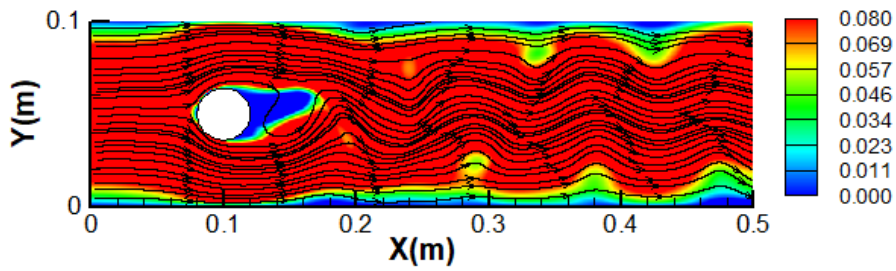
## ۵- نتایج

شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ نشان‌دهنده میدان اندازه سرعت و خطوط جریان را به‌زای اعداد رینولدز و ضریب شکل‌های مختلف نشان می‌دهند. توجه شود که سرعت در نظر گرفته شده در این اشکال در دو بازه در نظر گرفته شده است که دلیل آن تشخیص تفاوت بین تغییرات خطوط جریان در سرعت‌ها و موانع مختلف و همین‌طور ساده شدن توضیحات مربوط به اشکال است. در صورتی که بازه‌ی تغییر سرعت برای تمام اشکال را برابر قرار دهیم به دلیل شباهت به وجود آمده امکان تفسیر یک‌سری از حالات از بین می‌رود. با توجه به مطالعات تریتون تقریباً برای عدد رینولدز ۲۰۰ و بالاتر در پایین دست جریان گردابه‌ها شروع به شکل گرفتن می‌کنند [۲۹].

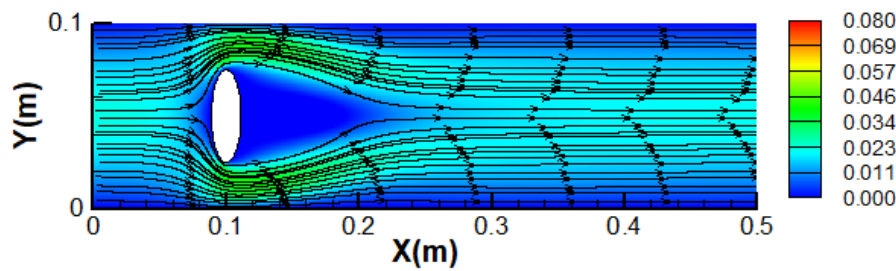
برای بیضی‌های افقی که در واقع دارای ضریب شکل پایین‌تری هستند، مانع تعداد کمتری از خطوط جریان را قطع می‌کند و آشفتگی کمتری در جریان ایجاد می‌کند (شکل ۱۰).



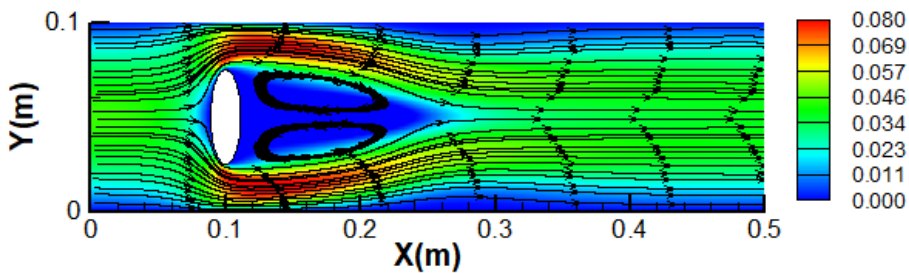
شکل ۱۰- میدان سرعت و خطوط جریان در  $F=0.44$  و  $Re=100$



