

## بررسی رفتار حرکت ذرات نانو در مدل‌های سه بعدی و متقارن محوری در عبور از یک لنز آیرودینامیک مرکب و مقایسه با مدل‌های کاربردی

فرهاد رئیس‌زاده دهکردی<sup>۱</sup>، عباس نیکبخت<sup>۲</sup>  
Farhadreisizadeh@yahoo.com

### چکیده

در این تحقیق بین مدل‌سازی‌های سه بعدی و متقارن محوری برای حرکت ذرات در عبور از یک لنز آیرودینامیک و همچنین بین این مدل‌ها و مدل‌های معروف وانگ و لیو مقایسه‌ای انجام شده است. برای این منظور راندمان نفوذ ذرات، زاویه واگرایی پرتو و سرعت ذرات با مدل‌های وانگ و لیو مقایسه شده است. مدل هندسی مورد استفاده برای لنز آیرودینامیک نسبت به تحقیق گذشته کاملتر و منطبق با مدل‌های عملی انتخاب شده است. با توجه به غلظت کم ذرات فرض تقابل یک طرفه بین سیال و ذره استفاده شده است به این معنی که حرکت ذرات تاثیری بر میدان جریان نخواهد داشت. مسیر حرکت ذرات برای ذرات با قطرهای ۱، ۲، ۶، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ نانومتر بررسی شده است. کسر تراکمی شعاعی که میزان واگرایی ذرات نسبت به محور سیستم را نشان می‌دهد برای قطرهای ۲، ۶، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ در دو مدل سه بعدی و متقارن محوری بدست آمده و با مدل‌های وانگ و لیو مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد ذرات با قطر کمتر بدلیل تاثیرپذیری بیشتر از نیروی براونی از محور بیشتر دور می‌شوند و همین امر موجب بوجود آمدن اختلاف بین نتایج دو مدل سه بعدی و متقارن محوری می‌شود چرا که در مدل سه بعدی ذرات در سه بعد تحت تاثیر این نیرو هستند. این نتایج نشان می‌دهد مدل‌سازی متقارن محوری در مدل‌سازی حرکت ذرات نانو با دقت خوبی همراه نمی‌باشد. همچنین تطابق خوبی میان مدل مورد استفاده و مدل‌های وانگ و لیو مشاهده می‌شود.

### کلیدواژه :

لنز آیرودینامیک- ذرات نانو- مدل‌سازی سه بعدی- مدل‌سازی متقارن محوری - مدل وانگ - مدل لیو

۱- عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد  
۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

## ۱- مقدمه

پرتوهای باریک ذرات با زوایای واگرایی کوچک به طور وسیعی در بسیاری از کاربردها به منظور بالا بردن راندمان انتقال ذرات، بهبود دقت اندازه‌گیری (دستگاههای اندازه‌گیری نیاز به پرتوهای متمرکز از ذرات دارند) یا نشان دادن میکروالگوها (Micropatterns) به صورت دقیق روی زمینه (Substrate) مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال از پرتو ذرات متمرکز اغلب به عنوان ورودی طیف سنج‌های جرمی به منظور هدایت ذرات به ناحیه آنالیز، که در آنجا فشار در حدود یک هشتم فشار اتمسفر است، استفاده می‌شود. پرتوهای باریک همچنین احتمال عبور ذرات از قسمت اعظم شدت پرتو لیزر، که برای بخار کردن یا یونیزه کردن ذرات استفاده می‌شود را افزایش می‌دهند. این پرتوها برای آنالیز مولکولهای سنگین مانند پروتئین‌ها استفاده می‌شوند. از این پرتوها در تولید ریزساختارهای سه بعدی، پرورش یونهای فلزی بزرگ و یا ترکیب مواد که بوسیله آن ذرات برای تولید لایه‌های نازک خیلی صاف روی زمینه می‌نشینند، استفاده می‌شود. متمرکز کردن آیرودینامیکی یکی از مکانیزم‌هایی است که به طور وسیعی برای تولید پرتوهای متمرکز ذرات استفاده شده است.

یک سیستم لنز آیرودینامیک معمولاً شامل سه قسمت است: یک اوریفیس کنترل کننده جریان، لنزهای متمرکز کننده و یک نازل شتاب دهنده، لنز آیرودینامیک اولین بار توسط لیو و همکاران [۱ و ۲] طراحی شد. پنگ لیو و همکاران دستگاه پرتوساز ذرات جدیدی بر اساس تئوری حرکت ذره در لنزهای آیرودینامیک بهمراه نازل انبساطی را طراحی کردند. آنها در کار خود از تعداد لنزهای مختلف (۱ تا ۱۴ عدد) و همچنین قطرهای مختلف (۳/۵ تا ۷ میلیمتر) برای سیستم لنز آیرودینامیک استفاده کردند. زمین و همکاران [۳] برای اندازه‌گیری اندازه ذره در طیف سنج‌های جرمی از سیستم لنز آیرودینامیک استفاده کردند.

شرینر و همکاران [۴] از لنزهای آیرودینامیک برای تولید پرتوهای ذرات به منظور نمونه‌گیری از ذرات معلق در لایه استراتوسفر استفاده کردند.

مالینا و همکاران [۵] از تکنیکهای عددی برای شبیه‌سازی حرکت سیال و ذرات در نازل‌ها استفاده کردند و مکانیزم تشکیل پرتوهای ذرات در نازل‌های موئین و مخروطی را بیان کردند.

تفرشی و همکاران [۶] اثر یک وسیله ساده متمرکز کننده بر روی پرتو ذرات مافوق صوت را بررسی کردند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند.

