

تمرکز نانو ذرات در داخل لنزهای آیرودینامیکی تکی

با دیواره لغزشی در جریان رقیق

مهدي نظري^۱

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

افشین حسن زاده مقیمی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

رضا ابراهیمی^۳

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهرزاد شمس^۴

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۹)

چکیده

به طور گسترده در لنزهای آیرودینامیکی از تمرکز ذرات در اندازه گیری آبروسول استفاده می شود. با عبور ذرات معلق در هوا از داخل سیستم لنز آیرودینامیکی، بیم متمرکز ذرات تشکیل می شود. در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد یک لنز آیرودینامیکی و تعیین چگونگی تمرکز ذرات با اندازه ها و چگالی های مختلف در رژیم جریان پیوسته و لغزشی، از تحلیل عددی جریان دوفازی ذره-گاز استفاده شده است. ابتدا، جریان تراکم پذیر گاز درون لنز آیرودینامیکی با شرایط مرزی لغزشی در دیواره ها، در نرم افزار فلونت مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. برای اعمال شرط مرزی لغزشی از امکان برنامه نویسی کاربر در نرم افزار فوق بهره گرفته شده است. در این حالت، با به کارگیری یک روش تکرار، سرعت جریان گاز روی دیواره ها متناسب با تنش برشی قرار داده شده و تا همگرایی کامل این تکرار ادامه یافته است. پس از همگرایی روش تکرار فوق و حل جریان گاز در رژیم لغزشی، ذرات با توزیع یکنواخت به درون سیستم لنز آیرودینامیکی تزریق شده و حرکت ذرات به روش لاگرانژی بررسی شده است. جریان روی ذرات نیز لغزشی می باشد. در این شرایط، یکی از نیروهای وارد بر ذرات نیروی پسای استوکس با ضریب کانینگهام متغیر می باشد تا از این طریق اثرات لغزش روی ضریب پسا و نیروی براونی مدل سازی شود. روند حل به صورت یک طرفه در نظر گرفته شده و از تأثیر ذرات روی هم دیگر و بر جریان سیال صرف نظر شده است.

واژه های کلیدی: لنز آیرودینامیکی، آبروسول، حرکت براونی، ضریب کانینگهام

Collimation of Nanoparticles Inside the Single Aerodynamic Lenses with Slip Flow on Wall and Diluted Flow

M. Nazari

Aerospace Engineering

Department

K.N. Toosi University of

Technology

A.H. Moghimi

Mechanical Engineering

Department

Iran science and

Technology University

(Received: 6 September, 2014; Accepted: 10 December, 2014)

R. Ebrahimi

Aerospace Engineering

Department

K.N. Toosi University of

Technology

M. Shams

Mechanical Engineering

Department

K.N. Toosi University of

Technology

ABSTRACT

Collimate beam in aerodynamic lenses are used widely for aerosol measuring. With passage of aerosol from inside an aerodynamic lens system, collimated particles beam forms. In order to evaluate the performance of an aerodynamic lens and to determine the quality of particle focus with various size and density in slip and continuous flow regime, particle-gas numerical analysis is used. Initially, compressible gas flow within aerodynamic lens with slip boundary condition on the wall was numerically analyzed using FLUENT software. Boundary condition for slip have been forced with the possibility of user programming in above software. In this case, using a repeat method, the speed of gas flow on the walls proportional to shear stress was set and this was continued until complete convergence. After convergence of the above procedure and solving gas flow in slip regime, uniform distribution of particles was injected into aerodynamic lens system and then the particles motion was analyzed by a Lagrangian method. Also, it was assumed that the flow on particles be slip. In these conditions, one of the forces acted on the particles is Stokes drag with variable Cunningham coefficient. By this method, the effect of slip on the drag coefficient and Brownian force were modeled. Solution process was assumed one way and we ignored the effects of particles on each other and on fluid flow

Keywords: Aerodynamic Lens, Aerosol, Brownian Motion, Cunningham Coefficient

^۱ - کارشناس ارشد (نویسنده پاسخگو): mehdi.na.61@gmail.com

^۲ - کارشناس ارشد

^۳ - دانشیار

^۴ - دانشیار

۱- مقدمه

بیم ذرات برای اولین بار توسط مورفی و ستارس تولید شد. علاقه روزافزون در دهه اخیر به این روش به دلیل آسانی اندازه‌گیری ذرات در روی خط بیم متمرکز شده و نیز مشخص شدن آسان ترکیب شیمیایی ذرات است. این اندازه‌گیری‌ها برای تشخیص ذرات اصلی اتمسفر و تأثیر آنها به سلامت عمومی جهانی یک امر ضروری می‌باشد [۱].

سنجش لحظه‌ای اندازه ذرات و آنالیز خواص شیمیایی ذرات، نیاز به استفاده از بیم ذراتی که جهت و واگرایی آن کنترل شده است، دارد. در این روش بیم ذرات به وسیله انبساط ذرات معلق در گاز از میان یک یا چندین اریفیس به وجود می‌آید. زمان پرواز ذرات (TOF) در مسافت مشخصی به وسیله پراکنش نور به دست می‌آید و از این طریق سرعت حدی ذرات تعیین شده و نیز اندازه ذرات استنباط می‌شود. ذرات بزرگ دارای سرعت کمی بوده ولی ذرات کوچک تندتر حرکت می‌کنند.

در اثر وجود لنز، ذرات در نزدیکی محور حرکت می‌کنند و اگر اندازه ذرات کمتر از مقدار بحرانی باشد ذرات می‌توانند خیلی به محور لنز نزدیک شوند. از این رو ذرات، وابسته به نیروی درگ شعاعی که می‌بینند در طول لنز در نزدیکی محور باقی می‌مانند و تشکیل یک بیم نازک ذرات در پایین دست لنز را می‌دهند. فاکتور اصلی که مینیمم عرض بیم ذرات را محدود می‌کند حرکت براونی و نیروی لیفت بر روی ذرات در طول لنز آیرودینامیکی است. حرکت براونی بر روی همه نوع ذره با قطرهای کم اثر می‌کند ولی نیروی لیفت تنها بر روی ذرات غیر کرووی تأثیر می‌گذارد که اغلب، خیلی بزرگ‌تر از تأثیر حرکت براونی است. در پایین دست نازل گاز حامل به تندی انبساط پیدا می‌کند در حالی که ذرات معلق میل به باقی ماندن در مسیری هستند که در طول حرکت در نازل به دست آورده‌اند. ذرات در طول شتاب گیری در نازل در نتیجه اینرسی زیادشان یک بیم ذرات را به وجود می‌آورند.