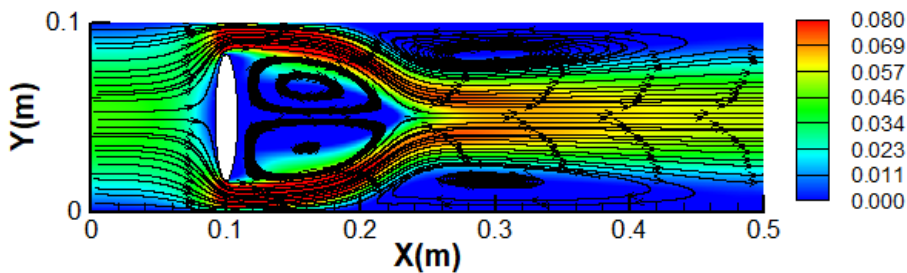
شکل ۱۱- میدان سرعت و خطوط جریان در  $F=0.7$  و  $Re=800$



شکل ۱۲- میدان سرعت و خطوط جریان در  $F=2/25$  و  $Re=100$

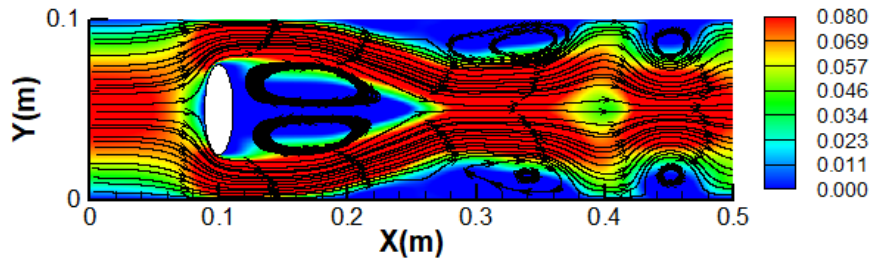


شکل ۱۳- میدان سرعت و خطوط جریان در  $F=2/25$  و  $Re=200$

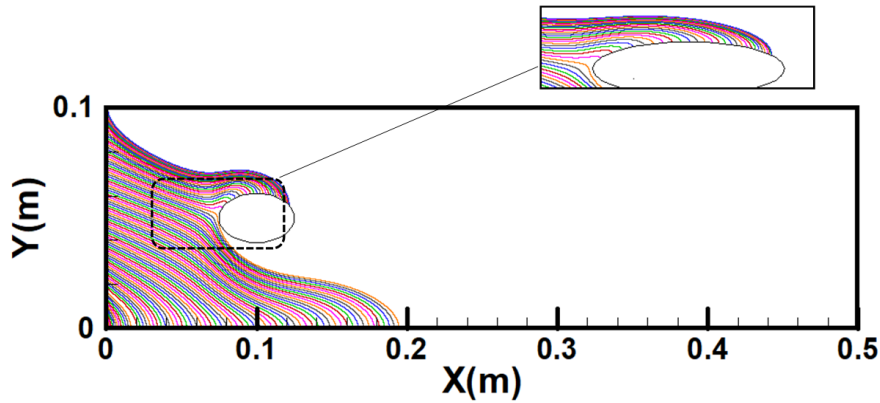


شکل ۱۴- میدان سرعت و خطوط جریان در  $F=4$  و  $Re=200$

