

روش های مدل سازی عددی نشست ذرات در مسائل متداول صنعتی

چکیده: مدل سازی عددی به منظور تسلط بر جزئیات پیچیده نشست ذرات در مسائل صنعتی، اهمیت بسیاری دارد. شرایط و معادلات حاکم بر مدل سازی عددی تشکیل لایه نشست با توجه به عوامل مؤثر و نیروهای تأثیرگذار، متفاوت می باشد. در تحقیق حاضر، پیشنهادی در خصوص استفاده از شرایط و معادلات حاکم بر نشست ذرات، ارائه شده است. روش های مدل سازی عددی برحسب دو دیدگاه لاگرانژی و اویلری تقسیم می شوند. برای مدل سازی نشست ذرات در نسبت حجمی بیشتر از 10^{-3} از روش های اویلری و در نسبت حجمی کمتر از 10^{-3} از روش های لاگرانژی، استفاده می شود. در میان روش های اویلری، روش دریافت فلاکس متداول تر است. در روش های لاگرانژی، اگر ذرات کوچک باشند (نانومتری) و نسبت حجمی کمتر از 10^{-6} باشد به دلیل بیشتر بودن نیروی واندروالسی بین ذرات و محل نشست، از شرط دیوار چسبناک استفاده می شود. بعلاوه با افزایش اندازه ذرات، باید احتمال بازگشت دوباره آنها به جریان بررسی شود و در صورت بالا بودن سرعت جریان باید احتمال جدایش ذرات از لایه رسوب در نظر گرفته شود. دما نیز بر نشست ذرات تأثیرگذار است. افزایش دما باعث تغییر فاز ذرات و در نتیجه آن نشست آن ها در هنگام برخورد به سطح می گردد.

واژه های راهنما: مدل سازی عددی، نشست ذرات، لایه رسوب، رویکرد لاگرانژی، رویکرد اویلری

علیرضا خوشنود

دانشجوی کارشناسی ارشد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مهدی معرفت*

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

غلامرضا ایمانی

استادیار، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه خلیج فارس،
بوشهر

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

**Alireza
Khoshnood**
Master Student, Faculty
of Mechanical
Engineering, Tarbiat
Modares University,
Tehran

Mehdi Maerefat*
Professor, Faculty of
Mechanical
Engineering,
Tarbiat Modares
University, Tehran

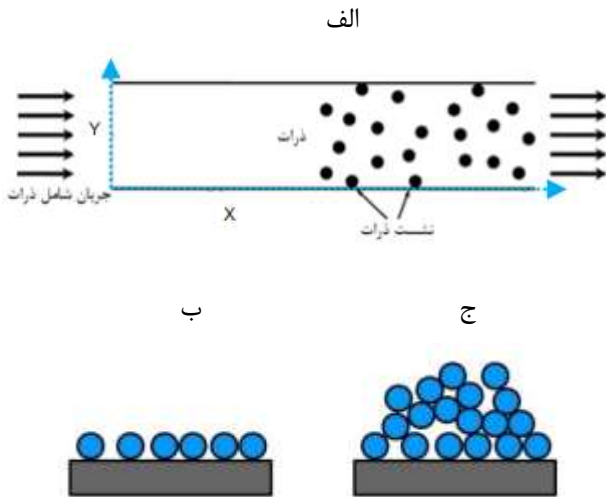
**Gholamreza
Imani**
Assistant Professor,
Faculty of
Mechanical
Engineering, Persian
Gulf University,
Bushehr

Numerical modeling methods for particle deposition in common industrial problems

Abstract: The numerical modeling of particle deposition in industrial problems is essential due to domination on intricate details of this phenomenon. In the present study, suggestions for properly using the governing equations and conditions have been presented. Modeling particle deposition phenomenon is generally divided into the Lagrangian and Eulerian approaches. Eulerian approaches are used to model particles deposition when the volumetric ratio is higher than 10^{-3} and The Lagrangian approaches are used for the volumetric ratio of particles less than 10^{-3} . The Drift Flux method is more common among the Eulerian approaches than others. In Lagrangian approaches, if the particles are small (in Nano size), and the volumetric ratio of particles is less than 10^{-6} due to the greater Van der Waals force between the particles and deposition place, the condition of the sticky wall is invoked. Furthermore, with increasing the size of the particles, the possibility of rebounding after their collision should be investigated. Moreover, if the flow rate is high, the possibility of particles detachment from the deposited layer should be considered. Also, the temperature affects particles deposition. Increasing temperature changes the phase of the particles, and as a result, they settle when they hit the surface.

Keywords: Numerical modeling, Particle deposition, Deposition layer, Lagrangian approach, Eulerian approach

۱- مقدمه



شکل ۱ الف) طرح‌واره‌ای از نشست ذرات موجود در جریان بر دیواره (ب) نشست ذرات (ج) گسترش لایه رسوب [۷]

می‌دهد. برای آگاهی از مدل‌های در نظر گرفته‌شده در مسائل و همچنین بررسی دقیق‌تر شبکه حل می‌توان به مراجع ذکرشده برای هر قسمت، مراجعه نمود.

۲- دسته‌بندی روش‌های عددی نشست ذرات

نشست ذرات موجب تشکیل و رشد لایه رسوب با تأثیر مثبت و خواسته و همچنین اثرات مخرب و ناخواسته می‌گردد. شکل ۱ طرح‌واره‌ای از نحوه تشکیل لایه رسوب به‌وسیله ذرات موجود در جریان سیال بر دیواره و همچنین نحوه گسترش آن را نشان می‌دهد. مدل‌سازی نشست ذرات را بر اساس استفاده از روش‌های اویلری^۴ و لاگرانژی^۵ حاکم بر رفتار ذرات و جریان می‌توان به دو دسته‌ی

- ۱- مدل‌سازی رفتار جریان و ذرات بر اساس دیدگاه اویلری - اویلری
- ۲- مدل‌سازی رفتار جریان و ذرات بر اساس دیدگاه اویلری - لاگرانژی تقسیم نمود [۸].

با توجه به شکل ۲ اندرکنش یک‌راهه در نسبت حجمی (Vp/V) ، که Vp حجم ذرات و V حجم کل می‌باشد، کمتر از 10^{-6} روی می‌دهد در این نوع اندرکنش ذرات فقط از جریان تأثیر می‌پذیرند و ذرات تأثیری بر جریان ندارند. استفاده از دیدگاه لاگرانژی برای ذرات در این نسبت مناسب است. در

نشست ذرات موجود در جریان‌های شامل ذرات^۱ در کاربردهای صنعتی تاکنون توسط محققین زیادی به‌ویژه در زمینه‌های مرتبط با مبدل‌های حرارتی [۱]، توربین‌ها [۲] مورد مطالعه قرار گرفته است. این پدیده تحت تأثیر نیروهای بین‌ذره‌ای و همچنین نیروهایی که از سیال به ذره یا برعکس وارد می‌شود، است. محققان زیادی تأثیر عوامل متعدد را بر نشست ذرات مطالعه نموده‌اند. هان و همکاران [۳] تأثیر نیروهای مختلف را بر انحراف ذرات موجود در جریان بررسی کردند و دریافتند که در خنک‌کن‌های حرارتی سیستم بازگردش گاز خروجی^۲ (EGR coolers) نیروی ترموفورسیس از سایر نیروها در انحراف ذرات در این خنک‌کن‌ها تأثیرگذارترند. وی‌وی و همکاران [۴] تأثیر زبری سطح پره‌های توربین بر نشست ذرات را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش زبری سهم قابل توجهی در کاهش نشست ذرات دارد. به‌منظور شناسایی نحوه تشکیل لایه رسوب، به دلیل پیچیدگی و همچنین سختی اعمال شرایط برای آگاه شدن از تأثیر آن‌ها و یا سختی حذف برخی شرایط به‌منظور نادیده گرفتن آن‌ها در روش‌های تجربی، به مدل‌سازی عددی در کنار بررسی‌های تجربی نیاز است [۵].