۲- مروری بر کارهای قبلی

رائو و همکارانش با کیویت و همکارانش فهمیدند که جریان لایه‌ای کیفیت بیم را افزایش می‌دهد [۲]. لیو و همکارانش برای اولین بار از یک سری اریفیس‌های هم‌مرکز (که تحت عنوان سیستم لنز آیرودینامیکی نیز شناخته می‌شوند) برای تمرکز ذرات

معلق در گاز استفاده کردند [۳]. کارهای قبلی به وسیله لیو و همکارانش و طبقه‌بندی‌های جدید به وسیله جین و همکارانش نشان می‌دهد که تکنولوژی، واگرایی بیم را کاهش می‌دهد. اسکرینر و همکارانش از لنزهای آیرودینامیکی در مواردی که فشار محیط کم است مانند تحقیقات لایه جو استراتوسفوریک استفاده کردند [۴].

کوفنگ ژانگ و همکارانش ذرات داخل لنز تکی را به صورت عددی، با فرض ضریب کانینگهام ثابت حل کردند و متوجه شدند که ماکزیمم انحراف مسیر خطوط ذرات از مسیر خطوط جریان در عدد استوکس نزدیک به یک رخ خواهد داد. آنها دریافتند که هندسه بی بعد لنز و عدد رینولدز جریان دو پارامتر مهم در همگرایی ذرات هستند [۵].

۳- معادلات حاکم

اگر جریان، در رژیم لایه‌ای بوده و ذرات به صورت کرووی فرض شود شتاب محلی یک ذره در سیال توسط معادله زیر به دست می‌آید [۶]:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{U - U_p}{\tau} \quad (1)$$

به طوری که U_p سرعت ذره، U سرعت جریان سیال و τ زمان وقفه ذره می‌باشد. نیروهای وارد بر ذرات در جریان گاز رقیق به این صورت به دست می‌آید:

$$\frac{dv_p}{dt} = F_D + F_B + \frac{g(\rho_p + \rho)}{\rho_p} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\rho_p D_p^2 C_c}{18\mu f_d} \quad (3)$$

که در آن‌ها، v_p بردار سرعت ذره، F_D نیروی درگ بر واحد جرم، F_B نیروی براونی بر واحد جرم، g شتاب جاذبه، ρ چگالی گاز، ρ_p چگالی ذرات، f_d ضریب تصحیح عدد رینولدز ذره، D_p قطر ذره، μ ویسکوزیته سیال و C_c ضریب تصحیح استوکس-کانینگهام می‌باشند.

۴- نیروی درگ

نیروی درگ استوکس بر واحد جرم شامل تصحیحات کانینگهام توسط معادله زیر داده می‌شود:

$$F_D = \frac{18\mu f_d}{\rho_p D_p^2 C_c} (V - V_p) = \frac{(V - V_p)}{\tau} \quad (4)$$

از طرفی، فاکتور C_c ضریب تصحیح استوکس کانینگهام می‌باشد که اثر مسافت پویس آزاد مولکولی^۲ را اعمال می‌کند. این فاکتور

استفاده از رابطه زیر بررسی می‌شود:

$$F_{bi} = G_i \sqrt{\frac{\pi S_{nn}}{\Delta t}}, \quad (13)$$

که در آن S_{nn} از معادله (۱۰) به دست می‌آید. نیروی براونی باعث جابه‌جایی ذرات به مقدار $U\Delta t$ می‌شود که در آن U یک عدد تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. عدد استوکس ذرات به این صورت تعریف می‌شود:

$$S = \frac{\tau_0 U_0}{L_0} = \frac{\rho_p D_p^2 C_{Co} U_0}{18 \mu_0 L_0}, \quad (14)$$

به طوری که U_0 سرعت مشخصه جریان و L_0 طول مشخصه می‌باشد و بقیه مقادیر بالا با زیرنویس صفر مربوط به مقادیر پایه در شرایط بالا دست جریان (جایی که ذرات با جریان سیال در تعادل می‌باشد) است.

۶- ضریب تصحیح کانینگهام متغیر

ضریب تصحیح لغزشی کانینگهام به عدد نادسون یا پویش آزاد متوسط گاز وابسته بوده و پویش آزاد گاز به فشار گاز وابسته است. وقتی که ضریب تصحیح کانینگهام ثابت استفاده می‌شود پویش آزاد مولکولی که تابعی از فشار گاز است نیاز به ارزیابی دارد. مالینا و همکارانش فشار خروجی نازل را برای ارزیابی ضریب تصحیح کانینگهام به کار بردند ژانگ و همکارانش یک فشار متوسط برای ارزیابی ضریب تصحیح کانینگهام ثابت برای مطالعات متمرکز سازی به کار بردند. در حالت‌هایی که فشار تغییرات زیادی داشته باشد محدوده تغییرات ضریب تصحیح کانینگهام نیز زیاد می‌شود و یک ضریب تصحیح ثابت برای همه میدان حل جریان سیال کافی نیست. از طرفی نرم‌افزار فلونتت به صورت پیش فرض تنها برای ضریب تصحیح کانینگهام ثابت مجاز می‌باشد. در اینجا برای اجتناب از محدودیت‌های نرم‌افزار، از امکان برنامه‌نویسی نرم‌افزار استفاده شده و یک کد برای آنالیز نیروهای وارد بر ذرات معلق در سیال و مسیر ذرات در یک ناحیه با تغییرات زیاد فشار نوشته شده است [۵].

