



## تحلیل عددی پدیده نشست ذرات گرد و غبار در مبدل‌های حرارتی فشرده با استفاده از رویکرد لاگرانژی

سعید باغدار حسینی<sup>۱</sup>، رامین حقیقی خوشخو<sup>۲\*</sup> و سید محمد جوادی مال آباد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتری مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۲</sup>دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۳</sup>استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۷/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۹

### چکیده

در این مقاله اثر اندازه ذرات در نشست آن‌ها روی سطوح مبدل حرارتی فشرده، به صورت عددی بررسی شده، تأثیر افزایش جرم ذرات و سرعت جریان بر نشست ذرات مطالعه گردیده است. تحلیل عددی فاز سیال با استفاده از رویکرد اویلری و مدل‌سازی نشست ذرات با استفاده از رویکرد لاگرانژی و مدل فاز گسسته (DPM)، به همراه کدهای عددی تعریف شده در انسیس-فلوئنت انجام شده است. برای شبیه‌سازی اثرات توربولانسی، از مدل K- $\omega$  SST استفاده گردیده است. مطالعه روی هندسه سه بعدی پنج ردیف کانال مبدل حرارتی فشرده انجام شده است و جریان هوا با سرعت ۱-۵ m/s و همچنین ذرات با اندازه‌های مختلف از محل ورودی هوا وارد آن شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افت فشار جریان هوا با افزایش اندازه ذرات و جرم آن‌ها افزایش یافته است؛ همچنین نرخ نشست ذرات با افزایش اندازه آن‌ها افزایش یافته و ذرات جامد عمدتاً جلوی کانال و روی کنگره‌های ردیف اول و دوم کانال‌های پره نشست کرده‌اند. اثر ورود همزمان ذرات ریز و درشت به همراه یکدیگر بررسی و مشاهده گردید، احتمال نشست ذرات ریز در حضور ذرات درشت‌تر افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** افت فشار؛ تحلیل عددی؛ ذرات جامد؛ رویکرد لاگرانژی؛ مبدل حرارتی فشرده.

## Numerical Study of Solid-Gas Two Phase Flow in Air-Side of a Compact Heat Exchanger Using Lagrangian Approach

S. Baghdar Hosseini<sup>1</sup>, R. Haghighi Khoshkhou<sup>2,\*</sup>, S. M. Javadi Malabad<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D of Mech. Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Mech. Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Mech. Eng., Quchan University of Advanced Technology, Ghouchan, Iran

### Abstract

In this paper, the effect of particle size on deposition in a compact heat exchanger was investigated numerically. The effect of flow velocity and particle mass on the deposition was also studied and discussed. Flow simulation was performed using Eulerian approach and particle motions were simulated using Lagrangian approach and discrete particle model (DPM) by ANSYS-FLUENT package. Turbulence was modeled with the k- $\omega$  SST model. Five fin channels of a compact heat exchanger were chosen as a 3D computational domain. The air flow was entered with velocity over a range from 1 m/s to 5 m/s and particles having various diameter sizes, were introduced to the computational domain from inlet boundary condition. The results showed that the pressure drop was increased with increase of particle size and particle mass. Besides, deposition ratio was grown with the increase of particle size. The results also demonstrated that most of the particles were settle down on the front of the channels and on the first and the second fins of channels. The effect of simultaneous injection of big and small particles was investigated and the results showed that small particles had more chance to deposit in the presence of the big particles.

**Keywords:** Compact Heat Exchanger; Lagrangian Approach; Numerical Study; Particle; Pressure Drop.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۹۱۲۵۶۴۴۹۰۲ (+۹۸) فکس: ۷۷۳۱۰۴۲۵ (+۹۸)

آدرس پست الکترونیک: [r\\_haghighi@sbu.ac.ir](mailto:r_haghighi@sbu.ac.ir)

## ۱- مقدمه

امروزه یکی از مسائل مهم در صنایع مختلف، بهینه‌سازی مصرف انرژی است. از مبدل‌های حرارتی فشرده، به عنوان یک راهکار جهت مصرف بهینه انرژی استفاده می‌شود. در این مبدل‌ها با افزایش چگالی سطح انتقال حرارت بیشتر از  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ، راندمان انتقال حرارت نسبت به مبدل‌های حرارتی متداول، بهبود قابل توجهی یافته است. رادیا تور خودروها، کندانسورهای هوایی و همچنین دلتاهای برج خنک‌کن هله، نمونه‌ای از این مبدل‌ها هستند. با افزایش چگالی سطح در این مبدل‌ها، احتمال نشست ذرات معلق و گرد و غبار موجود در هوا روی سطوح حرارتی افزایش می‌یابد. نشست این ذرات می‌تواند روی میدان فشار، آرایش جریان، انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه عملکرد این مبدل‌ها اثر گذار باشد؛ لذا با توجه به افزایش ریزگردها و ذرات گرد و خاک موجود در هوا و افزایش احتمال نشست این ذرات روی سطوح حرارتی، شناخت ماهیت و چگونگی نشست ذرات و تأثیر آن بر پارامترهای عملکردی مبدل فشرده، می‌تواند کمک قابل توجهی در کنترل و کاهش اثرات منفی آن داشته باشد. ذرات موجود در هوا که روی سطوح مبدل‌ها نشست می‌کنند، اندازه‌های متنوعی داشته و محدوده وسیعی از ذرات نانو و میکرون تا میلیمتر را در بردارند. بیشتر این ذرات مانند ذرات گرد و غبار، دارای ابعاد کوچکی بوده و تعداد کمی از آن‌ها دارای ابعاد بزرگی در حد چند میلیمتر (نظیر حشرات و برگ گیاهان) هستند. ذرات معلق تحت تأثیر مکانیزم‌های مختلف و نیروهای متنوعی نظیر، اینرسی، نیروی درگ، نیروهای ترموفورتیک و الکتروفورتیک<sup>۱</sup>، نیروی جاذبه، اثرات برون<sup>۲</sup>، نیروی لیفت سافمن<sup>۳</sup> و نیروی ناشی از تغییرات فشار سیال قرار گرفته و بر روی صفحات نشست می‌کنند. مطالعات گسترده‌ای در زمینه نشست ذرات معلق روی مبدل‌های حرارتی، بویژه کندانسورهای هواسازهای خانگی و بویلرهای نیروگاهی صورت گرفته است. هرانز و همکاران، نرخ نشست ذرات جامد ناشی از شکست و پارگی لوله یک مبدل بخار را بررسی کرده و نشان دادند که نشست ذرات تابع

عوامل متعددی از جمله نوع و ماهیت ذره، دبی جرمی سیال و میزان پارگی لوله است [۱]. حقیقی و همکاران اثر نشست ذرات جامد در یک مبدل حرارتی فشرده را به صورت آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نشست ذرات، افت فشار نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده کردند، تغییرات دبی جرمی ذرات جامد و هوا روی میزان نشست اثرگذار است [۲ و ۳]. در کنار مطالعات آزمایشگاهی، استفاده از روش‌های عددی می‌تواند به شناخت ماهیت نشست و پارامترهای موثر در آن کمک قابل توجهی کند. روش‌های حل عددی از متدهای متنوعی برای حل مسائل فیزیکی استفاده می‌کنند. روش حل عددی تفاضل محدود، حجم محدود<sup>۴</sup>، عنصر محدود<sup>۵</sup> و همچنین روش عددی لتیس بولتزمن<sup>۶</sup>، متداول‌ترین روش‌های حل مسائل بوده [۴] و مطالعات عددی متنوعی در زمینه جریان دوفازی جامد-گاز با استفاده از این روش‌ها انجام شده است [۵-۱۰]. در میان روش‌های فوق الذکر، روش حل حجم محدود در گستره وسیعی از مطالعات عددی پیچیده استفاده شده و می‌تواند به عنوان روشی با دقت بالا و هزینه محاسباتی پایین در مقایسه با سایر روش‌ها، مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. برای تحلیل عددی جریان دوفازی جامد-گاز از دو رویکرد اوپلری- اوپلری و لاگرانژی، می‌توان استفاده کرد. رویکرد اول نسبت به رویکرد دوم حجم محاسباتی کمتری دارد، با این وجود دارای محدودیت در معرفی کامل خصوصیات فیزیکی ذرات است [۱۲]. با استفاده از رویکرد اوپلری- لاگرانژی، می‌توان تمامی خصوصیات فیزیکی ذره نظیر، چگالی، اندازه و شکل آن را در سرعت‌های متنوع تعریف کرد [۱۳]. این رویکرد با استفاده از روش‌های فاز گسسته<sup>۷</sup>، فاز گسسته متراکم<sup>۸</sup> و اجزا گسسته<sup>۹</sup> تحلیل عددی جریان دوفازی جامد-گاز مورد اعمال می‌شود. تفاوت این روش‌ها در چگونگی اعمال برهمکنش ذرات و روش‌های عددی مورد استفاده برای حل معادلات است [۱۴]. روش فاز

<sup>5</sup> Finite Difference Method (FDM)<sup>6</sup> Finite Volume Method (FVM)<sup>7</sup> Finite Element Method (FEM)<sup>8</sup> Lattice Boltzman Method (LBM)<sup>9</sup> Discrete Phase Model (DPM)<sup>1</sup> Dense Discrete Phase Model (DDPM)<sup>1</sup> Discrete Element Model (DEM)<sup>1</sup> Thermophoretic Force<sup>2</sup> Electrophoretic Force<sup>3</sup> Brownian Movement<sup>4</sup> Saffman Lift force

و اثر اینرسی را روی نشست ذرات مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش قطر ذرات و همچنین افزایش سرعت هوا نرخ نشست را افزایش می‌دهد. بررسی مطالعات و تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که نشست ذرات جامد روی سطوح مبدل‌های حرارتی فشرده مسئله‌ای پیچیده بوده و تابع عوامل متعددی مانند، اندازه ذرات، ابعاد هندسی مبدل حرارتی و مشخصات فیزیکی هوا و ذرات جامد است. در مطالعه حاضر اثر پارامترهای فیزیکی نظیر، سرعت جریان، دبی جرمی ذرات جامد با اندازه‌های مختلف و اثر ابعاد ذرات در طیف وسیع میکرون تا میلی‌متر، بر نشست ذرات جامد در یک مبدل حرارتی فشرده، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر این پارامترها بر افت فشار جریان هوا، مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است. مطابق ساختار بندی مقاله، معادلات حاکم بر فاز گاز و جامد و همچنین مکانیزم نشست در بخش دوم ارائه شده است. در بخش سوم روش حل عددی استفاده شده، شرایط مرزی و هندسه حل، معرفی گردیده است. نتایج حل عددی در بخش چهارم، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و در پایان (بخش پنجم) نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲- معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر فاز سیال (گاز) و ذرات جامد معرفی شده و مکانیزم نشست شرح داده شده است.

