

Investigating Transport and Deposition of Nanoparticles in Voronoi Porous Foams with Various Pore Densities using Euler–Lagrange Method with Pore-Scale Perspective

Mohammad Dehghan, Majid Siavashi* 

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: October 19, 2025

Revised: November 14, 2025

Accepted: December 06, 2025

ePublished: December 16, 2025

ABSTRACT

Pore-scale simulations, by explicitly incorporating the geometrical features of the porous medium, enable accurate examination of fluid flow and particle transport within the foam. The present study numerically investigates nanoparticle transport and deposition in open-cell metallic foams with Voronoi-based geometries and a fixed porosity of 80%. Foam structures were reconstructed using the Laguerre–Voronoi algorithm, and simulations were performed with an Eulerian–Lagrangian framework implemented in the open-source software OpenFOAM. The model accounts for drag, Brownian motion, gravity, buoyancy, and Saffman lift forces, as well as van der Waals and electrostatic double-layer interactions to capture nanoparticle–wall adhesion. Results indicate that increasing the pore density from 30 to 60 pores per inch (PPI) enlarges the interfacial area while reducing flow velocity, thereby extending particle residence time and significantly enhancing deposition. Quantitatively, this increase in pore density leads to an approximate 26.5% rise in nanoparticle deposition ratio. Among the cases examined, the Voronoi foam with 80% porosity and 30 PPI exhibited the lowest deposition rate, whereas the foam with 80% porosity and 60 PPI showed the highest.

Keywords: Nanoparticles, Euler–Lagrange, Porous Media, Deposition, Pore Density, Pore-Scale Simulation.

How to cite this article

Dehghan M, Siavashi M, Investigating Transport and Deposition of Nanoparticles in Voronoi Porous Foams with Various Pore Densities using Euler–Lagrange Method with Pore-Scale Perspective. *Modares Mechanical Engineering*; 2025;25(12):829-841.

*Corresponding author's email: msiavashi@iust.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-7615-9689



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



مطالعه انتقال و رسوب نانوذرات در جریان نانوسیال در فوم‌های متخلخل ورونویی با چگالی حفرات متفاوت به روش اویلر-لاگرانژ با رویکرد مقیاس حفره

محمد دهقان، مجید سیاوشی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

شبیه‌سازی جریان در مقیاس حفره با وارد کردن ساختار هندسی دقیق محیط متخلخل، این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان جریان سیال در فوم متخلخل را با دقتی در مقیاس حفرات محیط متخلخل بررسی نمود. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر پارامترهای مختلف نانوسیال و محیط متخلخل بر روی میزان رسوب نانوذرات بر روی سطوح محیط متخلخل است. انتقال و رسوب نانوذرات در فوم‌های فلزی سلول باز با ساختار هندسی ورونوی و تخلخل ثابت ۸۰٪ به صورت عددی بررسی شده است. هندسه فوم‌ها با استفاده از الگوریتم لاگر-ورونوی تولید شده و شبیه‌سازی‌ها با رویکرد اویلر-لاگرانژی در نرم‌افزار متن‌باز این فوم انجام شده است. در شبیه‌سازی، نیروهای پسا، براونی، گرانش، شناوری و برآ سافمن در نظر گرفته شده است. همچنین، نیروهای واندروالس و دولایه‌ی الکترواستاتیکی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش نانوذرات با دیواره محیط متخلخل لحاظ گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش چگالی حفره از ۳۰ به ۶۰ حفره در اینچ (PPI) سطح تماس افزایش یافته، سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه نرخ رسوبگذاری افزایش می‌یابد. به طور کمی، این افزایش چگالی حفره باعث رشد حدود ۲۶/۵٪ در نسبت رسوب نانوذرات شده است. در میان فوم‌های بررسی‌شده، فوم فلزی ورونوی با تخلخل ۸۰٪ و چگالی حفره PPI ۳۰ کمترین نرخ رسوبگذاری و فوم فلزی ورونوی با تخلخل ۸۰٪ و چگالی حفره PPI ۶۰ بیشترین نرخ رسوب را نشان داده‌اند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

کلیدواژه‌ها: نانوذرات، اویلر-لاگرانژ، محیط متخلخل، رسوب، چگالی حفره، شبیه‌سازی مقیاس حفره