۷- معادلات حاکم بر جریان لغزشی

برای در نظر گرفتن اثرات غیر تعادلی محلی نزدیک جداره در جریان لغزشی، می‌بایست شرط مرزی لغزش^۲ به طور فیزیکی و معقولی اعمال شود. در سال ۱۸۲۷ ناویر برای اولین بار این فیزیک را فرموله کرد. سرعت لغزشی مماسی برابر است با تنش

زمانی مهم و مؤثر می‌شود که قطر ذره D_p به فاصله آزاد مولکولی گاز^۱ λ (فاصله میانگینی که هر مولکول هوا پس از برخورد با مولکولی دیگر طی می‌کند تا با مولکولی دیگر برخورد کند) نزدیک شود. C_c ضریب تصحیح استوکس کانینگهام به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{D_p} \left[1.257 + 0.4 \exp(-1.1 \left(\frac{D_p}{2\lambda} \right)) \right], \quad (5)$$

Kn_p عدد نادسن ذره می‌باشد که برابر است با:

$$Kn_p = \frac{2\lambda}{D_p}, \quad (6)$$

$$\lambda (\mu m) = \frac{23.1T}{P}. \quad (7)$$

f_d ضریب تصحیح اثر عدد رینولدز ذره می‌باشد که توسط توروبین در سال ۱۹۵۹ به صورت زیر به دست آمد:

$$f_d = 1 + 0.15 Re_p^{0.687}, \quad (8)$$

که Re_p عدد رینولدز ذره می‌باشد، یعنی:

$$Re_p = \frac{\rho(U-U_p)D_p}{\mu}. \quad (9)$$

۵- نیروی براونی

وقتی که ذره کوچکی در یک سیال معلق می‌شود، در معرض ضربات تصادفی نامتوازن مولکول‌های گاز قرار می‌گیرد. این پدیده موجب می‌شود که ذرات نانو در یک مسیر نامنظم حرکت کنند که با نام حرکت براونی شناخته می‌شود. ضربات تصادفی مولکول‌ها را می‌توان با یک فرایند تصادفی نویز سفید گوسی مدل کرد. نویز سفید یک فرایند تصادفی گوسی با میانگین صفر و طیف توانی ثابت است که به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

$$S_{nn} = \frac{2kT\beta}{\pi m} \quad \text{و} \quad \beta = \frac{3\pi\mu D_p f_d}{C_{cm} p} = \frac{1}{\tau}, \quad (10)$$

که $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ثابت بولتزمن است و τ زمان آسایش ذره می‌باشد. فرایند شبیه‌سازی حرکت براونی با در نظر گرفتن ضریب تصحیح کانینگهام متغیر، با یک کد کامپیوتری انجام می‌شود. برای شروع فرایند، یک گام زمانی Δt انتخاب می‌شود (گام زمانی بایستی به اندازه کافی کوچک‌تر از زمان آسایش ذره باشد) سپس یک جفت عدد تصادفی یک شکل U_i (بین ۱-۰) تولید شده و تبدیل به یک جفت عدد گوسی تصادفی با واریانس واحد و میانگین صفر می‌شود. این تبدیل با روابط زیر صورت می‌گیرد:

$$G_1 = \sqrt{-2 \ln U_1} \cos(2\pi U_2), \quad (11)$$

$$G_2 = \sqrt{-2 \ln U_1} \sin(2\pi U_2), \quad (12)$$

دامنه نیروی براونی بر واحد جرم در جهت i در هر گام زمانی با

۸- حل عددی

شرایط ورودی برای لنز را فشار ورودی^۳ با فشار ۲۷۹/۲ پاسکال در نظر می‌گیریم. سرعت ورودی ۲۹ متربرثانی و رینولدز ورودی ۵۱/۴ می‌باشد. دمای ورودی ۳۰۰ کلوین بوده و دیواره در دو حالت دیواره لغزشی و دیواره غیر لغزشی بررسی می‌شود. دیواره به صورت دیواره آدیاباتیک بوده و انتقال حرارت وجود ندارد و در دمای ثابت ۳۰۰ کلوین ثابت نگه داشته می‌شود. ذرات در ورودی لوله لنز با شعاع‌های مختلف تزریق می‌شود و مسیر حرکت و سرعت و فشار و دمای ورودی و خروجی ذرات بررسی می‌شود. ذرات با برخورد به دیواره جذب دیواره می‌شوند. در طول مسیر نیروی درگ بر ذره وارد می‌شود. این نیروی درگ همان نیروی درگ استوکس است که در طول مسیر با تغییر فشار و دما تغییر می‌کند. ژوفنگ ژانگ در تحلیل‌هایشان نیروی درگ وارد بر ذره در طول مسیر را به صورت ضریب ثابتی از عدد استوکس کانینگهام ثابت در نظر گرفتند. حال اینکه در این مقاله عدد استوکس متغیر گرفته می‌شود. چون عدد استوکس به فاصله آزاد مولکولی ربط دارد و فاصله آزاد مولکولی به فشار و دمای گاز حامل وابسته است و چون فشار به طور چشمگیری در طول لنز تغییر می‌کند ثابت گرفتن ضریب کانینگهام در محاسبه نیروی درگ وارد بر ذره خطای زیادی وارد می‌کند. که این خطا با افزایش تغییرات فشار به صورت تابع توانی رشد می‌یابد. و باعث به وجود آمدن خطای محاسباتی در محاسبه همگرایی ذرات توسط لنزها می‌شود.

همانطور که در کانتورهای شکل ۱ دیده می‌شود لنزها مانند یک اریفیس عمل کرده و باعث گرادیان شدید فشار در حین عبور از اریفیس برای جریان می‌شود که این گرادیان شدید باعث به وجود آمدن تغییرات زیادی در سرعت و چگالی سیال می‌شود.

