مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1395، دوره 16، شماره 4، ص‌ص 383-390

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی اثر نیروی ترموفورتیک بر ته‌نشینی ذرات خروجی از اگزوز موتورهای دیزل بعد از تونل رقیق‌سازی

پویان طالبی زاده[1]، حسن رحیم زاده[2*]، گودرز احمدی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه کلارکسون، نیویورک
* تهران، صندوق پستی 4413-15875 ، rahimzad@aut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 بهمن 1394
پذیرش: 09 اسفند 1394
ارائه در سایت: 11 اردیبهشت 1395

*کلید واژگان:*
جریان دو فاز گاز – جامد
ذرات نانو
ته‌نشینی ذرات
لوله
جریان آرام توسعه‌یافته

**چکیده**

هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر نیروی ترموفورتیک بر ته‌نشینی ذرات نانو خروجی از اگزوز موتورهای دیزل بعد از تونل رقیق‌سازی به صورت عددی می‌باشد. تونل رقیق‌سازی به‌منظور رقیق کردن گاز خروجی با هدف قابل اندازه‌گیری کردن آلاینده‌های آن توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری به کار می‌رود. به دلیل وجود اختلاف دما میان گاز خروجی از تونل رقیق‌سازی و دیواره‌های لوله، نیروی ترموفورتیک علاوه بر دیگر نیروی‌های مؤثر بر ذرات موجب ته‌نشینی ذرات می‌شود. برای مدل‌سازی حرکت ذرات و به دست آوردن میزان ته‌نشینی ذرات از روش اویلری – لاگرانژی استفاده شده است. با توجه به اندازه‌ی ذرات خارج‌شده از اگزوز موتورهای دیزل (از 5 تا 500 نانومتر)، نیروهای پخش براونی، ترموفورتیک، جاذبه و برآ به طور کامل مورد بررسی قرار گرفتند. پس از انجام اعتبار سنجی نتایج، سهم اثرگذاری هر یک از این نیروها در گرادیان‌های دمای مختلف به دست آمد. نتایج نشان داد که با توجه به قطر ذرات مورد بررسی نیروی براونی مهم‌ترین نیرو است که می‌بایست همواره در نظر گرفته شود. نیروی ترموفورتیک حتی با وجود اختلاف دمای کم نیز برای تمامی قطرها اثرگذار بوده و قابل صرف‌نظر کردن نمی‌باشد. بیشترین اثر این نیرو برای ذرات با قطر 100 نانومتر می‌باشد. نیروی جاذبه اثر بسیار کمی داشته و عملا برای ذرات با قطر کمتر از 500 نانومتر تاثیر کمی دارد. نیروی برآ هم تنها اثر ناچیزی بر روی ذرات با قطر 500 نانومتر ایفا می‌کند. نتایج این تحقیق کمک شایانی به شناخت جریان دو فاز گازهای خروجی از اگزوز موتورها به‌ویژه پس از تونل رقیق‌سازی می‌کند.

# Study the thermophoresis effect on the deposition of nano-particles from diesel engine exhaust after the dilution tunnel

**Pouyan Talebizadeh[1], Hassan Rahimzadeh[1*], Goodarz Ahmadi[2]**

1-Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2-Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University, New York, United States
* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, rahimzad@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 February 2016
Accepted 28 February 2016
Available Online 30 April 2016

*Keywords:*
Gas-Solid two-phase flow
Nano-particles
Particle deposition
Laminar fully developed flow
Pipe flow

ABSTRACT

The aim of this paper was to study the thermophoresis effect on the deposition of nano-particles from diesel engine exhaust after the dilution tunnel using a computational modeling approach. Dilution tunnel was used in order to dilute the exhaust gas to the extent that it was suitable for the measurement systems. The Lagrangian particle tracking method was used to model the dispersion and deposition of nano-particles. For the range of studied particle diameters (from 5 to 500 nm), the Brownian, thermophoresis, gravity and Saffman Lift forces are considered. After verifying the code, the importance of different forces was evaluated. Due to the temperature gradient between the exhaust gas and the pipe walls, particular attention was given to include the thermophoresis force in addition to the other forces acting on nano-particles. The results showed that for the range of nano-particle diameters studied, the Brownian force was the dominant force for particle deposition. Furthermore, the thermophoresis force was important even for relatively low temperature gradient and cannot be ignored, especially for larger particles. The maximum thermophoresis effect occurred for 100 nm particles. The gravity had negligible effects on nano-particle deposition and can be ignored for particles with diameter less than 500 nm. The Saffman lift also had negligible effects and its effect was noticeable only for the deposition of 500 nm particles. The results of this paper could provide an understanding of two-phase flow emission from diesel engines, especially after the dilution tunnel.

## 1- مقدمه

پخش و ته‌نشینی ذرات خروجی از موتورهای احتراق داخلی از دیرباز مورد توجه محققین و دانشمندان قرار داشته است. داشتن محیطی پاک، سخت‌گیرانه‌تر شدن استانداردهای بین‌المللی در رابطه با مسئله‌ی آلودگی و عوامل تولیدکننده‌ی آلاینده‌ها و همچنین تأثیر آلاینده‌ها بر روی سلامت انسان، همه و همه عواملی هستند که نیاز به کاهش آلودگی‌ها را بیش از

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
P. Talebizadeh, H. Rahimzadeh, G. Ahmadi, Study the thermophoresis effect on the deposition of nano-particles from diesel engine exhaust after the dilution tunnel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 383-390, 2016 (in Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]

گذشته مورد اهمیت قرار می‌دهد [1]. امروزه استفاده از موتورهای دیزل چه در کاربردهای ساکن و چه در حال حرکت به دلیل هزینه کارکرد کمتر و راندمان حرارتی بهتر، دوام و پایداری بهتر و همچنین تولید هیدروکربن‌ها و مونوکسید کربن کمتر نسبت به موتورهای بنزینی روزبه‌روز در حال افزایش می‌باشند [2,1]. این در حالی است که در حدود 30 الی 100 برابر ذرات معلق بیشتر نسبت به موتورهای بنزینی ساتع می‌کنند [1]. بنابراین بحث کاهش ذرات معلق در موتورهای دیزل از اهمیتی دوچندان نسبت به موتورهای بنزینی برخوردار است. همان‌طور که گفته شد به دلیل اثرات مخرب ذرات معلق بر روی محیط و سلامتی انسان، استانداردهای بین‌المللی روزبه‌روز سخت‌گیرانه‌تر نسبت به این مسئله برخورد می‌کنند. قوانین حکومتی برای میزان مجاز آلاینده‌های تولیدشده برای وسایل نقلیه سبک در سال 1982 هم در اروپا و هم در امریکا و در سال 1990 برای وسایل نقلیه سنگین مطرح شد [3]. در رابطه با ذرات معلق، در سال 2011 برای اولین بار حد مجاز تعداد ذرات ساتع شده از موتور دیزل به استاندارد یورو 5 و پس از یورو 6 اضافه گردید که مقدار مجاز آن در هر کیلومتر برابر با $6\times10^{11}$ تعیین شده است. پس از تصویب این استاندارد، تلاش برای اندازه‌گیری و تعیین تعداد ذرات خروجی از اگزوز موتورها هم به صورت عددی و هم تجربی بیش از گذشته مطرح گردید.