نحوه ارجاع به این مقاله

دهقان محمد، سیاوشی مجید، مطالعه انتقال و رسوب نانوذرات در جریان نانوسیال در فوم‌های متخلخل ورونویی با چگالی حفرات متفاوت به روش اویلر-لاگرانژ با رویکرد مقیاس حفره، مهندسی مکانیک مدرس. ۸۴۱-۸۲۹(۱۲):۲۵(۱۴)۱۴۰۴.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: msiavashi@iust.ac.ir

*شناسه ارجید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0002-7615-9689



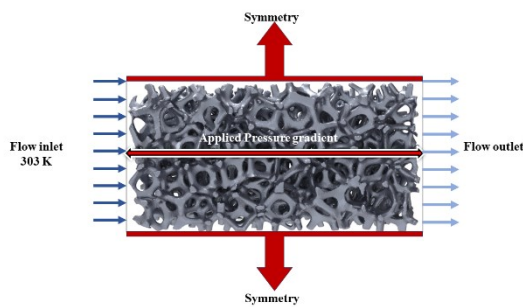
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، موضوع حرکت و رسوب‌گذاری ذرات در محیط‌های متخلخل توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است، زیرا این پدیده نقش مهمی در عملکرد بسیاری از سیستم‌های صنعتی ایفا می‌کند. در صنایعی مانند فیلتراسیون (Filtration)، تصفیه آب (Water purification) و سیستم‌های انرژی، ذرات معلق می‌توانند باعث گرفتگی ساختار متخلخل، کاهش راندمان فرآیند و حتی اختلال در کارایی تجهیزات شوند [۱]. از این رو، شناخت دقیق رفتار این ذرات، به‌ویژه در مقیاس نانو، برای طراحی بهینه سیستم‌ها و بهبود عملکرد فرآیندها ضروری است. نانوسیال‌ها، سیالاتی هستند که با پراکنده‌سازی نانوذرات جامد در سیالات پایه همچون آب، اتیلن گلیکول یا روغن تهیه می‌شوند. این ذرات دارای ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند و موجب تغییر خواص حرارتی سیال پایه می‌شوند [۲]. به دلیل اندازه بسیار کوچک و نسبت سطح به حجم بالا، نانوذرات رفتاری متفاوت از ذرات بزرگ‌تر دارند [۳].

یکی از محیط‌های متخلخل پرکاربرد در صنایع مختلف، فوم‌های فلزی متخلخل (Porous metal foams) هستند. این فوم‌ها به دلیل ساختار سلول‌باز، سطح تماس زیاد بین فاز جامد و سیال و خواص مکانیکی مناسب، در تجهیزاتی مانند مبدل‌های حرارتی (Heat exchangers) و فیلترها (Filters) به کار می‌روند [۴]. وجود تعداد زیاد حفره‌ها موجب می‌شود که سیال به راحتی درون آن‌ها جریان یابد و تبادل بین فاز جامد و مایع افزایش پیدا کند. با این حال، همین ویژگی می‌تواند باعث رسوب‌گذاری ذرات معلق، به‌ویژه نانوذرات، روی سطح فوم شده و در نهایت موجب گرفتگی مسیر جریان و کاهش کارایی سیستم گردد. بنابراین، شبیه‌سازی دقیق رفتار جریان و مکانیزم رسوب‌گذاری در چنین ساختارهایی ضروری است. با وجود اهمیت بالای این موضوع، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های گذشته محیط متخلخل را با یک دیدگاه ماکروسکوپی به صورت یک محیط پیوسته مدل‌سازی کرده‌اند [۵]. این رویکرد اگرچه باعث ساده‌تر شدن محاسبات می‌شود، اما قادر به نمایش دقیق هندسه واقعی فوم و اثرات سه‌بعدی ساختار آن بر حرکت ذرات نیست [۶]. اهمیت این مسئله در مقیاس نانو بیشتر است، زیرا در این مقیاس، نیروهای سطحی و تعاملات بین نانوذرات و دیواره‌های حفره نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیزم حرکت و رسوب‌گذاری دارند. برای رفع این محدودیت، در سال‌های اخیر مدل‌سازی مقیاس حفره (Pore-scale modeling) به‌عنوان رویکردی دقیق‌تر معرفی شده است که امکان شبیه‌سازی هندسه واقعی محیط متخلخل با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های هندسی را فراهم می‌کند.