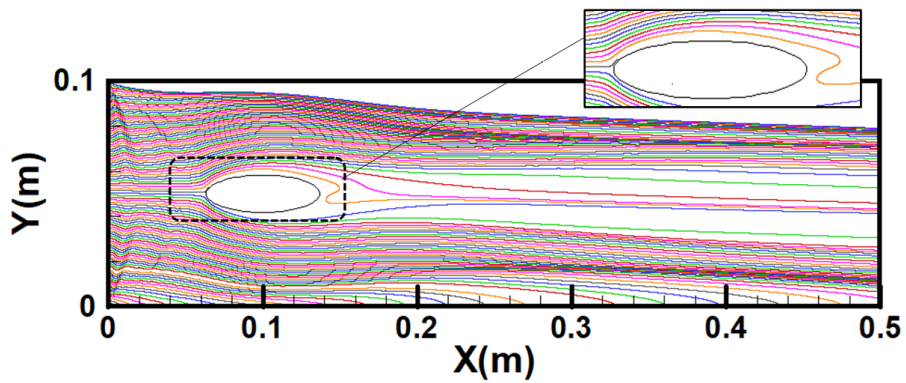




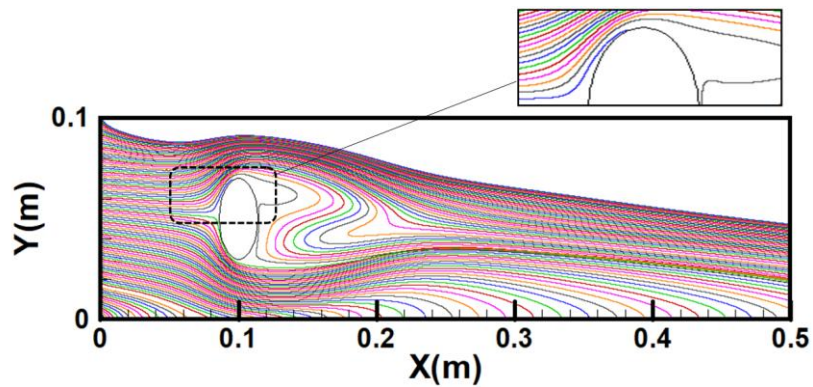
شکل ۱۵- میدان سرعت و خطوط جریان در  $Re=400$  و  $F=2/25$



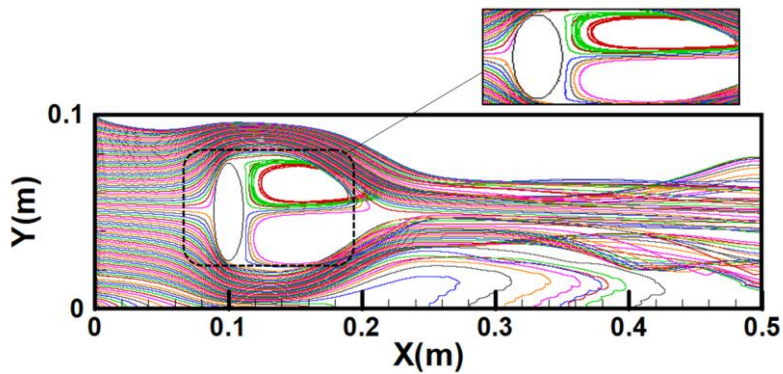
شکل ۱۶- خطوط مسیر ذرات برای ۱۰۰ ذره ۱۰ میکرومتری در  $Re=50$  و  $F=0/44$



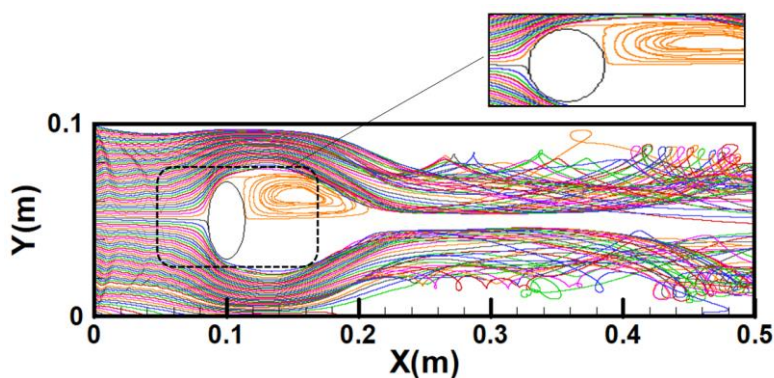
شکل ۱۷- خطوط مسیر ذرات برای ۱۰۰ ذره ۱۰ میکرومتری در  $Re=800$  و  $F=0/2$