بررسی ته‌نشینی ذرات به صورت عددی و تحلیلی در لوله‌های مدور به‌تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. توماس در سال 1967 [4] رابطه‌ای ریاضی برای ته‌نشینی ذرات در محدوده‌ی وسیعی از قطر ذرات به دست آورد. اینگهام در سال‌های 1975 و 1991 [5-7] مدلی برای ته‌نشینی ذرات به ترتیب برای جریان توسعه‌یافته و درحال‌توسعه برای جریان‌های مختلف پوازیه، پلاگ و ترکیب پوازیه و پلاگ به دست آورد. از دیگر مطالعات تحلیلی انجام شده می‌توان به مطالعات انجام گرفته توسط یه و چام [8] و کوهن و اصغریان [9] اشاره کرد. این مطالعات با استفاده از حل معادله‌ی انتقال جرم با در نظر گرفتن ترم‌های جابه‌جایی و پخش و در نظر گرفتن پروفیل دقیق سرعت در جریان داخل لوله‌ها به‌دست‌آمده است.

علاوه بر کارهای تحلیلی انجام‌شده مطالعات عددی زیادی بر روی ته‌نشینی ذرات با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی در داخل استوانه انجام شده است که اکثریت آن‌ها برای کاربرد ته‌نشینی ذرات در سیستم‌های تنفسی مورداستفاده قرارگرفته‌اند. مدل اساسی نیروی براونی در مدل لاگرانژین برای بررسی ته‌نشینی ذرات نانو که به علت کوچکی دچار حرکت کاتوره‌ای می‌شوند، توسط لی و احمدی [11,10] در سال‌های 1992 و 1993 و همچنین انیس و همکاران [12] در سال 1993 ارائه گردید. زمانخواه و همکاران [13] به بررسی ته‌نشینی ذرات در داخل استوانه به‌منظور اعتبارسنجی نتایج خود در مطالعه‌ی ته‌نشینی ذرات در حفره بینی و بیماری تنفسی پرداختند. آن‌ها نتایج خود را با معادلات به‌دست‌آمده توسط کوهن و اصغریان [9]، اینگهام [7] و همچنین مارتونن و همکاران [14] برای جریان آرام درحال‌توسعه مقایسه کردند. اینتاونگ و همکاران [15] به بررسی ته‌نشین ذرات در داخل حفره بینی و مجرای نای پرداختند. در این مطالعه، آن‌ها به شبیه‌سازی ته‌نشین ذرات در جریان توسعه‌یافته‌ی داخل لوله برای قطر مختلف ذرات و اعداد رینولدز مختلف با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و استفاده از توابع تعریف‌شده توسط کاربر برای شبیه‌سازی حرکت براونی در نرم‌افزار پرداختند. آن‌ها با استفاده از روابط تحلیلی موجود به اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام گرفته در بینی و مجرای نای پرداختند. لانگست و وینچرکار [16] با استفاده از روش لاگرانژی به شبیه‌سازی ته‌نشینی ذرات در مجرای هوا پرداختند. آن‌ها به شبیه‌سازی ته‌نشینی ذرات در جریان توسعه‌یافته و درحال‌توسعه پرداخته و نتایج به‌دست‌آمده را با روش اویلری مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که روش لاگرانژی به دلیل در نظر گرفتن اثر اینرسی و هم‌چنین توانایی در نظر گرفتن کلیه‌ی نیروهای وارده در معادله‌ی حرکت ذرات از عملکرد بهتری نسبت به روش اویلری برخوردار است. مقالات متعدد دیگری نیز به مطالعه ته‌نشینی ذرات در داخل استوانه پرداخته‌اند [17-22].

در ارتباط با نیروی ترموفورتیک، تالبوت و همکاران [23] در سال 1980 از اولین کسانی بودند که به بررسی اثر نیروی ترموفورتیک بر روی ته‌نشینی ذرات پرداختند و رابطه‌ای برای بازده ته‌نشینی ذرات در لوله‌های بلند ارائه کردند. هی و احمدی [24] در سال 1998 به بررسی اثر نیروی ترموفورسیس بر ته‌نشینی ذرات در جریان‌های آرام و آشفته در جریان بین دو صفحه‌ی موازی به صورت دوبعدی پرداختند. لین و تسای [25] در سال 2003 به بررسی اثر نیروی ترموفورتیک بر ته‌نشینی ذرات نمک طعام در داخل لوله با در نظر گرفتن طول توسعه‌یافتگی در ابتدای لوله پرداختند. تسای و همکاران [26] در سال 2004 مدلی جدید برای ته‌نشینی ذرات با قطر بین 40 تا 500 نانومتر در لوله‌ی بلند با در نظر گرفتن نیروهای الکترواستاتیکی و براونی علاوه بر نیروی ترموفورتیک ارائه کردند و نشان دادند که رابطه‌ی تالبوت برای جریان آرام از دقت خوبی با نتایج تجربی برخوردار است. زحمتکش در سال 2008 [27] به بررسی اثرات توأم نیروهای براونی و ترموفورتیک بر ته‌نشینی ذرات برای محدوده‌ی وسیعی از قطر ذرات در جریان حول استوانه در داخل کانال پرداخت. نتایج نشان داد که بسته به گرادیان دمای موجود، نیروی ترموفورتیک اثربخشی متفاوتی پیدا می‌کند. همچنین با افزایش قطر ذرات نانو نیروی ترموفورتیک اثر خود را نسبت به نیروی براونی بیشتر نشان می‌دهد. در سال 2014، گوها و همکاران [28] به بررسی پخش و ته‌نشینی ذرات در جریان جابجایی طبیعی در اطراف یک صفحه‌ی تخت عمودی و افقی با در نظر گرفتن نیروهای ترموفورتیک، براونی و جاذبه برای قطرهای 1 نانومتر تا 5 میکرومتر پرداختند.

برای اندازه‌گیری تعداد ذرات خارج شده از اگزوز موتورهای احتراق داخلی به صورت تجربی از دستگاه‌هایی مانند SMPS و DMS استفاده می‌شود. برای استفاده از این دستگاه‌ها، با توجه به حجم زیاد ذرات خارج‌شده از موتور، ابتدا گاز خروجی از اگزوز را با نسبت معینی با هوا مخلوط کرده که این عمل در محفظه‌ای به نام تونل رقیق‌سازی انجام می‌گردد. با رقیق‌سازی گاز خروجی، غلظت ذرات به میزان قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه‌های نام‌برده کاهش می‌یابد. با این عمل، دمای گاز خروجی از موتور دیزل که در حدود 800 تا 900 درجه سانتی‌گراد است نیز به حدود 30 درجه کاهش می‌یابد. در کارهای گذشته در مدل‌سازی عددی ته‌نشینی ذرات پس از تونل رقیق‌سازی، دمای گاز با دمای دیواره‌ی لوله که در محیط قرارگرفته یکسان در نظر گرفته شده است. این در حالی است که وجود گرادیان دمای بسیار بین گاز و دیواره نیز موجب اثرگذاری نیروی ترموفورتیک بر روی ذرات و درنتیجه ته‌نشینی بیشتر ذرات می‌گردد.

