



## Numerical Investigation of Ambient Temperature and Actual Impactor Plates Effects on Its Efficiency

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Faraji Kheyraabadi M.<sup>1</sup> MSc,  
Kheradmand S.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Faraji Kheyraabadi M, Kheradmand S. Numerical Investigation of Ambient Temperature and Actual Impactor Plates Effects on Its Efficiency. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(6):1327-1335.

<sup>1</sup>Aerodynamic, Propulsion & Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran

#### \*Correspondence

Address: Aerodynamic, Propulsion & Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran  
Phone: +98 (31) 45914485  
Fax: +98 (31) 45227136  
kheradmand@mut-es.ac.ir

#### Article History

Received: April 14, 2018  
Accepted: February 16, 2019  
ePublished: June 01, 2019

### ABSTRACT

In the present work, an investigation and simulation of the air flow, containing solid suspended particles in the actual impactor is done studied; particles under investigation are in the micron range. The results of this work can be illustrated by simulating the motion of particles in an actual impactor, investigating the effects of temperature changes on the surrounding environment, and the impedance plates on the accumulation efficiency. In the first part, by deriving the governing equations for this phenomenon and choosing the appropriate numerical method for solving these equations, the path of particles motion is simulated. By determining the path of the particles, it is possible to determine the number of particles deposited on collecting plate, and then according to the mentioned relations, the collection efficiency is obtained for a laboratory experiment, which compared with laboratory values. This comparison indicates the acceptable accuracy of the chosen employed method. In the next section, by selecting particles with different densities, effect of the environment temperature and inlet air variations by assuming constant plate temperature, and collector plate temperature variation on the impactor efficiency have been investigated. The results show that the particle density affects the efficiency of impactor, and reduces the diameter of cut from 2.2 to 4.2 in micrometer range. Due to the increased viscosity of the air, the heating of impactor's environment reduces the efficiency of impactor. The results showed that temperature variation of the collection plate could also change the particle collecting efficiency.

**Keywords** Inertial Impactor; Eulerian-Lagrangian Approach; Collection Efficiency; Computational Fluid Dynamics; Thermophoresis Force

### CITATION LINKS

[1] Reducing blowoff in cascade impactor measurements [2] History of impactors-the first 110 years [3] Inertial impactors: Theory, design and use [4] Influence of impaction plate diameter and particle density on the collection efficiency of round-nozzle inertial impactors [5] CFD simulations of the Andersen cascade impactor: Model development and effects of aerosol charge [6] Enhancement of collection efficiency of inertial impactors using elliptical concave impaction plates [7] Performance evaluation of an Andersen cascade impactor with an additional stage for nanoparticle sampling [8] Collection efficiency of round-nozzle impactors with horizontal annular inlet [9] Investigation of collection efficiency of round-nozzle impactors at different atmospheric pressures and temperatures [10] Study the thermophoresis effect on the deposition of nano-particles from diesel engine exhaust after the dilution tunnel [11] Effect of convergence angle on impactor performance [12] Solid particle collection characteristics on impaction surfaces of different designs [13] The effect of varying impaction plate temperature on impactor performance: Experimental studies [14] In-line impactor inlet for bioaerosol sampling [15] Development of a novel aerosol impactor utilizing inward flow from a ring-shaped nozzle [16] Enhancement of collection efficiency of an inertial impactor using an additional punched impaction plate [17] Measurement methods for nanoparticles in indoor and outdoor air [18] Performance investigation of micro-and nano-sized particle erosion in a 90 elbow using an ANFIS model [19] Bacterial aerosol neutralization by aerodynamic shocks using an impactor system: Experimental results for E.coli and analysis [20] Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles [21] Optimization studies on a slit virtual impactor [22] Numerical and experimental performance evaluation of the 3-stage FROSTY supercooled cloud collector [23] The effect of thermophoresis on the particle deposition on a cylinder [24] Thermophoresis of particles in a heated boundary layer

## بررسی عددی اثر تغییر دمای محیط و صفحات ایمپکتور حقیقی بر راندمان آن

محسن فرجی خیرآبادی MSc

گروه آیرودینامیک، پیشرانش و تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران

سعید خردمند PhD

گروه آیرودینامیک، پیشرانش و تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران

### چکیده

در کار حاضر به بررسی و شبیه‌سازی جریان هوا، حاوی ذرات معلق جامد در ایمپکتور حقیقی پرداخته شده است که ذرات مورد بررسی در محدوده میکرون هستند. نتایج این کار را می‌توان به صورت شبیه‌سازی حرکت ذرات در ایمپکتور حقیقی، بررسی تغییرات چگالی ذرات و همچنین اثر تغییرات دمایی محیط اطراف و صفحات ایمپکتور بر راندمان جمع‌آوری بیان کرد. در قسمت اول با استخراج معادلات حاکم بر این پدیده و انتخاب روش عددی مناسب برای حل این معادلات، مسیر حرکت ذرات شبیه‌سازی شده است. با استفاده از مشخص بودن مسیر ذرات می‌توان تعداد ذرات رسوب‌کرده روی صفحه جمع‌آوری را مشخص کرده سپس با توجه به روابط ذکر شده راندمان جمع‌آوری برای یک کار آزمایشگاهی به دست آمده که مقایسه این نتایج با مقادیر آزمایشگاهی نشان‌دهنده صحیح بودن روش انتخابی است. در قسمت بعد با انتخاب ذرات با چگالی‌های متفاوت، به بررسی اثر تغییرات دمایی محیط اطراف، تغییرات دمای هوای ورودی با فرض ثابت بودن دمای صفحه جمع‌آوری و تغییرات دمای صفحه جمع‌آوری بر راندمان ایمپکتور پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند چگالی ذرات روی راندمان ایمپکتور اثر زیادی گذاشته و این تغییرات باعث کاهش قطر برش بین ۲/۲ تا ۴/۲ میکرومتر در محدوده مورد بررسی خواهد بود. گرم شدن محیط کاری ایمپکتور با توجه به افزایش ویسکوزیته هوا باعث کاهش راندمان ایمپکتور می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان داد با تغییرات دمای صفحه جمع‌آوری نیز بازده جمع‌آوری ذرات دچار تغییر خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** ایمپکتور حقیقی، دیدگاه اولیری- لاگرانژی، بازده جمع‌آوری، دینامیک سیالات محاسباتی، نیروی ترموفورتیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷

\*نویسنده مسئول: kheradmand@mut-es.ac.ir

### ۱- مقدمه

از ایمپکتور حقیقی به طور گسترده‌ای برای نمونه‌برداری از ذرات با اندازه‌های متفاوت استفاده می‌شود. از موارد کاربرد این وسیله می‌توان به نمونه‌برداری از ذرات آئروسول و بیوآئروسول اشاره کرد. یک ایمپکتور حقیقی معمولاً از دو قسمت نازل و صفحه جمع‌آوری تشکیل شده است. سیال حاوی ذرات با عبور از نازل شتاب می‌گیرد و به صفحه جمع‌آوری برخورد می‌کند. ذرات با اندازه بزرگ‌تر روی صفحه رسوب می‌کنند و ذرات ریزتر با جریان از ایمپکتور خارج می‌شوند. ایمپکتور حقیقی دارای نقطه‌قوت طراحی ساده است که در مقابل نقطه‌ضعف این وسیله، برگشت ذرات از روی صفحه جمع‌آوری خواهد بود. این نقطه‌ضعف را نیز می‌توان با قراردادن یک پوشش مناسب روی صفحه جمع‌آوری تا مقدار زیادی حل نمود [1].