شکل ۱۸- خطوط مسیر ذرات برای ۱۰۰ ذره ۱۰ میکرومتری در  $Re=200$  و  $F=1/44$



شکل ۱۹- خطوط مسیر ذرات برای ۱۰۰ ذره‌ی ۱۰ میکرومتری در  $Re=400$  و  $F=2/25$



شکل ۲۰- خطوط مسیر ذرات برای ۱۰۰ ذره‌ی ۱۰ میکرومتری در  $Re=800$  و  $F=1/44$

ذرات رسوب شده رسوب شده رسوب شده روی مانع و سطح کانال هستند. اگر هرکدام از موانع را به صورت جداگانه تفسیر گردد، مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز تعداد ذرات رسوب کرده کاهش می‌یابد. با توجه به اندازه ذرات به نظر می‌رسد که دو مکانیزم رسوب گرانشی و اینرسی مکانیزم‌های غالب برای رسوب ذرات باشند. در واقع در اعداد رینولدز پایین به دلیل سرعت پایین، گرانش تأثیر غالب را بر ذرات دارد. به عبارت دیگر برای سرعت‌های پایین ذرات معلق به دلیل داشتن زمان بیشتر تحت تأثیر گرانش قرار می‌گیرند و رسوب گرانشی مکانیزم غالب است (جدول ۱، شکل ۱۶). با افزایش سرعت مشاهده می‌شود که تأثیر گرانش کاهش می‌یابد و تعداد ذرات رسوب کرده بر روی مانع کاهش می‌یابد (شکل ۱۷).

ذرات رسوب اینرسیال که ناشی از تغییر مسیر ناگهانی خطوط جریان است برای حالتی که ضریب شکل بالا است تأثیر مکانیزم رسوب اینرسیال افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش سطح مقطع و انحراف بیشتر خطوط جریان است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). با توجه به جدول ۱ تغییرات ذرات رسوب شده برای عدد رینولدز ۱۰۰ با افزایش ضریب شکل نشان از افزایش رسوب ذرات بر روی دیواره پایینی کانال در مقایسه با ذرات رسوب شده بر روی مانع دارد. در این حالت افزایش سطح انسداد مانع، باعث افزایش تأثیر مکانیزم رسوب اینرسیال می‌شود که این مکانیزم باعث تغییر مسیر ذرات شده و به جای رسوب بر روی مانع ذرات بر روی سطح پایینی کانال رسوب می‌کنند. البته باید به این نکته توجه کرد که تأثیر مکانیزم رسوب گرانشی برای رسوب کلی ذرات نسبت به رسوب اینرسیال بیشتر است و تأثیر رسوب اینرسیال بیشتر در تغییر رسوب از روی مانع به رسوب

ذرات رسوب شده رسوب شده رسوب شده روی مانع و سطح کانال هستند. اگر هرکدام از موانع را به صورت جداگانه تفسیر گردد، مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز تعداد ذرات رسوب کرده کاهش می‌یابد. با توجه به اندازه ذرات به نظر می‌رسد که دو مکانیزم رسوب گرانشی و اینرسی مکانیزم‌های غالب برای رسوب ذرات باشند. در واقع در اعداد رینولدز پایین به دلیل سرعت پایین، گرانش تأثیر غالب را بر ذرات دارد. به عبارت دیگر برای سرعت‌های پایین ذرات معلق به دلیل داشتن زمان بیشتر تحت تأثیر گرانش قرار می‌گیرند و رسوب گرانشی مکانیزم غالب است (جدول ۱، شکل ۱۶). با افزایش سرعت مشاهده می‌شود که تأثیر گرانش کاهش می‌یابد و تعداد ذرات رسوب کرده بر روی مانع کاهش می‌یابد (شکل ۱۷).

با افزایش عدد رینولدز به دلیل ماهیت ذکر شده در تعریف

بر روی دیواره است. با توجه به همین نکته در اعداد رینولدز پایین مانند عدد رینولدز ۵۰ به دلیل بیشتر بودن سهم رسوب گرانشی نسبت به اینرسال سهم رسوب روی مانع بیشتر از اعداد رینولدز بالاتر است که دلیل آن همان داشتن زمان زیاد ذرات برای طی کردن مسیر است (شکل ۱۶). این نتایج در واقع مقایسه‌ی بین مانع افقی و عمودی نیز است چون با تغییر ضریب شکل مانع از حالت افقی به عمودی تغییر می‌کند. پس می‌توان گفت در مانع افقی به دلیل افزایش سطح مانع در جهت جریان و بالا بودن تأثیر نیروی گرانش تعداد ذرات رسوب کرده روی مانع بیشتر است. و در مانع عمودی به دلیل افزایش سطح عمود بر جریان سهم مکانیزم برخوردی افزایش می‌یابد.