در تحقیق حاضر نیز با توجه به اهمیت مدل‌سازی عددی و تفاوت عوامل و نیروهای مؤثر بر نشست ذرات در هر مسئله، سعی شده است با دسته‌بندی شرایط مختلف حاکم پیشنهادی مبنی بر استفاده از مدل مناسب نشست ذرات ارائه گردد. به این منظور شرایط و معادلات مختلف این مدل‌ها به‌منظور مدل‌سازی عددی مورد بحث قرار گرفته است.

تغییر رژیم جریان از آرام به آشفته بر نحوه مدل‌سازی ذرات می‌تواند به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال برای مدل‌سازی اثرگذاری مستقیم جریان اغتشاشی بر حرکت ذرات از روش گام تصادفی^۳ استفاده می‌شود. همچنین، اغتشاشی شدن جریان می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم با اضافه کردن لزجت اغتشاشی بر حرکت ذرات تأثیر گذارد [۶].

مدل‌سازی نشست ذرات عموماً از طریق اعمال شرایط مرزی صورت می‌پذیرد که عمدتاً به‌صورت مستقیم به رژیم جریان وابسته نیست و در روابط تغییر خاصی ایجاد نمی‌گردد. اگرچه به‌صورت غیرمستقیم با تأثیرگذاری بر شرایط ذره (سرعت و زاویه برخورد) میزان و درصد نشست ذرات را دستخوش تغییر قرار

⁴ Eulerian

⁵ Lagrangian

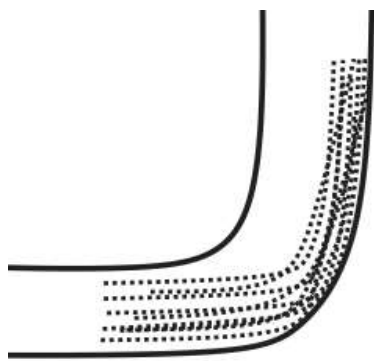
¹ Particle-laden flow

² Exhaust gas recirculation coolers

³ Discrete Random Walk (DRW)

ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه (۱) بیان‌کننده‌ی بازده نشست ذرات است [۹].

$$(\%) = \left(\frac{\sum_{ith\ CV\ im} v_i C_i A_i}{\sum_{all\ CV.s} v_i C_i A_i} \right) \times 100 \quad (1)$$



شکل ۳ مسیر حرکت ذرات در عبور از خم و تمایل آن‌ها در حرکت به سمت دیواره

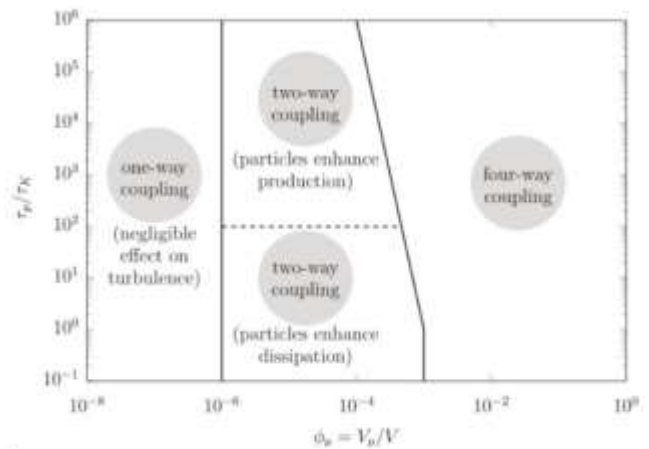
در رابطه (۱) v_i و C_i ، A_i به ترتیب مساحت مقطع عبور جریان، غلظت ذرات و سرعت محوری حجم کنترل \dot{V} می‌باشند [۱۱].

این روش در تعیین نحوه تأثیر زاویه خم^۲ لوله‌ها بر نشست ذرات و به‌طور کلی در تعیین میزان تأثیر هندسه در نشست ذرات موجود در جریان گاز یا مایع عبوری از سامانه مورد بررسی کاربرد دارد [۱۲]. در شکل ۳ نحوه تأثیر وجود خم در هندسه بر شکل‌گیری لایه رسوب قابل مشاهده است [۱۳].

۲-۱-۲- چاه کامل^۴

عملکرد این مدل بر اساس حذف ذراتی که به سطح رسیده‌اند، است. چنین شرایطی را با اعمال شرایط مرزی خاصی بر معادله رفتار ذرات ایجاد می‌کنند. از این مدل در شبیه‌سازی نشست ذرات موجود در سیال حامل که مایع یا گاز می‌باشد بر روی سطوح سامانه‌های جمع‌کننده ذرات^۴ استفاده شده است. در شکل ۴ نمایی از نحوه عملکرد این سامانه‌ها قابل مشاهده است. روابط (۲-۵) معادله‌ی انتشار همرفتی^۵ ذرات و شرایط مرزی حاکم بر آن را نشان می‌دهند [۱۴].

اندرکنش دوراوه علاوه بر تأثیرگذاری جریان بر ذرات، جریان به‌صورت متقابل از ذرات تأثیر می‌پذیرد [۹].



شکل ۲ تعیین اندرکنش‌ها از روی نسبت حجمی ذرات موجود در سیال [۹]

اما با افزایش نسبت حجمی از 10^{-3} اثر متقابل ذرات دخیل می‌گردد که دیدگاه لاگرانژی باید جای خود را به دیدگاه اویلری برای بررسی دهد.

در شکل ۲ حجم کل ذرات موجود در سیال، V_p نسبت حجمی ذرات و $\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f}$ ریلیکسیشن تایم ذره و τ_k کولومگورف تایم می‌باشد [۹].

۲-۱-۲- مدلسازی رفتار جریان و ذرات براساس دیدگاه اویلری - اویلری

در دیدگاه اویلری - اویلری علاوه بر جریان سیال، معادلات حاکم بر رفتار ذرات نیز به دلیل بالا بودن غلظت و نسبت حجمی ذرات، با فرض پیوسته بودن ذرات در نظر گرفته شده است. سه شیوه‌ی پرکاربرد برای شبیه‌سازی عددی نحوه‌ی نشست ذرات، بر اساس این دیدگاه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱-۱- بازده نشست ذرات^۱ بر اساس غلظت

این مدل بر اساس غلظت ذرات بیان می‌گردد. هدف این مدل تعیین درصد نشست ذرات موجود در جریان است. عمدتاً این روش به‌منظور تعیین اثر شکل هندسی بر میزان نرخ نشست

⁴ Particle Collector

⁵ Convective diffusion

¹ Deposition efficiency

² Bend

³ Perfect sink

۲-۱-۳- دریافت فلاکس^۴

این مدل به دلیل اطلاعاتی که در مورد سرعت نشست ذرات و شار جرمی نشست ذرات^۵ در اختیار قرار می‌دهد، نسبت به دیگر مدل‌های نشست ذرات که در دیدگاه اوپلری اوپلری، کاربرد گسترده‌تری دارد [۱۶].