در بسیاری از مطالعات اولیه شبیه‌سازی نانوسیالات، از مدل‌های تک‌فازی استفاده شده است که در آن، نانوذرات و سیال به صورت یک فاز با خواص موثر در نظر گرفته می‌شوند [۷]. هرچند این مدل‌ها ساده‌تر هستند، اما نمی‌توانند نیروهای مؤثر بر ذرات و مسیر دقیق حرکت آن‌ها را به‌درستی نمایش دهند [۸]. این ضعف منجر به توسعه روش اویلر-لاگرانژ شده است [۹]. در این روش، میدان جریان سیال با معادلات اویلری محاسبه می‌شود و هر ذره به‌طور جداگانه با معادلات لاگرانژی ردیابی می‌گردد. این رویکرد امکان بررسی نیروهای مختلف از جمله نیروی براونی (Brownian)، نیروی پسا (Drag)، نیروی شناوری (Buoyancy)، نیروی گرانش، نیروی برآ سافمن (Saffman lift)، نیروی واندروالس (Van der Waals) و نیروی دولایه الکترواستاتیکی (Electrostatic double-layer) را فراهم می‌سازد. به عنوان نمونه، غفوری و همکاران [۱۰]، با استفاده از روش اویلر-لاگرانژ حرکت و رسوب‌گذاری ذرات را در اطراف استوانه‌های مثلی در یک کانال دوبعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که نیروهای براونی، پسا و برآ سافمن نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع و رسوب ذرات دارند. همچنین ملوندی و همکاران [۱۱]، به بررسی حرکت نانوذرات در یک میکروکانال دایره‌ای پرداختند و بیان کردند که نیروهای سطحی نظیر واندروالس و دولایه الکترواستاتیکی در نزدیکی دیواره‌ها بیشترین تأثیر را بر مکانیزم رسوب‌گذاری دارند. در ادامه، خوشتراش و همکاران [۱۲]، شبیه‌سازی جریان نانوسیال در فوم فلزی سلول‌باز را انجام دادند. نتایج نشان داد که نیروی براونی موجب پراکندگی یکنواخت‌تر ذرات در فوم می‌شود، ولی اثر نیروهای دیواره را بررسی نکردند. از سوی دیگر، سپهری و همکاران [۱۳]، به بررسی اثر تغییرات ساختاری فوم بر افت فشار و توزیع سرعت پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که افزایش چگالی حفره (Pore density) موجب بهبود اختلاط جریان و افزایش سطح تماس می‌شود، اما در عین حال افت فشار را نیز به شدت افزایش می‌دهد، اما در این مطالعه به بررسی حضور نانوسیالات پرداخته نشده است. اکثر مطالعاتی که شبیه‌سازی جریان نانوسیال در محیط متخلخل را شبیه‌سازی کرده‌اند، جریان نانوسیال را به صورت تک‌فازی بررسی نموده‌اند، که امکان رصد مسیر حرکت نانوذرات و رسوب آن بر روی سطوح محیط را فراهم نمی‌آورد. همچنین امکان مطالعه اثرات پیچیدگی‌های هندسی بر روی جریان در نظر گرفته نمی‌شود. در این میان، رمضانپور و همکاران در دو مطالعه مجزا یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی مقیاس حفره و بررسی انتقال و رسوب نانوذرات ارائه کردند. در این مدل نیروهای براونی، پسا، برآ سافمن، شناوری، گرانش و نیز نیروهای واندروالس و دولایه الکترواستاتیکی لحاظ شده است. نتایج نشان داد حرکت براونی و نیروهای دیواره در رسوب نانوذرات نقش کلیدی دارند و اندازه ذره

ویژگی‌های فیزیکی نانوذرات و سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی، در جدول ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱ شرایط اولیه و مرزی در نمای دوبعدی از یک فوم فلزی سلول باز ورونوی.

Fig. 1 Initial and boundary conditions in a schematic 2D view of an open-cell Voronoi metallic foam.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی نانوذرات و سیال [۱۴].

Table 1 Physical properties of the nanoparticles and base fluid

Parameter	Value
Density of water (fluid)	$\rho_f = 998.21 \text{ kg/m}^3$
Density of nanoparticle	$\rho_p = 7870 \text{ kg/m}^3$
Dynamic viscosity of water	$\mu_f = 1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$
Hamaker constant of water	$A_H = 0.4 \times 10^{-20}$
Nanoparticles diameter	$d_p = 20 \text{ nm}$