ابوعلی و احمدی [۷] با استفاده از نرم‌افزار فلوننت جریان هوا و حرکت ذرات در ابعاد میکرو و نانو متر را در داخل یک متمرکز

کننده آیرودینامیکی که شامل چندین لنز، نازل و محفظه بعد از نازل می‌بود را مورد مطالعه قرار دادند. ژانگ و همکارانش [۸] حرکت ذرات در جریان‌های گاز- ذره داخل سیستم لنزهای آیرودینامیک- نازل را با استفاده از نرم افزار FLUENT. مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکارانش [۹ و ۱۰] بر مبنای اطلاعات تجربی و تئوری موجود برنامه‌ای تهیه کرده‌اند که بوسیله آن برای متمرکز کردن ذرات با قطر خاص لنز مناسب را طراحی می‌کند. آنها برای بررسی شرایط لنز طراحی شده از نرم افزار فلوننت برای حل متقارن محوری میدان جریان آرام تراکم‌پذیر لزج استفاده کردند. رئیس زاده و همکاران [۱۱] مدل سازی حرکت ذرات به صورت متقارن محوری و سه بعدی را در یک سیستم ساده تک لنزی ارایه و مقایسه کردند. بیشتر مطالعاتی که تا کنون انجام شده همگی به صورت متقارن محوری صورت گرفته است، ولی در این تحقیق علاوه بر استفاده از دو مدل متقارن محوری و سه بعدی، سیستم چند لنزی بکار گرفته شده و همچنین با مدل های وانگ و لیو مقایسه شده است.

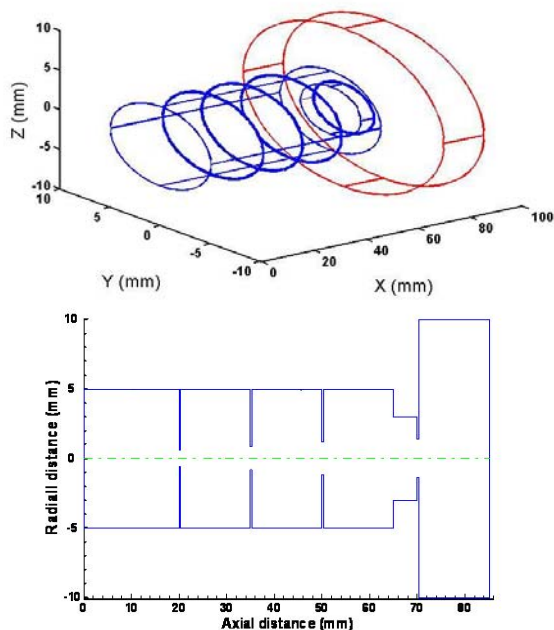
## ۲- فرمول‌ها و روابط

در تحقیق حاضر بمنظور رهایی از محدودیت‌های نرم‌افزارهای تجاری یک کد کامپیوتری برای حل معادلات سه بعدی حرکت ذرات و نیز پیدا کردن مسیر آنها تهیه شده است. جریان سیال در درون لنزها و نازل و پایین دست آنها متقارن محوری می‌باشد، اما حرکت ذرات بخصوص برای ذرات در سایز کوچکتر از ۱۰ nm بصورت سه بعدی می‌باشد.

لازم به اشاره است که برای بدست آوردن میدان جریان در این پژوهش از نرم‌افزار FLUENT استفاده شده است، اما همانطور که قبلاً اشاره شد برای حل معادلات حرکت ذرات یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده است که این برنامه قادر به حل معادلات حرکت ذرات در یک شبکه غیرسازمان یافته دو بعدی ( با المان‌های مستطیلی و مثلثی ) و سه بعدی ( با المان‌های شش وجهی ) می‌باشد.

در این قسمت به بیان مراحل انجام کار برای حل میدان جریان و محاسبه مسیر ذره می‌پردازیم. در مرحله اول شبکه عددی مورد نیاز با نرم‌افزار GAMBIT تولید می‌شود، سپس با استفاده از نرم‌افزار FLUENT میدان جریان بدست می‌آید. اطلاعات لازم برای حل معادله حرکت ذره (از قبیل اطلاعات هندسی شبکه، سرعتها، دما، فشار و ...) با فرمت نرم‌افزار TECPLOT از نرم‌افزار FLUENT بدست می‌آید. در این مرحله با استفاده از این فایلها و برنامه‌های کامپیوتری که تهیه شده دو فایل دیگر یکی برای مشخص کردن مرزها و دیگری برای مشخص کردن سلولهای مجاور ایجاد می‌شود.

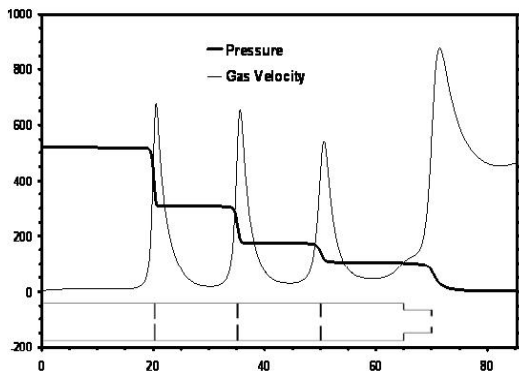
قرار می‌گیرد. اما این تقریب تا بحال در تمامی تحقیق های عددی صورت گرفته در رابطه با لنزهای آیرودینامیک از جمله تحقیق حاضر استفاده شده است.



شکل (۱): شماتیکی از لنز آیرودینامیک استفاده شده

#### ۴- بررسی نتایج

تغییرات سرعت محوری و فشار استاتیک در طول محور در شکل (۲) نشان داده شده است. سرعت سیال پس از عبور از لنز افزایش یافته و با پخش شدن گاز در لوله کاهش می‌یابد. از سوی دیگر فشار سیال حامل با عبور از لنز کاهش می‌یابد. این تغییر فشار باعث می‌شود که ضریب کانینگهام در طول مسیر ثابت نباشد.