شار جرمی نشست ذرات در این مدل بر اساس رابطه‌ی (۶) بیان می‌گردد.

$$J = -(\varepsilon_p + D) \frac{\partial C}{\partial N} \mp V_s C \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶) ضریب نفوذ براونی ذره و ε_p نفوذپذیری گردابه‌ای^۶ می‌باشد. در جمله آخر این رابطه عبارت منفی برای سطح پایین (کف) و عبارت مثبت برای سطح بالا (سقف) می‌باشد. رابطه (۷) نحوه به دست آمدن V_s (سرعت نشست) را نشان می‌دهد.

$$|V_s| = \left[\frac{4 g d_p (\rho_p - \rho)}{3 C_D \rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

در رابطه (۷) ضریب پسا، d_p قطر ذره و g شتاب جاذبه می‌باشد. همچنین ρ_p و ρ به ترتیب چگالی سیال و چگالی ذرات می‌باشند.

در شکل ۵ نمایی از یک اتاق که به منظور بررسی نشست ذرات بر روی دیوارهای آن مورد مطالعه می‌باشد، آورده شده است. سیال عامل نیز در اینجا هوای شامل ذرات می‌باشد. روابط (۸-۱۰) نیز روابط ارائه شده برای محاسبه سرعت نشست می‌باشند [۱۷].

$$V_{av} = u^* / l \quad (8)$$

$$V_{du} = \frac{V_s}{1 - \exp(-V_s l / u^*)} \quad (9)$$

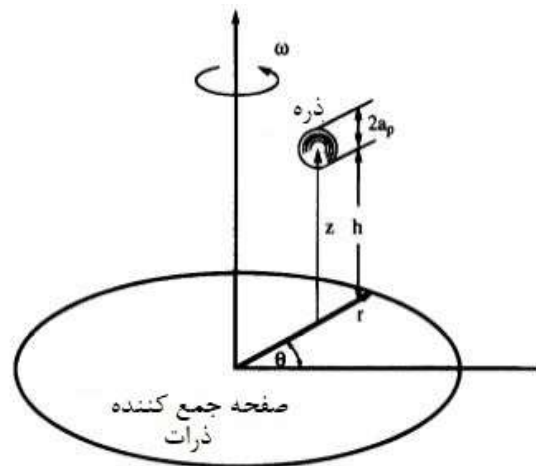
$$V_{da} = \frac{V_s}{\exp(-V_s l / u^*) - 1} \quad (10)$$

در روابط (۸-۱۰) V_{av} ، V_{du} و V_{da} به ترتیب سرعت نشست بر دیوارهای عمودی، سرعت نشست بر سطح افقی پایین (کف) و سرعت نشست بر سطح افقی بالا (سقف) می‌باشد. u^* نیز سرعت اصطکاکی است که از رابطه (۱۱) تعیین می‌گردد و I نیز تابعی بر حسب D ، d_p و u^* می‌باشد.

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (11)$$

$$\partial C / \partial t + \nabla \cdot J = Q \quad (2)$$

رابطه (۲) معادله انتشار همرفتی ذرات را نشان می‌دهد. در این رابطه C غلظت ذرات^۱، t زمان، J بردار شار ذرات و Q عبارت منبع به صورت چشمه یا چاه می‌باشد.



شکل ۴ نمایی از عملکرد سامانه جمع کننده ذرات [۱۴]

$$C = 0 \text{ at } h = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳) h فاصله ذرات تا سطح می‌باشد. سانگ و همکاران [۱۵] عنوان کردند که شرایط مرزی شار مهاجرتی^۲ ثابت با شرط چاه کامل معادل می‌باشد و کاربرد گسترده‌ای در مسائل عددی دارد، رابطه (۴) بیان کننده شرط مرزی شار مهاجرتی ثابت عنوان شده توسط آن نویسندگان می‌باشد.

$$\frac{d(uC)}{dh} \Big|_{h=\Delta} = 0 \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴) سرعت عمودی ذره بر سطح، C غلظت ذرات و Δ فاصله تا مکانی است که در آن شار جرمی مهاجرتی ذرات بر دیگر شارها غالب است. شرایط مرزی بیرونی نیز بر اساس رابطه (۵) تعیین می‌گردد.

$$C = C_0 \text{ at } h = \infty \quad (5)$$

در رابطه (۵) C_0 غلظت توده‌ای^۳ می‌باشد [۱۵].

⁴ Drift flux

⁵ Deposition mass flux

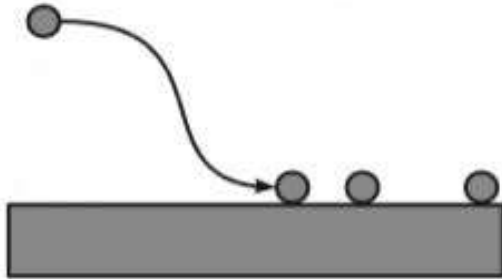
⁶ Particle eddy diffusivity

¹ Particle concentration

² Migration flux

³ Bulk concentration

شده به دیواره و دیواره بر دیگر نیروها غلبه کرده و ذره در محل برخورد خود به دیواره می‌چسبد [۱۹]. شکل ۶ نمایی از نحوه اعمال این سازوکار را نشان می‌دهد. اندازه ذرات و زاویه و سرعت برخورد ذرات شروط اعمال این مدل می‌باشند [۲۰].



شکل ۶ نمایی از چسبیدن ذرات به سطح در اثر برخورد با آن [۲۱].

۲-۲-۲- سرعت نشست ذرات بر اساس تعداد

این مدل نیز مانند، مدل دریافت فلاکس براساس غلظت، عمل می‌کند و به‌منظور تعیین میزان نرخ نشست ذرات، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تفاوت این مدل، به کاربردن فرمول سرعت نشست ذرات بر اساس تعداد ذرات می‌باشد. رابطه (۱۴) و (۱۵) روابط ارائه شده می‌باشند.

$$V_d = \frac{J}{C_0} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) J شار جرمی ذرات و C_0 غلظت ذرات نزدیک سطح می‌باشد. برای محاسبه ی سرعت نشست خصوصاً در خم ها از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود.

$$V_d = \frac{N_d / (A / t_{max})}{N_{in,bend} / V} \quad (15)$$

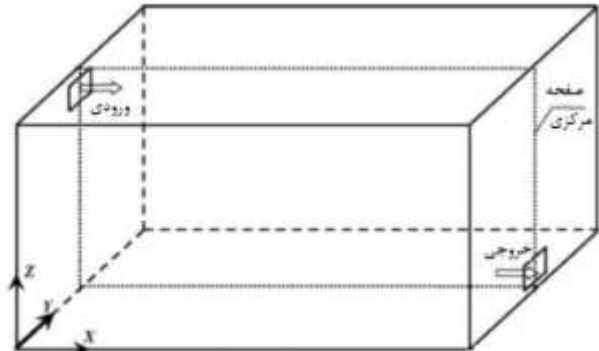
در رابطه (۱۵) t_{max} ماکزیمم زمان محاسبه، N_d تعداد ذرات نشسته شده در خم در دوره زمانی موردبررسی می‌باشد. همچنین V و A نیز به ترتیب حجم و مساحت خم و $N_{in,bend}$ تعداد ذرات ورودی به خم می‌باشند [۱۳].