### ۱-۲- معادلات حاکم بر فاز سیال

در این پژوهش، به منظور مدل‌سازی میدان جریان فاز سیال، معادلات RANS با استفاده از رویکرد اویلری حل شده‌اند. این معادلات به طور گسترده در مطالعات دو فاز جامد-گاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷، ۲۱ و ۲۲]. این معادلات برای حل جریان‌های توربولانسی سیالات نیوتنی تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شوند. این معادلات با استفاده از روش تنش‌های رینولدز متوسط گیری زمانی می‌شوند. این معادلات در روابط ۱ و ۲ به ترتیب برای بقای جرم و مومنتوم ارائه شده است.

گسسته نسبت به سایر روش‌ها، هزینه محاسباتی بسیار پایینتری داشته و فاقد مشکلات پایداری و همگرایی است [۱۵]. علاوه بر این اکثر مطالعات عددی جریان دوفازی جامد-گاز با استفاده از این روش انجام شده و قابلیت حل مطلوب آن را نشان داده‌اند [۱۶ و ۱۷]. در حل عددی جریان های دو فاز، چهار تکنیک مختلف برای بیان برهمکنش جامد-گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تکنیک اول، کوپلینگ یک راهه، اثر سیال روی ذرات جامد بررسی می‌شود. در تکنیک دوم، کوپلینگ دو راهه، اثر برهمکنش سیال روی ذرات جامد و بالعکس بررسی شده و در تکنیک سوم، کوپلینگ سه راهه، اثر برهمکنش ذرات روی هم با فرض یک راهه بودن حل عددی فاز سیال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تکنیک چهارم، کوپلینگ چهار راهه، اثر همزمان برهمکنش سیال و ذرات روی هم و همچنین برهمکنش ذرات با هم، به طور کامل بررسی می‌گردد. دو تکنیک اول زمانی استفاده می‌شود که حجم ذرات جامد داخل فاز گاز کم باشد، در صورتی که دو تکنیک آخر زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقدار ذرات جامد در فاز سیال زیاد بوده و اثر تعامل ذرات بر یکدیگر و همچنین برهمکنش ذرات بر سیال قابل توجه باشد [۱۸]. در رویکرد لاگرانژی برای حل عددی جریان دوفازی جامد-گاز می‌توان از هر چهار تکنیک استفاده کرد، اما توصیه می‌شود، به منظور کاهش حجم محاسبات، تکنیک سه راهه و چهار راهه در رویکرد اویلری استفاده شود [۱۹]. باغدار حسینی و همکاران [۳]، نشست ذرات با اندازه‌های یکسان<sup>۱</sup> را در یک مبدل حرارتی فشرده به صورت عددی، مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور از روش حجم محدود استفاده کرده و برهمکنش جامد-گاز را یک راهه در نظر گرفتند. آن‌ها از روش فاز گسسته برای تحلیل فاز جامد استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اندازه ذرات روی نرخ نشست اثر گذار است، همچنین سرعت جریان هوا تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نرخ نشست ذرات دارد. گائو و همکاران نشست گرد و غبار در کانال یک دستگاه تهویه مطبوع به صورت عددی بررسی کردند [۲۰]. آن‌ها نیز از روش حجم محدود برای حل معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس و معادلات فاز جامد استفاده کردند. آن‌ها اثر نیروی درگ، لیفت، جاذبه

<sup>2</sup> Poly-Disperse Particles

<sup>3</sup> Reynolds Average Navier Stokes Equations

<sup>1</sup> Mono-Disperse Particles

نسبت چگالی سیال به ذره جامد و بردار محلی شتاب جاذبه هستند. در رابطه ۶،  $\vec{X}_p$  نشان دهنده بردار موقعیت ذره است [۲۴]. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که مقدار نیروهای لیفت ساافمن، برونی و جرم مجازی برای ذرات بسیار ریز با اندازه های کمتر از میکرون قابل توجه بوده است و در بررسی حرکت ذرات درشت‌تر می‌توان از اثر این نیروها در مقابل نیروی درگ صرفنظر کرد [۲۶-۲۴]. رابطه ۷، شکل کلی نیروی لیفت ساافمن را نشان می‌دهد که در آن  $d_{ij}$  تانسور تغییر شکل و  $K$  ثابت عددی با مقدار  $۲/۵۹۴$  است [۲۵].

$$\vec{f}_{saff} = \frac{2\rho_f v^{0.5} K d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{0.25}} (\vec{U}_f - \vec{U}_p) \quad (۷)$$

نیروی برونی با استفاده از یک فرآیند نویز سفید گوسی مطابق روابط ذیل محاسبه می‌شود که در این روابط  $\delta_{ij}$  دلتا کرونیگر،  $T$  مقدار دمای مطلق سیال و  $v$ ،  $C_c$  و  $K_B$  به ترتیب، ویسکوزیته دینامیکی، ضریب تصحیح کانینگهام و ثابت بولتزمن است.  $\zeta_i$  در معادله ۱۰، عدد تصادفی توزیع گوسی است.

$$S_{n,ij} = S_0 \delta_{ij} \quad (۸)$$

$$S_0 = \frac{216\nu K_B T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c} \quad (۹)$$

$$F_{Brownian} = \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (۱۰)$$

در جریان دو فازی، نیروی جرم مجازی به اینرسی اعمال شده به ذرات جامد در نتیجه افزایش یا کاهش شتاب فاز سیال اطلاق می‌شود. این نیرو توسط رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود که در آن  $V_p$  حجم ذره است.

$$F_{VM} = \frac{\rho_p V_p}{2} \left( \frac{Du_f}{Dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \quad (۱۱)$$

در مطالعه حاضر، اثر نیروهای لیفت ساافمن، برونی، نیروی ناشی از گرادیان فشار و جرم مجازی برای ذرات با اندازه کمتر از میکرون در رابطه ۵ در نظر گرفته شده و برای ذرات درشت‌تر از میکرون از اثر این نیروها صرفنظر شده است. یکی از مسائل مهم در بررسی حرکت ذرات، در نظر گرفتن پخش آن‌ها به واسطه جریان مغشوش و توربولانس است؛ همچنین مطالعات اخیر نشان می‌دهد که نوسانات سرعت بویژه در نواحی نزدیک دیواره‌ها روی نرخ نشست ذرات اثرگذار است. در این مقاله به منظور اعمال نوسانات سرعت، از روش گام‌برداری تصادفی گسسته استفاده شده

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (۲)$$

در معادله فوق  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی است. برای بررسی اثر توربولانس از روش  $k-\omega$  رویکرد SST، معادلات ۳ و ۴ استفاده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (۴)$$

در این معادلات  $G_k$  و  $G_\omega$  به ترتیب، عبارات تولید انرژی جنبشی توربولانسی و  $\omega$  بوده و  $\Gamma_k$  و  $\Gamma_\omega$  به ترتیب، جملات پخش موثر  $k$  و  $\omega$  می‌باشند.  $Y_k$  و  $Y_\omega$  به ترتیب، نرخ اضمحلال  $k$  و  $\omega$  بوده و  $D_\omega$  نرخ پخش عمودی است.  $S_k$  و  $S_\omega$  نیز، جملات چشمه هستند [۲۳].

## ۲-۲- معادلات حاکم بر فاز جامد

برای حل معادلات حاکم بر ذرات جامد از رویکرد لاگرانژی استفاده شده است. در این رویکرد معادله نیروهای وارد بر ذرات جامد که تبیین کننده مسیر حرکت ذرات در میدان جریان سیال است، با استفاده از مدل فاز گسسته حل گردیده است. روابط ۵ و ۶، شکل کلی این معادلات برای یک ذره با جرم ثابت را نشان می‌دهد.

$$\frac{d\vec{U}_p}{dt} = (1 - B)\vec{g} + \frac{1}{\tau_p} v_{rel} \hat{n}_{rel} + \vec{f}_{saff} + \vec{f}_{Brownian} + \vec{f}_{VM} + \vec{f}_{\Delta P} \quad (۵)$$

$$\frac{d\vec{X}_p}{dt} = \vec{U}_p \quad (۶)$$

در سمت راست رابطه ۵ جمله شناوری، نیروی درگ، نیروی لیفت ساافمن، نیروی برونی و جرم مجازی قرار دارد. در عبارت نیروی درگ،  $\hat{n}_{rel}$  معرف برداری که در جهت سرعت نسبی سیال است. در جمله گرانش-شناوری  $S$  و  $\vec{g}$  به ترتیب،

شکل ۱ شماتیک نیروهای وارد بر آن در نزدیکی سطح مبدل حرارتی فشرده را نشان می‌دهد.

$$R_n = \frac{F_{L,eff}}{F_{ad} + F_g \cos \theta} \quad (12)$$

$$R_s = \frac{F_D + F_g \sin \theta}{k_s [F_{ad} + F_g \cos \theta - F_{L,eff}]} \quad (13)$$

$$R_t = abs \left\{ \frac{0.7(d_p)F_D}{r_0(F_{ad} + F_g \cos \theta)} \right\} + abs \left\{ \frac{r_0(F_{L,eff}) + 0.5d_p \sin \theta}{r_0(F_{ad} + F_g \cos \theta)} \right\} \quad (14)$$