شکل (۲): تغییرات فشار و سرعت محوری سیال در طول سیستم

در مرحله آخر با فراخوانی این فایل ها در کد کامپیوتری تهیه شده در این پژوهش محاسبات مربوط به حرکت ذره انجام می‌شود. جهت حل معادلات ذره که در زیر به آنها اشاره شده است یک کد کامپیوتری به زبان فرترن تهیه شده است که برای مدل سازی دقیق حرکت ذرات نانو به خصوص حرکت براونی جوابهای دقیق ارائه کرده است. در زیر معادلات دینامیک ذره ارائه شده است که در آن از نیروی وزن برای ذرات نانو صرف نظر شده است و  $F_B$  نشان دهنده نیروی براونی می‌باشد که جزئیات نحوه محاسبه آن در مرجع [۳] آمده است.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + F_B \quad (1)$$

که در آن  $F_D$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (2)$$

که در آن  $\mu$  ویسکوزیته سیال  $D_p$  و  $\rho_p$  قطر و دانسیته ذره و رینولدز برابر است با:

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

و ضریب تصحیح کانینگهام ناشی از لغزش ذرات در گاز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{D_p} \left[ 1.257 + 0.4 \exp\left(-1.1 \left(\frac{D_p}{2\lambda}\right)\right) \right] \quad (4)$$

که در آن  $\lambda$  مسیر آزاد مولکولی (میکرومتر)، و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

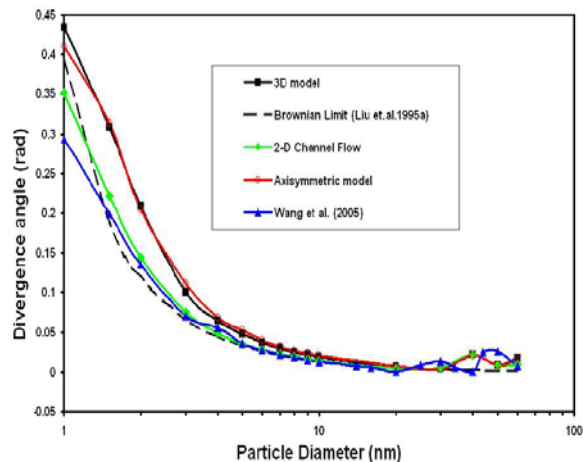
$$\lambda = \frac{0.0317 T^{1.3}}{P} \quad (5)$$

که در آن  $T$  دما (K) و  $P$  فشار (mmHg) می‌باشد.

#### ۳- مدل هندسی

در این سیستم قطر لوله ۱۰ میلیمتر و قطر اوریفیس سه لنز بکار رفته به ترتیب عبارتند از ۱/۲۶، ۱/۶۴ و ۲/۳۳ میلیمتر که فاصله آنها از یکدیگر ۱۵ میلیمتر می‌باشد و در انتها نیز نازلی به قطر ۲/۷۶ میلیمتر قرار دارد. شایان ذکر است اندازه ها برای مقایسه بهتر از مدل وانگ انتخاب شده است. در این مدل گاز هلیوم بعنوان سیال حامل استفاده شده است و شرایط مرزی به این صورت است که در ورودی دبی جرمی جریان  $2/98 \times 10^{-7}$  kg/s تنظیم می‌شود و فشار در مرزهای خروجی ۱ پاسکال در نظر گرفته شده است. این فشار در پایین دست نازل تنظیم می‌شود. فرض محیط پیوسته در درون لنزها و نازل فرض قابل قبولی است اما در قسمت پایین دست نازل با توجه به فشار خیلی کم (۱Pa) فرض محیط پیوسته مورد تردید

متناظر ۱/۸ و ۵/۴ قطر نازل بعد از خروجی نازل هستند، انتخاب شده‌اند. اختلاف این دو شعاع پرتو بر فاصله بین دو مقطع (در اینجا ۱۰ میلیمتر) تقسیم شده تا زاویه واگرایی پرتو بدست آید شکل (۴) مقایسه بین زوایای واگرایی برای مدل سه بعدی را با مدل‌های متقارن محوری، جریان کانال دو بعدی و نتایج وانگ و همکاران [۱۰] نشان می‌دهد. محدوده تئوری براونی که توسط لیو و همکاران [۱] برای جریان‌های متقارن محوری ارائه شده نیز در این شکل نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که نتایج مدل متقارن محوری تطابق خوبی با مدل سه بعدی دارد. مدل جریان کانال دو بعدی مقادیر کمتری را برای زوایای واگرایی پرتو بدست می‌دهد. نتایج وانگ و همکاران [۱۰] به مدل جریان کانال دو بعدی و محدوده براونی لیو و همکاران [۱] نزدیکتر است.

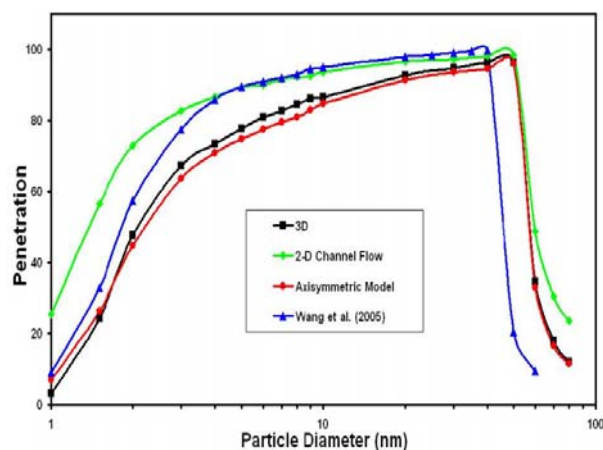


شکل (۴): مقایسه زاویه واگرایی پرتو در پایین دست نازل برای مدل‌های متقارن محوری، دو بعدی و سه بعدی

شکل (۴) سرعت‌های نهایی محوری ذرات در ۱/۸ برابر قطر نازل در پایین دست نازل را نشان می‌دهد. در این شکل تطابق خوبی بین مدل متقارن محوری، مدل سه بعدی و نتایج وانگ و همکاران [۱۰] وجود دارد و این بدان مفهوم است که مدل‌های متقارن محوری که در آنها حرکت براونی ذرات دقیق مدل نشده است (مانند مدل وانگ [۱۰]) نیز قادر به پیش‌بینی دقیق سرعت محوری ذرات هستند. این سرعت اهمیت زیادی در لنزهای آیرودینامیک دارد، چون دستگاه اندازه‌گیری متصل به پایین دست لنزها بر اساس سرعت ذرات کالیبره می‌شوند.