هدف اصلی از انجام این مقاله بررسی عددی اثر نیروی ترموفورتیک بر روی ذرات خارج‌شده از اگزوز موتور دیزل پس از عبور از تونل رقیق‌سازی با وجود گردیان دمای کم می‌باشد. در این راستا، اثر نیروهای مختلف مؤثر بر ته‌نشینی ذرات نانو شامل نیروی براونی به عنوان مهم‌ترین نیرو در ارتباط با بحث ذرات نانو، نیروی جاذبه و برآی سافمن علاوه بر نیروی ترموفورتیک



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]

مورد بررسی قرار می‌گیرند. بررسی سهم اثربخشی هر یک از این نیروها بر روی ذرات نانو در محدوده‌ی قطر بین 5 تا 500 نانومتر از دیگر اهداف این مقاله می‌باشد. لازم به ذکر است که بررسی اثر نیروی ترموفورتیک بر روی نانو ذرات خروجی از تونل رقیق‌سازی در کنار سایر نیروهای مؤثر بر ذرات نانو و مطالعه‌ی میزان اثر بخشی نیروی ترموفورتیک نسبت به نیروی براونی از جنبه‌های نوآوری کار حاضر بوده و در عین حال تکمیل‌کننده کارهای انجام شده توسط گذشتگان نیز می‌باشد

## 2- مدل‌سازی ریاضی مسئله

معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان سیال همان معادلات شناخته‌شده ناویراستوکس می‌باشند. لازم به ذکر است که ترم‌های ناشی از برهم‌کنش ذرات و گاز به‌صورت جملات چشمه به این معادلات اضافه خواهند شد. این در حالی است که در صورت کم بودن کسر حجمی ذرات معلق در محیط سیال، تأثیر ذرات بر جریان سیال بسیار کم می باشد. معادلات حاکم شامل پیوستگی و مومنتم برای جریان سیال در حالت کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi\rho) + \mathrm{div}(\rho\vec{V}\varphi - \Gamma_\varphi \mathrm{grad}\varphi) = S_\varphi \quad (1)$$

که در آن $\rho$ چگالی سیال، $\varphi$ یک متغیر وابسته، $\vec{V}$ بردار سرعت، $\Gamma_\varphi$ ضرایب تبدیل و $S_\varphi$ ترم چشمه است.

در بررسی حرکت ذرات به‌صورت لاگرانژی، با به کار بردن قانون دوم نیوتن برای یک ذره به جرم $m$، معادله حرکت به‌صورت زیر خواهد بود [29]:

$$m\frac{du^p}{dt} = \sum F \quad (2)$$

در رابطه بالا، $F$ می‌تواند هر نیروی اعمال‌شده به ذره از قبیل دراگ، برآ، ترموفورتیک، گرانش و براونی باشد. برای نانو ذرات با توجه به رقیق در نظر گرفته شدن غلظت ذرات (در نظر گرفتن شرایط حل مسئله به صورت کوپل یک‌طرفه[1])، معادله‌ی حرکت ذره به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [24]:

$$\frac{du_i^p}{dt} = F_{D,i} + F_{g,i} + F_{L,i} + F_{Br,i} + F_{Th,i} \quad (3)$$

$$\frac{dx_i^p}{dt} = u_i^p \quad (4)$$

برای جریان‌هایی با 1<Re<1000، نیروی دراگ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_D = \frac{3\pi\mu(u^f - u^p)}{\mathrm{C_c}} d(1 + 0.15\mathrm{Re}_P^{0.687}) \quad (5)$$

که در آن $u^f$ و $u^p$ به ترتیب سرعت حرکت سیال و ذرات، $\mu$ لزجت سیال و $\mathrm{Re}_p = \frac{|u^f - u^p|}{\nu}$ عدد رینولدز ذرات است. $\mathrm{C_c}$ ضریب تصحیح کانینگهام است که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد [10]:

$$\mathrm{C_c} = 1 + \frac{2\lambda}{d_p}(1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1d_p}{2\lambda}}) \quad (6)$$

که در آن $\lambda$ مسیر آزاد متوسط برای هوا است که 65 نانومتر در نظر گرفته می‌شود [29].

$F_g$ حاصل تأثیر نیروی جاذبه بر جرم ذره است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_g = \frac{g_i(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} \quad (7)$$

در رابطه بالا $g$ شتاب گرانش، $\rho_p$ و $\rho_g$ به ترتیب چگالی ذرات و سیال و $\frac{-g_i\rho_g}{\rho_p}$ مربوط به نیروی شناوری است.

مقدار نیروی براونی در معادله‌ی (3) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [10]:

$$F_{Br} = \xi\sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (8)$$

که در آن $\xi$ متغیر گوسین تصادفی و $\Delta t$ گام زمانی لازم برای انتگرال‌گیری و $S_0$ تابع شدت طیفی است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [10]:

$$S_0 = \frac{216\nu k_B T}{\pi^2\rho_g d_p^5\left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^2 \mathrm{C_c}} \quad (9)$$

در معادله‌ی بالا $T$ دمای مطلق سیال، $\nu$ لزجت دینامیک و $k_B$ ثابت بولتزمن است.

هنگامی‌که ذرات معلق کوچک در یک محیط برشی سیال قرار می‌گیرند، نیروی برآی سافمن که عمود بر حرکت سیال است را تجربه می‌کنند که از رابطه‌ای زیر محاسبه می‌گردد [30]:

$$F_L = \frac{2K\nu^{1/2}d_{ij}}{Sd(d_{lk}d_{kl})^{1/4}}(u_j - u_j^p) \quad (10)$$

که در آن $K$ ضریب ثابت معادله نیروی برآ است و برابر با 2.594 در نظر گرفته می‌شود. $d_{ij}$ نیز تانسور نرخ تغییر شکل است و برابر است با:

$$d_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (11)$$

شایان ذکر است که این نیرو فقط برای ذراتی که در یک محیط برشی قوی قرار داشته و یا دارای قطر بزرگی باشند اهمیت پیدا می‌کند و در بقیه موارد قابل صرف‌نظر است [29].

گرادیان دما می‌تواند باعث حرکت ذرات معلق در یک سیال شود که در نتیجه آن، یک نیروی خالص در جهت کاهش گرادیان دما است که به ذره وارد می‌شود. تالبوت و همکاران [23] یک رابطه برای محاسبه نیروی ترموفورتیک به صورت زیر ارائه دادند:

$$F_{Th} = \frac{-6\pi d_p\mu^2 C_s\left(\frac{k}{k_p} + C_t\mathrm{Kn}\right)}{\rho(1 + 3C_m\mathrm{Kn})\left(1 + \frac{2k}{k_p} + 2C_t\mathrm{Kn}\right)}\frac{1}{m_p T}\frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (12)$$

که در آن Kn عدد نادسن و برابر با $2\lambda/d_p$ است. $k$ ضریب هدایت حرارتی سیال، $k_p$ ضریب هدایت حرارتی ذرات، $m_p$ وزن ذرات، $T$ دمای سیال در هر نقطه و $C_s = 1.17$، $C_t = 2.18$ و $C_m = 1.14$ می باشد.