۲-۲-۳- دیوار چسبناک و جدایش^۳

این مدل از مجموع مدل‌های، دیوار چسبناک و جدایش تشکیل شده است. دانکه [۲۲] مطالعات تجربی در خصوص تأثیر سرعت

در رابطه‌ی (۱۱) τ_w تنش برشی روی دیواره است. شار جرمی نشست ذرات برای یک حجم کنترل از رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید.

$$J_{w-dA} = V_{d-dA} C_{n-dA} \rho dA \quad (12)$$



شکل ۵ نمایی از اتاقی با ورودی هوای شامل ذرات

در رابطه (۱۲) V_{d-dA} سرعت نشست ذرات برای هر مکان و C_{n-dA} غلظت ذرات در مش دیواره و dA مساحت هر حجم کنترل می‌باشد. برای به دست آوردن میزان کل شار جرمی نشست ذرات می‌توان از رابطه‌ی (۱۲) انتگرال گرفت.

سرعت نشست کل برای این مدل نیز از رابطه‌ی (۱۳) تعیین می‌گردد [۱۸].

$$V_d = (\int V_{d-dA} dA) / A \quad (13)$$

۲-۲-۲- مدل‌سازی نشست ذرات براساس دیدگاه اولیری-لاگرانژی

در این دیدگاه برخلاف جریان که با فرض پیوستگی محیط سیال بررسی می‌شود، رفتار ذرات به دلیل کم بودن غلظت و نسبت حجمی ذرات، یک‌به‌یک و به‌صورت یک محیط گسسته بررسی می‌گردد. در ادامه شش شیوه‌ی پرکاربرد برای شبیه‌سازی عددی نشست ذرات مطابق با این دیدگاه بررسی گردیده است.

۲-۲-۱- دیوار چسبناک^۱

در این روش برخورد ذره با دیواره یا ذرات نشسته شده به‌منزله‌ی نشست ذره در نظر گرفته می‌شود. این روش برای نشست ذراتی با ابعاد کوچک (نانومتری) و نسبت حجمی پایین ذرات (کمتر از 10^{-6}) کاربرد دارد که نیروی واندروالسی^۲ بین ذرات نزدیک

³ Removal

¹ Sticky wall

² Van der Waals force

شکل ۸ نیز طرح‌واره‌ای از لایه رسوب تشکیل شده بر پره توربین را طی زمانی کاری مختلف نشان داده است. بر اساس رابطه (۱۶) نیروی مومنت مورد نیاز برای غلبه بر نیروی چسبندگی بر اساس رابطه‌ی آن با نیروی پسا و برآ بیان می‌گردد پارامترهای به‌کاررفته در این رابطه در شکل ۶ مشخص است.

$$F_D \left(\frac{d_p}{2} - \alpha \right) + F_L a \geq F_{po} a \quad (16)$$

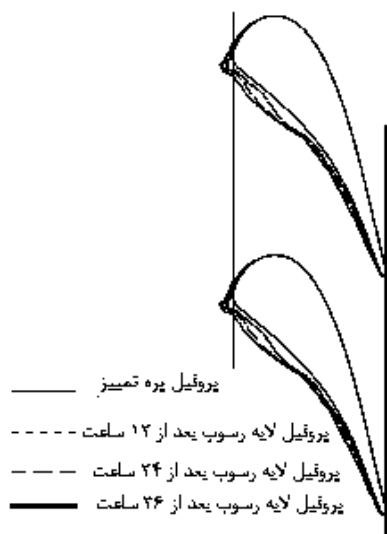
در بیشتر بررسی‌ها چسبندگی ذرات به صورت الاستیک بررسی می‌گردد، لذا مقدار α کوچک می‌باشد.

احمدی عنوان کرد که نیروی برآ^۲ در مقابل پسا^۳ قابل چشم پوشی است و رابطه‌ی (۱۷) با حذف این نیرو از رابطه (۱۶) حاصل می‌گردد [۲۴].

$$F_D \frac{d_p}{2} \geq F_{po} a \quad (17)$$

۲-۲-۴- انرژی بحرانی یا سرعت بحرانی برای بازگشت

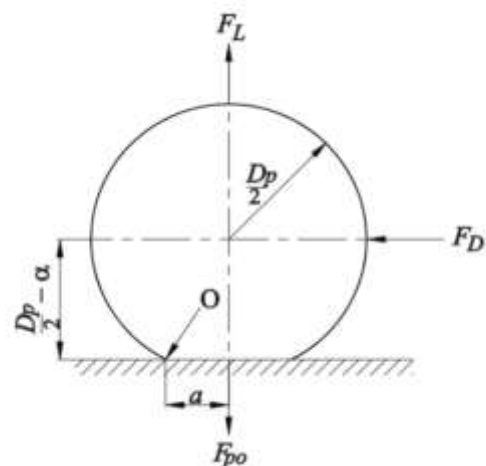
این مدل بر مبنای پایستگی انرژی می‌باشد، اگر انرژی ذخیره شده در سطح تماس ذره با دیوار (انرژی الاستیک بعلاوه انرژی پلاستیک) از انرژی چسبندگی بین ذره و دیوار بزرگ‌تر باشد، ذره پس از برخورد به دیوار با یک سرعت و زاویه مشخص که قابل محاسبه است منعکس می‌شود. در شکل ۹ طرح‌واره‌ای از برخورد و چسبندگی ذره و برخورد و بازگشت ذره به جریان نشان داده شده است.



شکل ۸ طرح‌واره‌ای از پروفیل لایه رسوب بر پره توربین [۲۴].

برخورد ذرات کروی با سطح بر سرعت برگشت آن‌ها انجام داد و به این نتیجه رسید که احتمال بازگشت ذره با کاهش سرعت برخورد و در نتیجه افزایش نیروی چسبندگی، کمتر می‌گردد تا در نهایت سرعت برخورد ذرات به حدی کاهش می‌یابد که دیگر بازگشت آن‌ها به جریان ممکن نیست این سرعت را سرعت بحرانی^۱ می‌نامند. براچ و دان [۲۳] نیز سرعت بحرانی را هم‌زمان با در نظر گرفتن ویژگی ذرات و سطح، به گونه‌ای که برخورد ذرات به سطح از نوع الاستیک باشد بررسی نمودند. این مدل توسط ای آی بتش و حاصلباچر برای نشست ذرات بر روی پره‌های توربین مورد استفاده قرار گرفت فرض آن‌ها برای برخورد الاستیک بین سطح و ذرات بر مبنای وجود یک لایه اولیه از ذرات بر روی سطح بود که امکان برخورد الاستیک ذرات را با سطح ممکن می‌ساخت. در مرجع [۲۴] سرعت ذرات در حال برخورد به پره توربین کمتر از سرعت بحرانی در نظر گرفته شده است.

پس در مدل بیان شده در این مرجع برخورد ذره را با دیواره به دلیل شرط گفته شده به منزله نشست ذره در نظر می‌گیرد؛ اما در بخش انرژی بحرانی و بازگشت شرایطی کامل‌تر از نحوه اعمال روش شرط بحرانی برای بازگشت گفته شده است که در آن بخش به توضیح آن پرداخته شده است. بخش دیگر از این مدل بخش جدایش می‌باشد که در اثر بیشتر بودن نیروهای مومنت وارد بر ذره از طریق جریان نسبت به نیروهای مقاوم نگه‌دارنده ذره، روی می‌دهد. لذا، روی دادن چنین شرایطی نیازمند سرعت بالای جریان می‌باشد که در مبدل‌هایی با سرعت جریان بالا و همچنین در توربین‌ها این مکانیزم محتمل می‌باشد. شکل ۷ و روابط (۱۶) و (۱۷) بیان‌کننده نحوه رخ دادن این مکانیزم می‌باشند.



شکل ۷ طرح‌واره‌ای از نیروهای وارده بر ذره [۱۷].