در اعداد رینولدز بالا فارغ از ضریب شکل مانع تعداد ذرات رسوب شده تفاوت چندانی ندارند. این وضعیت حکایت از این دارد که مکانیزم‌های رسوب اینرسال در سرعت‌های بالا تأثیر چندانی بر رسوب ذرات ندارد. همچنین این افزایش سرعت باعث کاهش تأثیر نیروی گرانش شده و بسیاری از ذرات همراه با خطوط جریان از کانال خارج می‌شوند. پس در اعداد رینولدز بالا سهم مکانیزم گرانشی در رسوب ذرات ۱۰ میکرومتری کاهش و سهم رسوب اینرسال تقریباً از بین می‌رود (شکل ۲۰).

گفتنی است که در اعداد رینولدز بالا و به‌خصوص برای ضریب شکل‌های بالا گردابه‌هایی در پشت مانع به‌وجود می‌آید که این گردابه باعث گیر افتادن یک سری از ذرات در آن می‌شود. این ذرات به‌دلیل جریان به‌وجود آمده در پشت مانع و خطوط جریان گردابه‌ای نه بر روی مانع و سطح پایینی رسوب می‌کنند و نه از کانال عبور می‌کنند بلکه همواره در گردابه‌ی به‌وجود آمده گیر می‌کنند (شکل ۱۹).

همانطور که مشاهده شد در ذرات ۱۰ میکرونی دو مکانیزم گرانشی و اینرسال غالب هستند اما برای ذرات ریزتر (۱ میکرومتر و ۱۰ نانومتر) مشاهده می‌شود که فارغ از مقدار عدد رینولدز و ضریب شکل تمام ذرات از کانال عبور می‌کنند (شکل‌های ۲۱ و ۲۲) و دو مکانیزم فوق توان تفسیر آنها را ندارند. برای ذرات ریز باید از دو مکانیزم رسوب مماسی و

براونی استفاده کرد.

برای ذرات یک میکرومتری یا ۱۰۰ نانومتری گاهی رسوب محدودی از ذرات روی مانع مشاهده می‌شود که به دلیل غالب شدن مکانیزم رسوب مماسی است. این مکانیزم به‌خاطر عبور ذرات از نزدیکی مانع غالب می‌شود.

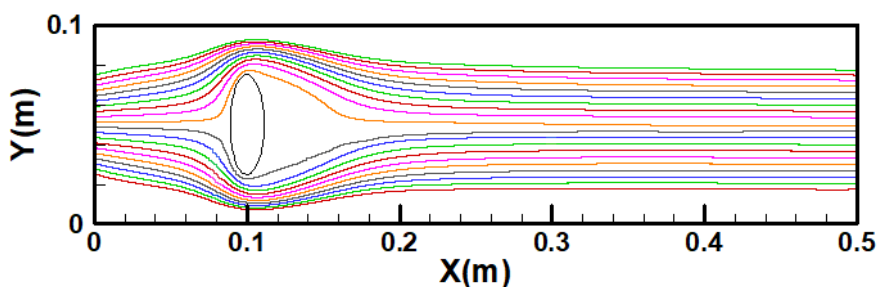
با افزایش ضریب شکل در ذرات ریز باز هم ذرات با پیگیری خطوط جریان از کانال خارج می‌شوند. اما در اعداد رینولدز بالا و در ضریب شکل‌های بالا ذرات تحت تأثیر گردابه‌های پشت مانع قرار می‌گیرند. این گردابه‌ها ممکن است باعث به تله افتادن ذرات در پشت مانع شوند. در این گردابه‌ها ذرات تحت تأثیر نیروی براونی قرار گرفته و از مسیر خارج می‌شوند (شکل ۲۳).