لازم به ذکر است که از نرم افزار فلوئنت[2] برای حل معادلات حاکم استفاده شده است.

## 3- هندسه، شبکه‌بندی و شرایط مرزی

همان‌طور که گفته شد هندسه موردمطالعه در این پژوهش یک استوانه است که نمایی از آن در شکل 1 نشان داده‌شده است. قطر استوانه 15 میلی‌متر و طول آن از 40 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که دبی جریان 6.5 لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

برای شبکه‌بندی هندسه مورد مطالعه، از نرم‌افزار ICEM CFD استفاده‌شده است. نمایی از شبکه‌بندی انجام‌گرفته در مقاطع عرضی و طولی لوله در شکل 2 نشان داده‌شده است. شبکه نشان داده‌شده کاملا ساختاریافته و مربعی شکل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نزدیک دیواره به دلیل تشکیل لایه‌مرزی و اهمیت بحث ته‌نشینی ذرات، از شبکه‌بندی ریزتری استفاده‌شده است. ارتفاع سلول اول 0.005 شعاع لوله در نظر گرفته‌شده و با نسبت 1.1 در حال افزایش می‌باشند. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

1- One way coupling

2- ANSYS-Fluent 15.0



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]

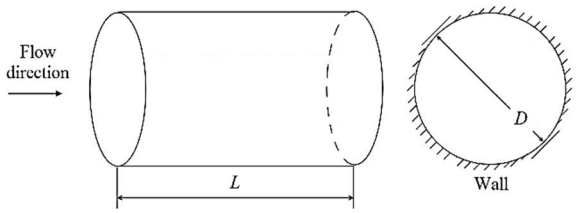
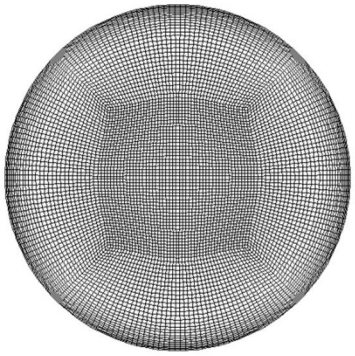
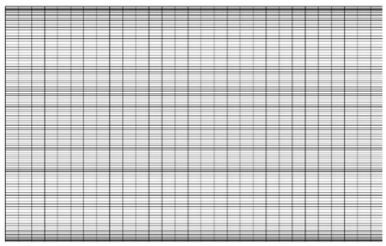



**Fig. 1** A schematic of studied geometry in this paper

**شکل 1** نمایی از هندسه موردمطالعه در این مقاله



الف)



ب)

**Fig. 2** A view of computational mesh at the a) pipe cross section b) pipe length

**شکل 2** نمایی از شبکه‌بندی هندسه در الف) مقطع استوانه ب) طول استوانه

برای جریان درحال‌توسعه، سرعت یکنواخت در ورودی لوله، خروجی جریان در خروجی لوله و همچنین شرط عدم لغزش نیز برای دیواره‌ها شرط‌های مرزی بکار گرفته شده می‌باشند. برای دستیابی به جریان توسعه‌یافته کامل می‌بایست پس از همگرایی نتایج در لوله با جریان درحال‌توسعه، خروجی نتایج به‌دست‌آمده را به صورت پروفیل جدید در ورودی لوله‌ی دیگر با همان ابعاد به عنوان شرط مرزی در ورودی لوله استفاده کرد.

ذرات کروی شکل به فاصله اندکی از سطح ورودی به‌طور یکنواخت در مقطع لوله تزریق می‌شوند. این فاصله به‌منظور جلوگیری از خروج اشتباه ذرات از سطح ورودی می‌باشد. مکان ذرات توسط کد نویسی در نرم‌افزار متلب[1] تهیه گردیده و سپس در نرم‌افزار فلوئنت فراخوانده می‌شوند. به‌منظور اعمال شرط توسعه‌یافتگی برای ذرات با استفاده از پروفیل سرعت توسعه‌یافته، فلاکس جرمی متناسب با سرعت سیال برای ذرات تعریف می‌گردد و در انتها با داشتن فلاکس جرمی ذرات ته‌نشین شده و ذرات ورودی، بازده ته‌نشینی ذرات توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mathrm{DE} = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{in}} \qquad (13)$$

تعداد کل ذرات نیز 1،000،000 ذره در نظر گرفته شده که با توجه به پروفیل سرعت توسعه‌یافته در جریان آرام به طور یکنواخت در ورودی لوله تزریق می‌شوند. ذرات از جنس کربن با چگالی 2000 کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب هدایت حرارتی 0.33 وات بر کلوین متر انتخاب شده‌اند. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار فلوئنت، ذرات پس از برخورد به دیواره‌ی استوانه، بر روی دیواره ته‌نشین شده و از دامنه‌ی حل خارج می‌شوند. این امر با توجه به محدوده‌ی قطر ذرات بررسی‌شده صحیح است [29].

با توجه به تعریف عدد نادسن و قطر ذرات مورد بررسی در این مقاله، این پارامتر از مقدار 26 برای ذرات به قطر 5 نانومتر تا مقدار 0.26 برای ذرات به قطر 500 نانومتر تغییر می کند. برای اعداد نادسن بین 0.1 تا 10، سیستم در ناحیه‌ی گذرا و برای اعداد بزرگتر از 10 سیستم در ناحیه‌ی ملکولی آزاد یا گسسته قرار می‌گیرد. نوع ناحیه‌ای که سیستم در آن قرار می‌گیرد در هنگام بررسی اثر متقابل ذرات با ملکول‌های سیال اهمیت پیدا می‌کند. با توجه به فرض رقیق در نظر گرفتن غلظت ذرات و شرایط کوپل یک طرفه در این مقاله، نواحی مختلف سیستم اثری بر روی پخش و ته نشینی ذرات نخواهند داشت [31].

## 4- نتایج

### 4-1- استقلال از شبکه

قبل از بررسی و اعتبارسنجی نتایج لازم است که استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از سه شبکه‌بندی مختلف استفاده شده است. جدول 1 تعداد سلول‌های شبکه‌بندی‌های گفته‌شده به همراه بازده ته‌نشینی ذرات به قطر 10 نانومتر را برای استوانه‌ای با شرایط گفته شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج مربوط به هر سه شبکه به یکدیگر نزدیک می‌باشند که علت این امر یکسان در نظر گرفتن ارتفاع اولین سلول و همچنین نسبت افزایش ارتفاع در هر سه شبکه‌بندی می‌باشد.

با توجه به یکسان بودن نتایج شبکه‌بندی دوم و سوم، در ادامه از شبکه‌بندی شماره 2 برای بررسی نتایج استفاده شده است.