مارپل در مقاله خود با عنوان تاریخچه ۱۱۰ سال ابتدایی ایمپکتور، این موضوع را بیان می‌کند که اولین بار پوچت وسیله‌ای برای جمع‌آوری ذرات محیط اطراف معرفی کرده است. همچنین بیان می‌کند که ده سال بعد، مادوکس این وسیله را گسترش داد و به صورت آزمایشگاهی توانست از آن استفاده کند و پس از آن تحقیقات زیادی روی این وسیله انجام شد تا بالاخره در سال ۱۹۲۰

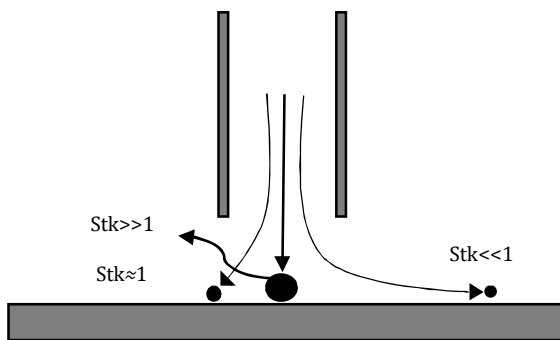
سه ابزار مهم کونیمتر کوتاه، جت شمارنده ضدغبار اوزن و ایمپکتور گرنبرگ ساخته شدند که این‌ها جزء اولین ایمپکتورهای صنعتی به شمار می‌آیند [2]. بعد از تولید این وسیله به صورت صنعتی، مطالعات زیادی برای بهبود کارایی آن انجام شد. کارهای انجام شده در این زمینه را می‌توان به دو دسته تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی طبقه‌بندی کرد. از کارهای تحلیلی و عددی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مارپل و ویلک [3] به بررسی تحلیلی این وسیله پرداختند و توانستند برای حالت خاصی از آن رابطه تحلیلی برای محاسبه راندمان جمع‌آوری ارائه دهد. هانگ و تسای [4] اثر قطر صفحه جمع‌آوری و نیروی گرانش را بر راندمان جمع‌آوری ایمپکتور با نازل دایروی به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد با بالا رفتن رینولدز جریان، اینرسی ذرات افزایش می‌یابد و مقدار این نیرو در مقابل گرانش، بسیار بزرگ‌تر خواهد شد و می‌توان از گرانش صرف نظر کرد. وینچرکار و همکاران [5] به بررسی عددی ایمپکتور آبشاری به منظور شناسایی ذرات در سم‌شناسی و داروسازی پرداختند. آنها قصد داشتند تا اثر باردار کردن ذرات را روی راندمان جمع‌آوری بررسی کنند. نتایج نشان داد با این کار در طبقات آخر ایمپکتور، راندمان به مقدار زیادی افزایش خواهد یافت. کیم و یوک [6]، افزایش راندمان جمع‌آوری در ایمپکتور حقیقی را با توجه به مقعر کردن سطح جمع‌آوری بررسی کردند. در این کار، علاوه بر اثر سطح، تغییرات عمق و طول قسمت مقعر نیز بررسی شده است. آنها نشان دادند با مقعر کردن سطح و افزایش عمق آن می‌توان بازده جمع‌آوری را افزایش داد. هاتا و همکاران [7] یک ایمپکتور آبشاری با مرحله اضافی برای نمونه‌برداری از ذرات نانو را مورد بررسی قرار دادند. در این کار، عملکرد و طراحی یک ایمپکتور آبشاری با قابلیت جدا کردن ذرات با قطر کمتر از ۷۰ نانومتر بیان شده است. نوع فیلتری که بعد از این ایمپکتور قرار می‌گیرد، دارای قطر برشی بین ۵۰ تا ۷۰ نانومتر است. کیم و همکاران [8] به بررسی اثر ورودی عمودی و افقی برای کاهش قطر برش در ایمپکتور تک‌مرحله‌ای پرداختند. در این کار به بررسی عرض نازل، فاصله نازل تا صفحه، قطر صفحه جمع‌آوری و میزان ذرات جذب‌شده روی صفحه جمع‌آوری برای هر دو نمونه بررسی شده است. آنها نشان دادند با تغییر ورودی از عمودی به افقی، قطر برش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا خواهد کرد. پارک و همکاران [9]، اثر فشار و دمای هوای ورودی به ایمپکتور را در ارتفاع‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی که برای ایمپکتورهای تک‌مرحله‌ای موجود در بالون‌ها انجام شده، شرایط کاری این ایمپکتور در ارتفاع‌های متفاوت با توجه به استانداردهای موجود استخراج شده است. طالبی‌زاده و همکاران [10]، اثر نیروی ترموفورتیک را بر ته‌نشینی ذرات خروجی از تونل رقیق‌سازی آگروز موتورهای دیزل بررسی کردند. آنها به صورت عددی نشان دادند نیروی براونی و ترموفورتیک در محدوده ذرات ۵ تا ۵۰۰ نانومتری، اثر قابل توجهی بر ته‌نشینی ذرات دارند. در حالی که نیروی برآ و جاذبه برای این محدوده از قطرات ذرات، قابل چشم‌پوشی خواهد بود. لی و همکاران [11]، اثر تغییر زاویه نازل ایمپکتور را بر بازده مورد بررسی قرار دادند. آنها برای این کار دو زاویه ۵۲ و ۳۰ درجه را برای نازل در تونل باد بررسی کردند. نتایج نشان داد با کاهش زاویه از ۵۲ به ۳۲ درجه، عدد استوکس در بازده ۵۰٪ از ۰/۵۹ به ۰/۴۹ خواهد رسید که نشان می‌دهد ضریب نفوذ ذرات از ایمپکتور در یک قطر خاص کاهش یافته است. همچنین آنها به صورت عددی، اثر پروفیل سرعت در خروجی نازل را بررسی کردند.

$Stk > 1$  باشد، ذره از مسیر حرکت خود کمتر تغییر پیدا می‌کند یا به حرکت مستقیم خود به سمت صفحه ادامه می‌دهد تا به صفحه برخورد کند و روی آن ته‌نشین شود. این موضوع در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است [17]. البته باید ذکر کرد که این مقادیر عدد استوکس ممکن است برای هندسه‌های دیگر متفاوت باشد. برای یک ایمپکتور، قطر برش برابر قطری است که بازده ذره برابر با ۵۰٪ باشد. بر این اساس، قطر برش ( $d_{50}$ ) به صورت رابطه ۱ خواهد بود [11]:

$$d_{50} \sqrt{C_c(d_{50})} = \left[ \frac{9\pi \cdot \mu \cdot D_j^3 \cdot Stk_{50}}{4 \cdot \rho_p \cdot Q} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\mu$  ویسکوزیته هوا،  $D_j$  قطر نازل،  $C_c$  ضریب تصحیح لغزش،  $\rho_p$  چگالی ذره،  $Stk_{50}$  عدد استوکس در بازده ۵۰ درصد و  $Q$  دبی جریان است.



شکل ۱ نحوه عبور ذرات با استوکس‌های مختلف از روی صفحه جمع‌آوری

جریان آئروسول داخل این ایمپکتور با فرض اینکه کسر حجمی ذرات آن کمتر از ۱۲٪ باشد، بررسی شده است. بنابراین می‌توان از روش گسسته‌کردن فازها برای به‌دست‌آوردن میدان جریان و مسیر حرکت ذرات استفاده نمود [18]. به این منظور، ابتدا باید معادلات حاکم بر فاز پیوسته که شامل هوای خشک است را حل نمود. سپس با به‌دست‌آوردن میدان جریان سیال، مسیر ذرات را به دست آورد. همچنین باید ذکر کرد که چون غلظت ذرات پایین است، فقط حرکت سیال روی ذرات اثرگذار خواهد بود و حرکت ذرات روی جریان سیال تاثیری ندارد. بنابراین از روش کوپل یک طرفه به‌منظور بررسی رفتار بین سیال و ذرات استفاده خواهد شد [19]. معادلات پایه برای به‌دست‌آوردن میدان جریان شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم بوده که در روابط ۲ و ۳ نشان داده شده است.

$$\Delta \cdot V = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla \dot{P} + \mu \nabla^2 V \quad (3)$$

که  $\frac{DV}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V$  و علامت  $\nabla$  نشانگر دیورژانس است. نشان‌دهنده بردار سرعت  $(u, v, w)$  و فشار هیدرواستاتیک کل  $\dot{P} = P + \rho gz$  است.