در روابط فوق  $F_{L,eff}$  مجموع نیروی لیفت سافمن و نیروی گرادیان فشار است.  $F_g$  نیروی جاذبه و  $F_{ad}$  نیروی چسبندگی و اندروالس می باشد، روابط مربوط به این نیرو در مرجع [۱۶] ارائه شده است. در رابطه ۱۳، مقدار  $k_s$  برابر ۰/۳ است. در رابطه ۱۴،  $r_0$  شعاع برخورد بوده با استفاده از معادله ذیل محاسبه می‌شود. [۳۰].

$$r_0 = \frac{\frac{d_p}{2}(1 - \cos \theta)}{\cos \theta} \quad (15)$$

همانطور که اشاره شد، اگر یک ذره معیار نشست را داشته باشد، به عنوان یک ذره نشست کرده در نظر گرفته شده و از دامنه حل محاسباتی حذف می‌شود. سپس اطلاعات مربوط به آن نظیر، جرم و سرعت برخورد توسط کد مربوطه در ماکرو DEFINE\_DPM\_EROSION ذخیره می‌شود. نرخ جرمی نشست برای دبی جرمی ورودی ذرات  $\dot{m}_p$  که به سطوح حرارتی با مساحت  $A$ ، با زاویه  $\theta$  برخورد کرده‌اند، از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود [۱۶ و ۲۳]. در این رابطه تابع احتمال نشست بوده که با توجه به معیار نشست، برای ذره‌ای که شامل این معیار باشد، برابر با یک و برای ذره‌ای که از سطح بازگشت می‌کند، برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{m}_{dep,A} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} P_{dep} \frac{d\dot{m}_p}{dA} \sin \theta \quad (16)$$

در ماکرو تعریف شده به بسته نرم افزاری، تمامی کدها در داخل یک حلقه روی تمامی سلول‌ها و سطوح هندسه حل نگاشته شده است و در هر بار تکرار تعداد ذرات نشست کرده، جرم نشست و سرعت برخورد در یک حافظه تعریف شده ذخیره می‌شود. با در نظر گرفتن زمان حل عددی برای ذره و همچنین چگالی آن می‌توان ضخامت لایه ذرات نشست کرده

است. استفاده از این روش در حل جریان‌های دوفازی گاز-جامد نتایج قابل قبولی ارائه کرده است [۲۹-۲۷]. در این روش از یک تابع توزیع تصادفی گوسی برای تولید نوسانات سرعت جریان استفاده می‌شود. بسته نرم‌افزاری ANSYS FLUENT به تنهایی نمی‌تواند فرآیند نشست ذرات بر روی سطوح مبدل حرارتی فشرده را شبیه‌سازی کند، بنابراین لازم است، کدهای عددی تحت عنوان توابع تعریف شده توسط کاربر<sup>۱</sup> نوشته شده و به این بسته نرم‌افزاری اضافه گردد [۲۳]. در این پژوهش کدهای عددی با اهداف ذیل توسط ماکرو DEFINE\_DPM\_EROSION تعریف گردیده است.

- معرفی معیار نشست ذرات و اعمال آن به تمامی ذرات
- محاسبه جرم ذرات نشست کرده
- تعداد ذرات برخورد کننده به سطوح
- محاسبه سرعت برخورد ذرات
- محاسبه ضخامت لایه نشست کرده بر روی سطوح

### ۳-۲- مکانیزم نشست

در بررسی جریان دوفازی جامد-گاز، ذرات به دامنه حل محاسباتی وارد شده و معادلات حرکت برای آن‌ها با استفاده از رویکرد لاگرانژی حل می‌شود. وقتی یک ذره به نزدیکی سطح می‌رسد، ممکن است به آن برخورد کرده، نشست کند و یا از سطح بازگشت نموده و مسیر جدیدی را طی کند؛ لذا برای بررسی اینکه یک ذره روی سطح نشست کرده است، انتخاب یک معیار نشست مناسب ضروری است. در این پژوهش، معادله بالانس نیروهای وارد بر ذره در نزدیکی دیواره به عنوان معیار نشست انتخاب گردیده است. با در نظر گرفتن معادله بالانس نیروها، می‌توان این معادله را در راستای حرکت عمودی، مماسی و چرخشی ذره به صورت سه نسبت ذیل نشان داد و به عنوان معیار نشست در نظر گرفت. اگر هنگام انجام محاسبات هر یک از این سه نسبت بزرگتر از ۱ باشد، ذره پس از برخورد به سطح بازگشت کرده و مسیر جدیدی را طی خواهد نمود، در غیر این صورت فرض می‌شود ذره نشست کرده و از دامنه حل محاسباتی حذف می‌شود.

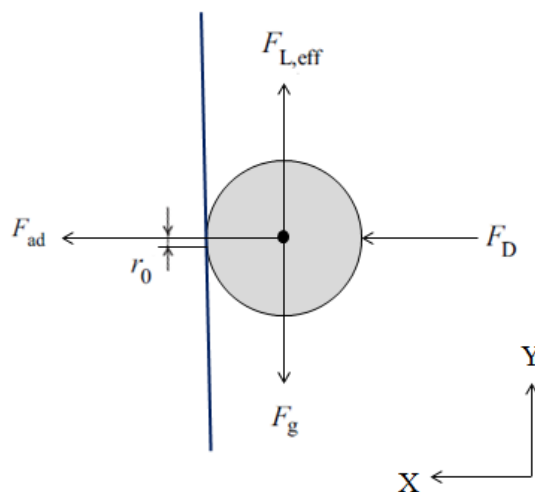
<sup>۱</sup> User Defined Function (UDF)

جریان یکنواخت در ورودی و خروجی کانال‌های مبدل، هندسه حل در جهت ورود و خروج به اندازه ۵ برابر عرض هر پره امتداد یافته است. برای ایجاد شبکه بندی مناسب هندسه حل، از یک شبکه منظم سازمان یافته استفاده شده است. اولین فاصله مش بندی در دیوارها به گونه‌ای انتخاب شده که مقدار  $y^+$  در تمامی شرایط، کمتر از یک باشد. استقلال از مش برای هندسه حل، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن نشان می‌دهد که انتخاب شبکه بندی بسیار ظریف، منجر به بهبود نتایج حل عددی (استعداد) مش شبکه انتخاب شده برای هندسه حل، حدود  $6.5 \times 10^{-4}$  است. در شکل ۳، شبکه بندی هندسه حل نشان داده شده است. در این شکل، یک برش طولی از هندسه به همراه شبکه بندی آن نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، مش در اطراف پرها که تغییرات سرعت قابل توجه بوده، متراکم تر تولید شده است. شبکه بندی در اطراف دیوارها و فضاهای داخلی در راستای ارتفاع هندسه حل با نسبت ابعاد حداکثر ۲:۱ توسعه یافته است. انتخاب صحیح نوع شرایط مرزی تأثیر بسیاری در روند حل عددی و مدل سازی سازی دارد. در این مطالعه هندسه حل شامل، پنج شرط مرزی سرعت ورودی برای سطح ورودی هندسه، فشار خروجی<sup>۲</sup> برای سطح خروجی هندسه، شرط مرزی دیوار برای سطوح کانال، شرط مرزی داخلی<sup>۳</sup> برای محیط داخل هندسه حل و شرط مرزی پرئودیک<sup>۴</sup> برای بخش‌های امتداد یافته در ورودی و خروجی، مطابق شکل ۲ است. در حل عددی هوا از شرط مرزی ورودی به طور یکنواخت و با سرعتی در محدود ۱ m/s تا ۱۰ m/s وارد هندسه حل شده است. شدت توربولانسی ۵٪ بوده، شرط عدم لغزش روی سطوح برقرار گردیده است. ذرات با اندازه‌های مختلف مطابق جدول ۲ با سرعت اولیه صفر در جهت نرمال مرز ورودی و در یک بازه زمانی مشخص ۲۰ ثانیه به داخل هندسه تزریق گردیده‌اند و پس از حل معادلات حرکت آن‌ها و بررسی معیار نشست روی ذرات، سرنوشت آن‌ها تعیین می‌شود [۳۱ و ۳۲]. چگالی ذرات تزریق شده مشابه خرده چوب و خاک اره برابر، با  $700 \text{ kg/m}^3$  و دبی

روی سطح را محاسبه کرد. علاوه بر این قطر هر یک ذرات با استفاده از دستور P\_DIAM (P) محاسبه می‌شود؛ در صورتی که ذره نشست نکند، با یک سرعت جدید بازگشت کرده و مسیر جدیدی را تا زمانی طی خواهد کرد که روی سطح دیگری نشست کرده و یا از هندسه حل خارج شود. سرعت جدید این ذره از روابط ذیل محاسبه می‌شود که در آن‌ها  $V_{p,1}$  و  $V_{p,2}$  به ترتیب، سرعت ذره قبل و بعد از برخورد و  $e_r$  ضریب بازگشت است [۳۰].

$$V_{p,2} = e_r \cdot V_{p,1} \quad (17)$$

$$e_r = \left[ 1 - \left( \frac{V_{p,1}}{u} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$



شکل ۱- شماتیک نیروهای وارد بر آن در نزدیکی سطح

### ۳- روش حل عددی

#### ۳-۱- هندسه حل و شرایط مرزی

در این مطالعه، به منظور کاهش هزینه‌های محاسبات و زمان حل عددی، پنج کانال از یک مبدل حرارتی فشرده انتخاب شده و جهت انجام حل عددی به صورت سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر کدام از صفحات کانال‌ها حاوی ۱۰ پره بوده که به منظور بهبود انتقال حرارت از سطوح مبدل حرارتی فشرده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۲ شماتیک پنج کانال پره نشان داده شده است. ابعاد هندسی کانال‌های پره مطابق با مطالعات تجربی قبلی [۲ و ۳] انتخاب شده و در جدول ۱ ارائه گردیده است. به منظور دستیابی به