۹- بررسی قطر ذرات در همگرایی بیم ذرات

در شکل‌های زیر مسیر حرکت ذرات با قطرهای مختلف و چگالی مختلف در داخل لنز آیرودینامیکی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ذرات با قطر کم به دلیل اینرسی کم، کمتر از مسیر خطوط جریان منحرف می‌شود و شعاع بیم تشکیل شده توسط این ذرات بیشتر است و تقریباً، ذرات خطوط جریان را به طور مناسبی دنبال می‌کنند با افزایش قطر ذرات، به دلیل اینکه سرعت شعاعی سیال در قبل از لنز آیرودینامیکی به مراتب بیشتر از سرعت شعاعی در بعد از لنز آیرودینامیکی است و به عبارتی سیال

برشی مماسی در محل تماس سیال و دیواره، به عبارت دیگر:

$$u_{t \text{ wall}} \approx \alpha \tau_{t \text{ wall}}, \quad (15)$$

که α یک ثابت در این رابطه در نظر گرفته شده است. بعدها ماکسول در سال ۱۸۷۹ با استفاده از تئوری جنبشی گازها نشان داد که $\alpha \approx \lambda/\mu$. برای یک گاز کامل، مسافت آزاد میانگین توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi p d_m^2}. \quad (16)$$

در این رابطه k ثابت بولتزمن، T دمای گاز و d_m قطر مولکول‌های گاز است. جهت احتساب اثر دینامیکی ناشی از برخورد و بازتاب مولکول‌ها به جداره جامد، برخورد و بازتاب آنها را به دو دسته بازتابی و پخشی^۱ تقسیم می‌نماییم. حالت اول در مورد سطوح ایده‌ال کاملاً صیقلی پیش می‌آید که در آن هر ذره بنیادی گاز با هر زاویه‌ای که به سطح برخورد می‌کنند با همان زاویه نیز بازتاب می‌نماید و از روی سطح بلند می‌شود. در حالت دوم (برخورد پخشی) که در مورد سطوح واقعی و غیر صیقلی و زبر و دارای ناهمواری ایجاد می‌گردد، ذرات با زوایایی غیر مرتبط با زاویه برخورد بازتابش می‌کند. اسکاف و کمبری (۱۹۶۱) پیشنهاد کردند تا اثر نوع بازتاب ذرات برخوردی به وسیله ضرب فاکتور $\frac{2-\sigma}{\sigma}$ در ثابت α در فیزیک مسئله داخل شود. در این رابطه σ ضریب همسازی مومنتم مماسی^۲ می‌باشد. با اعمال این ضرایب، سرعت مماسی گاز در روی دیواره به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$u_{t \text{ wall}} = \left(\frac{2-\sigma}{\sigma}\right) \frac{\lambda}{\mu} \tau_{t \text{ wall}}. \quad (17)$$

معادله (۱۷) از طریق پارامترهای σ و λ سرعت لغزش مماسی را با تنش برش مماسی مرتبط می‌کند. با توجه در رابطه مقیاس طولی مرجع جریان L ، معادل است با نسبت یک خاصیت ترمودینامیکی جریان (نظیر دما یا چگالی) به گرادیان مکانی آن خاصیت. به عبارت دیگر، L می‌تواند مساوی با یک بعد طولی از هندسه جریان در نظر گرفته شود. برای جریان هم‌دما و تراکم‌پذیری که در اینجا مطالعه می‌شود، شعاع لنز آیرودینامیکی به عنوان مقیاس طولی مرجع جریان اتخاذ می‌شود. با استفاده از تعریف عدد نادسن معادله (۱۷) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$u_{t \text{ wall}} \approx \left(\frac{2-\sigma}{\sigma}\right) k_n \frac{d}{2\mu} \tau_{t \text{ wall}}, \quad (18)$$

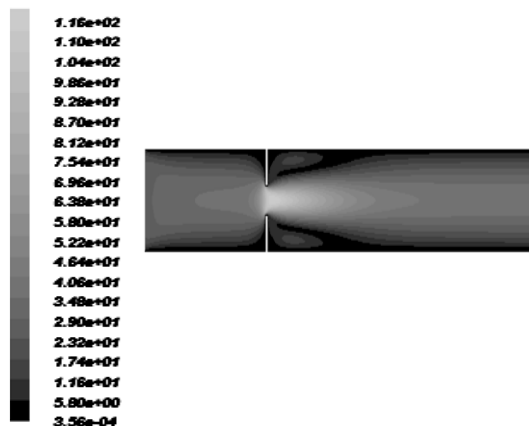
1- Specular and Diffusive

2- Tangential Momentum Accommodation Coefficient (TMAC)

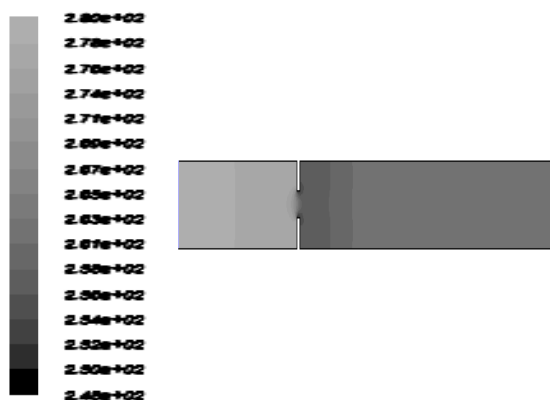
کرده و خود را به خطوط جریان زیر محور لنز می‌رسانند و رفته‌رفته نیروی اینرسی خود را از دست داده با خطوط جریان همراه می‌شوند. در این حالت ذرات دارای ضریب همگرایی (نسبت فاصله شعاعی خروجی ذرات در بعد از لنز به فاصله شعاعی ورودی ذرات در قبل از لنز) منفی هستند. یعنی فاصله شعاعی خروجی ذرات در بعد از لنز در جهت منفی است. با افزایش دوباره قطر ذرات، نیروی اینرسی بیشتر شده، و باعث می‌شود. جریان سیال نتواند ذرات را با خود همراه کرده، و از داخل لنز عبور دهد. در این حالت ذرات به دلیل اینرسی خیلی زیاد مسیر مستقیم قبل از لنز را ادامه داده و به دیواره لنز برخورد کرده و از بین می‌روند و فقط ذراتی که در قبل از لنز در نزدیکی محور قرار دارند، باقی می‌مانند و کمی همگرا می‌شوند.