## ۶- نتیجه‌گیری

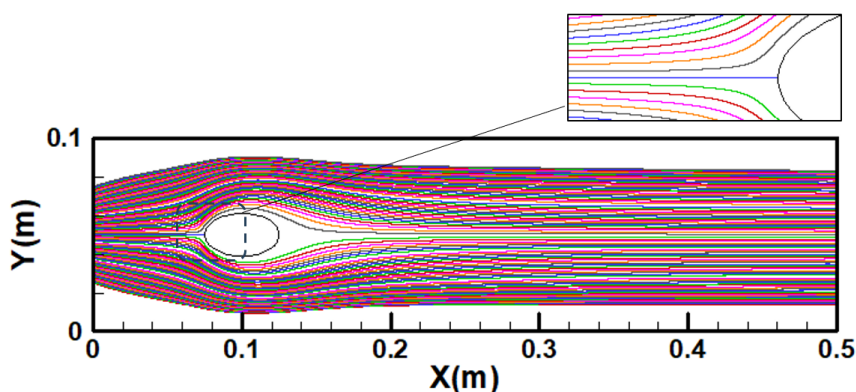
شبیه‌سازی جریان سیال به‌وسیله روش شبکه بولتزمن به‌همراه مسیریابی لاگرانژی ذرات انجام شده است. در این پژوهش تغییرات زیادی بر روی ضریب شکل مانع انجام شده است. همانطور که ذکر شده است این تغییرات با حفظ مساحت اشغال شده مانع اما با توجه به تغییرات زیاد سطح عمود و موازی جریان در نظر گرفته شده است و با توجه به این روش‌ها نتایج به‌دست آمده را بدین صورت می‌توان ذکر کرد:

روند کلی رسوب ذرات بر روی دیواره‌ها و موانع تحت تأثیر عدد رینولدز است. با افزایش عدد رینولدز به‌دلیل افزایش سهم ذرات خروجی از کانال سهم تعداد ذرات رسوب کرده بر روی سطوح و مانع کاهش می‌یابد. این کاهش به‌دلیل افزایش سرعت ذرات منطقی است. به‌صورت کلی در این حالات ذرات عمدتاً تحت تأثیر جاذبه بوده و مکانیزم‌های گرانش و اینرسیال مکانیزم‌های غالب رسوب هستند. با بررسی تغییر ضریب شکل برای دو حالت مانع افقی و عمودی مشاهده می‌شود که در اعداد رینولدز پایین با افزایش ضریب شکل، مقدار رسوب روی مانع روندی کاهشی دارد که این روند در اعداد رینولدز بالا تقریباً ثابت است. در موانع افقی به دلیل بالا بودن سطح موازی با جریان، تعداد ذرات رسوب کرده روی موانع بیشتر

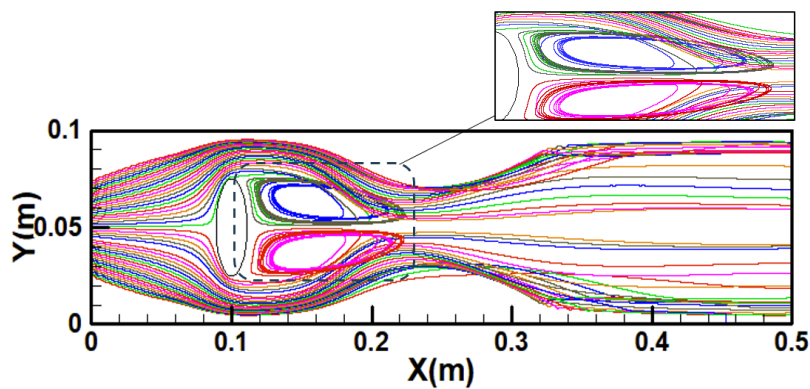




شکل ۲۱- خطوط مسیر ذرات برای ۲۰ ذره‌ی ۱۰۰ نانومتری در  $Re=50$  و  $F=2/25$



شکل ۲۲- خطوط مسیر ذرات برای ۱۰۰ ذره‌ی ۱ میکرومتری در  $Re=100$  و  $F=2/44$



شکل ۲۳- خطوط مسیر ذرات برای ۵۰ ذره‌ی ۱ میکرومتری در  $Re=200$  و  $F=2/25$

دست می‌رود.