### 4-2- اعتبارسنجی نتایج

نتایج حاصل از ته‌نشینی ذرات نانو در جریان داخل استوانه به‌منظور اعتبارسنجی نتایج در این قسمت مورد مطالعه قرارگرفته است. به منظور نشان دادن اعتبار سنجی نتایج، ته‌نشینی ذرات برای قطرهای مختلف ذرات با نتایج حاصل از رابطه تحلیلی به‌دست‌آمده توسط اینگهام [5] مقایسه شده است. این معادله به‌صورت تابعی از پارامتر $\Delta$ برای جریان توسعه‌یافته درون لوله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{DE} = 1 - (0.819e^{-14.63\Delta} + 0.0976e^{-89.22\Delta} + 0.0325e^{-228\Delta} + 0.0509e^{-125.9\Delta^{2/3}}) \qquad (14)$$

که در این رابطه $\Delta$ به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\Delta = \frac{\widetilde{D} L_{\mathrm{pipe}}}{U_{\mathrm{in}} d^2} \qquad (15)$$

که در آن $L_{\mathrm{pipe}}$ طول لوله و $d$ قطر لوله، $U_{\mathrm{in}}$ سرعت متوسط ورودی سیال و $\widetilde{D}$ ضریب پخش ذرات است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\widetilde{D} = \frac{k_b T C_c}{3\pi\mu d_p} \qquad (16)$$

شکل 3 بازده ته‌نشینی ذرات برای قطرهای بین 5 تا 500 نانومتر برای جریان داخل استوانه با در نظر گرفتن اثر پخش ذرات (نیروی براونی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از تطبیق کامل با

1- Matlab



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]

**جدول 1** بررسی استقلال از شبکه برای ذرات به قطر 10 نانومتر

**Table 1** Mesh independency analysis for 10 nm particles

| شماره شبکه‌بندی | تعداد سلول | بازده ته‌نشینی (%) |
|---|---|---|
| شماره 1 | 780615 | 1.88 |
| شماره 2 | 2013165 | 1.97 |
| شماره 3 | 3812405 | 1.98 |

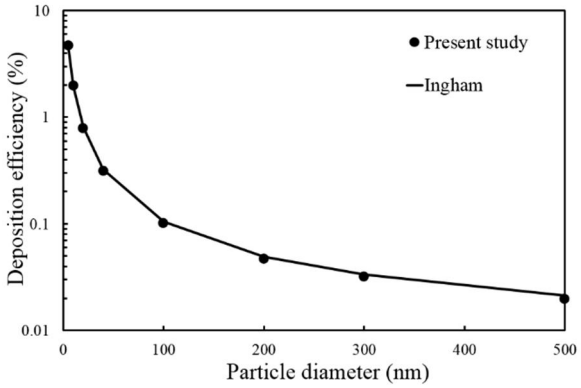



**Fig. 3** Particle deposition efficiency for different particle diameters for the fully developed pipe flow in compare with the Ingham equation

**شکل 3** نمودار تغییرات بازده ته‌نشینی ذرات برحسب قطر ذرات برای جریان توسعه یافته‌ی آرام داخل استوانه در مقایسه با رابطه‌ی اینگهام

رابطه‌ی تحلیلی اینگهام برخوردار می‌باشند. در قطرهای بالا به دلیل افزایش اثر اینرسی ذرات در مدل لاگرانژی نتایج به میزان جزئی نسبت به حالت پخش کامل متفاوت است [32].

### 4-3- نتایج مدل‌سازی ته‌نشینی ذرات پس از تونل رقیق‌سازی

همان‌طور که گفته شد برای اندازه‌گیری آلاینده‌های موتور دیزل به دلیل زیاد بودن غلظت آن‌ها پس از خروج از اگزوز، از تونل رقیق‌سازی استفاده می‌شود. در این تونل، غلظت مواد خروجی از اگزوز موتور دیزل با نسبت معینی با هوا رقیق‌سازی می‌شود. درنتیجه غلظت آن‌ها به همراه دمای آن‌ها کاهش می‌یابد. شکل 4 شماتیکی از مدار رقیق‌سازی گاز خروجی از اگزوز موتور دیزل را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد دمای گاز خروجی از تونل رقیق‌سازی در حدود 30 درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. حال فرض می‌کنیم که هوای خارج‌شده از تونل رقیق‌سازی پیش از وارد شدن به لوله‌ی مورد آزمایش به

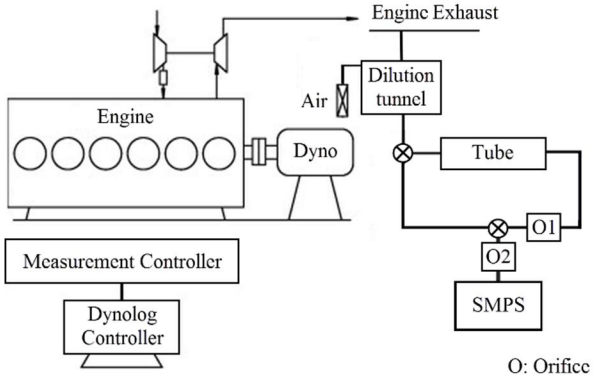


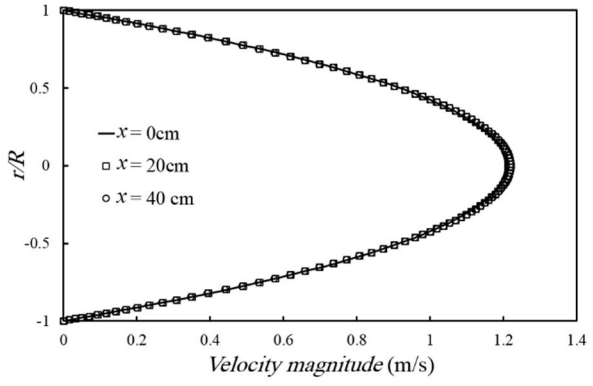

**Fig. 4** A schematic design of particle deposition measurement after the dilution tunnel

**شکل 4** شماتیکی از مدار طراحی شده جهت اندازه‌گیری درصد ته‌نشینی ذرات پس از تونل رقیق‌سازی

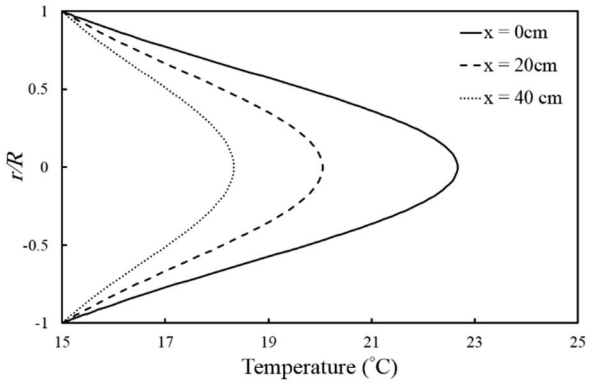
حالت توسعه‌یافتگی دست پیدا کند. برای رسیدن به توسعه‌یافتگی، جریان یک‌بار در لوله با در نظر گرفتن پروفیل سرعت تخت با سرعت یکنواخت برابر با 0.613 متر بر ثانیه (با توجه به دبی 6.5 لیتر بر دقیقه و قطر لوله‌ی 15 میلی‌متر) و پروفیل دمای تخت برابر با 30 درجه حل‌شده و پس از همگرایی نتایج و عدم تغییر سرعت در خروجی لوله، خروجی جریان به‌عنوان شرط مرزی ورودی وارد استوانه‌ی دیگری می‌شود.