۱۰- بررسی چگالی ذرات بر روی همگرایی بیم ذرات

تأثیر تغییرات چگالی سیال بر روی همگرایی بیم ذرات همانند تأثیر تغییرات قطر ذرات بر روی همگرایی بیم ذرات می‌باشد. یعنی ذرات با چگالی خیلی کم خطوط جریان را دنبال کرده و همگرا نمی‌شوند. مثلاً ذرات آرگون به دلیل چگالی کمی که دارند مانند گاز عمل کرده و در طول خطوط جریان گاز حامل حرکت می‌کنند. البته روش‌هایی برای همگرایی ذرات با چگالی کم نیز وجود دارد که در آن از گازهای با چگالی کم استفاده می‌شود. مثلاً از گاز هلیوم یا هیدروژن برای ذرات سبک استفاده می‌شود. البته به دلیل خاصیت اشتعالی زیاد هیدروژن بیشتر از گاز هلیوم استفاده می‌شود. ذرات با چگالی متوسط همانند ذرات با قطر متوسط عمل کرده و بسته به مقدار چگالی ذره و قطر ذره و شرایط سیال حامل، بیم ذرات با قطرهای متفاوت را تشکیل می‌دهند. اما ذرات با چگالی زیاد، مانند ذرات با قطر زیاد، به دلیل وزن زیادی که دارند انرژی جنبشی زیادی پیدا کرده و نمی‌توانند خطوط جریان را در قبل از نازل همراهی کرده و از داخل لنز عبور کنند و با برخورد به دیواره لنز از بین می‌روند. در شکل ۲ حرکت ذرات در داخل لنز نشان داده شده است. ذرات با چگالی و قطر مختلف از ورودی تزریق شده و مسیر ذرات در طول سیستم لنز آیرودینامیکی نشان داده شده است. برای همه این شکل‌ها قطر محفظه لنز ۱۰ میلی‌متر بوده و شرایط مرزی ورود و خروج و دمای سیال به صورت $P_{up}=279.2\text{Pa}$, $P_{down}=260\text{Pa}$, $T_g=300\text{K}$, $Re_0=51.4$, $V_0=29\text{ m/s}$ می‌باشد و دیواره نیز آدیاباتیک در نظر گرفته شده و در دمای ثابت ۳۰۰ کلوین نگهداری می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) کانتور سرعت (ب) کانتور فشار استاتیکی $id=3$ mm, $P_{up}=280\text{Pa}$, $P_{down}=240\text{Pa}$, $T_g=300\text{K}$, $Re_0=51.4$, $V_0=29\text{ m/s}$.

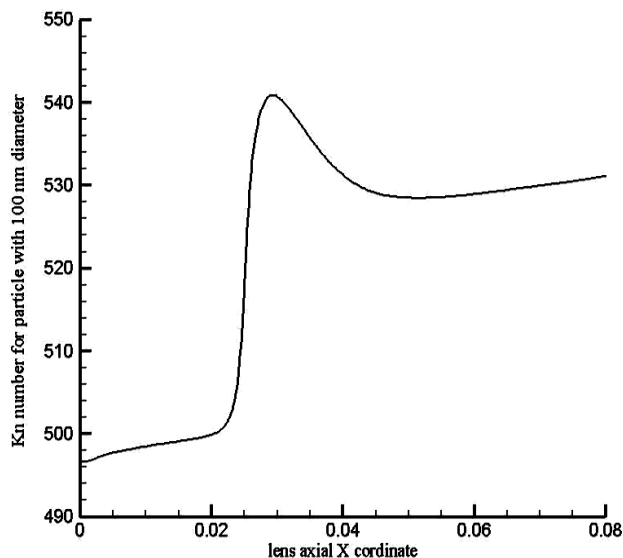
قبل از لنز آیرودینامیکی سیال به تندی همگرا می‌شود، در صورتی که بعد از لنز آیرودینامیکی به آرامی واگرا می‌شود. این همگرایی و واگرایی سیال، در جهت شعاع لنز آیرودینامیکی بر ذرات نیرو وارد می‌کند. در چنین حالتی ذرات در قبل از لنز آیرودینامیکی نیروی اینرسی بیشتری نسبت به بعد از لنز آیرودینامیکی به دست می‌آورند و در طول لنز آیرودینامیکی از مسیر خطوط جریان منحرف می‌شوند. بسته به قطر ذرات، بیم ذرات همگرایی خاصی پیدا می‌کنند. ذرات با قطر متوسط در طول لنز آیرودینامیکی از مسیر خود منحرف شده و وقتی به محور لنز آیرودینامیکی و یا نزدیک محور لنز آیرودینامیکی می‌رسند نیروی شعاعی خود را از دست می‌دهند و در راستای خطوط جریان واقع در محور لنز حرکت کرده، بیم نازکی تشکیل می‌دهند. این ذرات را در مراحل بعدی می‌توان شناسایی کرد. وقتی که ذرات بزرگ می‌شود دو حالت رخ خواهد داد. در ابتدا ذرات به دلیل اینرسی زیادی که پیدا می‌کنند از محور لنز عبور

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود نیروی براونی یک مسیر کاملاً تصادفی برای ذرات به وجود می‌آورد ذرات با قطرهای کم در مسیر حرکت خود یک حرکت براونی نیز دارند و این حرکت در نزدیکی دیواره باعث برخورد ذرات به دیواره محفظه لنز شده و باعث از بین رفتن ذرات می‌شود.

۱۲- عدد نادسون ذرات و دیواره لنز

برای ذرات بسیار ریز، که ابعاد ذره قابل مقایسه با مسافت پویس آزاد مولکولی است سرعت لغزشی بین ذره و سیال ایجاد خواهد شد. مقدار Cc به ازاء $kn < 0.1$ تقریباً یک است در حالیکه برای $kn > 0.5$ به شدت تغییر می‌کند.