<sup>1</sup> Velocity Inlet

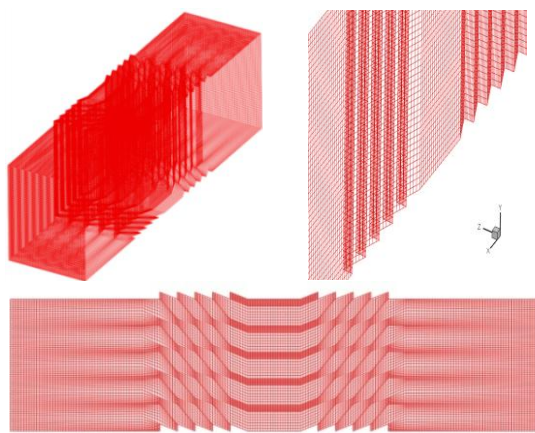
<sup>2</sup> Pressure Outlet

<sup>3</sup> Interior

<sup>4</sup> Periodic

جدول ۲- گروه بندی ذرات جامد براساس اندازه

ردیف	نام گروه	محدوده اندازه ذرات (μm)	نام گروه	اندازه ذرات (μm)
۱	PD1	۱-۱۰۰	MD1	۷۵۰
۲	PD2	۱۰۰-۲۰۰	MD2	۱۰۰۰
۳	PD3	۲۰۰-۳۰۰	MD3	۱۲۵۰
۴	PD4	۳۰۰-۴۰۰	MD4	۱۵۰۰
۵	PD5	۴۰۰-۵۰۰		

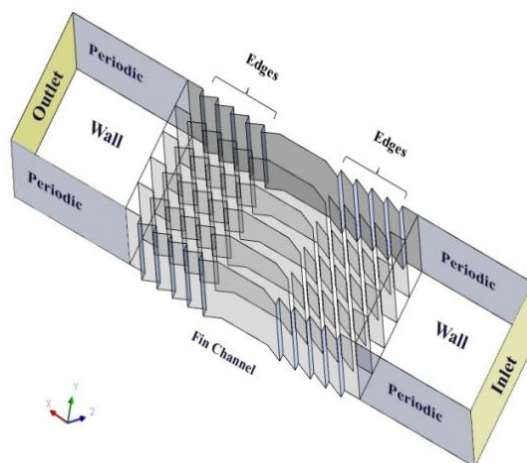


شکل ۳- شبکه بندی هندسه حل

### ۱-۳-۱- استقلال از مش

به منظور بررسی استقلال از مش حل عددی، هندسه حل با چهار مش با اندازه مختلف شبکه بندی شده و سرعت جریان هوا داخل کانال به عنوان معیار انتخاب مناسب ترین شبکه بندی در نظر گرفته شده است. استقلال از مش برای سرعت های مختلف هوا در محدود  $1 \text{ m/s}$  تا  $5 \text{ m/s}$  انجام شده و نتایج آن برای سرعت  $5 \text{ m/s}$  ارائه شده است. در جدول ۳ مقادیر سرعت در موقعیت های مختلف کانال برای چهار مش ارائه شده است. مشاهده می شود، مقادیر سرعت در مش یک و دو نسبت به دو مش دیگر متفاوت است، اما اختلاف مقادیر سرعت برای مش سه و چهار ناچیز است؛ لذا با توجه به نتایج حاصل و به منظور کاهش هزینه و زمان محاسبات، شبکه بندی شماره سه به عنوان مش منتخب در حل عددی، مورد استفاده قرار گرفته است. این شبکه بندی دارای حدود  $55600$  مش است. نتایج حاصل از استقلال از مش برای سایر سرعت ها نیز، نشان دهنده صحت انتخاب مش سه است.

جرمی آن برابر، با  $0.001 \text{ kg/s}$  انتخاب گردیده است. توزیع جرمی ذرات تزریق شده با اندازه های مختلف به کمک توزیع روسین-رامرل<sup>۱</sup> صورت گرفته است. هوا به صورت تراکم ناپذیر فرض شده و خواص فیزیکی آن ثابت در نظر گرفته شده است. چگالی هوا و ویسکوزیته دینامیکی آن به ترتیب برابر با  $1/225 \text{ kg/m}^3$  و  $1/789 \times 10^{-5} \text{ kg.s/m}$  است. مشخصات فیزیکی ذره و همچنین مشخصات تزریق آن ها در فایل تزریق معرفی گردیده است. این فایل حاوی موقعیت تزریق ذرات، دبی جرم ذرات متناسب با قطر آن ها، زمان شروع و پایان تزریق، تابع توزیع اندازه ذرات و سرعت آن ها است. علاوه بر این قطر مینیمم، ماکزیمم و متوسط ذرات، پارامتر توزیع و همچنین تعداد قطرها در تابع توزیع ذرات تعریف گردیده است.



شکل ۲- شماتیک هندسه حل و شرایط مرزی حاکم بر آن

جدول ۱- مشخصات هندسی مبدل حرارتی فشرده [۲ و ۳]

۴۴	چگالی پره در هر $100$ میلیمتر
کنگره دار	نوع پره
۳	عرض کانال (mm)
۳۰	طول کانال (mm)
$18/5$	ارتفاع کانال
$0/15$	ضخامت پره
عمودی	راستای طولی کانال
$330 \times 640$	ابعاد واقعی مبدل حرارتی فشرده (mm)

<sup>1</sup> Rosin-Rammler Distribution

$$F = \sum \left( \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (19)$$

در این رابطه  $\rho_p$ ،  $d_p$  و  $\dot{m}_p$  به ترتیب، چگالی ذره، قطر و دبی جرمی آن می‌باشند. عدد رینولدز ذره و عدد استوکس دو عدد بی بعد بوده که در جریان دوفازی جامد-گاز مورد استفاده قرار گرفته و توسط روابط ذیل محاسبه می‌شوند. از عدد رینولدز برای بیان ماهیت سیال اطراف ذرات و از عدد استوکس برای بیان رفتار ذات معلق در جریان سیال استفاده می‌شود. در رابطه ۲۱  $C_c$  فاکتور تصحیح کانینگهام بوده و  $W_{ch}$  عرض کانال است [۳۴].

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot u \cdot d_p}{\mu_f} \quad (20)$$

$$StK = C_c \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot u}{18 \cdot \mu_f \cdot W_{ch}} \quad (21)$$

### ۳-۳- صحنه گذاری نتایج حل عددی

به منظور صحنه گذاری روش حل عددی، نتایج حاصل از آن با تجربیات آزمایشگاهی گذشته، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند [۲] و [۳]. در این آزمایش‌ها از یک تونل هوا با مقطع مربعی به طول ۴۰ cm استفاده شده است. جنس تونل از پلی گلس بوده تا بتوان روند آزمایش را مورد مشاهده قرار داد. مشخصات هوا و ذرات تزریق شده به تونل هوا، در جدول ۴ ارائه شده است. اطلاعات تکمیلی در مراجع [۲] و [۳] ارائه گردیده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، در شکل ۴ ارائه شده است. در قسمت (الف) مشاهده می‌شود، روند افت فشار، بدون تزریق ذره، در سرعت‌های مختلف برای نتایج عددی و آزمایشگاهی مشابه هم است. افت فشار به صورت تابعی از جرم ذرات تزریق شده در قسمت (ب) نشان داده شده و نتایج عددی و تجربی، تقریباً مشابه هم هستند. در قسمت (ج) شکل ۴ نشست ذرات به عنوان تابعی از اندازه آن‌ها ترسیم گردیده و مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد که روند تغییر نشست ذرات برحسب اندازه آن‌ها مشابه هم هستند. مقایسه نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روش حل عددی، از تطابق و صحت قابل قبولی برخوردار است.

جدول ۳- مقادیر سرعت در کانال پره برای چهار مش بندی

مش ۱	مش ۲	مش ۳	مش ۴	
۲۸×۱۰ <sup>۴</sup>	۴۷×۱۰ <sup>۴</sup>	۶۶/۵×۱۰ <sup>۴</sup>	۱۲۰×۱۰ <sup>۴</sup>	تعداد سلول‌ها
۴/۹۳۲	۵/۰۱۵	۵/۱۰۳	۵/۱۴۰	سرعت در ورودی کانال (m/s)
۵/۶۴۳	۵/۷۱۰۵	۵/۷۸۱	۷۸۵۵	سرعت در وسط کانال (m/s)
۵/۹۹۱	۶/۰۵۶	۶/۱۲۲	۶/۱۳۰	سرعت در خروجی کانال (m/s)

### ۳-۲- روش اجرای حل عددی

در این مطالعه، از روش حجم محدود برای حل معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز جریان هوا در یک هندسه سه بعدی استفاده شده است. معادلات حرکت ذرات به روش فاز گسسته و با کمک متد عددی رانگ گوتا حل شده‌اند. عبارات جابجایی و پخش با استفاده از روش بالادستی مرتبه دوم جداسازی شده‌اند. برای اجرای حل عددی، از بسته نرم افزاری ANSYS-FLUENT استفاده شده و کدهای عددی به کمک UDF به آن اضافه گردیده است. برای شبیه سازی اثرات توربولانسی و اغتشاش جریان، از مدل k- $\omega$  SST استفاده شده است. حل جریان سیال پایدار بوده و برای کوپلینگ فشار و سرعت از متد سیمپل استفاده شده است [۳۳]. شرط همگرایی برای مقادیر سرعت، تنش های رینولدز و عبارات پیوستگی کمتر از  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. برهم کنش فاز سیال و ذرات جامد به صورت دو راهه انتخاب گردیده و از برهم کنش ذرات جامد با یکدیگر به واسطه دبی جرمی کم ذرات تزریق شده به هندسه حل، صرفنظر گردیده است [۲] و [۳]. در تکنیک دو راهه، برهم کنش بین سیال و ذرات جامد با افزودن عبارت تغییر مومنتوم به صورت یک عبارت چشمه، مطابق رابطه ذیل امکان پذیر گردیده است که در آن اثرات چگالی و غلظت ذرات جامد در نظر گرفته شده است. تغییرات مومنتوم سیال و ذرات جامد تا لحظه عدم تغییر این عبارت ادامه یافته و پس از اطمینان از عدم تغییر مومنتوم، متوقف می‌شود.