لازم به ذکر است که شرط مرزی در نظر گرفته شده برای جداره‌ی استوانه با توجه به قرارگیری در محیط، دما ثابت با دمایی برابر با دمای محیط که 15 درجه است در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که با توجه به شرط مرزی دمایی، جریان هیچ‌گاه به حالت توسعه‌یافتگی دمایی دست نخواهد یافت.

شکل 5 الف و ب به ترتیب نمودار پروفیل سرعت و دما را در سه مقطع لوله (ابتدا، وسط و انتهای لوله) با شرایط گفته شده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پروفیل سرعت در تمام سه مقطع بر روی یکدیگر قرار داشته و لذا جریان از نظر سرعت به توسعه‌یافتگی دست یافته است. این در حالی است که به دلیل وجود اختلاف دما بین دمای گاز ورودی به لوله و دمای دیواره‌ی لوله که در دمای محیط قرار دارد، گرادیان دما ایجاد می شود و بیشینه دما در ورودی استوانه به 23.2 درجه‌ی سانتی‌گراد رسیده است. در خروجی لوله نیز بیشینه دما به 18.3 درجه سانتی‌گراد رسیده است. این گرادیان دمای ایجاد شده باعث اعمال نیروی ترموفورتیک بر ذرات شده که موجب ته‌نشینی بیشتر ذرات بر روی دیواره لوله می‌گردد که در ادامه به بررسی آن می‌پردازیم.




الف)




ب)

**Fig. 5** The profiles of a) velocity and b) Temperature at three different line cross section of the pipe

**شکل 5** نمودار پروفیل الف) سرعت و ب) دما در سه مقطع استوانه

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]

برای بررسی ته‌نشینی ذرات، همان‌طور که گفته شد، 1،000،000 ذره به‌طور یکنواخت با دمایی برابر با بیشینه دمای سیال در ورودی (23.2 درجه‌ی سانتی‌گراد) در سطح ورودی استوانه رها شده و سپس درصد ته‌نشینی ذرات محاسبه شده است. شکل 6 بازده ته‌نشینی ذرات از 5 تا 500 نانومتر (خروجی از اگزوز موتور دیزل) یک‌بار با در نظر گرفتن نیروی پخش براونی (حالت اول) و بار دیگر با در نظر گرفتن کلیه‌ی نیروهای وارده شامل پخش براونی، ترموفورسیس، جاذبه و لیفت (حالت دوم) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه قطر ذرات بیشتر می‌شود اختلاف بین بازده ته‌نشینی در حالات اول و دوم بیشتر می‌شود. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که نمی‌توان از نیروهای دیگر در برابر نیروی براونی به‌ویژه برای قطرهای بزرگ‌تر از 40 نانومتر صرف‌نظر کرد.

برای بهتر مشخص شدن اثر تک‌تک هر یک از نیروهای وارده بر ذرات، جدول 2 بازده ته‌نشینی ذرات برای قطرهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی برآ تقریبا اثری بر روی نانو ذرات کمتر از 500 نانومتر نداشته و فقط برای ذرات 500 نانومتر اندکی بازده ته‌نشینی را افزایش می‌دهد. به‌طورکلی، نیروی برآی لیفت به دلیل کوچک بودن ذرات و عدم وجود میدان سرعت برشی اثری بر ته‌نشینی ذرات ندارد. نیروی جاذبه تأثیر بیشتری نسبت به نیروی لیفت برای ذرات سنگین‌تر (با قطر بیشتر) دارد. این در حالی است که تقریبا برای ذرات 200 نانومتر، نیروی جاذبه اثر ناچیزی داشته و برای ذرات 100 نانومتر دیگر اثری ندارد.

اما همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی ترموفورتیک بیشترین تأثیر را علاوه بر نیروی براونی بر روی ته‌نشینی ذرات دارد به‌طوری‌که هر چه قطر ذره بیشتر می‌شود اثر نیروی ترموفورتیک بیشتر می‌شود. این در حالی است که برای ذرات بیش‌تر از 100 نانومتر اثر این نیرو بیشتر از نیروی براونی است. لازم به ذکر است که در شرایط گفته شده، در ورودی جریان لوله بیشینه اختلاف درجه حرارت تنها 8.2 درجه بود که حتی این مقدار در انتهای لوله به 3.3 درجه کاهش می‌یابد. این نتیجه‌ی بسیار مهمی است که اغلب در محاسبات انجام‌گرفته از آن به‌اشتباه صرف‌نظر می‌شود. لازم به ذکر است که دمای گاز ورودی فقط 30 درجه در نظر گرفته شده است.

برای بهتر مشخص شدن اثر نیروی ترموفورتیک، جریان خروجی از استوانه در حالت قبل به‌عنوان شرایط ورودی وارد استوانه‌ی جدیدی به همان

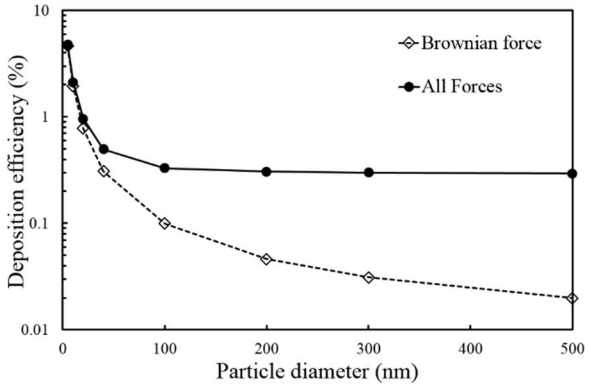



**Fig. 6** Particle deposition efficiency by considering the Brownian force alone and all applied forces for different particle diameters

**شکل 6** نمودار بازده ته‌نشینی ذرات با در نظر گرفتن نیروی براونی به‌تنهایی و همچنین در نظر گرفتن تمامی نیروهای وارد بر ذرات برحسب قطر ذرات

**جدول 2** بازده ته‌نشینی ذرات با در نظر گرفتن نیروهای متفاوت وارد بر ذرات

**Table 2** Particle deposition efficiency for different particle diameters by considering various applied forces

| قطر ذرات / نیروی وارده | 500 | 300 | 200 | 100 | 40 | 20 | 10 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Br | 0.0198 | 0.031 | 0.0462 | 0.0997 | 0.3072 | 0.7788 | 1.9935 | 4.6168 |
| Br+Th | 0.2779 | 0.2969 | 0.3066 | 0.3302 | 0.4968 | 0.9574 | 2.1195 | 4.8799 |
| Br+Th+Gr | 0.2940 | 0.2995 | 0.3069 | 0.3302 | - | - | - | - |
| Br+Th+Gr+Li | 0.2944 | 0.2995 | - | - | - | - | - | - |

ابعاد می‌گردد و معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی برای شرایط جدید دوباره حل می‌گردند. در این حالت، پروفیل سرعت تغییر نمی‌کند این در حالی است که دما در لوله کاهش پیدا می‌کند. شکل 7 پروفیل دما در سه مقطع ابتدایی، وسط و انتهایی استوانه در شرایط جدید را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد بیشینه اختلاف دما در هر مقطع در این حالت 3.3 درجه و کمترین آن در خروجی 1.34 درجه است.