حرکت ذرات در میدان جریان براساس قانون دوم بوده که معادله آن در رابطه ۴ آمده است [20, 21]. بعد از اینکه سرعت ذرات در زمان مشخص به دست آمد، می‌توان با استفاده از رابطه ۵، مختصات ذرات را مشخص کرد.

تسای و چنگ [12]، اثر سطح‌های مختلف جمع‌آوری را بر راندمان جمع‌آوری ایمپکتور تک‌مرحله‌ای، به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش سطح صفحه می‌توان راندمان جمع‌آوری را افزایش داد. لی و کیم [13] به بررسی اثر تغییر دمای صفحه جمع‌آوری بر عملکرد ایمپکتور حقیقی به صورت آزمایشگاهی پرداختند. اندازه ذرات مورد بررسی آنها بین یک تا ۱۰ میکرومتر بود و هر دو عامل سرد و گرم‌کردن صفحه مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند با سردکردن صفحه می‌توان راندمان را افزایش داد. مک‌فارلند و همکاران [14] به بررسی یک ایمپکتور حقیقی به‌منظور پیش‌جداپیش ذرات بزرگ‌تر در جریان با دبی ۱۲۵۰ لیتر بر دقیقه پرداختند. همچنین جنس سطح پوششی صفحه جمع‌آوری را که به صورت خشک، اندود با چربی و سطح متخلخل‌تر شده با نفت بود، به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد صفحه جمع‌آوری از جنس متخلخل، دارای راندمان بالاتری خواهد بود. سون و همکاران [15] یک ایمپکتور جدید را ابداع کردند که جریان آن با عبور از نازل حلقوی شکل به صفحه جمع‌آوری برخورد می‌کند. همچنین آنها اثر اضافه‌کردن نازل و موقعیت آن نسبت به صفحه جمع‌آوری را بررسی کردند. این مساله به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج، تطابق خوبی با هم داشتند که نشان‌دهنده روش عددی مورد قبول است. چئون و همکاران [16] برای بهبود عملکرد ایمپکتور حقیقی، یک صفحه بین نازل و صفحه جمع‌آوری ذرات قرار دادند. این بررسی به دو صورت شبیه‌سازی و انجام آزمایش روی ایمپکتور با قطر برش یک، ۲/۵ و ۱۰ میکرومتر صورت گرفت. نتایج نشان داد برای ایمپکتور با قطر برش ۲/۵ میکرومتر با اضافه‌شدن صفحه، قطر برش ۲۷٪ کاهش می‌یابد و به ۱/۸۴ میکرومتر می‌رسد.

نوآوری‌های این طرح پژوهشی را می‌توان به پنج مورد تقسیم‌بندی کرد. در مورد اول در این کار، ذرات با جنس‌های مختلف و به‌تبع آن خواص فیزیکی و حرارتی مختلف، مورد استفاده قرار گرفته است. مورد دوم اینکه در کارهای قبل، تغییر دمای محیط همراه با تغییرات ارتفاع که تغییرات فشار نیز در آن لحاظ می‌شود، بررسی شده است. اما بررسی این تغییر دمایی در سطح زمین و با ثابت‌بودن فشار انجام نگرفته که در این کار، مورد مطالعه قرار گرفته است. مورد سوم اینکه نیروی ترموفورتیک در ایمپکتور حقیقی تاکنون به صورت عددی بررسی نشده بود که با ارایه این کار نشان داده شده است، می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی عددی، این پدیده را در ایمپکتور مدل‌سازی کرد. مورد چهارم هم این بود که در ایمپکتورها برای رسیدن به رفتار ایده‌آل، باید وسیله به‌صورتی باشد که در یک قطر مشخص، بازده آن از صفر به ۱۰۰٪ برسد. در این کار با سردکردن هوای ورودی به ایمپکتور یا در حالت دیگر با گرم‌کردن صفحه جمع‌آوری، رفتار این وسیله به حالت ایده‌آل نزدیک شده است. مورد پنجم هم بدین صورت است که برای افزایش بازده این وسیله در این کار، دو پیشنهاد ارایه شده است. در حالت اول می‌توان هوای ورودی را گرم کرد یا در حالت دیگر می‌توان با سردکردن صفحه جمع‌آوری به این هدف رسید.

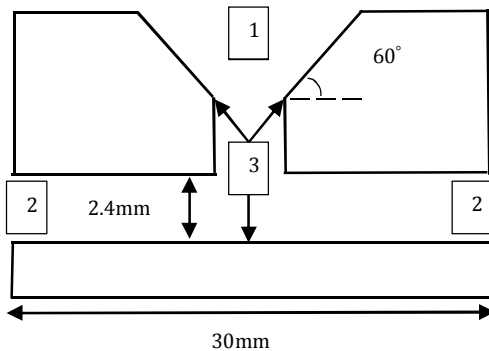
## ۲- معادلات حاکم

عدد بی‌بعد استوکس به صورت نسبت فاصله توقف ذره به طول مشخصه سیال تعریف می‌شود. با استفاده از این عدد بی‌بعد می‌توان فهمید که ذره روی صفحه رسوب می‌کند یا به همراه جریان به خارج از ایمپکتور می‌رود. برای ذرات با  $Stk \ll 1$ ، ذرات به همراه سیال تغییر مسیر می‌دهند و از ایمپکتور خارج می‌شوند، اما اگر

رسوب می‌کند و مخرج کسر، برابر با تعداد ذرات ورودی به ایمکتور است.

### ۳- هندسه مساله، شرایط مرزی، استقلال از شبکه و مطالعات اعتبارسنجی

هندسه مورد بررسی در این مساله براساس طرح تسای (شکل ۲) است [۱۹]. در کار تسای، عدد رینولدز برابر ۳۰۰۰ انتخاب شده و قطر نازل برابر ۲/۴ میلی‌متر است. طول گلوگاه نازل برابر قطر نازل و ۶۰٪ ورودی مخروطی ایمپکتور خواهد بود. نرخ جریان عبوری از نازل برابر ۵ لیتر بر دقیقه است. صفحه جمع‌آوری ایمپکتور به وسیله سه پین متغیر حمایت و فاصله صفحه تا نازل به وسیله این پین‌ها تنظیم می‌شود که در این کار، مقدار ثابت ۲/۴ میلی‌متر تنظیم خواهد شد. در این طراحی، زاویه مخروط ورودی نسبت به خط عمود برابر ۳۰ درجه خواهد بود. در این مساله با توجه به اینکه هندسه مورد بررسی دارای تقارن محوری است، می‌توان آن را به صورت دوبعدی در نظر گرفت و از شرط مرزی تقارن محوری برای مرکز آن استفاده کرد.



شکل ۲) شماتیک ایمپکتور تسای

از آنجایی که این مساله از نوع دوفازی سیال-جامد است، از این رو دیدگاه در این حل از نوع اویلری-لاگرانژی انتخاب می‌شود. پس برای اعمال شرایط مرزی به دو نوع از شرط مرزی نیاز است. اولین نوع از شرط مرزی باید روی جریان پیوسته سیال قرار گیرد و نوع دیگر شرط مرزی که مربوط به فاز گسسته است، باید روی این فاز قرار گیرد. شرط مرزی که برای جریان سیال پیوسته در نظر گرفته شده، بدین صورت است که در ورودی، "سرعت ورودی" قرار داده شده و روی خروجی، "فشار خروجی" اعمال شده است و بقیه مرزها به صورت "دیواره" در نظر گرفته می‌شوند.