جدول ۴- مشخصات هوا و ذرات جامد در مطالعات

چگالی هوا (kg/m <sup>3</sup> )	ویسکوزیته هوا (kg.s/m)	محدوده سرعت هوا (m/s)	محدوده اندازه ذرات (μm)
۱/۲	۱/۸	۵-۱	۴۰۰۰-۱

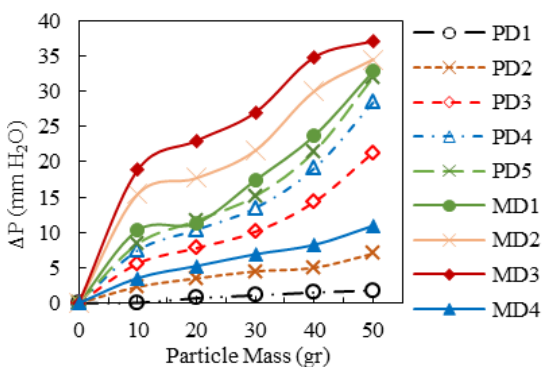
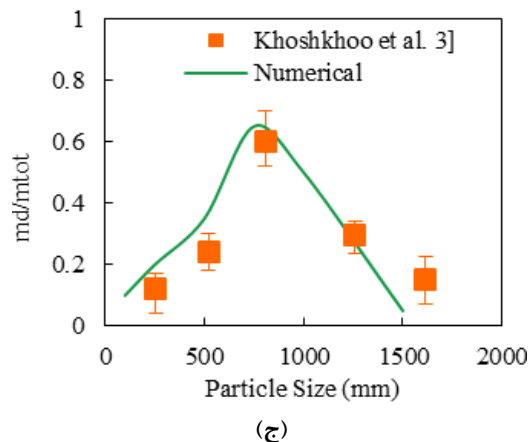
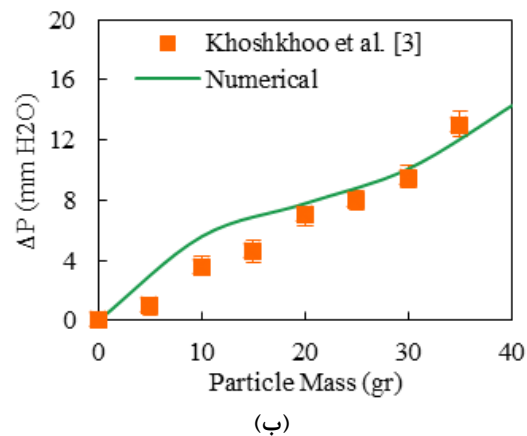
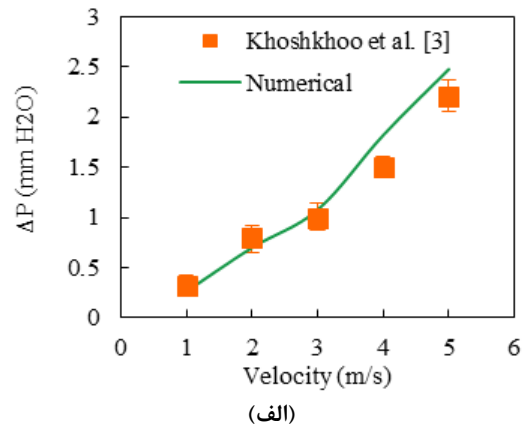
آزمایشگاهی [۲ و ۳]

۴- بحث و بررسی نتایج

در این مقاله امکان نشست ذرات در پنج کانال پره دار یک مبدل حرارت فشرده، مورد بررسی قرار گرفته و اثر اندازه ذرات روی افت فشار جریان هوا مطالعه شده است. علاوه بر این تأثیر اندازه ذرات و سرعت جریان روی مقدار نشست ذرات بررسی شده است.

۴-۱- اثر جرم ذرات و اندازه آن‌ها بر افت فشار

در این بخش در ابتدا اثر تزریق هر یک از گروه ذرات با اندازه های مختلف بر افت فشار بررسی شده، سپس اثر تزریق همزمان گروه ذرات ریز (PD1, PD2) با سایر گروه‌ها، روی افت فشار مطالعه شده است. بدین منظور ۹۵٪ جرمی از گروه‌های PD1 و PD2 با ۵٪ جرمی از ذرات سایر گروه‌ها وارد هندسه حل شده‌اند. افت فشار جریان هوا با تفاضل مقادیر فشار در مقطع ورودی به کانال و مقطع خروجی از آن محاسبه شده است. در شکل ۵، اثر تزریق ذرات مختلف روی افت فشار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با تزریق گروه ذرات متنوع، افت فشار افزایش یافته است؛ همچنین مشاهده می‌شود، مقدار افت فشار ناشی از تزریق ذرات ریز PD1 و PD2 نسبت به سایر گروه‌ها کمتر است. ذرات هم اندازه نیز، به هندسه حل تزریق شده و اثر آن‌ها بر افت فشار بررسی گردیده است. ذرات هم اندازه ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ میکرونی با توجه به اینکه نسبت به گروه‌های PD درشت‌تر هستند، افت فشار بیشتری ایجاد کرده‌اند.

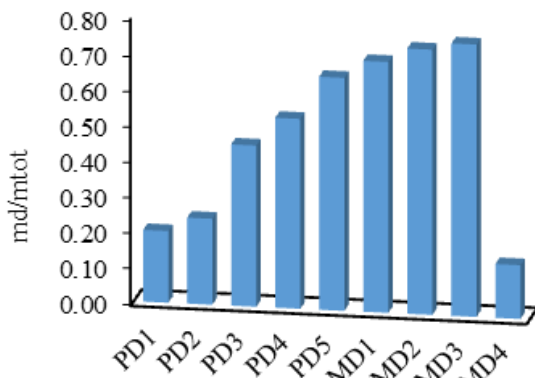


شکل ۵- اثر تغییر جرم گروه ذرات پنج بر افت فشار

در حالیکه ذره با اندازه ۱۵۰۰ میکرون، افت فشار کمتری حتی کمتر از گروه PD3 ایجاد کرده است؛ زیرا اکثر این

شکل ۴- مقایسه نتایج عددی و داده های آزمایشگاهی

جرم کل ذرات تزریق شده) برای هر پنج گروه ذرات PD در سرعت ۳ m/s نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه ذرات، مقدار نشست آن‌ها افزایش یافته است. ذرات ریز نسبت به ذرات درشت، زمان پاسخ<sup>۱</sup> کمتری به تغییرات جریان دارند. آن‌ها روی خطوط جریان نشسته و تابع حرکت جریان هوا هستند، لذا به راحتی از داخل کانال عبور کرده و احتمال برخوردشان به سطوح و نشست آن‌ها کم است. ذرات درشت دارای زمان پاسخ کندتری هستند، در نتیجه تابعی از حرکت جریان هوا نبوده، می‌توانند از خطوط جریان خارج شده، به سطوح برخورد کرده و نشست کنند. مقدار نشست ذرات گروه‌های PD1 و PD2، حدود ۲۰٪ بوده و با افزایش اندازه ذرات از گروه PD3 تا PD5 مقدار نشست به حدود ۵۰٪ تا ۸۰٪ رسیده است.



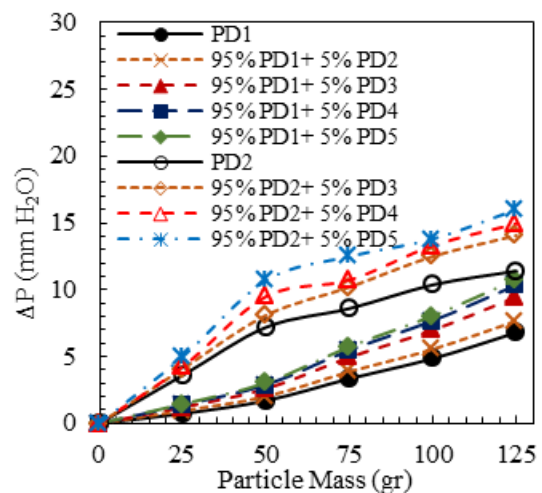
شکل ۷- نسبت نشست ذرات گروه‌های پنج گانه

برای ذرات گروه PD3 تا PD5 می‌توان نتیجه گرفت که نیروی اینرسی غالب بوده، این ذرات از خطوط جریان منحرف شده‌اند و احتمال نشست آن روی سطوح مبدل حرارتی فشرده بیشتر بوده است. در این شکل همچنین مقدار نشست ذرات هم اندازه MD1 تا MD4 با اندازه ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۵۰۰ میکرون نشان داده شده است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقدار نشست ذرات ۷۵۰  $\mu\text{m}$  تا ۱۲۵۰  $\mu\text{m}$  نسبت به تمامی گروه ذرات PD بیشتر بوده؛ در حالیکه ذرات ۱۵۰۰  $\mu\text{m}$  نتوانسته‌اند نشست کنند، این ذرات تحت تأثیر نیروی وزنشان به سمت پایین هدایت شده و به سطوح مبدل

ذرات قبل از رسیدن به مبدل حرارتی فشرده به واسطه نیروی وزن خود به سمت پایین هدایت شده‌اند، لذا افت فشار ناشی از حضور آن‌ها در ورودی و خروجی کانال‌های مبدل مشاهده نشده است.