ته‌نشینی نانوذرات زمانی رخ می‌دهد که نیروهای جاذبه بین نانوذره و سطوح جامد محیط متخلخل از نیروهای دافعه آنها بیشتر باشند. بنابراین، زمانی که فاصله مرکز نانوذره تا نزدیک‌ترین سطح جامد کمتر از شعاع نانوذره باشد، نانوذره ته‌نشین می‌شود [۱۷-۱۶]. علاوه بر این، فرضیات زیر در تمامی شبیه‌سازی‌های این بخش در نظر گرفته شده‌است:

- سیال پایه آب در نظر گرفته شده‌است.
- نانوذرات در مدت زمان بسیار کوتاهی تزریق می‌شوند.
- توزیع نانوذرات در ورودی محیط متخلخل به صورت تصادفی است.
- شبیه‌سازی حرکت نانوذرات تا زمانی ادامه می‌یابد که آخرین ذره یا ته‌نشین شده یا از محیط خارج شود.
- تخلخل تمام فوم‌های فلزی تولید شده مقدار ثابت ۸۰٪ در نظر گرفته شده‌است.

۲-۲ تولید هندسه

برای تولید هندسه‌های فوم فلزی با چگالی حفره‌های مختلف، از الگوریتم موزائیک‌کاری لاگر-ورونوی (LVT Laguerre-Voronoi Tessellation) استفاده شده‌است که شامل مراحل زیر هست [۱۸]:

- ابعاد نمونه‌های فوم فلزی با تعریف طول، عرض و ارتفاع تعیین می‌شود.
- کل فضای داخل این محدوده توسط تعداد معینی از نقاط پر می‌شود. این نقاط به طور تصادفی پخش شده و نقش دانه‌ها در الگوریتم LVT را برعهده خواهند داشت.

و دما بر مکانیزم رسوب‌گذاری اثر چشمگیر دارند، ولی در این مطالعه از هندسه‌های میکروکانال استفاده شده‌است و مقدار رسوب در ساختارهای متخلخل بررسی نشده‌است [۱۴]. در مطالعه دیگری، رسوب نانوذرات را در کانال مستطیلی، کانال گلوگاه‌دار و هندسه‌های سه‌بعدی متخلخل سنگ و همچنین فوم با تخلخل مختلف بررسی کردند. نتایج نشان دادند که پیچیدگی هندسه و شکل‌گیری نواحی با سرعت صفر (stagnant zones) احتمال رسوب را افزایش می‌دهد زیرا ذرات در این نواحی فرصت بیشتری برای برخورد به دیواره و در نتیجه رسوب پیدا می‌کنند. این مطالعه محدود به ساختارهای فوم متخلخل با چگالی حفره یکسان بوده و اثر چگالی حفره بر رسوب در نظر گرفته نشده‌است [۱۵]. براساس مطالعات مرور شده، مشاهده می‌شود که اغلب مطالعات گذشته در زمینه جریان نانوسیال در محیط متخلخل از مدل‌های اویلری برای شبیه‌سازی جریان نانوسیال استفاده کرده‌اند. همچنین پیچیدگی‌های هندسی محیط متخلخل و رسوب نانوذرات بر روی دیواره محیط متخلخل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات مبتنی بر هندسه‌های ساده و عدم استفاده از ساختار واقعی فوم بوده است. همچنین در اغلب مطالعات گذشته، مکانیزم رسوب‌گذاری روی سطوح فوم‌های فلزی لحاظ نشده است.