شرط مرزی روی جریان فاز گسسته بدین شکل است که در ورودی، تزریق یکنواختی از ذرات قرار داده شده است تا ذرات را به درون جریان وارد کند. برای این کار، یک خط در ورودی، تعریف و سپس با تقسیم این خط به تعداد ذرات تزریقی در میدان، محل تزریق ذرات مشخص می‌شود. در این روش تزریق، باید جهت و سرعت اولیه ذرات مشخص شود که جهت به صورت عمود بر ورودی و سرعت اولیه نیز هم‌اندازه سرعت ورودی سیال تعریف شده است. در خروجی، شرط مرزی "فرار" برای ذرات در نظر گرفته شده است، بدین صورت که هر ذره‌ای که به این خروجی‌ها می‌رسد، از این مرز، رد خواهد شد و مورد شمارش قرار خواهد گرفت. روی دیواره‌ها نیز شرط مرزی "به‌دام افتادن" اعمال شده است، بدین صورت که با برخورد ذره به دیواره روی آن رسوب می‌کند و دیگر وارد جریان نمی‌شود. در جدول ۱ به صورت خلاصه، انواع شرایط مرزی که روی شکل ۲ با استفاده از اعداد یک، ۲ و ۳ مشخص شده، توضیح داده

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_D + F_B + F_{PG} + F_{VM} + F_L + F_g + F_T \quad (4)$$

$$\frac{dX_p}{dt} = V_p \quad (5)$$

که  $m_p$  جرم ذره،  $V_p$  بردار سرعت ذره  $(u_p, v_p, w_p)$ ،  $X_p$  مکان ذره و طرف راست معادله ۴ بیانگر نیروهای وارد بر ذره بوده که به ترتیب هر کدام از این پارامترها برابر نیروی درگ، بویانسی، گرادیان فشار، جرم مجازی، لیفت، گرانش زمین و ترموفورتیک است. نیروی گرادیان فشار و جرم مجازی، زمانی اهمیت پیدا می‌کند که چگالی سیال بیشتر از چگالی ذرات باشد، در حالی که در مطالعه حاضر، چگالی ذرات بسیار بزرگ‌تر از سیال هوا است. همچنین نیروی براونی و لیفت نیز برای ذرات نانو مورد بررسی قرار می‌گیرد که در مطالعه حاضر، بررسی روی ذرات میکرونی است. بنابراین از این چهار نیرو در معادلات صرف نظر خواهد شد. در نتیجه، معادله نیروهای وارد بر ذره به صورت رابطه ۶ خواهد بود.

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_D + F_g + F_T \quad (6)$$

نیروی درگ وارد بر ذرات از رابطه ۷ قابل محاسبه است.

$$F_D = \frac{1}{8} \pi d_p^2 C_D |V_R| V_R \quad (7)$$

که  $V_R$  سرعت نسبی بین دو فاز و  $d_p$  قطر ذرات است.  $C_D$  نیز ضریب درگ نامیده می‌شود که از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (8)$$

عدد رینولدز ذرات ( $Re_p$ ) که در رابطه ۸ ذکر شد، به صورت رابطه ۹ است:

$$Re_p = \frac{\rho V_R d_p}{\mu} \quad (9)$$

که  $\rho$  برابر چگالی سیال است.

نیروی گرانش نیز از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود [22].

$$F_g = \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (10)$$

نیروی ترموفورتیک که در رابطه ۱۱ نشان داده شده است، زمانی به ذرات وارد می‌شود که در فاز پیوسته گرادیان دما وجود داشته باشد و این نیرو در خلاف جهت گرادیان دما است. بدین صورت که نیرویی به ذرات در جهتی که دما پایین‌تر است، وارد می‌شود [23].

$$F_T = -D_{T,p} \frac{1}{m_p T} \nabla T \quad (11)$$

$T$  دمای موضعی سیال و  $D_{T,p}$  ضریب ترموفورتیک است که از رابطه تالبوت ۱۲ محاسبه می‌شود [24].

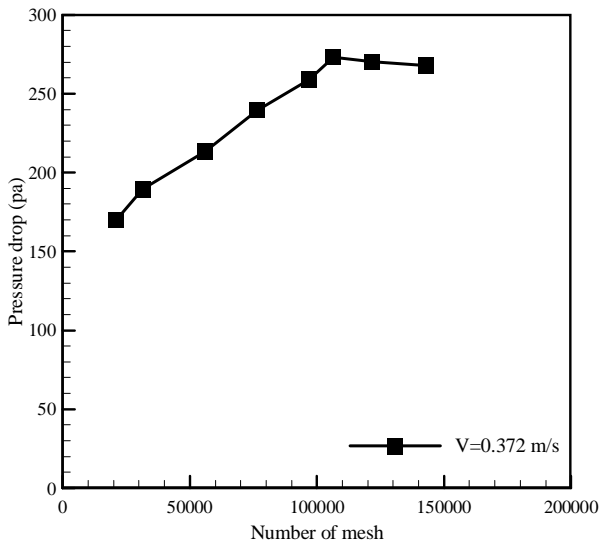
$$D_{T,p} = \frac{6\pi d_p \mu^2 C_S (K + C_t Kn)}{\rho (1 + 3C_m Kn)(1 + 2K + 2C_t Kn)} \quad (12)$$

که  $Kn$  عدد نادسن،  $K$  نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی سیال به ذره و بقیه پارامترها ضرایب ثابت هستند.

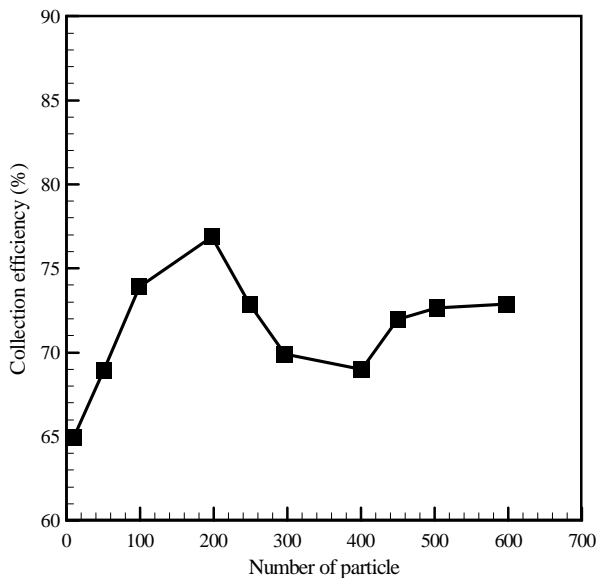
برای بررسی و مقایسه رفتار ایمپکتور در شرایط متفاوت، پارامتر بازده ایمپکتور تعریف می‌شود. این پارامتر به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{n_{collect}}{n_{total}} \quad (13)$$

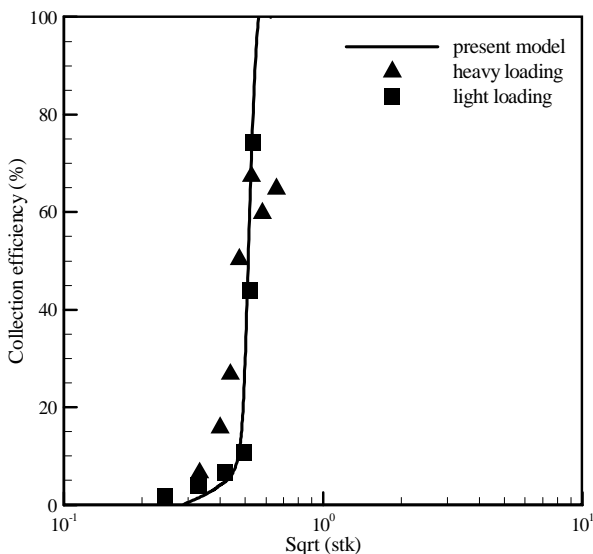
که در این رابطه، صورت کسر برابر تعداد ذراتی بوده که روی صفحه



نمودار (۱) نمودار استقلال حل از تعداد المان‌های شبکه



نمودار (۲) نمودار استقلال حل از تعداد ذرات تزریقی در میدان جریان



نمودار (۳) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی راندمان جمع‌آوری ذرات با نتایج شبیه‌سازی

شده است. این اعداد به ترتیب بیانگر مرز ورودی، مرز خروجی و دیواره‌ها هستند. در سطر ۴ در جدول ۱، شرط مرزی برگشت قرار دارد که نشان می‌دهد ذره با برخورد به این مرز، دوباره به میدان جریان برمی‌گردد و تحت تاثیر آن قرار خواهد گرفت که در این مساله از این نوع شرط مرزی استفاده نشده است.