در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تزریق همزمان ذرات درشت با ذرات ریز گروه‌های PD1 و PD2، منجر به افزایش افت فشار گردیده است، مقدار افت فشار برای تزریق ذرات PD5 حدود ۳ برابر شده است. مطابق رابطه ۱۹ حضور ذرات درشت‌تر در هندسه حل، مومنوم جریان هوا را تغییر می‌دهد و در نتیجه افت فشار بیشتری مشاهده می‌شود.

نتایج ارائه شده در این شکل‌ها، حاصل حل عددی برای سرعت هوا ۳ m/s بوده و در سرعت‌های دیگر نیز، روندی مشابه این نتایج حاصل گردیده است.



شکل ۶- اثر تزریق همزمان گروه ذرات PD1 و PD2 با ذرات درشت‌تر بر افت فشار

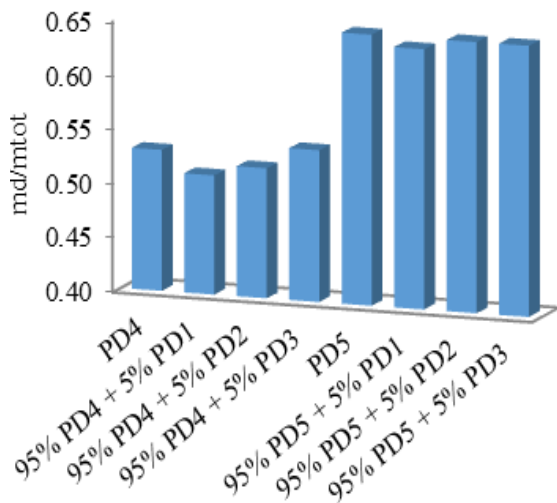
در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش جرم ذرات تزریق شده به داخل هندسه حل، افت فشار به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. به عنوان مثال، افزایش تزریق گروه PD1 از ۲۵ گرم به ۱۲۵ گرم، افت فشار جریان را پنج برابر کرده است.

#### ۴-۲- اثر اندازه ذرات بر نشست آن‌ها

در این بخش اثر اندازه ذرات روی میزان نشست بررسی شده است. در شکل ۷، نسبت نشست (جرم ذرات نشست کرده به

<sup>۱</sup> Response Time

حتی برای تزریق همزمان این گروه ذرات با ذرات گروه‌های PD1 و PD2 مقدار نشست کاهش می‌یابد.

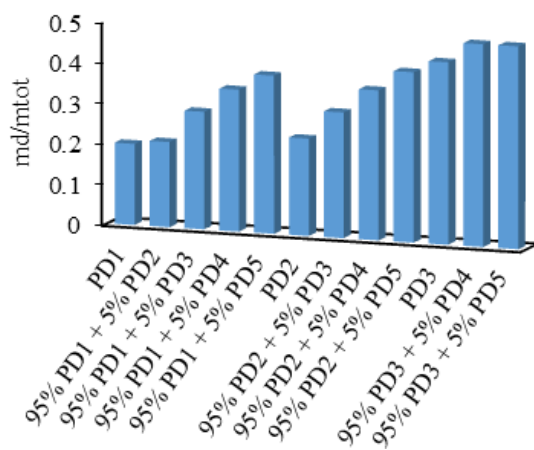


شکل ۹- اثر تزریق همزمان گروه ذرات درشت PD4 و PD5 با ذرات ریز سایر گروه‌ها روی مقدار نشست

می‌توان نتیجه گرفت که عامل اصلی نشست ذرات، گروه‌های PD4 و PD5 بوده و ذرات ریزتر اثر قابل توجهی نداشته و حتی با کاهش جرم ورودی این ذرات درشت به میزان ۵٪، مقدار نشست کاهش یافته است.

در شکل ۱۰، ۹۵٪ جرمی از گروه ذرات با اندازه‌های مختلف (PD) به همراه ۵٪ جرمی از ذرات یک اندازه (SD) به طور همزمان وارد هندسه حل شده و اثر این تزریق همزمان بر مقدار نشست مطالعه شده است. اندازه ذرات SD به ترتیب  $500 \mu\text{m}$ ،  $750 \mu\text{m}$ ،  $1000 \mu\text{m}$ ،  $1250 \mu\text{m}$  و  $1500 \mu\text{m}$  بوده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه ذرات، مقدار نشست زیاد می‌شود. بیشترین مقدار نشست برای ذره  $1500 \mu\text{m}$  حاصل شده است که می‌توان آن را به واسطه کاهش مومنتوم جریان هوا ناشی از حضور این ذرات، تفسیر نمود و در نهایت احتمال نشست ذرات ریزتر بیشتر شده و این ذرات به سطوح برخورد کرده و نشست نموده‌اند. مقدار افزایش نشست ناشی از تزریق ذرات  $500 \mu\text{m}$  و  $700 \mu\text{m}$  نسبت به سایر ذرات کمتر بوده است. نتایج حاصل از تزریق ذرات درشت‌تر از  $1500 \mu\text{m}$  نشان می‌دهد که این ذرات پس از تزریق به واسطه نیروی وزن خود به سمت پایین هدایت شده، اصلاً به سطوح مبدل حرارتی فشرده نرسیده‌اند؛ بنابراین اثر تزریق همزمان

حرارتی فشرده نرسیده‌اند. در شکل ۸ مقدار نشست ناشی از تزریق همزمان گروه ذرات مختلف تماماً نشان داده شده است. در حل عددی مقدار جرمی ۹۵٪ از هر گروه با مقدار جرمی ۵٪ از سایر گروه‌ها وارد هندسه حل شده و مقدار نشست این ذرات مطالعه گردیده است. مشاهده می‌شود، تزریق همزمان منجر به افزایش نشست ذرات گروه‌های PD1، PD2 و PD3 شده است. به عنوان مثال برای تزریق همزمان گروه PD1 با گروه PD5، مقدار نشست از ۲۰٪ به حدود ۴۰٪ رسیده است. با تزریق همزمان ذرات درشت به هندسه مقدار مومنتوم جریان هوا به واسطه معادله ۱۹ بویژه در نزدیکی ورودی کانال‌ها کاهش یافته و در نتیجه ذرات ریزتر که تابع جریان هوا هستند، می‌توانند راحت‌تر از خطوط جریان جدا شده و به صفحات مبدل برخورد نمایند.



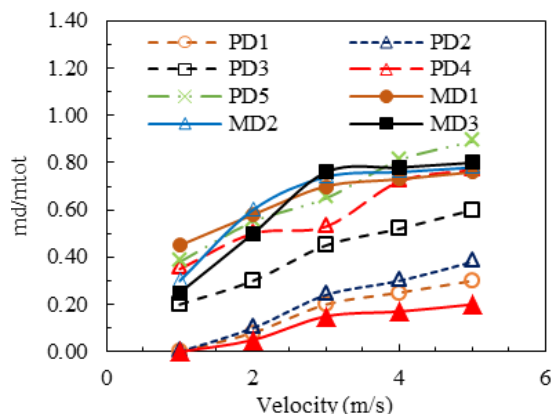
شکل ۸- اثر تزریق همزمان گروه ذرات مختلف با هم بر روی مقدار نشست

علاوه بر این احتمال نشست ذرات درشت‌تر به واسطه نیروی اینرسی بیشتر آن‌ها، بالاتر است. بیشترین مقدار نشست برای تزریق همزمان ۹۵٪ PD3 با ۵٪ جرمی PD5 صورت گرفته است. مشاهده می‌شود با تزریق همزمان گروه‌های PD1 و PD2، مقدار نشست افزایش قابل توجهی نداشته است. در شکل ۹ تزریق همزمان گروه ذرات درشت PD4 و PD5 با ذرات ریز سایر گروه‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، تزریق همزمان ذرات گروه‌های PD4 و PD5 با ذرات ریز گروه‌های PD1 تا PD3 مقدار نشست را افزایش نداده و

پره آخر نسبت به سایر گروه‌ها کمتر است. علاوه بر این، ذرات این گروه‌ها توانسته‌اند، از مسیر جریان منحرف شده و روی سایر پره‌ها به ویژه پره‌های شماره ۶ و ۷ نشست کرده‌اند.

#### ۲-۴- اثر سرعت جریان هوا بر نشست ذرات

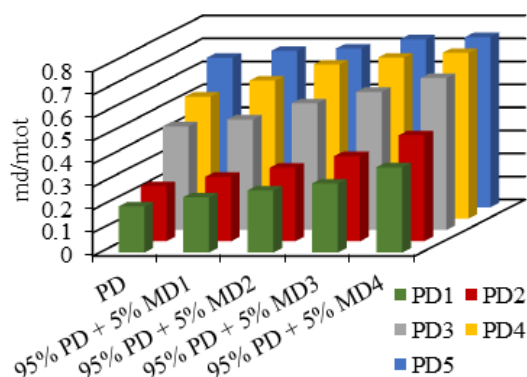
در این بخش اثر سرعت جریان هوا روی مقدار نشست ذرات مطالعه شده است. مقدار سرعت جریان هوا در محدود ۱ m/s تا ۵ m/s انتخاب شده است. مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جریان هوا، مقدار نشست ذرات در گروه‌های مختلف (PD) و همچنین ذرات هم اندازه (MD) افزایش یافته است. مقدار افزایش نشست برای ذرات گروه PD1 و PD2 به ترتیب حدود، ۳۰٪ و ۴۰٪ و برای گروه‌های PD3، PD4 و PD5 حدود ۴۰٪ بوده است. مقدار افزایش نشست ذرات برای ذرات هم اندازه بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ متغیر بوده است. در شکل مشاهده می‌شود، مقدار نشست ذره  $1500 \mu\text{m}$  در سرعت ۱ m/s تقریباً برابر صفر بوده و با افزایش سرعت تا ۵ m/s حدود ۲۰٪ افزایش یافته است. بطورکلی با افزایش سرعت و بالطبع افزایش تلاطم جریان و سرعت‌های لحظه‌ای، احتمال برخورد ذرات بویژه در پره‌های ابتدایی افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر سرعت، نیروی درگ بر نیروی اینرسی ذرات غلبه کرده و نشست آن‌ها را افزایش می‌دهد، از طرفی با افزایش سرعت، تأثیر نیروی درگ و اینرسی در حرکت ذرات درشت، نسبت به نیروی گرانش بیشتر شده و شانس نشست این ذرات را افزایش داده است.