برای عدد نادسون کوچک‌تر از 0.1 فرضیات پیوسته بودن سیال صادق بوده و سیال در تعادل ترمودینامیکی محلی قرار دارد و می‌توان از معادلات ناویر-استوکس بدون در نظر گرفتن دیواره لغزشی برای به‌دست آوردن رفتارهای محلی سیال استفاده کرد. وقتی که عدد نادسون بین $0.1 - 1$ قرار دارد رژیم جریان در محدوده رژیم رقیق قرار دارد و این محدوده متعلق به محدوده رژیم جریان لغزشی است.

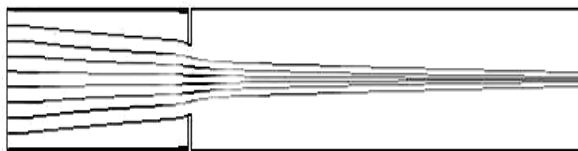


شکل (۴): تغییرات عدد نادسون ذره به قطر ۱۰۰ نانومتر که در طول لنز و بر روی محور مرکزی حرکت می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود تغییرات عدد نادسون در حین عبور از لنز زیاد است لیبو و همکارانش در بررسی‌های خودشان متوسط این تغییرات را در نظر گرفتند که معتبر



ذرات آرگون به قطر ۵۰۰ نانومتر

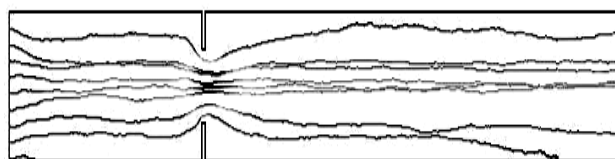


ذرات به قطر ۵۰۰ نانومتر با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

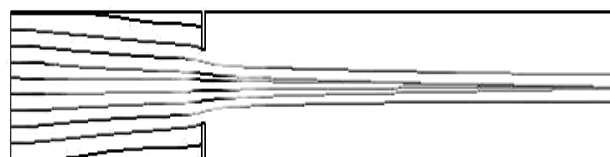
شکل (۲): خطوط مسیر ذرات داخل لنز تکی با $OD=10\text{ mm}$ و $P_{up}=279.2\text{ pa}$, $P_{down}=260\text{ Pa}$, $T_g=300\text{ k}$ ، $id=3\text{ mm}$ شرایط مرزی $Re_0=51.4$, $V_0=29\text{ m/s}$.

۱۱- تأثیرات نیروی براونی بر همگرایی ذرات

وقتی یک ذره ریز در محیط سیال در حالت تعلیق است، مدام تحت اثر نیروهای ناشی از برخورد ذره جامد با مولکول‌های گاز یا مایع است. در شکل ۳ اعمال نیروی براونی بر روی ذرات با قطرهای مختلف نشان داده شده است. وقتی که نیروی براونی بر ذرات اعمال می‌شود به دلیل تصادفی بودن نیروی براونی اعمال شده، ذرات در مسیر تصادفی حرکت می‌کنند و باعث واگرایی بیم ذرات می‌شوند و این واگرایی که بر اثر حرکت براونی به‌دست می‌آید در ذرات کوچک مشهودتر است.

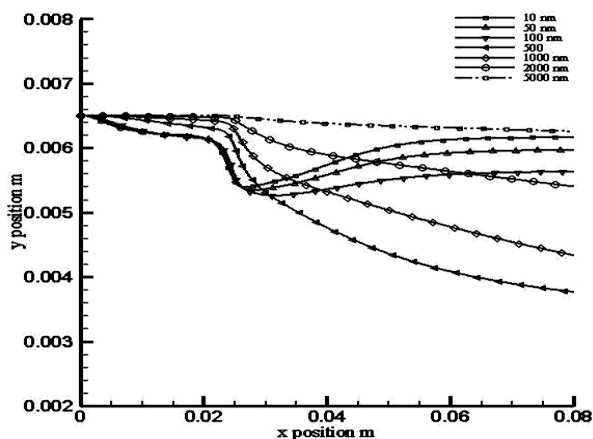


ذرات به قطر ۵۰ نانومتر با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با اعمال نیروی براونی



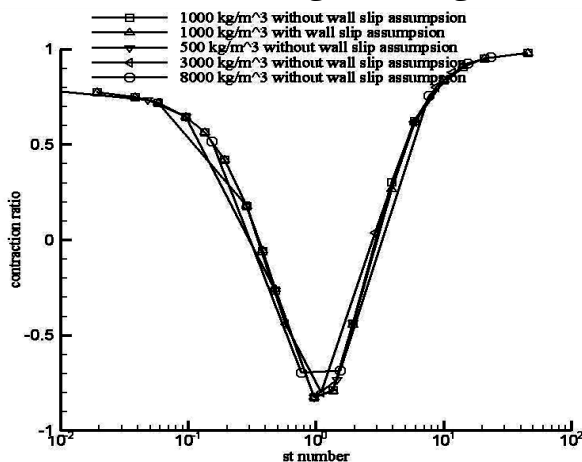
ذرات به قطر ۵۰۰ نانومتر با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با اعمال نیروی براونی

شکل (۳): شماتیک حرکت ذرات به قطر ۵ و ۵۰ و ۵۰۰ نانومتر در داخل لنز تکی با اعمال نیروی براونی بر آنها.



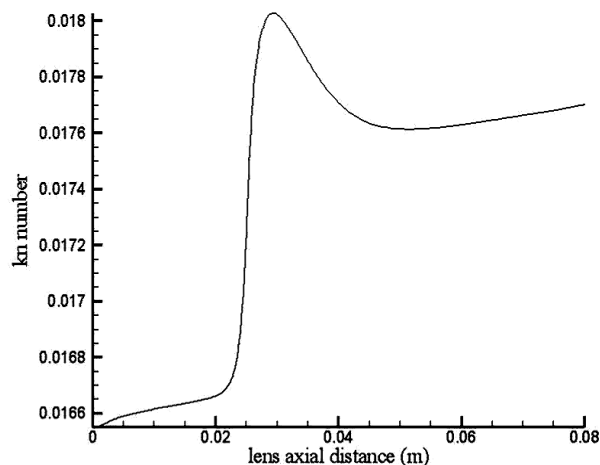
شکل (۶): شماتیک مسیر حرکت ذرات با قطرهای مختلف (از فاصله ۱/۵ میلی متری محور تزریق شده) در داخل لنز آیرودینامیکی به قطر ۱۰ میلی متر.