برای ذرات ریز تأثیر دو مکانیزم گرانشی و اینرسیال ناچیز است. برای این ذرات در نواحی نزدیک به مانع رسوب مماسی و برای گردابه‌های ایجاد شده در پشت مانع عمودی مکانیزم رسوب براونی تأثیرگذار هستند.

هستند که ناشی از تأثیر نیروی گرانشی است. با توجه به غالب بودن دو مکانیزم گرانشی و اینرسیال در ضریب شکل‌های بالا به دلیل کاهش سطح موازی با جریان؛ افزایش تأثیر مکانیزم اینرسیال و کاهش تأثیر مکانیزم گرانشی؛ کاهش ذرات رسوب را به همراه دارد. اما در رینولدزهای بالا تأثیر مکانیزم گرانشی به شدت کاهش می‌یابد و تأثیر مکانیزم اینرسیال بر ذرات نیز از

## مراجع

- Hinds, W. C., and Zhu, Y., "Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles", 2<sup>nd</sup> ed., 483, John Wiley & Sons, 1999.
- Wing, E. J., and Schiffman, F. J., "Cecil Essentials of Medicine E-Book", 10<sup>th</sup> ed., Elsevier Health Sciences, 2021.
- Ma, X., Zhang, T., Ji, C., Zhai, Y., Shen, X. and Hong, J., "Threats to Human Health and Ecosystem: Looking for Air-Pollution Related Damage since 1990", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 145, p. 111146, 2021.
- Wang, Y., Hu, H., Wang, X., Liu, H., Dong, L., Luo, G., Zhao, Y. and Yao, H., "A Critical Review on Lead Migration, Transformation and Emission Control in Chinese Coal-Fired Power Plants", *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 124, pp. 397-413, 2023.
- Li, C. and Tang, H., "Comparison of COVID-19 Infection Risks Through Aerosol Transmission in Supermarkets and Small Shops", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 76, pp. 103424, 2022.
- Shinde, P. P., Desai, V. P., Katkar, S. V., Oza, K. S., Kamat, R. K. and Thakar, C. M., "Big Data Analytics for Mask Prominence in COVID Pandemic", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 51, pp. 2471-2475, 2022.
- Mao, N., An, C. K., Guo, L. Y., Wang, M., Guo, L., Guo, S. R. and Long, E. S., "Transmission Risk of Infectious Droplets in Physical Spreading Process at Different Times: A Review", *Building and Environment*, Vol. 185, pp. 107307, 2020.
- May, K. R., and Clifford, R., "The Impaction of Aerosol Particles on Cylinders, Spheres, Ribbons and Discs", *The Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 10, pp. 83-95, 1967.
- Brandon, D. J., and Aggarwal, S. K., "A Numerical Investigation of Particle Deposition on A Square Cylinder Placed in A Channel Flow", *Aerosol Science Technology*, Vol. 34, pp. 340-352, 2001.
- Wang, J., and Pui, D.Y.H., "Filtration of Aerosol Particles by Elliptical Fibers: A Numerical Study", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 11, pp. 185-196, 2009.
- Przekop, R., and Gradoń, L., "Deposition and Filtration of Nanoparticles in the Composites of Nano-and Microsized Fibers", *Aerosol Science Technology*, Vol. 42, pp. 483-493, 2008.
- Jafari, S., Salmanzadeh, M., Rahnema, M., and Ahmadi, G., "Investigation of Particle Dispersion and Deposition in A Channel with A Square Cylinder Obstruction Using the Lattice Boltzmann Method", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 41, pp. 198-206, 2010.
- Hosseini, S. A., and Vahedi Tafreshi, H., "On The Importance of Fiber's Cross-Sectional Shape for Air Filters Operating in The Slip Flow Regime", *Powder Technology*, Vol. 212, pp. 425-431, 2011.