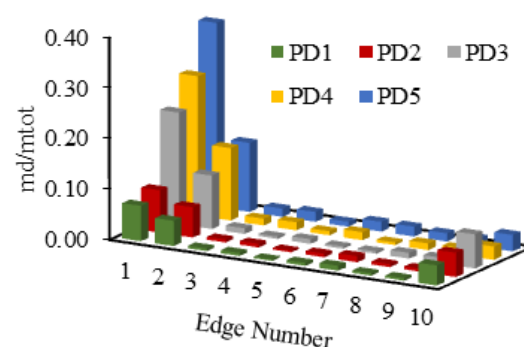
شکل ۱۲- اثر سرعت جریان هوا بر روی مقدار نشست ذرات

ذرات درشت تر از  $1500 \mu\text{m}$ ، در این مقاله بررسی نشده است.

در شکل ۱۱ نسبت نشست روی هر یک از پره‌های کانال مبدل حرارتی فشرده نشان داده شده است.



شکل ۱۰- اثر تزریق همزمان گروه ذرات با اندازه‌های مختلف (PD) و ذرات هم اندازه (MD) روی مقدار نشست



شکل ۱۱- نشست ذرات با اندازه‌های مختلف بر روی پره‌های کانال مبدل حرارتی فشرده نشست

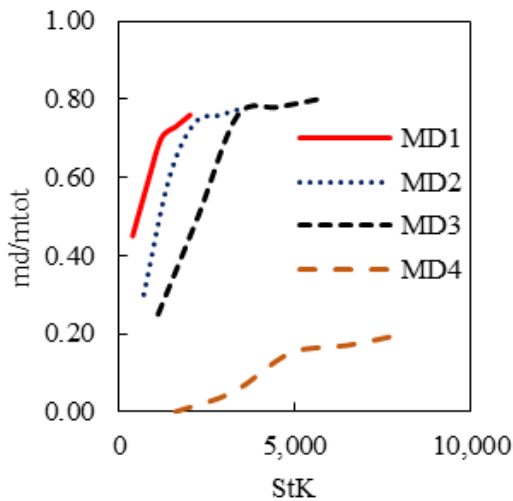
مشاهده می‌شود، بیشترین میزان نشست تمامی گروه ذرات در جلوی مبدل و روی پره اول و دوم صورت گرفته است. پس از آن بیشترین مقدار نشست در پره آخر مشاهده شده است، زیرا در پشت هر پره ناحیه سکون ایجاد می‌شود و ذراتی که نتوانسته‌اند روی سایر پره‌ها نشست کنند، با کاهش سرعت جریان بویژه در پره آخر احتمال نشست بیشتری داشته‌اند. مقدار نشست ذرات روی پره‌های میانی بسیار ناچیز بوده است. علاوه بر این مشاهده می‌شود، ذرات درشت گروه‌های PD5 و PD4 در محدوده  $300 \mu\text{m}$  تا  $500 \mu\text{m}$  عمدتاً روی دو پره اول نشست کرده‌اند و مقدار نشست آن‌ها روی

شده است، اعداد بدون بعد رینولدز و استوکس تنها تابعی از اندازه ذرات و سرعت جریان می‌باشند.

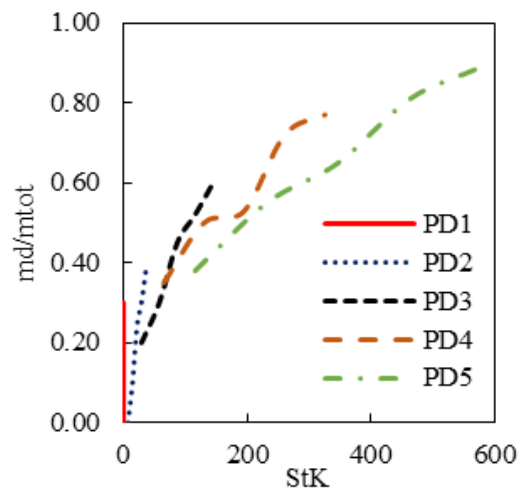
در شکل ۱۳ روند تغییر نشست ذرات برحسب عدد استوکس برای گروه PD1 نیز افزایشی بوده، ولی با توجه به بزرگی اعداد در نمودار کاملاً مشخص نمی‌باشد. در این شکل با افزایش عدد استوکس، به عبارتی افزایش تأثیر نیروی درگ

در شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب، نرخ نشست ذرات به صورت تابعی از عدد استوکس و نسبت عدد استوکس به رینولدز ذره (StK/Rep) نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش عدد استوکس نرخ نشست نیز افزایش یافته است. با توجه به اینکه در حل عددی مشخصات فیزیکی جریان و ذرات نظیر چگالی ثابت فرض

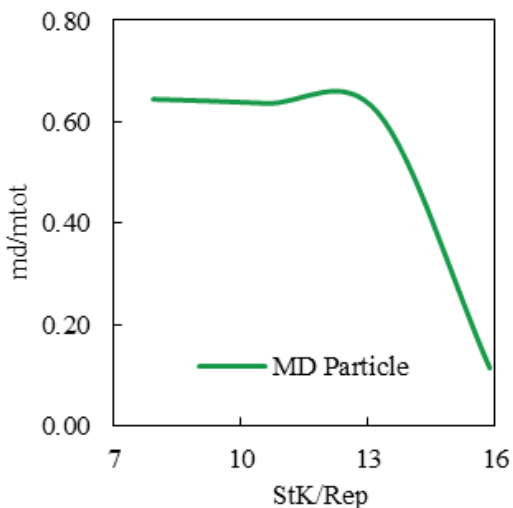


(ب)

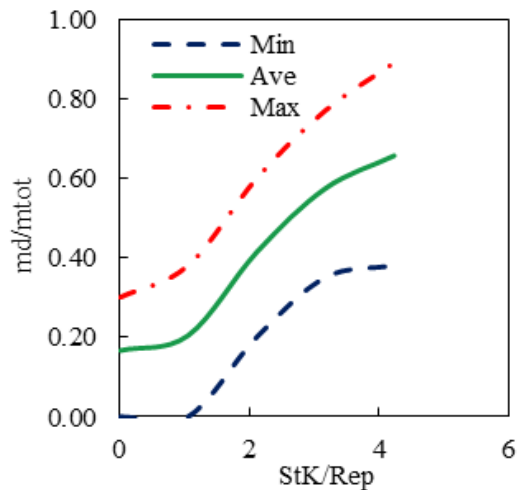


(الف)

شکل ۱۳- رابطه عدد استوکس با مقدار ذره نشست کرده (الف) برای گروه ذرات (ب) برای ذرات هم اندازه



(ب)



(الف)

شکل ۱۴- رابطه نسبت عدد استوکس به رینولدز ذره با مقدار ذره نشست کرده (الف) برای گروه ذرات (ب) برای ذرات هم اندازه

۲- افزایش دبی جرمی ذرات به مقدار ۵۰ گرم، باعث افزایش افت فشار جریان هوا به مقدار حدود ۲۵٪ می‌شود، در واقعیت این مسئله منجر به گرفتگی بیشتر کانال‌های مبدل و تغییر میدان جریان هوا در اطراف آن می‌شود.

۳- با افزایش اندازه ذرات، احتمال نشست آن‌ها روی سطوح مبدل حرارتی فشرده افزایش می‌یابد. علاوه بر این تزریق همزمان ذرات ریز و درشت با هم، منجر به افزایش نشست ذرات ریز روی سطوح می‌شود. ذرات درشت می‌توانند الگوی جریان هوا را تغییر داده و به نشست بیشتر ذرات ریز کمک کنند.

۴- افزایش سرعت جریان هوا، مقدار نشست ذرات را بویژه برای ذرات درشت به میزان حدود ۵۰٪ افزایش می‌دهد.

۵- تزریق همزمان ذرات ریزتر از ۵۰۰ میکرون و ذرات درشت تر از ۵۰۰ میکرون، بویژه ذرات درشت‌تر از ۱۰۰۰ میکرون، باعث افزایش میزان نشست ذرات روی سطوح حرارتی می‌شود.

۶- در تزریق همزمان ذرات ریز و درشت، حضور ذرات درشت منجر به کاهش مومنتوم جریان هوا و کاهش سرعت به صورت موضعی شده و در نتیجه احتمال نشست ذرات ریز افزایش می‌یابد.

وارد بر ذرات بر حرکت آن‌ها، مقدار نشست افزایش یافته است. مقدار افزایش نشست برای ذرات درشت‌تر، با اینرسی و نیروی درگ بیشتر، نسبت به سایر ذرات قابل توجه بوده است.