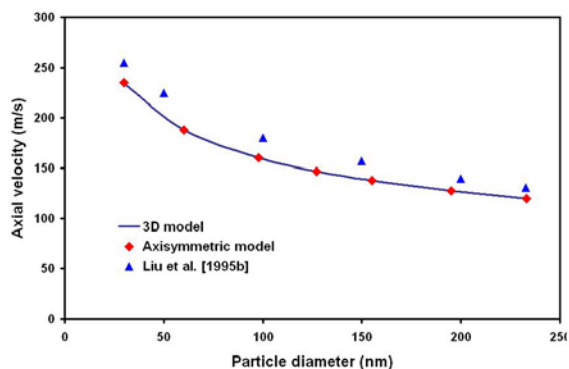
در شکل (۵) نتایج عددی برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکاران [۲] مقایسه شده است. اختلاف کمی که بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد می‌تواند ناشی از یکی نبودن توزیع ذرات در ورودی باشد.

راندمان نفوذ بصورت نسبت تعداد ذرات خارج شده از نازل به تعداد ذرات وارد شده به سیستم لنز آیرودینامیک می‌باشد. شکل (۳) راندمان نفوذ محاسبه شده برای سیستم لنز آیرودینامیک را نشان می‌دهد. علت کاهش سریع راندمان نفوذ برای ذرات بزرگتر از ۵۰ نانومتر برخورد ذرات با دیواره‌های لنز در اثر اینرسی‌شان می‌باشد. بطور مشابه برای ذرات کوچک حرکت براونی پراکندگی را افزایش داده و باعث می‌شود ذرات با دیواره‌ها برخورد کنند. در شکل (۳) نتایج مدل‌های سه بعدی و متقارن محوری با جریان کانال دو بعدی و نتایج وانگ و همکاران [۱۰] مقایسه شده است. می‌توان مشاهده کرد که نتایج مدل متقارن محوری، که در آن از تمرکز مناسب ذرات در ورودی و شدت براونی مناسب استفاده شده است، به نتایج مدل سه بعدی نزدیک است. نتایج مدل دو بعدی، که در آن از شدت براونی و توزیع یکنواخت دو بعدی ذرات در ورودی استفاده شده است، راندمان نفوذ را بیشتر پیش‌بینی می‌کند. تزریق یکنواخت دو بعدی ذرات موجب متمرکز شدن بیشتر ذرات نزدیک محور می‌شود. همچنین در این شکل نتایج وانگ و همکاران [۱۰] برای راندمان نفوذ نشان می‌دهد که برای ذرات بزرگتر از ۳ نانومتر نتایج آنها به مدل جریان کانال دو بعدی ما نزدیک است و برای ذرات کوچکتر نتایج آنها به مدل متقارن محوری صحیح نزدیک است.

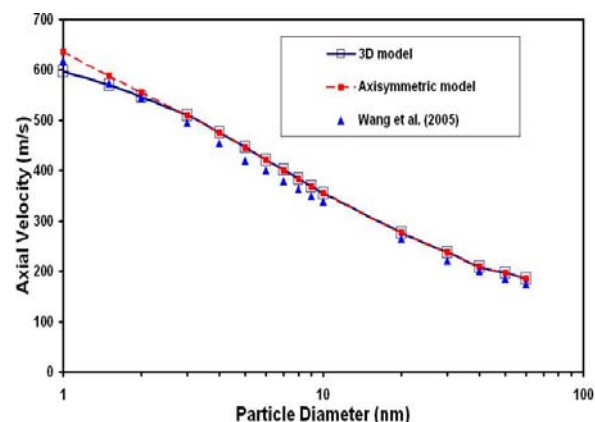


شکل (۳): مقایسه راندمان نفوذ ذرات نانو در خروجی نازل برای مدل‌های متقارن محوری، دو بعدی و سه بعدی و مدل وانگ

زوایای واگرایی پرتو ذرات براساس تعریف وانگ و همکاران [۱۰] مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در مدل متقارن محوری قطر پرتو ذرات دو برابر شعاعی است که ۹۰ درصد ذرات را در برگرفته‌است و در مدل سه بعدی نیز قطر پرتو بر اساس ۹۰ درصد ذرات محاسبه شده است. برای بدست آوردن زاویه واگرایی پرتو از شعاع‌های پرتو محاسبه شده در دو مقطع استفاده شده است. در اینجا مقاطع مانند کار وانگ و همکاران [۱۰] در فواصل ۷۵/۳ و ۸۵/۳ میلیمتر از ورودی، که

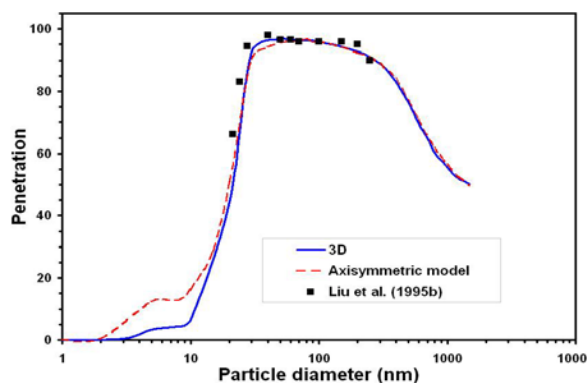


شکل (۷): مقایسه نتایج عددی سرعت ذرات برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکاران [۲]