جدول (۱) معرفی شرایط مرزی مربوط به ذرات

شماره مرز	شرایط مرزی	توضیحات
۱ و ۲	فرار	عبور ذرات از مرز
۳	به‌دام افتادن	رسوب ذرات روی مرز
۴	برگشت	برخورد ذرات به مرز و برگشت دوباره به میدان جریان

برای شبیه‌سازی این مساله از نرم‌افزار OpenFOAM استفاده شده است. از آنجایی که روش حل در این نرم‌افزار براساس حجم محدود است، باید قبل از بررسی مساله و حل معادلات حاکم، دامنه حل المان‌بندی شود تا بتوان معادلات را در هر المان حل نمود. از آنجایی که تعداد المان‌ها در صورت کم‌بودن یا اینکه دارای اندازه درشت باشند، موجب اشتباه در نتایج خواهد شد، در اینجا المان‌ها تا اندازه‌ای ریز شدند تا از یک طرف، تغییر در اندازه المان‌ها روی نتایج اثر نگذارد و از طرف دیگر، نتایج منطبق بر نتایج مقالات معتبر موجود باشد. برای این کار، ابتدا میدان جریان با توجه به شبکه‌بندی‌های متفاوت حل می‌شود. پارامتری که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد، افت فشار بین ورودی و خروجی ایمپکتور است. با توجه به نمودار ۱ مشخص است با افزایش تعداد المان‌های شبکه از ۱۰۵۰۰۰، افت فشار برای جریان با سرعت ورودی ۳۷۲/متر بر ثانیه تقریباً ثابت خواهد شد که نشان می‌دهد این تعداد المان برای حل میدان جریان، کافی است.

با توجه به ثابت بودن تعداد المان‌ها، حال باید تعداد ذرات تزریقی در جریان نیز مشخص شود. برای این کار در یک میدان جریان مشخص، تعداد ذرات متفاوت تزریق می‌شود و بازه جمع‌آوری به دست خواهد آمد. با توجه به نمودار ۲، به ازای ۵۰۰ ذره و بیشتر، راندمان ثابت خواهد ماند. بنابراین در مطالعاتی که در این کار انجام خواهد شد، تعداد ذرات تزریقی در جریان برابر ۵۰۰ عدد خواهد بود. با اعمال شرایط گفته‌شده روی هندسه مورد نظر و حل مساله با کمک دینامیک سیالات محاسباتی، نتایج نمودار ۳ حاصل خواهد شد. در کار آزمایشگاهی، ذرات به دو صورت تعداد بالا و پایین به داخل جریان تزریق شده‌اند. در تعداد بالای ۸۰-۶۰ ذره در هر سانتی‌متر مکعب و در تعداد پایین ۲۰-۱۰ ذره در هر سانتی‌متر مکعب تزریق شده است. با محاسبه درصد خطای متوسط شبیه‌سازی برای حالتی که تعداد ذرات پایین باشد، مقدار این پارامتر برابر ۱۴٪ خواهد بود. با توجه به کارهای پیشین که در زمینه شبیه‌سازی این وسیله انجام شده، این درصد خطای متوسط قابل قبول است.

۴-۱- گرم شدن هوای ورودی و صفحات ایمپکتور

در نمودار ۴، جمع آوری ذرات برحسب قطر ذرات مربوط به جریان با رینولدز ۵۰۰ برای ذرات سیلیکا، چرم و آلومینیوم اکسید، زمانی که دمای محیط گرم تر از حالت نرمال باشد، رسم شده است. منظور از حالت نرمال در نمودارها این است که ایمپکتور در محیط با دمای ۲۹۳ درجه کلوین کار می کند و دمای دیواره ها و هوای ورودی برابر ۲۹۳ درجه کلوین خواهد بود.

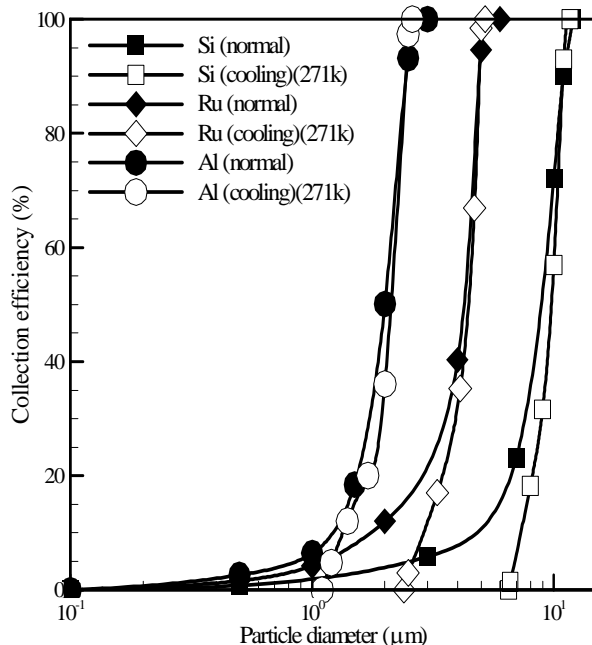
در این حالت که دما برابر ۳۹۸ درجه کلوین است، دمای صفحات ایمپکتور و هوای ورودی برابر ۳۹۸ درجه کلوین خواهد بود. در نمودار ۴ می توان اثر تغییرات چگالی و دما را بر راندمان ایمپکتور بررسی کرد. با افزایش چگالی ذرات، قطر برش کاهش خواهد یافت. به طور مثال برای ذرات سیلیکا، چرم و آلومینیوم اکسید، قطر برش به ترتیب برابر ۸/۸، ۴/۲ و ۲ میکرومتر خواهد بود که نشان می دهد با افزایش چگالی، قطر برش کاهش خواهد یافت. اینرسی در ذرات با قطرهای مشابه، با افزایش چگالی، در حین حرکت افزایش می یابد، بنابراین با تغییر مسیر جریان سیال، کمتر تغییر مسیر می دهد و تعداد ذراتی که روی صفحه جمع آوری رسوب می کند، افزایش و به تبع آن راندمان نیز در قطر مشخص افزایش می یابد. همچنین در این نمودار مشخص است با افزایش دمای سیال برای یک ذره مشخص، قطر برش افزایش خواهد یافت. برای ذرات سیلیکا، چرم و آلومینیوم اکسید در حالت نرمال، قطر برش برابر ۸/۸، ۴/۲ و ۲ میکرومتر است که با افزایش دمای محیط کارکرد ایمپکتور به ۳۹۸ درجه کلوین، این مقادیر به ترتیب برابر ۱۰/۴، ۴/۶ و ۲/۴ میکرومتر خواهد بود. دلیل این اتفاق را می توان به این صورت توجیه نمود که با کاهش دما، ویسکوزیته هوا کاهش می یابد و چون عدد استوکس با ویسکوزیته رابطه عکس دارد، بنابراین مقدار استوکس ذرات افزایش خواهد یافت. چون ذرات با استوکس بالا قادر به تغییر مسیر حرکت خود با تغییر مسیر جریان نیستند، به صفحه جمع آوری برخورد می کنند و روی آن رسوب خواهند کرد. از نگاه دیگر می توان گفت با کاهش ویسکوزیته هوا، ذرات راحت تر در سیال جریان پیدا می کنند و سرعت بیشتری به خود می گیرند. بنابراین تعداد بیشتری از آنها به صفحه جمع آوری برخورد خواهد کرد و قطر برش کاهش خواهد یافت.