³ Drag

¹ Capture velocity

² Lift

معادله پایستگی انرژی بر اساس رابطه (۲۲) بیان می‌گردد.

$$Q_K + Q_{A,a} = Q_{el} + Q_{pe} + Q_p \quad (22)$$

در رابطه (۲۲) Q_K انرژی جنبشی^۵، $Q_{A,a}$ انرژی ارتجاعی^۶ ذره در حال نزدیک شدن، Q_p انرژی تلف^۷ شده، Q_{el} و Q_{pe} انرژی ذخیره‌شده، بر اثر تغییر شکل پلاستیک و الاستیک می‌باشند.

در صورتی که سرعت عمودی برخورد کمتر از سرعت حدی پلاستیکی باشد، Q_p و Q_{pe} از رابطه (۲۲) حذف می‌گردد. رابطه (۲۳) حاصل می‌گردد.

$$Q_{el} + Q_{pe} < Q_{A,r} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳) $Q_{A,r}$ انرژی ارتجاعی ذره در حال برگشت می‌باشد که بر اساس رابطه (۲۳) کمتر بودن انرژی الاستیک از انرژی ارتجاعی برگشت موجب چسبیدن ذره می‌گردد [۲۸].

۲-۲-۵- احتمال چسبندگی^۸ ذرات بر اساس دما و انرژی جنبشی

در این مدل احتمال نشست ذرات از دو نظر مورد مطالعه قرار می‌گیرد: ۱- احتمال چسبندگی بر اساس از دست رفتن انرژی جنبشی بر اثر برخورد ۲- احتمال چسبندگی در صورت تغییر دما و در نتیجه تغییر لزجت ذرات. در اثر تغییر دما با کاهش سرعت برخورد ذرات به سطح احتمال بازگشت ذرات به جریان کاهش یافته است و در نتیجه میزان نشست ذرات نیز بیشتر می‌گردد، همچنین با افزایش دما و در نتیجه آن کاهش لزجت ذرات احتمال چسبندگی ذرات به سطح و لایه رسوب افزایش می‌یابد. لذا در این روش احتمال چسبندگی کلی ذرات بر اساس دو عامل چسبندگی گفته‌شده تعیین می‌گردد. بر اساس روابط (۲۴-۳۰) احتمال چسبندگی بر اساس از دست رفتن انرژی و بر اساس روابط (۳۱) و (۳۲) احتمال چسبندگی در صورت تغییر لزجت تعیین می‌گردند.

$$e_n = \frac{V_{2n}}{V_{1n}} = e_{ep} \left(1 + 2 \times \frac{W_A}{e_{ep}^2 m V_{1n}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

هم‌چنین با استفاده از مدل بقای انرژی در برخورد ذره با دیوار می‌توان یک سرعت بحرانی برخورد برای ذره به دست آورد که برای سرعت‌های برخورد بیشتر از این سرعت بحرانی می‌توان فرض کرد که ذره شرایط بازگشت دارد.

مدل بیان‌شده توسط ای‌آی بتش نیز در واقع از همین نوع مدل سرعت بحرانی می‌باشد که با محاسبات سرعت مشخص می‌گردد، اگر سرعت از سرعت بحرانی بیشتر باشد ذره بازگشت می‌یابد. از این مدل در شبیه‌سازی نشست ذرات بر روی پره توربین استفاده شده است؛ رابطه (۱۸-۲۱) سرعت بحرانی^۱ و رابطه (۲۲) انرژی بحرانی را بیان میکنند [۲۵].

$$V_{cr} = \left[\frac{2K}{d_p R^2} \right]^{\frac{10}{7}} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸) K سختی مؤثر می‌باشد که از رابطه (۱۹) تعیین می‌گردد.

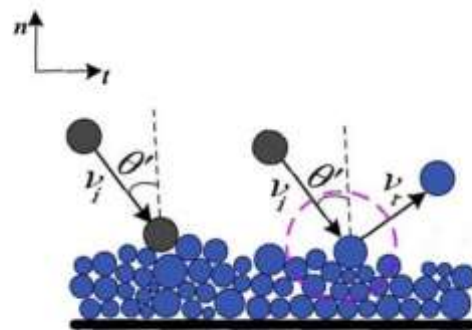
$$K = 0.51 \left[\frac{5\pi^2(k_s + k_p)}{4\rho_p^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (19)$$

k_s و k_p موجود در رابطه (۱۹) به ترتیب از روابط (۲۰) و (۲۱) تعیین می‌گردند

$$k_p = (1 - \nu_p) / \pi E_p \quad (20)$$

$$k_s = (1 - \nu_s) / \pi E_s \quad (21)$$

در روابط (۲۱-۲۱) E_p و E_s به ترتیب ضرایب مدول یانگ^۲ ذره و سطح و ν_p و ν_s به ترتیب نسبت پواسن^۳ ذره و سطح می‌باشند. همچنین d_p شعاع ذره، ρ_p چگالی ذره و R ضریب ارتجاعی شکل سینماتیکی^۴ می‌باشد [۲۶].



شکل ۹ طرحواره‌ای از برخورد ذره و چسبندگی و برخورد ذره و بازگشت به جریان [۲۷]

⁵ Kinetic energy

⁶ Restitution energy

⁷ Wasted energy

⁸ Adhesion probability

¹ Critical velocity

² Young's modulus

³ Poisson's ratio

⁴ kinematic restitution coefficient

$$1 - e^2 \leq 0.5 \text{ or } e \geq 0.707, e = 0.707, \\ P_e = 0.01 \Rightarrow c \approx 6.5 \quad (30)$$

در زمانی که دما، پایین تر از دمای بحرانی باشد. احتمال چسبندگی در اثر تغییر لزجت بر اساس رابطه های (۳۱) و (۳۲) تعیین می گردد.

$$P_{visc} = \mu_{cr} / \mu_t \quad (31)$$

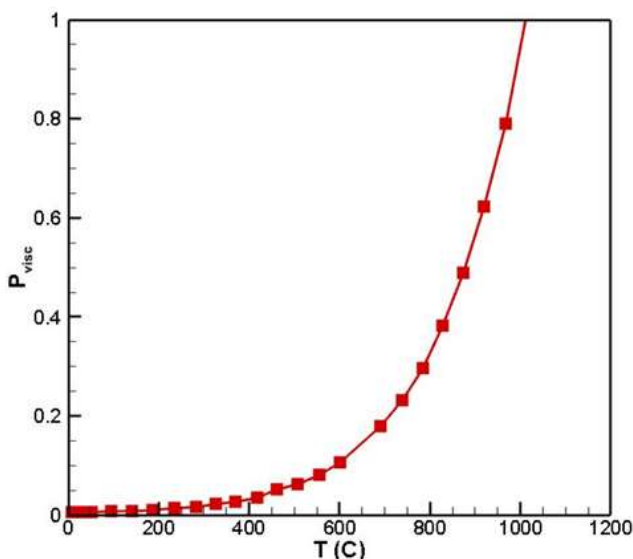
در رابطه (۳۱) احتمال چسبندگی بر اساس لزجت و μ_{cr} لزجت ذرات در دمای بحرانی و μ_t لزجت ذرات بر اساس دمای آن ها می باشد. مقدار μ_t با توجه به خواص ذرات تعیین می گردد.

در رابطه ی (۳۲) احتمال چسبندگی نهایی بر اساس دو احتمال چسبندگی گفته شده به دست می آید.