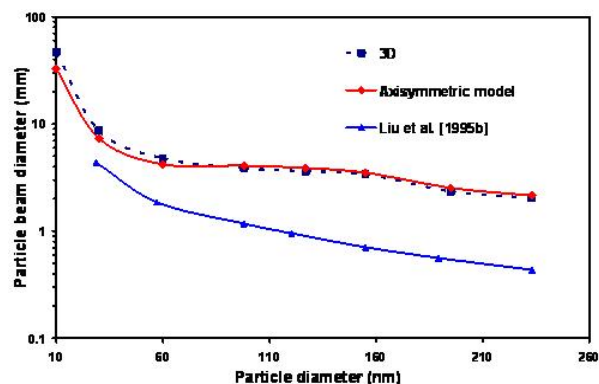
شکل (۵): مقایسه سرعت متوسط نهایی ذرات برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی با نتایج وانگ و همکاران [۱۰]

همانطور که در شکل مشخص است برای محدوده‌ای از قطر ذرات راندمان نفوذ بیش از ۹۰ درصد می‌باشد و برای قطرهای کوچکتر بدلیل وجود حرکت براونی و برای قطرهای بزرگتر بدلیل اینرسی بالای آنها و برخورد با دیواره لنزها راندمان نفوذ کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۸): مقایسه نتایج عددی راندمان نفوذ ذرات برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکاران [۲]

نتایج ما بر اساس توزیع کاملاً یکنواخت ذرات در ورودی می‌باشد ولی ممکن است در کار آزمایشگاهی نتوان به خاطر محدودیت‌هایی که وجود دارد توزیع کاملاً یکنواخت را بدست آورد.

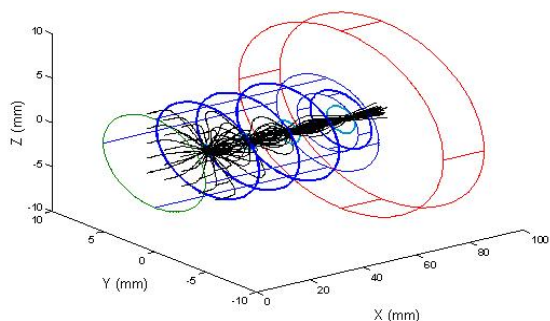


شکل (۶): مقایسه نتایج عددی قطر پرتو ذرات برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکاران [۲]

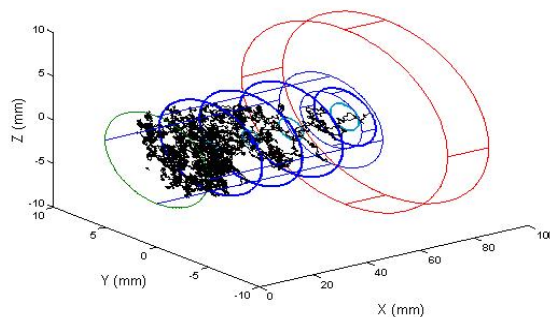
در شکل‌های (۹) تا (۱۴) به ترتیب نمونه مسیر حرکت سه بعدی ذرات در سیستم لنز آیرودینامیک برای ذرات با قطرهای ۱، ۲، ۶، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ نانومتر با و بدون در نظر گرفتن اثر نیروی براونی نشان داده شده است. (برای واضح‌تر شدن شکل‌ها فقط ۲۵ ذره در ورودی تزیق شده است). همانطور که دیده می‌شود اکثر ذرات با قطر ۱ و ۲ نانومتر در اثر حرکت براونی بر روی دیواره نشست‌اند در حالیکه در غیاب این نیرو همه ذرات با قطر ۱ و ۲ نانومتر از نازل خارج شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای ذرات با قطر ۶ و ۱۰ نانومتر نیز دیفیوژن مهم است.

شکل (۷) مقایسه سرعت محوری ذرات در خروجی روزن برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکاران [۲] را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. نکته دیگری که در شکل دیده می‌شود اینست که نتایج سه بعدی و متقارن محوری بر یکدیگر منطبق است که این به سبب کوچک بودن نیروی براونی برای محدوده قطر ذرات در نظر گرفته شده می‌باشد. در شکل (۸) راندمان نفوذ ذرات نشان داده شده است در این شکل نیز نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد.

**2 nm, without Brownian motion**

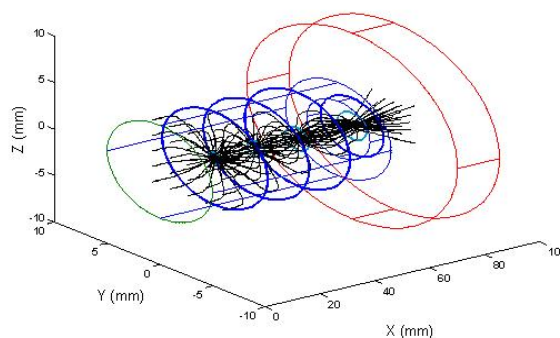


**1 nm, with Brownian motion**

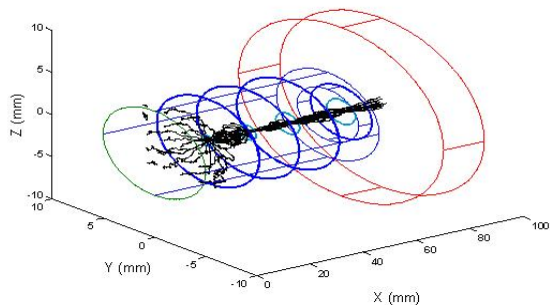


شکل (۱۰): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۲ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی

**1 nm, without Brownian motion**

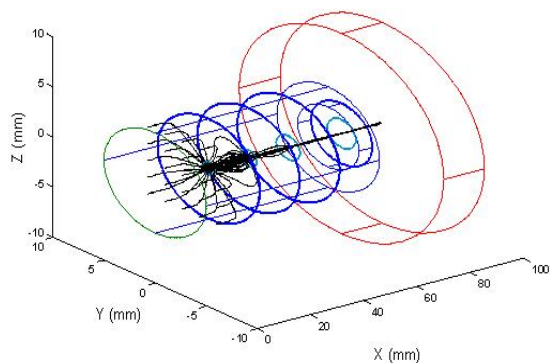


**6 nm, with Brownian motion**

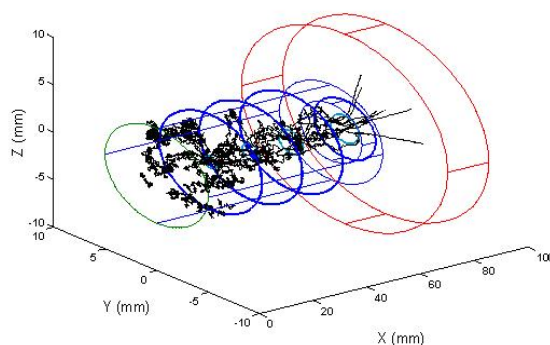


شکل (۹): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۱ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی

**6 nm, without Brownian motion**



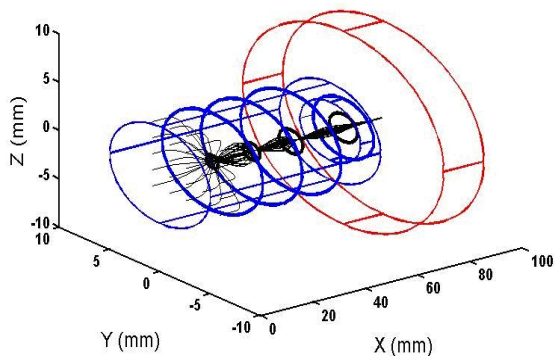
**2 nm, with Brownian motion**



شکل (۱۱): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۶ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی

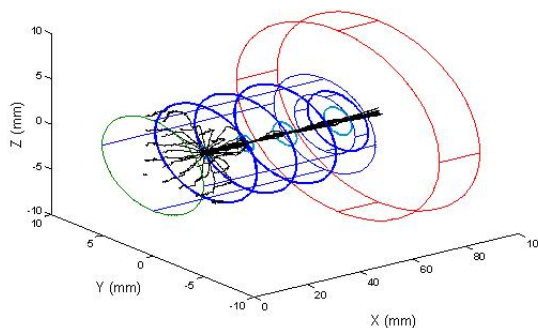


**30 nm, without Brownian motion**

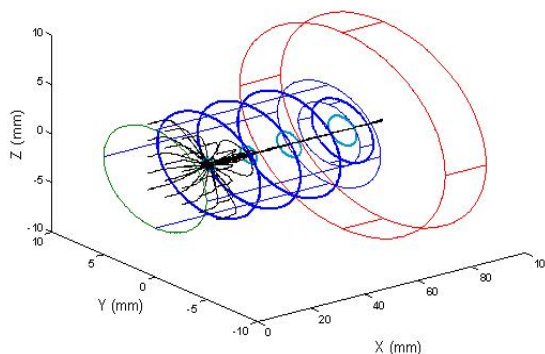


شکل (۱۳): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۳۰ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی

**10 nm, with Brownian motion**

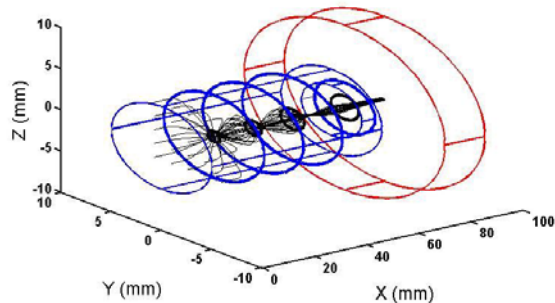


**10 nm, without Brownian motion**

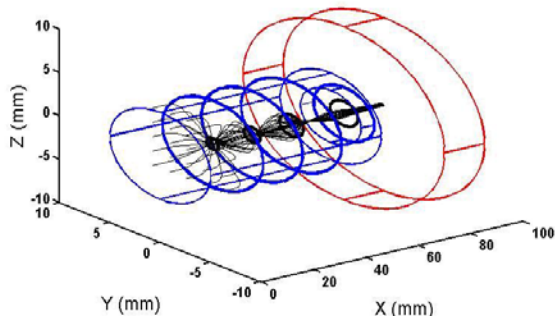


شکل (۱۲): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۱۰ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی

**50 nm, with Brownian motion**

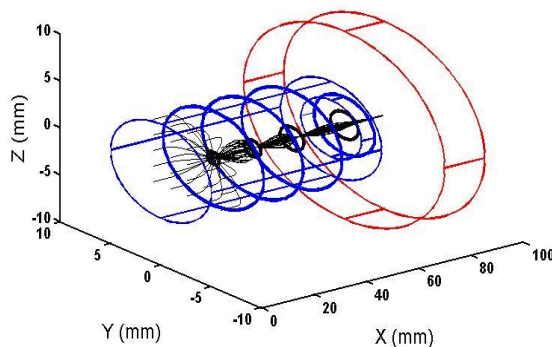


**50 nm, without Brownian motion**



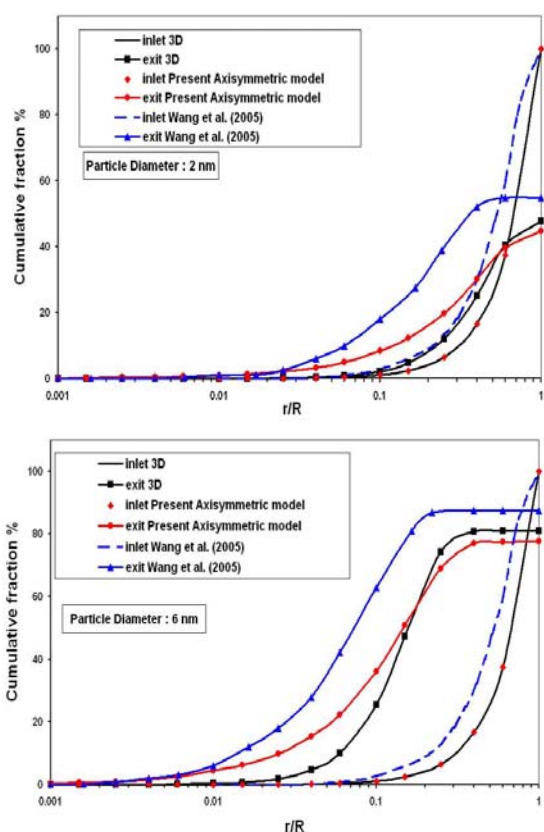
شکل (۱۴): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۵۰ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی

**30 nm, with Brownian motion**

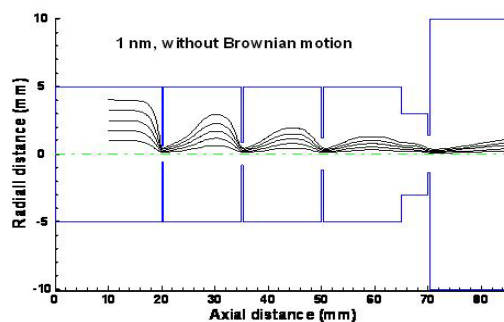
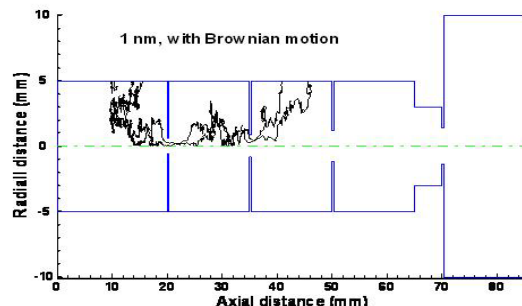


برای درک بهتر نمونه مسیر حرکت ذرات در مدل متقارن محوری در عبور از سیستم لنز آیرودینامیک شکل‌های ( ۱۵ و ۱۶ ) برای ذرات با قطرهای ۱ و ۳۰ نانومتر تهیه شده اند. ( برای واضح تر شدن شکل‌ها فقط ۵ ذره در ورودی تزریق شده است).

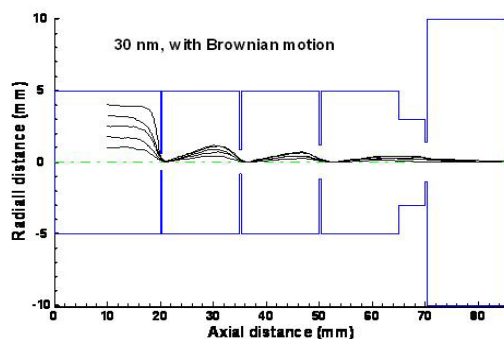
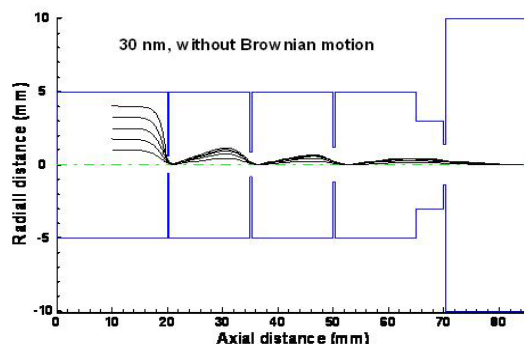
همانند کار وانگ و همکاران [۱۰] موقعیت شعاعی ذره با شعاع ورودی سیستم (۵ میلیمتر) برای منحنی ورودی و شعاع نازل (۱/۳۸ میلیمتر) برای منحنی خروجی بی بعد شده است. مشاهده می شود که کسر تراکمی ذرات تزریق شده در ورودی برای مدل متقارن محوری همانند مدل سه بعدی برابر با  $(t/R)^2$  می باشد. همانطور که قبلا اشاره شد پهنای پرتو ذره برابر است با قطر پرتویی که ۹۰ درصد تعداد کل ذراتی که از آن مقطع عبور می کند را در برگرد، بنابراین قطر پرتو ذرات را می توان براحتی از این شکلها بدست آورد. برای ذرات بزرگتر از ۲۰ نانومتر، نشان می دهد که نتایج مدل متقارن محوری تقریبا بر نتایج مدل سه بعدی منطبق است و این بخاطر اینست که برای این ذرات نیروی براونی تاثیر کمی دارد. همچنین این شکلها نشان می دهد که نتایج وانگ و همکاران [۱۰] چندان به مدل سه بعدی نزدیک نیست.



شکل (۱۷): کسر تراکمی ذرات در ورودی سیستم و در خروجی نازل برای قطرهای ۲ و ۶ نانومتر برای مدل های متقارن محوری و سه بعدی و مقایسه با مدل وانگ



شکل (۱۵): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۱ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی



شکل (۱۶): شمایی از حرکت ذرات با قطر ۳۰ نانومتر در مدل سه بعدی با در نظر گرفتن حرکت براونی و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی



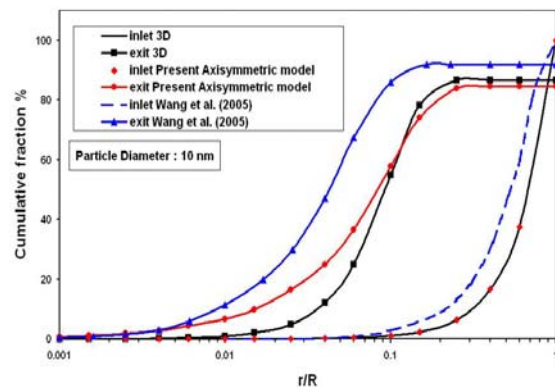
بعدی و متقارن محوری شده است. همچنین شکل (۱۹) نشان می‌دهد که حدود ۹۰ درصد ذرات توانسته‌اند از سیستم خارج شوند و این در حالی است که ذرات با قطر ۱ نانومتر بدلیل اثرات نیروی براونی با دیواره‌ها برخورد کرده و تعداد کمی از آنها به خروجی رسیده‌اند.