در شکل ۱۴-الف نسبت عدد استوکس به رینولدز ذره ( $StK/Re_p$ ) توسط سه نمودار براساس قطرهای مینیمم، متوسط و ماکزیمم تعریف شده در توزیع روسین-راملر، برای هر گروه ذره PD نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، هر سه نمودار روند مشابهی داشته و با افزایش این پارامتر ( $StK/Re_p$ ) مقدار نشست افزایش یافته است. در واقع نسبت عدد استوکس به عدد رینولدز ذره بیانگر، نسبت قطر ذره و طول مشخصه جریان بوده و با افزایش این نسبت مقدار نشست ذرات ریز و درشت افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۴-ب مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت عدد استوکس به رینولدز ذره ( $StK/Re_p$ ) برای ذرات هم اندازه  $750 \mu m$ ،  $1000 \mu m$  و  $1250 \mu m$  و  $1500 \mu m$  مقدار نشست ابتدا به مقدار کمی افزایش و سپس کاهش یافته است. برای ذرات تک اندازه افزایش نسبت قطر ذره به طول مشخصه جریان، منجر به افزایش مقدار نشست شده، اما مقدار نشست برای ذره  $1500 \mu m$  کاهش یافته است، زیرا این ذره تحت تأثیر نیروی وزن بوده و به پایین سقوط کرده است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر نشست ذرات با اندازه‌های مختلف به صورت عددی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. ذرات به پنج گروه در محدوده‌های متنوع تقسیم‌بندی شده و به صورت ناپایدار و در یک بازه زمانی مشخص وارد هندسه حل شده اند. اثر اندازه این گروه‌ها بر افت فشار جریان هوا و همچنین روی مقدار نشست بررسی شده است. علاوه بر این اثر سرعت جریان هوا در محدوده  $1 \text{ m/s}$  تا  $5 \text{ m/s}$  روی مقدار نشست مطالعه شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها به شرح ذیل است.

۱- تزریق ذرات جامد منجر به افزایش افت فشار جریان هوا می‌شود؛ همچنین افزایش اندازه ذرات از  $1 \mu m$  تا  $500 \mu m$ ، منجر به افزایش افت فشار به مقدار حدود ۳۰٪ می‌شود.

## ۶- فهرست علائم

نسبت چگالی سیال به ذره	$B$
انتشار متقابل	$D_{\omega}$
قطر (m)	$d$
تانسور تغییر شکل	$d_{ij}$
ضریب بازگشت	$e_r$
تولید انرژی جنبشی ناشی از تغییرات سرعت متوسط (J)	$G_k$
تولید انرژی جنبشی ناشی از تولید (J) $\omega$	$G_{\omega}$

	حروف یونانی	شتاب جاذبه (m/s <sup>2</sup> )	$\bar{g}$
دلتای کرونیگر	$\delta_{ij}$	انرژی جنبشی آشفتهگی (J/kg)	$k$
زاویه برخورد (درجه)	$\theta$	ثابت استفان بولتزمن	$K_B$
عدد تصادفی توزیع گوسی	$\zeta_i$	ضریب لغزش	$k_s$
ویسکوزیته دینامیکی (kg/s.m)	$\mu$	دبی جرمی جریان (kg/s)	$\dot{m}$
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	فشار (N/m <sup>2</sup> )	$p$
عدد پراوتل برای k	$\sigma_k$	تابع احتمال نشست	$P_{dep}$
عدد پراوتل برای $\omega$	$\sigma_\omega$	تولید انرژی آشفتهگی ناشی از بایونسی (J/kg)	$P_b$
پخش موثر برای k	$\Gamma_k$	تولید انرژی آشفتهگی ناشی از گرادیان سرعت (J/kg)	$P_k$
پخش موثر برای $\omega$	$\Gamma_\omega$	تانسور کرنش متوسط	$S$
نرخ اضمحلال انرژی آشفتهگی (J/kg.s.m <sup>3</sup> )	$\omega$	شدت طیفی (W/sr.Hz)	$S_{n,ij}$
	زیرنویس‌ها	جمله چشمه برای انرژی جنبشی آشفتهگی	$S_k$
سیال	$f$	بردار موقعیت	$\vec{r}$
ذره جامد	$p$	شعاع برخورد (m)	$r_0$
		زمان (s)	$t$
		سرعت ذره (m/s)	$U_p$
		سرعت سیال (m/s)	$u$
		نوسانات سرعت در جهت x (m/s)	$u'$
		نوسانات سرعت در جهت y (m/s)	$v'$
		نوسانات سرعت در جهت z (m/s)	$w'$
		استهلاک برای $\omega$	$Y_\omega$
		استهلاک برای k	$Y_k$
		فاصله از دیواره (m)	$y$
		حجم ذره (m <sup>3</sup> )	$V_p$

### ۷- مراجع

- [1] Herranz LE, Tardáguila RD (2014) New data and interpretation on source term attenuation within the break stage during meltdown SGTR sequences. Nucl Eng Des 270: 283-294.
- [2] Haghghi Khoshkhoo R, McCluskey FMJ (2007) Air-side fouling of compact heat exchangers for discrete particle size ranges. Heat Transfer Eng 28(1): 58-64.
- [3] Baghdar Hosseini S, Haghghi Khoshkhoo R, Javadi Malabad SM (2017) Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger. Appl Therm Eng 115: 406-417.
- [4] Zhang Z, Zhang X (2012) Direct simulation of low-Re flow around a square cylinder by numerical manifold method for Navier-Stokes equations. J Appl Math Article ID465972.

- [17] Han H, He YL, Tao WQ, Li YS (2014) A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction. *Int J Heat Mass Tran* 72: 210-221.
- [18] Mousazadeh F (2013) Hot spot formation in trickle bed reactors. *MSC Thesis Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)*.
- [19] Martens S (2004) Flow mechanics and mass transfer. *Script Ins Therm Process Eng Environ Eng Graz University of Technology*.
- [20] Gao R, Li A (2012) Dust deposition in ventilation and air-conditioning duct bend flows. *Energ Convers Manage* 55: 49-59.
- [21] Li ZQ, Sun R, Wan ZX, Sun SZ, Wu SH, Chen LZ (2013) Gas-particle flow and combustion in the near-burner zone of the swirling stabilized pulverized coal burner. *Combust Sci Technol* 175: 1979-2014.
- [22] Bilrgen H, Levy EK (2011) Mixing and dispersion of particle ropes in lean phase pneumatic conveying. *Powder Technol* 119: 134-152.
- [23] ANSYS Inc. ANSYS Academic Research Release 16; 2014.
- [24] Li A, Ahmadi G (1992) Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow. *J Aerosol Sci Tech* 16: 209-226.
- [25] Saffman PG (1965) The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow. *J Fluid Mech* 22: 385-400.
- [26] Crowe CT, Sommerfeld M, Tsuji Y, (1998) *Multiphase flows with droplets and particles* Published in Boca Raton. CRC press.
- [27] Yazdani A, Normandie M, Yousefi M, Saidi MS, Ahmadi G (2014) Transport and deposition of pharmaceutical particles in three commercial spacer-MDI combinations. *Comput Biol Med* 54: 145-155.
- [28] Matida EA, Nishino K, Torii K (2000) Statistical simulation of particle deposition on the wall from turbulent dispersed pipe flow. *Int J Heat Fluid Flow* 21: 389-402.
- [29] Mansoori MZ, Saffar Avval M, Ahmadi G, Ebadi A (2014) Modeling and numerical investigation of erosion rate for turbulent two-phase gas-solid flow in horizontal pipes. *Powder Tech* 267: 362-370.
- [30] Tomeczek J, Krzysztow W (2009) Two-dimensional modeling of deposits formation on platen superheaters in pulverized coal boilers. *Fuel* 88: 1466-1471.
- [31] Jin HH, Fan JR, Zeng MJ, Cen KF (2007) Large eddy simulation of inhaled particle deposition
- [5] Sheikholeslami M, Ganji DD (2016) Turbulent heat transfer enhancement in an air-to-water heat exchanger. *J Process Mech Eng* 1(0): 1-14.
- [6] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji DD, Soleimani S (2014) MHD natural convection in a nanofluid filled inclined enclosure with sinusoidal wall using CVFEM. *Neural. Comp Appl* 24: 873-82.
- [7] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji DD, Soleimani S (2014) Heat flux boundary condition for nanofluid filled enclosure in presence of magnetic field. *Molecular Liquids* 193: 174-84.
- [8] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji DD, Rana P, Soleimani S (2014) Magneto hydrodynamic free convection of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid considering thermophoresis and Brownian motion effects. *Comp Fluids* 94: 147-60.
- [9] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Seyyedi SM, Ganji DD, Rokni HB, Soleimani S (2013) Application of LBM in simulation of natural convection in a nanofluid filled square cavity with curve boundaries. *Powder Technol* 247: 87-94.
- [10] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji DD (2013) Free convection of nanofluid filled enclosure using lattice Boltzmann method (LBM). *Appl Math Mech* 34(7): 1-15.
- [11] Boivin S, Cayre F, Herard J (2000) A finite volume method to solve the Navier-Stokes equations for incompressible flows on unstructured meshes. *Int J Therm Sci* 39(8): 806-821.
- [12] Chen X, Wang J (2014) A comparison of two-fluid model dense discrete particle model and CFD-DEM method for modeling impinging gas-solid flows. *Powder Tech* 254: 94-102.
- [13] Lu H, Guo X, Zhao W, Gong X, Lu J (2014) Experimental and CPFV Numerical study on hopper discharge. *Ind Eng Chem Res* 53: 12160-12169.
- [14] Manjula EVPJ, Hiromi WK, Morten ACR, Melaaen C (2017) A review of CFD modeling studies on pneumatic conveying and challenges in modeling offshore drill cuttings transport. *Powder Tech* 305: 782-793.
- [15] Kosinski P, Hoffmann AC (2005) Modeling of dust lifting using the Lagrangian approach. *International. J Multiphase Flow* 31: 1097-1115.
- [16] Waclawiak K, Kalisz S (2012) A practical numerical approach for prediction of particulate fouling in PC boilers. *FUEL* 97: 38-48.



- [33] Partankar SV (1980) Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Washington DC.
- [33] Herranz LE, Velasco FJ, Del Prá SCL (2005) Aerosol retention near the tube breach during steam generator tube rupture sequences. Nucl Technol 154: 85-94.
- [32] Jin HH, He C, Lu L, Fan JR (2013) Numerical investigation of the wall effect on airborne particle dispersion in a test chamber. Aerosol Air Qual Res J 13: 786-794.
- within the human upper respiratory tract. J Aerosol Sci 38: 257-268.