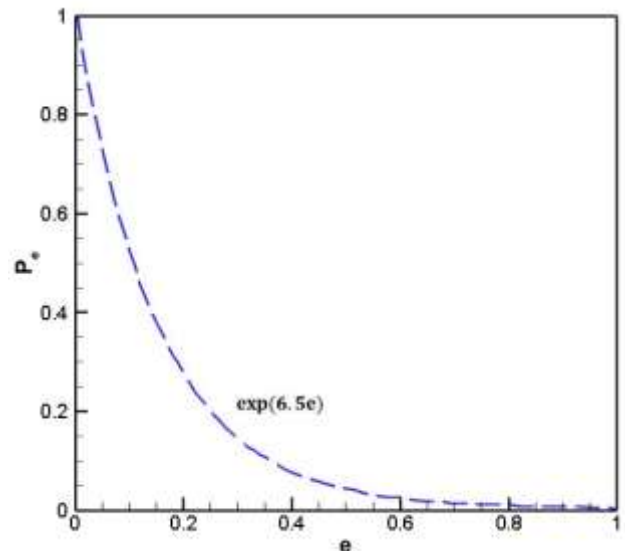
$$P = \min\{P_e + P_{visc}, 1\} \quad (32)$$

کاربرد این روش در بررسی نشست ذرات شن در توربین هایی با شرایط کاری دما بالا می باشد که اطلاعات دقیق تر مربوط به شبیه سازی نشست این ذرات در مرجع [۲] مورد بحث قرار گرفته است.

شکل ۱۰ نمودار کاهش چسبندگی ذرات شن به توربین در اثر افزایش ضریب ارتجاعی ذره را نشان می دهد. با توجه به نمودار اگر میزان ضریب ارتجاعی ذره صفر باشد میزان چسبندگی بیشینه است چراکه در برخورد با سطح انرژی جنبشی خود را از دست می دهد اما زمانی که مقدار ضریب ارتجاعی افزایش می یابد



شکل ۱۱ نمودار افزایش چسبندگی ذره در اثر افزایش دما [۲]



شکل ۱۰ نمودار کاهش چسبندگی ذره در اثر افزایش ضریب ارتجاعی ذره [۲]

$$e_t = \frac{V_{2t}}{V_{1t}} = 1 - \mu \tan \alpha \\ \times \left(1 + e_{ep} \left(1 + 2 \times \frac{W_A}{e_{ep}^2 m V_{1n}^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad (25)$$

$$e_n = \frac{V_{2n}}{V_{1n}}, e_n = \frac{V_{2t}}{V_{1t}}, e = \frac{V_2}{V_1} \quad (26)$$

در روابط (۲۴-۲۶) V_1 سرعت برخورد، V_2 سرعت بازگشت، W_A کار ناشی از چسبندگی، e_{ep} ضریب ارتجاع الاستیکی و پلاستیکی و e ضریب ارتجاع کلی می باشند. ضریب ارتجاع کلی را می توان از e_t و e_n محاسبه نمود. از آنجا که:

$$V_2 = \sqrt{V_n^2 + V_t^2} \quad (27)$$

پس داریم:

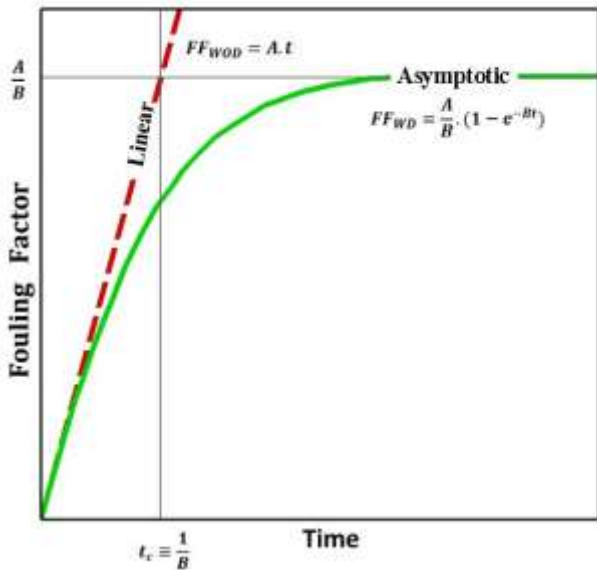
$$e = \sqrt{(e_n^2 \tan^2 \alpha + e_t^2) / (\tan^2 \alpha + 1)} \quad (28)$$

لذا از کالیبراسیون^۱ بر اساس آزمایش داریم:

$$P_e = \exp(-ce) \quad (29)$$

در روابط (۲۷-۲۹) P_e احتمال چسبندگی بر اساس از دست رفتن انرژی و c نیز ضریب ثابت می باشد. برای پیدا کردن ضریب ثابت c احتمال نشست را تا زمانی که انرژی ذره به اندازه ی ۵۰ درصد انرژی ورودی آن نشده است را در نظر نگرفته اند. لذا با اعمال این شرط انرژی، مقدار c از رابطه (۳۰) برای ذرات رسوب حاصل از شن موجود در توربین تعیین می گردد.

¹ Calibration



شکل ۱۲ نمایی از فاکتور نشست ذرات در صورت وجود و عدم وجود مکانیزم جدایش

رابطه‌ی (۳۳) و (۳۴) فاکتور رشد نشست ذرات را به ترتیب در زمانی که مکانیزم جدایش اعمال نگردد و مکانیزم جدایش اعمال گردد نشان می‌دهد.

$$FF_{WOD} = A \cdot t \quad (33)$$

$$FF_{WD} = \frac{A}{B} \cdot (1 - e^{-Bt}) \quad (34)$$

در روابط (۳۳) و (۳۴) FF_{WOD} و FF_{WD} به ترتیب فاکتور نشست ذرات همراه با مکانیزم جدایش ذرات و بدون در نظر گرفتن این مکانیزم، A شیب منحنی فاکتور نشست ذرات در لحظه اولیه ($t = 0$) و $\frac{1}{B}$ زمان مشخصه می‌باشند.

شکل ۱۲ نمایی از فاکتور نشست ذرات در صورت وجود و عدم وجود مکانیزم جدایش را نشان می‌دهد. در صورت در نظر نگرفتن مکانیزم جدایش فاکتور نشست ذرات رفتار ثابت خطی دارد که با زمان افزایش می‌یابد. اما در صورتی که امکان جدایش لایه نشست در نظر گرفته شود، فاکتور نشست ذرات ابتدا افزایش یافته و بعد از زمان مشخص $\frac{1}{B}$ رفتاری حدی پیدا می‌کند.

۳- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

بحث بر روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی پیوسته و گسسته فاز ذرات موجب به‌کارگیری روش مناسب با توجه به فیزیک و جنبه مورد ارزیابی در مسائل، شده است. مطابق با پیشنهاد حاصل از بحث انجام‌شده، در نسبت حجمی ذرات بالاتر از 10^{-2}

احتمال چسبندگی به دلیل ذخیره‌ی انرژی ناشی از برخورد کاهش می‌یابد. بنابراین در ضریب ارتجاعی $0/6$ و بالاتر ذره به جریان بازمی‌گردد (البته دما نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد). شکل ۱۱ نمودار افزایش چسبندگی ذره در اثر افزایش دما را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۱ با افزایش دما مقدار ضریب چسبندگی ذره افزایش می‌یابد. تا دمای 400 درجه شیب افزایش ضریب چسبندگی ثابت بوده اما زمانی که دما بیشتر از 400 درجه می‌گردد این شیب به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. در صورت افزایش دما و رسیدن آن به دمای بحرانی 1120 درجه سانتی‌گراد به دلیل ذوب شدن ذرات شن در صورت برخورد، نشست رخ می‌دهد. همچنین اگر دما بیش از دمای بحرانی^۱ باشد، احتمال نشست تمامی ذرات در بیشترین حد قرار می‌گیرد. برای ذرات کوچک در دمایی حتی پایین‌تر از دمای بحرانی، احتمال چسبندگی در سرعت پایین به دلیل کم بودن انرژی جنبشی آن‌ها بسیار بالاست لذا احتمال چسبندگی بر اساس از دست رفتن انرژی جنبشی در این شرایط فاکتور تعیین‌کننده-تری برای نشست ذرات کوچک شن می‌باشد، در مقابل برای ذرات بزرگ در سرعت‌های بالا انرژی جنبشی بسیار زیاد بوده و احتمال چسبندگی بر اساس از دست رفتن انرژی جنبشی کاهش می‌یابد [۲].