شکل 8 بازده ته‌نشینی ذرات از 5 تا 500 نانومتر یک‌بار با در نظر گرفتن نیروی پخش براونی و بار دیگر با در نظر گرفتن کلیه‌ی نیروها در

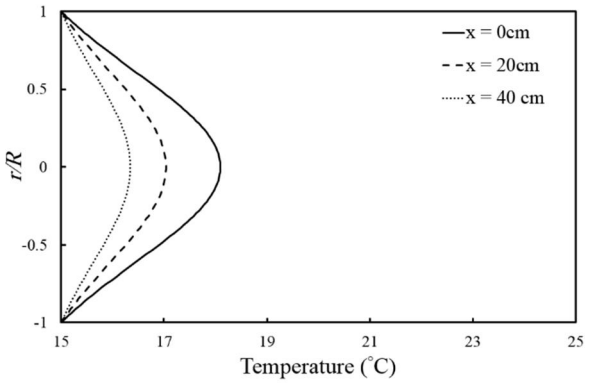



**Fig. 7** Temperature profiles at three different line cross section of the pipe with the maximum temperature of 18.3 C

**شکل 7** نمودار پروفیل دما در سه مقطع استوانه با شرایط بیشینه دمای ورود 18.3 درجه سانتی‌گراد

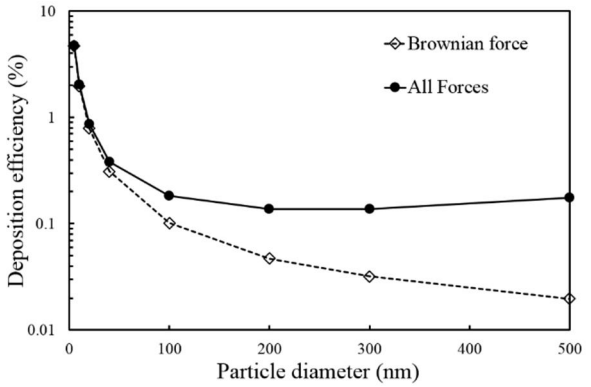



**Fig. 8** Particle deposition efficiency by considering the Brownian force alone and all applied forces for different particle diameters for the maximum inlet temperature of 18.3C

**شکل 8** نمودار بازده ته‌نشینی ذرات با در نظر گرفتن نیروی براونی به‌تنهایی و همچنین در نظر گرفتن تمامی نیروهای وارد بر ذرات برحسب قطر ذرات با شرایط بیشینه دمای ورود 18.3 درجه سانتی‌گراد

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]

شرایط جدید را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود باوجود اختلاف دمای بسیار کم در طول لوله (میانگین حدود 2 درجه)، نیروی ترموفورتیک تأثیر بسیاری بر میزان ته‌نشینی ذرات به‌ویژه برای ذرات بزرگ‌تر از 100 نانومتر دارد که نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

شکل 9 نمودار بازده ته‌نشینی ذرات با در نظر گرفتن کلیه‌ی نیروهای وارد بر ذرات شامل براونی، ترموفورتیک، جاذبه و برآی سافمن را در استوانه‌های اول و دوم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت اول (بیشینه دما در ورودی برابر با 23.2 درجه‌ی سانتی‌گراد)، به دلیل وجود گرادیان دمای بیشتر نسبت به حالت دوم (بیشینه دما در ورودی برابر با 18.3 درجه‌ی سانتی‌گراد)، بازده ته‌نشینی ذرات بیشتر است. این در حالی است که برای ذرات کوچک‌تر (با قطر 5 و 10 نانومتر)، به دلیل کمتر بودن اثر نیروی ترموفورتیک نسبت به نیروی براونی، نمودار مربوط به بازده ته‌نشینی تقریبا بر روی یکدیگر (به خصوص برای ذرات 5 نانومتر) قرار دارند. همچنین، بیشترین اختلاف نشان داده شده مربوط به ذرات با قطر 200 نانومتر می باشد و پس از آن تفاوت بازده ته نشینی مربوط به حالات اول و دوم کم می شود که علت آن کاهش اثر نیروی ترموفورتیک می باشد.

## 5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، اثر نیروی ترموفورتیک بر ته‌نشینی ذرات نانو خروجی از اگزوز موتور دیزل پس از عبور از تونل رقیق‌سازی در جریان آرام عبور کننده از داخل استوانه بررسی شد. کلیه‌ی نیروهای براونی، ترموفورتیک، جاذبه و برآ بر ته‌نشینی ذرات نانو در محدوده‌ی قطر بین 5 تا 500 نانومتر و سهم هر یک از این نیروها بر ته‌نشینی ذرات بررسی شد. از مدل لاگرانژی – اویلری به کمک نرم‌افزار فلوئنت برای یافتن مسیر ذرات و پیدا کردن تعداد ذرات ته‌نشین شده استفاده شد. موارد ذکرشده در ادامه از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله می‌باشد:

- اثربخش بودن نیروی ترموفورتیک بر ذرات نانو حتی با وجود گرادیان دمای کم در مقایسه با نیروی براونی
- ناچیز بودن ته‌نشینی ذرات با در نظر گرفتن نیروی براونی در مقایسه با نیروی ترموفورتیک برای ذرات با قطر بزرگ‌تر از 200 نانومتر
- اثربخش بودن ناچیز نیروی برآ تنها بر روی ذرات با قطر 500 نانومتر
- اثربخش بودن نیروی جاذبه برای ذرات با قطر بزرگ‌تر از 200 نانومتر

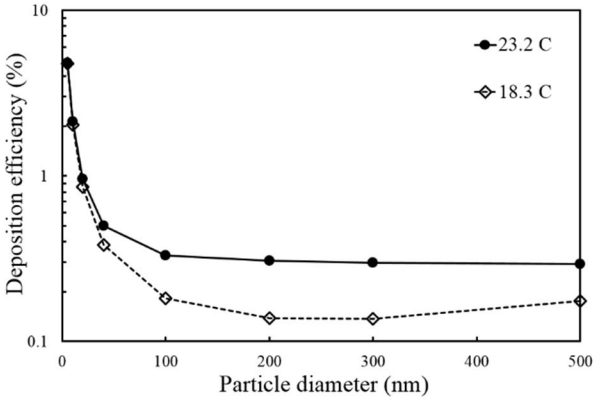



**Fig. 9** Particle deposition efficiency by considering all applied forces for different particle diameters for different maximum inlet temperature of 18.3 C and 23.2 C

**شکل 9** نمودار بازده ته‌نشینی ذرات با در نظر گرفتن کلیه‌ی نیروهای وارده برحسب قطر ذرات با بیشینه دماهای ورودی 18.3 و 23.2 درجه‌ی سانتی‌گراد

بررسی میزان اثرگذاری نیروی ترموفورتیک بر ذرات خارج شده از اگزوز موتورهای دیزل در قیاس با نیروی براونی به ویژه پس از تونل رقیق سازی از جنبه های نوآوری کار حاضر می باشد که در کارهای گذشتگان به چشم نمی خورد. نتایج این تحقیق می‌تواند کمک شایانی در شناخت پخش و ته‌نشینی ذرات خروجی از اگزوز موتورهای دیزل به ویژه پس از عبور از تونل رقیق‌سازی در اگزوز خودرو داشته باشد.