#### ۵- نتیجه‌گیری

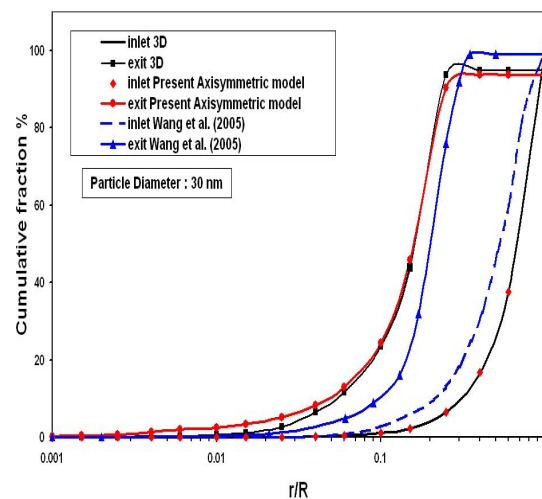
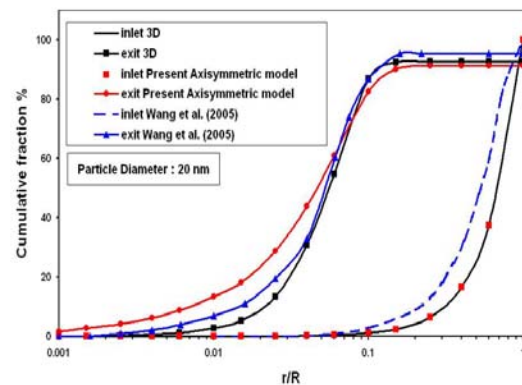
نتایج این تحقیق نشان دهنده‌ی این مطلب است که بین مدل حاضر و مدل های وانگ و لیو تطابق خوبی وجود دارد. همچنین نتایج بیانگر عدم دقت مدلسازی‌های حرکت ذرات نانو با استفاده از روش های متداول متقارن محوری می‌باشد. مقایسه نتایج مربوط به کسر تراکمی شعاعی ذرات برای مدل های متقارن محوری و سه بعدی نشان موید این مطلب می‌باشد. اگرچه لازم بذکر است برای قطرهای بزرگ این دو مدل نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند.

#### ۶- مراجع

- [1] 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. Technol.*, 22:, 1995, pp. 293-313.
- [2] Liu, P., Ziemann, P. L., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: II. Experimental Evaluation of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions", *Aerosol Sci. Technol.*, 22:, 1995, pp. 314-324.
- [3] Ziemann, P. J., Liu, P., Rao, N. P., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., "Particle Beam Mass Spectrometry of Submicron Particles Charged to Saturation in an Electron Beam", *J. Aerosol Sci.*, 26:, 1995, pp. 745-756.
- [4] Schreiner, J., Voigt, C., Mauersberger, K., McMurry, P. and Ziemann, P., "Aerodynamic Lens System for Producing Particle Beams at Stratospheric Pressures", *Aerosol Sci., Tech.* 29:, 1998, pp. 50-56.
- [5] Mallina, R. V., Wexler, A. S., Rhoads, K. P. and Johnson, M. V., "High Speed Particle Beam Generation: A Dynamic Focusing Mechanism for Selecting Ultrafine Particles", *Aerosol Sci. Technol.*, 33:, 2000, pp. 87-104.
- [6] 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. Technol.*, 33:, 2000, pp. 49-70.
- [7] Tafreshi, H. V., Benedek, G., Piseri, G., Vinati, S., Barborini, E. and Milani, P., "A Simple Nozzle Configuration for the Production of Low Divergence Supersonic Cluster Beam by Aerodynamic Focusing", *Aerosol Sci. Technol.*, 36:, 2002, pp. 593-606, 2002.



شکل (۱۸): کسر تراکمی ذرات در ورودی سیستم و در خروجی نازل برای قطرهای ۱۰ و ۲۰ نانومتر برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی و مقایسه با مدل وانگ



شکل (۱۹): کسر تراکمی ذرات در ورودی سیستم و در خروجی نازل برای قطر ۳۰ نانومتر برای مدل‌های متقارن محوری و سه بعدی و مقایسه با مدل وانگ

برای قطرهای کوچکتر بدلیل غالب بودن نیروی براونی و تاثیر این نیرو در سه بعد باعث بوجود آمدن اختلاف بین نتایج مدل های سه

- [10] Wang, X., Gidwani, A., Girshick, S. L. and McMurry, P. H., "Aerodynamic Focusing of Nanoparticles: II. Numerical Simulation of Particle Motion Through Aerodynamic Lenses", *Aerosol Sci. Technol.*, 39:, 2005, pp. 624–636.
- [11] Raeiszadeh, D. F., Nikbakht, A., "Comparison of Nanoparticles Motion in 3D and Axisymmetric Models through a Single Aerodynamic Lens", *Najaf Abad Nano materials and Nano Technology Conference*, 2008.
- [8] Zhang, X., Smith, K. A., Worsnop, D. R., Jimenez, J., Jayne, J. T., Kolb, C. E., Morris, J. and Davidovits, P., "Numerical Characterization of Particle Beam Collimation: Part II Integrated Aerodynamic-Lens-Nozzle System", *Aerosol Sci. Technol.*, 38:, 2004, pp. 619–638.
- [9] Wang, X., Kruis, F. E. and McMurry, P. H., "Aerodynamic Focusing of Nanoparticles: I. Guidelines for Designing Aerodynamic Lenses for Nanoparticles", *Aerosol Sci. Technol.*, 39:, 2005, pp. 611–623.