۲-۲-۶- انرژی بحرانی یا سرعت بحرانی برای بازگشت و جدایش

این مدل نیز با افزودن مکانیزم جدایش بر مدل انرژی بحرانی برای بازگشت، به وجود آمده است. در این مدل مکانیزم جدایش موجب جدا شدن ذرات از لایه‌ی نشست تشکیل‌شده می‌گردد. ژیانگ و همکاران [۲۷] نشان دادند ضخامت لایه رسوب حاصل از ذرات ریز بر روی لوله بدون در نظر گرفتن مکانیزم جدایش به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و با در نظر گرفتن مکانیزم جدایش رشد این لایه به‌صورت نمایی^۲ می‌باشد. همچنین پاز و همکارانش این رفتار نمایی در نشست ذرات را در خنک‌کننده سامانه‌ی بازگردش گاز آگروز خنک شبیه‌سازی نمودند که نحوه شبیه‌سازی آن‌ها در مرجع [۳۰] آورده شده است. به‌کارگیری مکانیزم جدایش در سرعت‌های بالا در کنار مکانیزم نشست سبب شده است تا لایه رسوب^۳ به شکل دقیق‌تری مدل‌سازی گردد [۳۰].

³ Deposit layer

¹ Critical temperature

² Asymptotic

A^k	مساحت راه هوایی k (m^2)
B	وارون زمان مشخصه (s^{-1})
C	غلظت ذرات (kg/m^3)
C_D	ضریب پسا
C_i	غلظت ذرات در مقطع i (kgm^{-3})
C_{n-dA}	غلظت ذرات در مش روی دیواره (kgm^{-3})
C_0	غلظت توده ای (kgm^{-3})
\dot{D}	ضریب نفوذ برونی ذره (m^2s^{-1})
d_p	قطر ذره (m)
e	ضریب ارتجاعی کلی
e_{ep}	ضریب ارتجاعی الاستیک و پلاستیک
e_n	ضریب ارتجاعی عمودی
E_p	ضریب مدول یانگ ذره (Pa)
E_s	ضریب مدول یانگ سطح (Pa)
e_t	ضریب ارتجاعی افقی
F_D	نیروی پسا (N)
F_l	نیروی برآ (N)
F_{po}	نیروی چسبندگی (N)
FF_{WD}	فاکتور نشست ذرات همراه با مکانیزم جدایش
FF_{WOD}	فاکتور نشست ذرات بدون در نظر گرفتن مکانیزم جدایش
g	شتاب جاذبه (ms^{-2})
h	فاصله ذرات تا سطح (m)
J	بردار شار ذرات ($kgm^{-2}s^{-1}$)
J_{w-dA}	شار جرمی برای یک حجم کنترل ($kgm^{-2}s^{-1}$)
K	سختی موثر (N/m)
k_p	سختی ذره (N/m)
k_s	سختی سطح (N/m)
N_d	تعداد ذرات نشسته شده
$N_{in,bena}$	تعداد ذرات ورودی به خم
P	احتمال چسبندگی نهایی
P_e	احتمال چسبندگی در اثر هدر رفت انرژی
P_{visc}	احتمال چسبندگی بر اثر لزجت
$Q_{A,a}$	انرژی ارتجاعی (J)
Q_{el}	انرژی ذخیره شده از تغییر شکل الاستیک (J)
Q_K	انرژی جنبشی (J)
Q_p	انرژی تلف شده (J)
Q_{pe}	انرژی ذخیره شده از تغییر شکل پلاستیک (J)
R	ضریب ارتجاعی شکل سینماتیکی (J)
T	دما (K)
T_{inh}	زمان تناوب استنشاق (s)
u^*	سرعت اصطکاکی (ms^{-1})
V	حجم (m^3)
V_1	سرعت برخورد (ms^{-1})
V_2	سرعت بازگشت (ms^{-1})
V_{cr}	سرعت بحرانی (ms^{-1})
V_d	سرعت نشست کل (ms^{-1})
V_{ad}	سرعت نشست بر دیواره پایین (ms^{-1})
V_{d-dA}	سرعت نشست ذرات برای یک حجم کنترل (ms^{-1})
V_{du}	سرعت نشست بر دیواره بالا (ms^{-1})

اثرات ذرات بر یکدیگر مهم می‌گردد در نتیجه روش‌های که دیدگاه اولیری بر آنها حاکم است دقت بهتری را دارند. در میان این روش‌ها، روش دریافت فلاکس به دلیل جزئیاتی که بخصوص از توده ذرات در اختیار می‌دهد کاربرد گسترده‌تری دارد، مابقی روش‌های مطرح‌شده با این دیدگاه دارای کاربردهای خاص می‌باشند. بازده نشست ذرات که زیرمجموعه‌ی همین گروه از روش‌ها می‌باشد. کاربرد خاصی در بررسی اثر یک هندسه، یا اثر تغییر آن را در نشست ذرات دارد. استفاده گسترده این روش در تأثیر تغییر زاویه، شکل مقطع و یا وجود مانع در کانال یا لوله می‌باشد. روش چاه کامل یک روش خاص از این گروه می‌باشد که ذرات رسیده به سطح را حذف کرده و نحوه برخورد و توزیع ذرات بر سطح را بررسی نمی‌کند، این روش بیشتر در سامانه‌های جمع‌کننده ذرات کاربرد دارد. در صورت بررسی جریان با نسبت حجمی ذرات کمتر از 10^{-3} می‌توان از روش‌هایی که دیدگاه لاگرانژی بر آنها حاکم است برای دستیابی به جزئیات بیشتر استفاده کرد.

در صورتی که اندازه ذرات کوچک باشد (نانومتری) و نسبت حجمی ذرات کمتر از 10^{-6} باشد و در نتیجه آن نیروی واندروالسی بین ذره و محل نشست ذره بیشتر از سایر نیروها باشد می‌توان از روشی که از شرایط دیوار چسبناک استفاده می‌نماید، استفاده نمود. در حالت‌های دیگر که اطمینان از این شرایط وجود ندارد باید روشی که شامل شرط بازگشت ذرات نیز می‌باشد، را برای مدل‌سازی به کار گرفت. در شرایطی که دما بر خاصیت چسبندگی ذرات مؤثر است باید روشی که شرط تغییر احتمال چسبندگی بر اساس دما را منظور می‌نماید برای مدل‌سازی نشست ذرات با دیدگاه لاگرانژی منظور نمود. چرا که در دمای بالاتر از دمای بحرانی برای برخی ذرات عامل اصلی چسبندگی ذره است که به عنوان مثال این دما برای شن 1120 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اگر نیروهای مومنتی که از جریان بر لایه نشست ذرات وارد می‌شوند به میزانی قابل توجه باشند که احتمال تغییر شکل لایه نشست یا جداسازی ذرات از لایه نشست داده شود باید از روشی که شرط جدایش را اعمال می‌نماید استفاده نمود. در جریان‌های توربولانس با سرعت بالا احتمال جدایش افزایش می‌یابد لذا این روش برای بررسی این نوع جریان‌ها پیشنهاد می‌گردد.