## 6- تقدیر و تشکر

در پایان جا دارد که از زحمات استاد گران‌قدر جناب آقای دکتر ریچارد بران از دانشگاه صنعتی کوئینزلند و همچنین جناب آقای دکتر میثم بابائی از دانشگاه سالفورد انگلستان و جناب آقای دکتر کیاو اینتاوونگ از دانشگاه آر ام آی تی استرالیا که نویسندگان را در انجام این پژوهش یاری رسانیده‌اند، تقدیم و تشکر به عمل آید.

## 7- مراجع

[1] P. Talebizadeh, M. Babaie, R. Brown, H. Rahimzadeh, Z. Ristovski, M. Arai, The role of non-thermal plasma technique in NOx treatment: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 40, No. 10, pp. 886-901, 2014.

[2] J. C. Guibet, E. Faure-Birchem, *Fuels and Engines: Technology, Energy and Environment*, pp. 160-170, Michigan: Editions Technip, 1999.

[3] B. A. A. L. van Setten, M. Makkee, J. A. Moulijn, Science and technology of catalytic diesel particulate filters, *Catalysis Reviews*, Vol. 43, No. 4, pp. 489-564, 2001.

[4] J .W. Thomas, Particle loss in sampling conduits, *Proceedings of a Symposium on Instruments and Techniques for the Assessment of Airborne Radioactivity in Nuclear Operations*,Vienna, Austria, July 3-7, 1967.

[5] D. B. Ingham, Diffusion of aerosols from a stream flowing through a cylindrical tube, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 125-132, 1975.

[6] D. B. Ingham, Simultaneous diffusion and sedimentation of aerosol particles in rectangular tubes, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 7, No. 5, pp. 373-380, 1976.

[7] D. B. Ingham, Diffusion of aerosols in the entrance region of a smooth cylindrical pipe, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 22, No. 3, pp. 253-257, 1991.

[8] H. C. Yeh, G. M. Schum, Models of human lung airways and their application to inhaled particle deposition, *Bull Math Biol*, Vol. 42, No. 3, pp. 461-480, 1980.

[9] B. S. Cohen ,B. Asgharian, Deposition of ultrafine particles in the upper airways: An empirical analysis, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 21, No. 6, pp. 789-797, 1990.

[10] A. Li, G. Ahmadi, Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow, *Aerosol Science Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 209-226, 1992.

[11] A. Li, G. Ahmadi, Computer simulation of deposition of aerosols in a turbulent channel flow with rough wall, *Aerosol Science Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 11-24, 1993.

[12] H .Ounis, G. Ahmadi, J. B. McLaughlin, Brownian particles deposition in a directly simulated turbulent channel flow, *Physics of Fluids A*, Vol. 5, No. 6, pp. 1427-1432, 1993.

[13] P. Zamankhan, G. Ahmadi, Z. Wang, P. K. Hopke, Y.-S. Cheng, W. C. Su, D. Leonard, Airflow and deposition of nano-particles in a human nasal cavity, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 40, No. 6, pp. 463-476, 2006.

[14] T. Martonen, Z. Zhang, Y. Yang, Particle diffusion with entrance effects in a smooth-walled cylinder, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 27, No. 1, pp. 139-150, 1996.

[15] K. Inthavong, K. Zhang, J. Tu, Modeling submicron and micron particle deposition in a human nasal cavity, *Proceedings of the 7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia, December 9-11, 2009.

[16] P. W. Longest, S. Vinchurkar, Effects of mesh style and grid convergence on particle deposition in bifurcating airway models

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]

[25] J. S. Lin, C.-J. Tsai, Thermophoretic deposition efficiency in a cylindrical tube taking into account developing flow at the entrance region, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, No. 5, pp. 569-583, 2003.
[26] C. J. Tsai, J.-S. Lin, S. G. Aggarwal, D.-R. Chen, Thermophoretic deposition of particles in laminar and turbulent tube flows, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 38, No. 2, pp. 131-139, 2004.
[27] I. Zahmatkesh, On the importance of thermophoresis and Brownian diffusion for the deposition of micro and nanoparticles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 3, pp. 369-375, 2008.
[28] A. Guha, S. Samanta, Effect of thermophoresis and its mathematical models on the transport and deposition of aerosol particles in natural convective flow on vertical and horizontal plates, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 77, No. 7, pp. 85-101, 2014.
[29] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, pp. 100-400, Michigan: Wiley, 2012.
[30] C. He, G. Ahmadi, Particle deposition in a nearly developed turbulent duct flow with electrophoresis, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 30, No. 6, pp. 739-758, 1999.
[31] R. C. Flagan, J. H. Seinfeld, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, pp. 215-240, Massachusetts: Courier Corporation, 2012.
[32] P. W. Longest, J. Xi, Computational investigation of particle inertia effects on submicron aerosol deposition in the respiratory tract, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 111-130, 2007.
with comparisons to experimental Data, *Medical Engineering & Physics*, Vol. 29, No. 3, pp. 350-366, 2007.
[17] H. Shi, C. Kleinstreuer, Z. Zhang, C. S. Kim, Nanoparticle transport and deposition in bifurcating tubes with different inlet conditions, *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 7, pp. 2199-2213, 2004.
[18] Z. Zhang, C. Kleinstreuer, C. Kim, Airflow and nanoparticle deposition in a 16-generation tracheobronchial airway model, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 36, No. 12, pp. 2095-2110, 2008.
[19] A. Guha, Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flow, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 40, No. 1, pp. 311-341, 2008.
[20] Q. Ge, K. Inthavong, J. Tu, Local deposition fractions of ultrafine particles in a human nasal-sinus cavity CFD model, *Inhalation Toxicology*, Vol. 24, No. 8, pp. 492-505, 2012.
[21] M. Yousefi, K. Inthavong, J. Tu, Microparticle transport and deposition in the human oral airway: toward the smart spacer, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 49, No. 11, pp. 1109-1120, 2015.
[22] Y. Shang, J. Dong, K. Inthavong, J. Tu, Comparative numerical modeling of inhaled micron-sized particle deposition in human and rat nasal cavities, *Inhalation Toxicology*, Vol. 27, No. 13, pp. 694-705, 2015.
[23] L. Talbot, R. K. Cheng, R. W. Schefer, D. R. Willis, Thermophoresis of particles in a heated boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 101, No. 4, pp. 737-758, 1980.
[24] C. He, G. Ahmadi, Particle deposition with thermophoresis in laminar and turbulent duct flows, *Aerosol science and technology*, Vol. 29, No. 6, pp. 525-546, 1998.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.3.2 ]