۴-۲- سرد شدن هوای ورودی

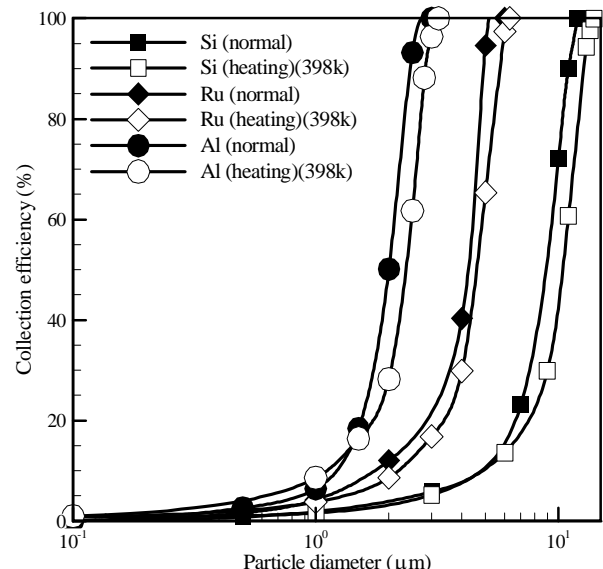
در این بررسی با فرض ثابت بودن دمای صفحات، دمای هوای ورودی تغییر می کند و اثر آن بر راندمان جمع آوری و قطر برش بررسی می شود. دمای صفحات در این حالت برابر ۲۹۳ درجه کلوین و هوای ورودی برابر ۲۷۱ درجه کلوین خواهد بود. تغییراتی که در این حالت بررسی می شود، مربوط به تغییرات ویسکوزیته و گرادیان دمایی است که در داخل ایمپکتور به وجود می آید و راندمان را تحت تاثیر خود قرار می دهد.

در نمودار ۵، تاثیر سرد کردن هوای ورودی، زمانی که دمای آن برابر ۲۷۱ درجه کلوین باشد، بر منحنی راندمان جمع آوری نشان داده شده است. منظور از سرد کردن هوا در دمای ۲۷۱ درجه کلوین که در نمودار نشان داده شده، این است که هوای ورودی دارای دمای ۲۷۱ درجه کلوین و صفحات ایمپکتور دارای دمای ۲۹۳ درجه کلوین خواهند بود. در جریان با رینولدز ۵۰۰، قطر برش فقط برای ذره سیلیکا تغییر محسوس دارد، بدین صورت که قطر برش این ذره از ۸/۸ به ۹/۸ میکرومتر افزایش می یابد و در دو ذره دیگر، این تغییر کمتر از ۰/۱ میکرومتر است. از موارد دیگر که می توان به تاثیر تغییر دمای هوای ورودی اشاره کرد، عدم نشست ذرات ریز روی صفحه جمع آوری است. به طور مثال برای این جریان در حالت نرمال، ذرات سیلیکا در قطر ۶ میکرون با راندمان ۱۵٪ روی صفحه جمع آوری رسوب می کنند، در حالی که در این قطر با هوای ورودی ۲۷۱ درجه کلوین، هیچ ذره ای با قطر ۶ میکرون روی صفحه جمع آوری رسوب نخواهد کرد.

افزایش قطر برش در ذرات با چگالی کم و رینولدز پایین را می توان به این صورت توجیه کرد که چون نیروی ترموفورتیک وارد بر ذرات در رینولدزهای پایین در مقایسه با نیروی درگ وارد بر ذرات قابل ملاحظه است، بنابراین با توجه به کانتور شکل ۳ که گرادیان دما را به سمت دیواره نشان می دهد، این گرادیان باعث به وجود آمدن نیرویی در جهت خلاف افزایش دما می شود و ذرات کوچک با چگالی کم را تحت تاثیر قرار می دهد و راندمان آنها را کم می کند. برای ذرات ریزتر که در راندمان، افت بیشتری داشته اند نیز می توان همین دلیل را بیان کرد.

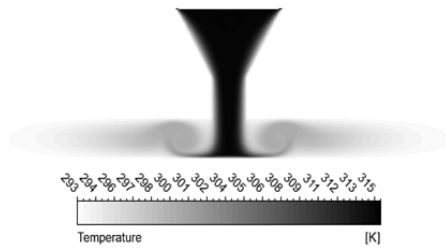


نمودار ۵) راندمان جمع آوری ذرات در حالت سرد شدن هوای ورودی



نمودار ۴) راندمان جمع آوری ذرات در حالت گرم شدن محیط کاری ایمپکتور

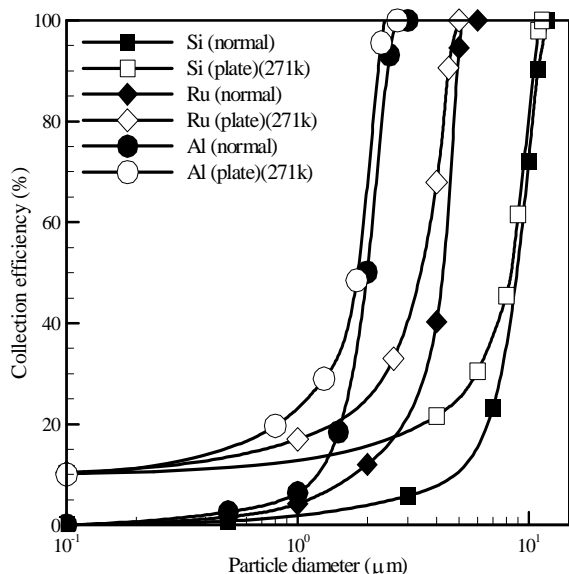
سمت صفحه جمع‌آوری هل می‌دهد. با این اتفاق، تعداد ذراتی که روی صفحه ته‌نشین خواهند شد، افزایش و راندمان به‌ازای قطرهای مشخص افزایش خواهد یافت.



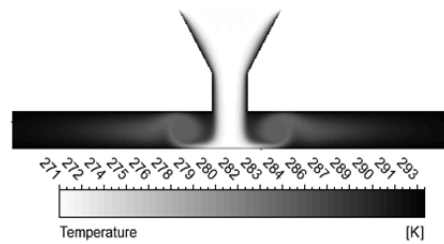
شکل ۴) کانتور توزیع دما در حالت هوای ورودی گرم‌تر از صفحات