۴- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A	شیب منحنی فاکتور نشست ذرات
A_i	مساحت در مقطع i (m^2)

8. Kallio, G. and M. Reeks, A numerical simulation of particle deposition in turbulent boundary layers. *International Journal of Multiphase Flow*, 15(3): pp. 433-446, (1989).
9. Kasper, R., J. Turnow, and N. Kornev, Numerical modeling and simulation of particulate fouling of structured heat transfer surfaces using a multiphase Euler-Lagrange approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115: pp. 932-945, (2017).
10. Brandon, D.J. and S. Aggarwal, A numerical investigation of particle deposition on a square cylinder placed in a channel flow. *Aerosol Science & Technology*, 34(4): pp. 340-352, (2001).
11. Tsai, C.-J. and D.Y. Pui, Numerical study of particle deposition in bends of a circular cross-section-laminar flow regime. *Aerosol Science and Technology*, 12(4): pp. 813-831, (1990).
12. Seyfi, S., B. Mirzayi, and H. Seyyedbagheri, CFD modeling of black powder particles deposition in 3D 90-degree bend of natural gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 78: pp. 103330, (2020).
13. Jiang, H., L. Lu, and K. Sun, Experimental study and numerical investigation of particle penetration and deposition in 90 bent ventilation ducts. *Building and Environment*, 46(11): pp. 2195-2202, (2011).
14. Elimelech, M., Particle deposition on ideal collectors from dilute flowing suspensions: Mathematical formulation, numerical solution, and simulations. *Separations Technology*, 4(4): pp. 186-212, (1994).
15. Song, L. and M. Elimelech, Calculation of particle deposition rate under unfavourable particle-surface interactions. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 89(18): pp. 3443-3452, (1993).
16. AL-Shami, H.M., A.A. Monem, and E.A. Khazal, Numerical simulation of indoor airflow and particle deposition in the clean room (surgical operation room). *International Journal of Energy and Environment*, 9(3): pp. 269-282, (2018).
17. Zhao, B., X. Li, and Z. Zhang, Numerical study of particle deposition in two differently ventilated rooms. *Indoor and built environment*, 13(6): pp. 443-451, (2004).
18. Zhao, B. and J. Chen, Numerical analysis of particle deposition in ventilation duct. *Building and Environment*, 41(6): pp. 710-718, (2006).
19. Inthavong, K., Z. Tian, H. Li, J. Tu, W. Yang, C. Xue, and C.G. Li, A numerical study of spray particle deposition in a human nasal cavity. *Aerosol Science and Technology*, 40(11): pp. 1034-1045, (2006).

سرعت نشست بر دیواره عمودی (ms^{-1})	V_{dV}
سرعت محوری در مقطع i (ms^{-1})	v_i
سرعت عمودی (ms^{-1})	v_n
سرعت نشست (ms^{-1})	V_S
سرعت افقی (ms^{-1})	v_t
کار ناشی از چسبندگی (J)	W_A

علایم یونانی

ضریب بازده برخورد	ϵ_i
ضریب نفوذ گردابه‌ای (m^2s^{-1})	ϵ_p
ضریب ترکیبی بازده رسوب گذاری و پخش	ϵ_{sd}
لزجت ذرات در دمای بحرانی	μ_{cr}
لزجت ذرات در دمای t (m^2s^{-1})	μ_t
نسبت پواسون سطح	ν_s
نسبت پواسون ذره	ν_p
چگالی سیال (kgm^{-3})	ρ
چگالی ذره (kgm^{-3})	ρ_p
تنش برشی بر روی دیواره (Pa)	τ_w
نسبت حجمی ذرات	ϕ_p

۶- مراجع

1. Garrett-Price, B., S. Smith, R. Watts, J. Knudsen, W. Marner, and J. Sutor, Fouling of Heat Exchangers, *Noyes Publications*, Park Ridge, NJ, USA.4, (1985).
2. Singh, S. and D. Tafti, Particle deposition model for particulate flows at high temperatures in gas turbine components. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 52: pp. 72-83, (2015).
3. Han, T., A. Booth, S. Song, D. Styles, and J. Hoard. Review and A Conceptual Model of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Cooler Fouling Deposition and Removal Mechanism. in *Proceedings of the Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. (2015).
4. Weiwei, X., Z. Konghao, W. Jianjun, L. Yajun, and L. Qiang, Modeling and numerical analysis of the effect of blade roughness on particle deposition in a flue gas turbine. *Powder Technology*, 347: pp. 59-65, (2019).
5. Abd-Elhady, M.S., M.R. Malayeri, and H. Müller-Steinhagen, Fouling problems in exhaust gas recirculation coolers in the automotive industry. *Heat Transfer Engineering*, 32(3-4): pp. 248-257, (2011).
6. Gimenez, J.M., D. Ramajo, and N.M. Nigro, Particle transport in laminar/turbulent flows. *Mecánica Computacional*, 31(2): pp. 151-164, (2012).
7. Lu, H. and L. Lu, Numerical investigation on particle deposition enhancement in duct air flow by ribbed wall. *Building and Environment*, 85: pp. 61-72, (2015).

26. Xu, Z., Z. Han, A. Sun, and X. Yu, Numerical study of particulate fouling characteristics in a rectangular heat exchange channel. *Applied Thermal Engineering*, 154: pp. 657-667, (2019).
27. Zhan, F., D. Zhuang, G. Ding, and J. Tang, Numerical model of particle deposition on fin surface of heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 72: pp. 27-40, (2016).
28. Tang, S.-Z., Y.-L. He, F.-L. Wang, and Y.-B. Tao, Parametric study on fouling mechanism and heat transfer characteristics of tube bundle heat exchangers for reducing fouling considering the deposition and removal mechanisms. *Fuel*, 211: pp. 301-311, (2018).
29. Tong, Z.-X., M.-J. Li, Y.-L. He, and H.-Z. Tan, Simulation of real time particle deposition and removal processes on tubes by coupled numerical method. *Applied energy*, 185: pp. 2181-2193, (2017).
30. Paz, C., E. Suárez, A. Eirís, and J. Porteiro, Development of a predictive CFD fouling model for diesel engine exhaust gas systems. *Heat Transfer Engineering*, 34(8-9): pp. 674-682, (2013).
20. Mofakham, A.A. and G. Ahmadi, Particles dispersion and deposition in inhomogeneous turbulent flows using continuous random walk models. *Physics of fluids*, 31(8): pp. 083301, (2019).
21. Henry, C., J.-P. Minier, and G. Lefèvre, Towards a description of particulate fouling: From single particle deposition to clogging. *Advances in colloid and interface science*, 185: pp. 34-76, (2012).
22. Dahneke, B., Further measurements of the bouncing of small latex spheres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 51(1): pp. 58-65, (1975).
23. El-Batsh, H. and H. Haselbacher. ON PARTICLE DEPOSITION ON TURBINE BLADES. in *4th European Conference on Turbomachinery: Fluid Dynamics and Thermodynamics: Conference Proceedings:[Firenze, Italy, March 20-23, 2001]*. SGE, (2001).
24. El-Batsh, H. and H. Haselbacher, Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades. Vol. 3610, (2002).
25. Wang, J., K. Tian, H. Zhu, M. Zeng, and B. Sundén, Numerical investigation of particle deposition in film-cooled blade leading edge. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 77(6): pp. 579-598, (2020).