- Himika, T. A., Hasan, M. F., and Molla, M. M., "Lattice Boltzmann Simulation of Air flow and Mixed Convection in a General Ward of Hospital", *International Journal of Computational Engineering Science*, pp. 1-15, 2016.
- Guo, Z., Zheng, C., and Shi, B., "An Extrapolation Method for Boundary Conditions in Lattice Boltzmann Method", *Physics of Fluids*, Vol. 14, pp. 2007-2010, 2002.
- Chen, S., and Doolen, G. D., "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 329-364, 1998.
- Succi, S., "The Lattice Boltzmann Equation: For Fluid Dynamics and Beyond", 1<sup>st</sup> ed., Vol. 281, Oxford University Press, 2001.
- Gabbanelli, S., Drazer, G., and Koplik, J., "Lattice Boltzmann Method for Non-Newtonian (Power-Law)", *Physical Review Fluids*, Vol. 72, p. 04312, 2005.
- Nejat, A., Abdollahi, V., and Vahidkhah, K., "Lattice Boltzmann Simulation of Non-Newtonian Flows Past Confined Cylinders", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 166, pp. 689-697, 2011.
- Zhou, Y., Zhang, R., Staroselsky, I., Chen, H., Kim, W. T., and Jhon, M. S., "Simulation of Micro-and Nano-Scale Flows Via the Lattice Boltzmann Method", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Application*, Vol. 362, pp. 68-77, 2006.
- Bajalan, S., Kouhi Kamali, R., and Rahimian, M. H., "Simulation of Two-Phase Flow and Heat Transfer in A Channel and around A Tube by Lattice-Boltzmann Method", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, pp. 499-516, 2021.
- Filippova, O., and Hänel, D., "Grid Refinement for Lattice-BGK Models", *Journal of Computational Physics*, Vol. 147(1), pp. 219-228, 1998.
- Mei, R., Luo, L. S., and Shy, W., "An Accurate Curved Boundary Treatment in The Lattice Boltzmann Method", *Journal of Computational Physics*, Vol. 155(2), pp. 307-330, 1999.
- Zou, Q., and He, X., "On Pressure and Velocity Boundary Conditions for The Lattice Boltzmann BGK Model", *Physics of Fluids*, Vol. 9, pp. 1591-1598, 1997.
- Pan, A., Cai, R. R., and Zhang, L. Z., "Numerical Methodology for Simulating Particle Deposition on Super Hydrophobic Surfaces with Randomly Distributed Rough Structures", *Applied Surface Science*, Vol. 68, pp. 150872, 2021.
- Chen, C., Zhu, Y., Chen, M., and Shanguan, W., "A

- Novel Approach for Investigation of Collision Mechanisms Between Fine Particles in Electrostatic Precipitator under Consideration of Brownian Effect”, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 168, pp. 96-108, 2021.
27. Li, A., and Ahmadi, G., “Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in A Turbulent Channel Flow”, *Aerosol Science Technology*, Vol. 16, pp. 209-226, 1992.
28. Li, A., and Ahmadi, G., “Deposition of Aerosols on Surfaces in A Turbulent Channel Flow”, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 31, pp. 435-451, 1993.
29. Tritton, D. J., “Experiments on The Flow Past A Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 6, pp. 547-567, 1959.
30. Tehrani, A. and Moosavi, A., “Investigation of Particle Dispersion and Deposition in A Channel with Elliptic Obstructions Using Lattice Boltzmann Method”, *7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, pp. 523-528, 2012.
31. Salmanzadeh, M., Rahnama, M., and Ahmadi, G., “Particle Transport and Deposition A Duct Flow with A Rectangular Obstruction”, *Particulate Science and Technology*, Vol. 25, pp. 401-412, 2007.