#### ۴-۴- سرد شدن صفحه جمع‌آوری

نمودار ۷، بازده جمع‌آوری برای سه ذره را در زمانی که صفحه جمع‌آوری دارای دمای ۲۷۱ درجه کلوین باشد، نشان می‌دهد. در این حالت، دمای هوای ورودی و بقیه صفحات برابر ۲۹۳ درجه کلوین است. نتایج برای ذرات سیلیکا، چرم و آلومینیوم‌اکسید نشان می‌دهد، بازده جمع‌آوری برای ذرات با قطر ۲ میکرومتر در حالت نرمال به‌ترتیب برابر ۴، ۱۲ و ۵۱٪ است که با سرد شدن صفحه جمع‌آوری، این مقادیر به ۱۶، ۲۵ و ۶۸٪ می‌رسد. این مقادیر نشان می‌دهند با سرد شدن صفحه جمع‌آوری، بازده ایمپکتور در این قطر ذرات بین ۱۲ تا ۱۷٪ افزایش می‌یابد. برای قطر برش این ذرات نیز می‌توان بیان کرد در حالت نرمال به‌ترتیب بالا برابر ۸/۹، ۴/۳ و ۲ میکرومتر است که با به‌وجود آمدن نیروی ترموفورتیک حاصل از سرد شدن صفحه جمع‌آوری، این مقادیر به ۸/۴، ۳/۴ و ۱/۸ میکرومتر خواهند رسید. این کاهش قطر برش نشان می‌دهد بازده برای ایمپکتور در این شرایط کاری افزایش خواهد یافت. این تغییرات، ناشی از نیروی ترموفورتیک بوده که نسبت به حالت نرمال اضافه شده است. این نیرو همان‌طور که گفته شد، در خلاف جهت گردایان دما بر ذرات وارد می‌شود. بنابراین در این حالت با توجه به کانتور توزیع دما در شکل ۵ که گردایان دما از دیواره به سمت داخل جریان است، باعث می‌شود تا نیرویی در جهت حرکت ذرات به سمت صفحه جمع‌آوری به وجود آید و تعداد ذراتی که روی صفحه رسوب می‌کنند، افزایش یابند.



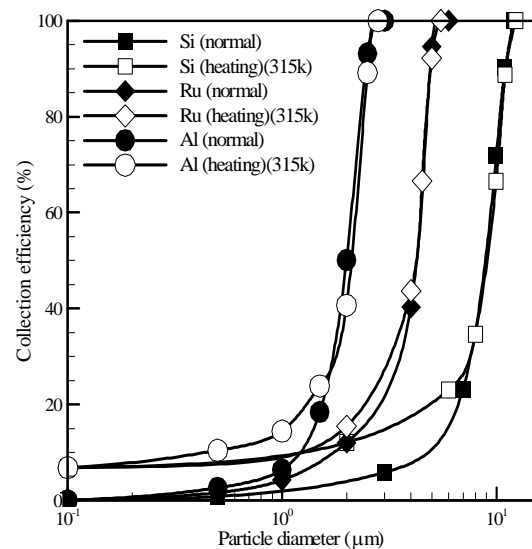
نمودار ۷) راندمان جمع‌آوری ذرات در حالت سرد شدن صفحه جمع‌آوری



شکل ۳) کانتور توزیع دما در حالت هوای ورودی سردتر از صفحات

#### ۴-۳- گرم شدن هوای ورودی

نمودار ۶، راندمان جمع‌آوری برای رینولدز ۵۰۰ را در زمانی نشان می‌دهد که دمای هوای ورودی برابر ۳۱۵ درجه کلوین باشد. منظور از حالت گرم شدن هوا با دمای ۳۱۵ درجه کلوین این است که هوای ورودی با دمای ۳۱۵ درجه کلوین وارد ایمپکتور می‌شود و دمای صفحات ایمپکتور برابر ۲۹۳ درجه کلوین خواهد بود. در این رینولدز، قطر برش ثابت است. تغییرات محسوسی که می‌توان در این نمودارها دید، تغییر بازده برای ذرات ریزتر از قطر برش خواهد بود. به‌طور مثال برای ذرات سیلیکا با قطر ۵ میکرومتر، بازده جمع‌آوری ذرات از ۱۰ به ۲۰٪ خواهد رسید. بنابراین در کل با گرم شدن هوای ورودی، در حالی که دمای صفحات ثابت است، ذرات ریزتر از قطر برش، بیشتر دچار تغییر راندمان خواهند شد و برای ذرات بزرگ‌تر از قطر برش، راندمان نسبت به حالت نرمال تقریباً ثابت خواهد ماند.



نمودار ۶) راندمان جمع‌آوری ذرات در حالت گرم شدن هوای ورودی

برای توجیه موارد ذکر شده می‌توان گفت، در حالتی که گردایان دما در ایمپکتور وجود دارد، سه نیروی عمده به ذره وارد خواهد شد که شامل نیروی درگ، ترموفورتیک و گرانش خواهد بود. در تمام مقایسه‌های موجود که انجام می‌شود، در حالت نرمال، نیروی درگ و گرانش در نظر گرفته و از بقیه نیروها صرف نظر می‌شود. در این قسمت و قسمت‌های دیگر که گردایان دما وجود دارد، نیروی ترموفورتیک نیز در نظر گرفته می‌شود. با افزایش دمای هوای ورودی به دلیل اینکه دیواره‌ها سردتر هستند، یک گردایان دما در جهت داخل ایمپکتور (از دیواره به داخل جریان) به وجود می‌آید. همان‌طور که قبلاً بیان شد، نیروی ترموفورتیک روی ذرات اثر می‌گذارد. بنابراین با به‌وجود آمدن گردایان دما در جهت داخل جریان (مطابق کانتور شکل ۴)، طبق رابطه تالبوت، نیروی ترموفورتیک در جهت خلاف این گردایان وارد می‌شود و ذرات را به

است. با توجه به این موضوع، معادلات حاکم بر این پدیده استخراج شد که شامل معادلات اوپلری حاکم بر فاز پیوسته و معادلات لاگرانژی حاکم بر فاز گسسته است. حل این معادلات با روش عددی صورت گرفت که برای اعتبار دادن به حل از مقادیر آزمایشگاهی استفاده شد. نتایجی که از این شبیه‌سازی‌ها به دست آمد را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- با افزایش دمای محیط کارکرد ایمپکتور قطر برش آن بین ۱۰ تا ۲۰٪ نسبت به حالت نرمال افزایش خواهد یافت.
- ۲- کاهش دمای هوای ورودی باعث نزدیک شدن رفتار ایمپکتور به حالت ایده‌آل می‌شود.
- ۳- با گرم شدن هوای ورودی به ایمپکتور، راندمان جمع‌آوری ذرات کوچک‌تر از قطر برش، افزایش خواهد یافت.
- ۴- سرد کردن صفحه جمع‌آوری ذرات باعث کاهش ۵ تا ۲۰ درصدی قطر برش ایمپکتور برای ذرات مختلف خواهد شد.
- ۵- با گرم کردن صفحه جمع‌آوری، محدوده جمع‌آوری ذرات از ۱۱/۴ به ۳/۱ میکرومتر کاهش خواهد یافت که نشان می‌دهد رفتار ایمپکتور به حالت ایده‌آل نزدیک شده است.

**تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.  
**تأییدیه اخلاقی:** نتایج مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و تا کنون در نشریه یا مجموعه مقالات کنفرانسی دیگری چاپ نشده است و در دست بررسی نیز نیست.