تغییرات در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان طور که دیده می شود در دو حالت عدد استوکس بهینه می شود و در این حالت لنز بهترین تمرکز را انجام خواهد داد. در عدد استوکس برابر با ۱ که عدد استوکس بحرانی است بیشترین پراکندگی ذرات صورت گرفته، و در قسمت منفی محور لنز رخ می دهد. بعد از این نقطه دوباره ذرات به دلیل افزایش اینرسی بیشتر از مسیر خود به سختی منحرف می شوند و در عدد استوکس بهینه دوم به دومین ضریب همگرایی بهینه خود می رسند.



شکل (۷): تغییرات ضریب همگرایی ذرات با تغییرات عدد استوکس برای ذرات با وزن های مختلف و تزریق از ۱/۵ میلی متری محور.

نمی باشد البته در جایی که عدد ناسون نزدیک به ۰/۰۱ است انتخاب متوسط عدد ناسون می تواند درست باشد. ولی در اکثر لنزهای آیرودینامیکی این عدد بزرگ تر از ۰/۰۱ است

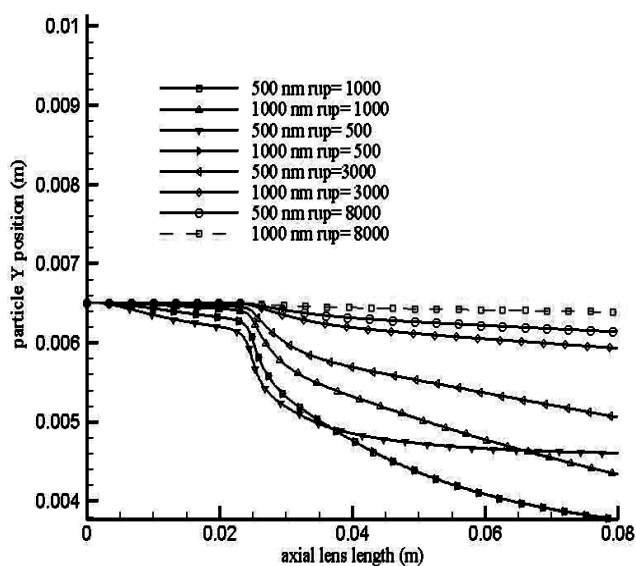


شکل (۸): تغییرات عدد ناسون در طول محور لنز برای قطر داخلی ۳ میلی متر و فشار خروجی ۲۶۱ پاسکال.

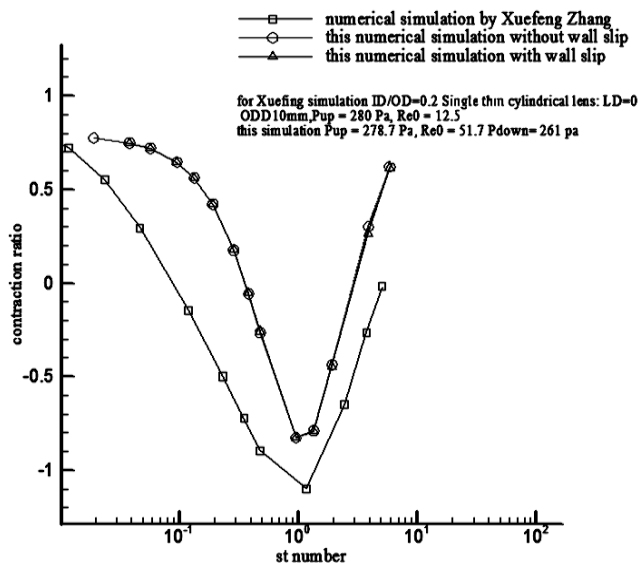
در شکل ۶ شماتیکی از مسیر حرکت ذرات با قطرهای مختلف نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود ذرات کوچک مسیر جریان را دنبال کرده و همگرا نمی شوند. ذرات خیلی بزرگ نیز به واسطه اینرسی خیلی زیادشان با چرخش جریان از مسیر خود منحرف نمی شوند و به مسیر خود ادامه می دهند و بنابراین آنها نیز همگرا نمی شوند. ذرات به قطر ۵۰ الی ۲۰۰ نانومتر بهترین همگرایی را دارند. ذرات به قطر ۱۰۰۰ - ۱۳۰۰ نانومتر نیز در این هندسه و این شرایط خاص بهترین تمرکز را دارا هستند که البته تمرکز ذرات بین محدوده ۱۰۰۰ الی ۱۳۰۰ از نوع ضریب همگرایی منفی است. ذرات به قطرهای متوسط در حدود ۷۰۰-۴۰۰ بعد از عبور از لنز به واسطه اینرسی از مسیر خود منحرف می شود و بعد از لنز دیگر به مسیر خود برنگشته، باعث پراکندگی ذرات می شوند. برخی از این ذرات به دیواره پایین لوله لنز برخورد کرده و از بین خواهند رفت.

۱۳- بررسی همگرایی ذرات

ضریب همگرایی ذرات با تغییر عدد استوکس تغییر می کند. این



شکل (۹): شماتیک حرکت شعاعی ذرات با تغییرات قطر ذرات برای ذرات با وزن‌های مختلف و تزریق از ۱/۵ میلی‌متری محور.



شکل (۸): تغییرات ضریب همگرایی ذرات با تغییرات عدد استوکس برای ذرات با وزن‌های مختلف و تزریق از ۱/۵ میلی‌متری محور.

۱۴- نتایج و بحث

در این مقاله ذرات به اندازه‌هایی از ۱۰ تا ۵,۰۰۰ نانومتر و برای چگالی ذرات از ۵ تا ۱,۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. با بررسی عدد استوکس ذرات متوجه می‌شویم که جریان سیال در محدوده رژیم لغزشی قرار دارد. اعمال فرض لغزش روی دیواره، که با UDF نویسی انجام می‌شود بسته به مقدار عدد نادسون جریان سیال، باعث افزایش سرعت جریان در داخل لنز می‌شود. سپس با کدنویسی (UDF)، تصحیح کانینگهام روی درگ استوکس اعمال شده و لغزش روی ذرات لحاظ می‌شود. جریان تراکم‌پذیر فرض شده است. تزریق و دنبال کردن ذرات با روش لاگرانژی بررسی می‌شود. نتایج عددی برای سرعت، ضریب انقباض و قطر بیم ذرات با نتایج مقالات دیگر مقایسه شده و نزدیکی بین آنها نشان داده شده است. نیروی براونی بر روی ذرات کوچک، تأثیر می‌گذارد ولی بر روی ذرات بزرگتر می‌توان از این تأثیر چشم پوشی کرد. نیروی براونی باعث پراکندگی ذرات کوچک شده و از متمرکز شدن ذرات و تشکیل بیم جلوگیری می‌کند. در این مقاله ضریب تصحیح کانینگهام با تغییر مسافت پویس آزاد مولکولی تغییر می‌کند که تا حد زیادی جوابها را بهبود بخشیده است.

بعد از آن به دلیل افزایش هر چه بیشتر اینرسی، ذرات در برابر چرخش جریان از خود مقاومت نشان داده و به مسیر خود ادامه می‌دهند و همگرایی رخ نمی‌دهد. در شکل ۸ این کار با کاری از لیو تحت شرایط مشابه مورد مقایسه قرار گرفته است. و دیده می‌شود در عدد استوکس بهینه همگرایی این کار بیشتر از همگرایی کار لیو می‌باشد در هر دو کار عدد استوکس بهینه تقریباً یک می‌باشد.

نیروی اینرسی ذرات تابعی از وزن بر واحد حجم و یا چگالی ذرات می‌باشد. ذرات با چگالی زیاد زودتر همگرا می‌شوند و می‌توان ذرات با چگالی بالا و قطر کم را به مانند ذرات با چگالی کم و قطر زیاد متمرکز کرد. مسیر حرکت ذرات با تغییر وزن و قطر ذرات در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود ذرات به قطر ۵۰۰ نانومتر و چگالی‌های ۵۰۰ و ۳,۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب که اولی دارای ضریب همگرایی مثبت و دومی دارای ضریب همگرایی منفی خوبی می‌باشند و نیز ذرات به قطر ۱,۰۰۰ نانومتر و چگالی ۱,۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب دارای ضریب تمرکز خوبی هستند. ذرات به قطر ۱,۰۰۰ نانومتر و چگالی ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ضریب همگرایی منفی و ذرات به قطر ۱,۰۰۰ نانومتر و چگالی ۸,۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ضریب همگرایی مثبت بدی را دارا هستند.

۱۵- مراجع

1. Israel, G. W., and Friedlander", S.K. "High Speed Beams of Small Particles", J. Colloid Interface Sci. Vol. 24, pp. 330-337, 1998.
2. Kievit, O., Weiss, M., Verheijet, P.J.T., Marijnissen, J.C. M., and Scarlett, B. "The OnLine Chemical Analysis of Single Particles, Using Aerosol Beams and Time of Flight Mass Spectrometer ", Chem Eng. Comm., Vol. 151, pp. 79-100, 1996.
3. Liu, P., Ziemann, P.L., Kittelson, D.B. and McMurry, P.H. "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions", Aerosol Sci. Tech., Vol. 22, pp. 293-313, 1995.
4. Jayne, J.T., Leard, D.L., Zhang, X., Davidovits, P., Smith, K. A., Kolb, C. E., and Worsnop, D.R. "Development of an Aerosol Mass Spectrometer for Size and Composition Analysis of Submicron Particles", Aerosol Sci. Tech., Vol. 33, pp. 49-70, 2000.
5. Zhang, X. "A Numerical Characterization of Particle Beam Collimation by an Aerodynamic Lens-Nozzle System: Part I. An Individual Lens or Nozzle". Aerosol Science and Technology, Vol. 36, pp. 617-631, 2002.
6. Nikbakht, A., Abouali, O., and Ahmadi, G. "Nano-Particle Beam Focusing in Aerodynamic Lenses - an Axisymmetric Model", Scientia Iranica, Vol. 14, No. 3, pp. 263-272, 2007.
7. Ahmadi, G. "Developing Supersonic Impactor and Aerodynamic Lens for Separation and Handling of Nano-Sized particles", Scientia Iranica, Vol. 18, No. 2, pp. 185-198, 2008.
8. Peter, S.K. and Liu, R.D., "Transmission Efficiency of an Aerodynamic Focusing Lens System: Comparison of Model Calculations and Laboratory Measurements for the Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer", Aerosol Science and Technology, Vol. 35, No. 2, pp. 265-280, 2010.
9. Lee, J.W, Yi, M.Y., and Lee, S.M. "Inertial Focusing of Particles with an Aerodynamic Lens in the Atmospheric Pressure Range", Aerosol Science and Technology, Vol. 28, No. 3, pp 225-240, 2002.
10. Wang, X., Kruis, F.E., and McMurry, P.H. "A Design Tool for Aerodynamic Lens Systems", Aerosol Science and Technology, Vol. 39, pp. 624-636, 2005.
11. Dahneke, B.E, and Flachsbar, H. "An Aerosol Beam Spectrometer", Journal of Aerosol Science, Vol. 3, pp. 345-349.
12. Murphy, W.K., and Sears, G.W. "Production of Particle beams" Journal of Applied Physics, Vol. 85, pp. 1986-1987, 1995.
13. Liu, P., Ziemann, P.L., Kittelson, D.B., and McMurry, P.H. "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions", Aerosol Sci. Tech., Vol. 22 pp. 293-313, 1995.