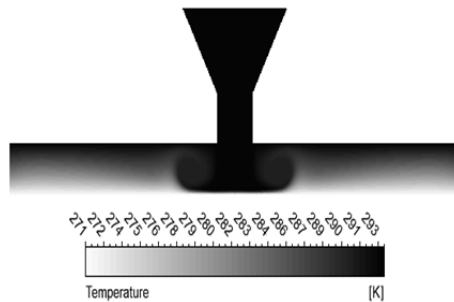
**تعارض منافع:** در این مقاله تعارض منافی با هیچ شخصیتی حقوقی و حقیقی وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** محسن فرجی خیرآبادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/اروش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سعید خردمند (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/اروش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**منابع**

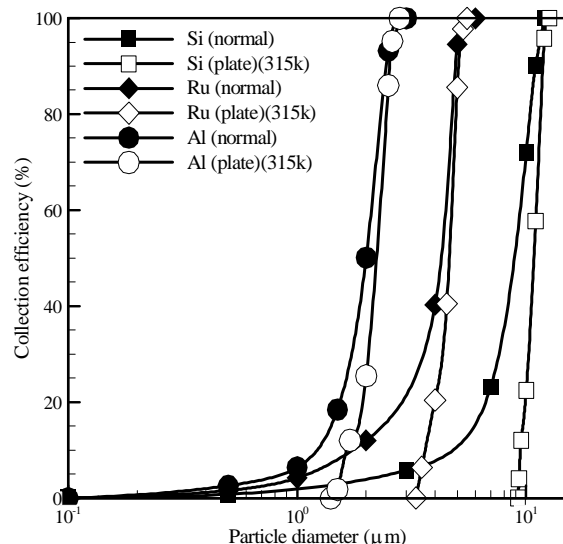
- 1- Markowski GR. Reducing blowoff in cascade impactor measurements. *Aerosol Science and Technology*. 1984;3(4):431-439.
- 2- Marple VA. History of impactors-the first 110 years. *Aerosol Science and Technology*. 2004;38(3):247-292.
- 3- Marple VA, Willeke K. Inertial impactors: Theory, design and use. In: Liu BYH, editor. *Fine particles: Aerosol generation, measurement, sampling, and analysis*. New York: Academic Press; 1976. pp. 411-446.
- 4- Huang CH, Tsai CJ. Influence of impaction plate diameter and particle density on the collection efficiency of round-nozzle inertial impactors. *Aerosol Science and Technology*. 2002;36(6):714-720.
- 5- Vinchurkar S, Longest PW, Peart J. CFD simulations of the Andersen cascade impactor: Model development and effects of aerosol charge. *Journal of Aerosol Science*. 2009;40(9):807-822.
- 6- Kim YJ, Yook SJ. Enhancement of collection efficiency of inertial impactors using elliptical concave impaction plates. *Journal of Aerosol Science*. 2011;42(12):898-908.
- 7- Hata M, Linfa B, Otani Y, Furuuchi M. Performance evaluation of an Andersen cascade impactor with an additional stage for nanoparticle sampling. *Aerosol and Air Quality Research*. 2012;12(6):1041-1048.
- 8- Kim MK, Kim WG, Lee KS, Yook SJ. Collection efficiency of round-nozzle impactors with horizontal annular inlet.



شکل ۵) کانتر توزیع دما در حالت سرد شدن صفحه جمع‌آوری

**۴-۵- گرم شدن صفحه جمع‌آوری**

نمودار ۸، جمع‌آوری ذرات را برحسب قطر ذرات نشان می‌دهد، هنگامی که دمای صفحه جمع‌آوری برابر ۳۱۵ درجه کلوین باشد. این نمودار برای ذرات سیلیکا، چرم و آلومینیوم اکسید رسم شده که در این بررسی، دمای صفحه جمع‌آوری بیشتر از سیال ورودی و بقیه صفحات ایمپکتور بوده و برابر ۳۱۵ درجه کلوین است. قطر برش در این جریان برای ذرات سیلیکا در حالت نرمال برابر ۸/۸ میکرومتر است، اما با افزایش دمای صفحه جمع‌آوری، قطر برش نیز افزایش می‌یابد. به این صورت که در دمای ۳۱۵ درجه کلوین برای صفحه جمع‌آوری برابر ۱۰/۸ میکرومتر خواهد بود. این اختلاف نشان می‌دهد با افزایش دمای صفحه جمع‌آوری در این جریان، قطر برش نسبت به حالت نرمال افزایش می‌یابد. در نمودار ۸ مشخص است که رفتار ایمپکتور، وقتی صفحه جمع‌آوری گرم‌تر از هوای ورودی باشد، به ایده‌آل نزدیک می‌شود. به طور مثال برای ذرات سیلیکا در حالت نرمال، محدوده قطر ذراتی که توسط ایمپکتور جذب می‌شود تا بازده به ۱۰۰٪ برسد، برابر ۰/۱ تا ۱۱/۵ میکرومتر است. در حالی که وقتی صفحه جمع‌آوری گرم‌تر از هوای ورودی باشد، این محدوده به ۹/۳ تا ۱۲/۴ میکرومتر کاهش خواهد یافت که نشان می‌دهد شیب نمودار بازده برحسب قطر ذرات افزایش یافته و رفتار ایمپکتور به حالت ایده‌آل نزدیک شده است.



نمودار ۸) راندمان جمع‌آوری ذرات در حالت گرم شدن صفحه جمع‌آوری

**۵- نتیجه‌گیری**

ابتدا با مرور مطالعات انجام‌گرفته مشخص شد برای ایمپکتور حقیقی، وقتی هوای خشک با شرایط تغییر دمای صفحه جمع‌آوری وارد این نمونه بردار می‌شود، شبیه‌سازی عددی صورت نگرفته



- 17- Asbach Ch, Clavaguera S, Todea AM. Measurement methods for nanoparticles in indoor and outdoor air. In: Viana M, editor. Indoor and outdoor nanoparticles: Determinants of release and exposure scenarios. Cham: Springer; 2015. pp. 19-49.
- 18- Shamshirband Sh, Malvandi A, Karimipour A, Goodarzi M, Afrand M, Petković D, et al. Performance investigation of micro- and nano-sized particle erosion in a 90 elbow using an ANFIS model. Powder Technology. 2015;284:336-343.
- 19- Sislian PR, Pham D, Zhang X, Li M, Mädler L, Christofides PD. Bacterial aerosol neutralization by aerodynamic shocks using an impactor system: Experimental results for E.coli and analysis. Chemical Engineering Science. 2010;65(4):1490-1502.
- 20- Hinds WC. Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2<sup>nd</sup> Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2012.
- 21- Hari S, Hassan YA, McFarland AR. Optimization studies on a slit virtual impactor. Particulate Science and Technology. 2006;24(2):105-136.
- 22- Straub DJ, Collett Jr JL. Numerical and experimental performance evaluation of the 3-stage FROSTY supercooled cloud collector. Aerosol Science and Technology. 2001;34(3):247-261.
- 23- Lutro HF. The effect of thermophoresis on the particle deposition on a cylinder [Dissertation]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology; 2012.
- 24- Talbot L, Cheng RK, Schefer RW, Willis DR. Thermophoresis of particles in a heated boundary layer. Journal of Fluid Mechanics. 1980;101(4):737-758.
- Journal of Aerosol Science. 2014;74:63-69.
- 9- Park CW, Kim G, Yook SJ, Ahn KH. Investigation of collection efficiency of round-nozzle impactors at different atmospheric pressures and temperatures. Advanced Powder Technology. 2015;26(3):868-873.
- 10- Talebizadeh P, Rahimzadeh H, Ahmadi G. Study the thermophoresis effect on the deposition of nanoparticles from diesel engine exhaust after the dilution tunnel. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(4):383-390. [Persian]
- 11- Li H, Faulkner WB, Haglund JS, Lacey RE. Effect of convergence angle on impactor performance. Aerosol Science and Technology. 2017;51(8):981-987.
- 12- Tsai CJ, Cheng YH. Solid particle collection characteristics on impaction surfaces of different designs. Aerosol Science and Technology. 1995;23(1):96-106.
- 13- Lee BU, Kim SS. The effect of varying impaction plate temperature on impactor performance: Experimental studies. Journal of Aerosol Science. 2002;33(3):451-457.
- 14- McFarland AR, Hu S, Baehl MM, Richardson KW, Poeschl PM. In-line impactor inlet for bioaerosol sampling. Aerosol Science and Technology. 2011;45(6):701-711.
- 15- Son M, Lim S, Sung G, Kim T, Ha Y, Choi K, et al. Development of a novel aerosol impactor utilizing inward flow from a ring-shaped nozzle. Journal of Aerosol Science. 2015;85:1-9.
- 16- Cheon TW, Lee JY, Bae JY, Yook SJ. Enhancement of collection efficiency of an inertial impactor using an additional punched impaction plate. Aerosol and Air Quality Research. 2017;17(10):2349-2357.