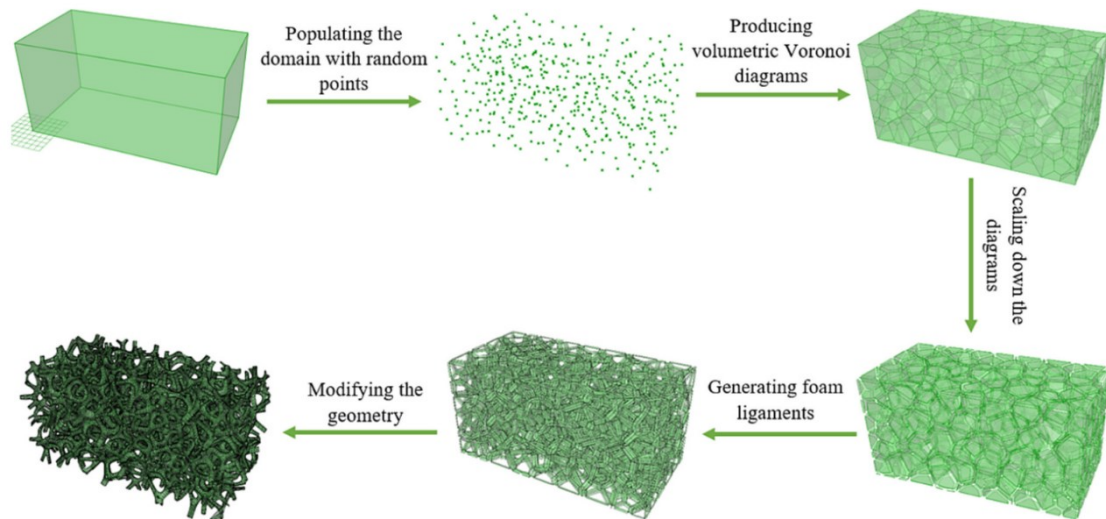
چگالی حفرات محیط متخلخل با تأثیر بر سطح تماس سیال-جامد و هیدرودینامیک جریان سیال می‌تواند میزان رسوب نانوذرات بر دیواره‌ها را تغییر دهد. این موضوع در پژوهش‌های پیشین بررسی نشده است. در این مطالعه، برای پر کردن این خلأ، چهار مدل فوم فلزی ورونوی با ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ PPI و تخلخل ثابت ۸۰٪ ساخته شد. جریان سیال و حرکت نانوذرات با استفاده از روش اویلر-لاگرانژ شبیه‌سازی گردید. در مدل عددی حاضر، تمامی نیروهای پسا، براونی، شناوری، گرانش، سافمن، واندروالس و دولایه الکترواستاتیکی لحاظ شده‌اند. تمرکز پژوهش بر تحلیل رفتار هیدرودینامیکی و مکانیزم رسوب‌گذاری است تا اثر چگالی حفرات بر نسبت رسوب نانوذرات آشکار شود. نتایج این کار می‌تواند مبنایی برای طراحی بهینه فوم‌های فلزی در کاربردهای صنعتی مانند فیلتراسیون فراهم کند.

۲- تعریف مسئله و روش تحقیق

۲-۱ تعریف مسئله

دامنه حل، شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی جریان نانوسیال در داخل فوم متخلخل در شکل ۱ نمایش داده شده است. نانوسیال با خصوصیات نشان داده شده در جدول ۱ از سمت چپ وارد محیط فوم سلول‌باز شده و بواسطه گرادیان فشار ثابت اعمال شده در راستای جریان، از سمت راست میدان حل خارج می‌شود. برای کلیه مرزهای جانبی شرط تقارن در نظر گرفته شده است.

- در این مرحله، الگوریتم LVT به دانه‌ها اعمال می‌شود. در نتیجه، کره‌هایی با ابعاد مختلف به مرکزیت این دانه‌ها تولید شده و سپس، دیاگرام‌های حجمی ورنوی براساس این کره‌ها شکل می‌گیرند.
 - با تعریف دو ضریب، مقیاس دیاگرام‌های ورنوی کوچک شده و یک فضای خالی برای تولید رشته‌های فوم فلزی به وجود می‌آید.
 - با استفاده از تکنیک‌های شبکه‌بندی، فضای خالی تبدیل به رشته‌های فوم فلزی می‌شود.
 - با بستن اتصالات و پر کردن حفره‌ها، هندسه نهایی فوم فلزی تولید می‌شود.
- در شکل ۲، مراحل مورد استفاده برای تولید مدل‌های فوم فلزی در پژوهش حاضر نشان داده شده‌است.



شکل ۲ نمایشی از مراحل مورد استفاده برای تولید مدل‌های فوم فلزی با استفاده از الگوریتم ورنوی [۱۸]
 Fig. 2 View of the steps employed to generate metallic foam models using the Voronoi algorithm [18].

۲-۳ معادلات حاکم

در روش اویلر-لاگرانژ، سیال پایه به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود و معادلات پیوستگی و مومنتوم برای محاسبه جریان سیال حل می‌شوند که به صورت زیر هستند [۱۴]:

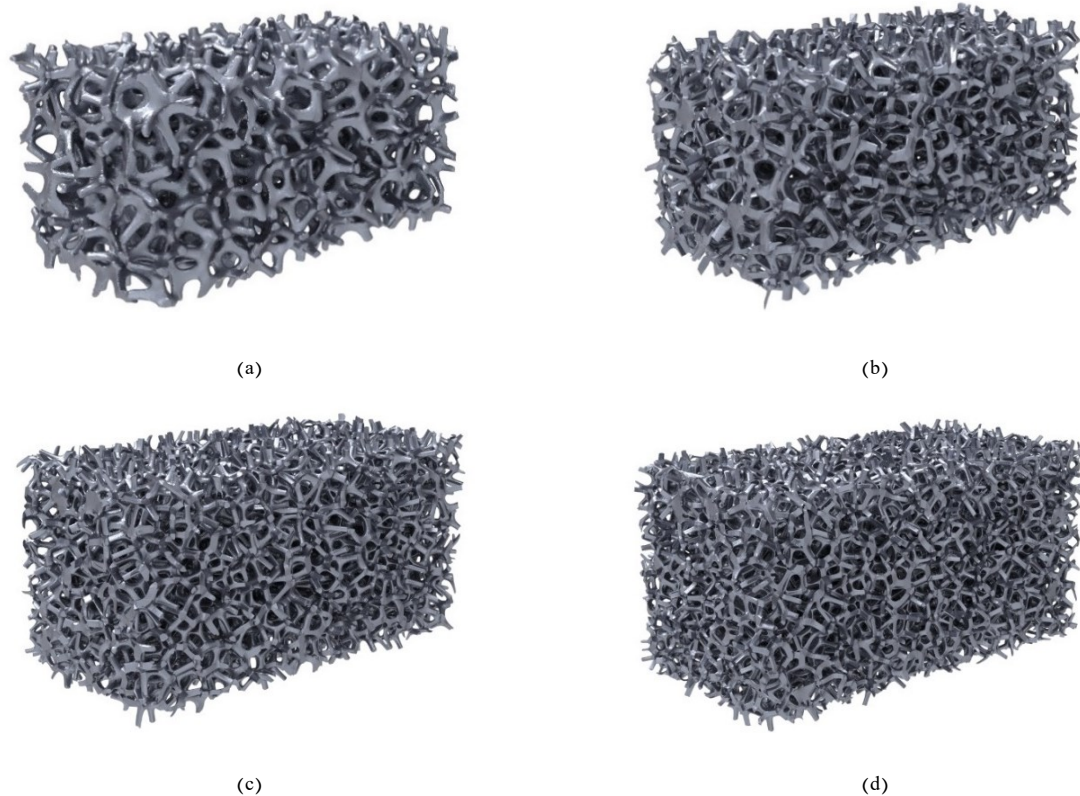
$$\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f (\mathbf{U}_f \cdot \nabla) \mathbf{U}_f = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_f (\nabla \mathbf{U}_f + \nabla \mathbf{U}_f^T)] + S_m \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا، ρ_f چگالی سیال، μ_f لزجت دینامیکی سیال، $\mathbf{U}_f$ سرعت سیال و S_m ترم چشمه است که انتقال مومنتوم بین سیال و نانوذرات را نشان می‌دهد. مقدار S_m با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

مراحل اول تا پنجم از مراحل بالا به وسیله نرم‌افزار تجاری راینو (Rhino) و افزونه گرسهوپر (Grasshopper) انجام شده است. افزونه گرسهوپر امکان تولید منحنی‌ها و احجام و اعمال تغییرات و بهبودهای متنوع روی آن‌ها را از طریق الگوریتم‌های مختلف برای کاربران فراهم می‌کند. هم‌چنین، مرحله ششم، یعنی مرحله اصلاح ایرادات هندسی و آماده‌سازی هندسه نهایی، در نرم‌افزار تجاری Geomagic Design X انجام شده است.

در این پژوهش، چهار نمونه فوم فلزی متخلخل ورنویی با تخلخل ثابت ۸۰٪ و چگالی حفره‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ PPI طبق الگوریتم توضیح داده‌شده و با ابعاد ۱۰×۵×۵ میلی‌متر تولید شد (شکل ۳).



شکل ۳ فوم‌های متخلخل تولید شده با تخلخل ثابت ۸۰٪ و چگالی حفره‌های الف (۳۰ PPI؛ ب) ۴۰ PPI؛ ج) ۵۰ PPI؛ و د) ۶۰ PPI.
Fig. 3 Porous foams generated with a constant porosity of 80% and pore densities of (a) PPI 30; (b) PPI 40; (c) PPI 50; and (d) PPI 60.

به مقیاس نانو نزدیک می‌شود، فرض عدم لغزش در این موقعیت معتبر نیست. بنابراین، نیروی پسا با استفاده از ضریب کانینگهام، تصحیح می‌شود.

۲-۳-۲- نیروی براونی

در نتیجه برخورد بین مولکول‌های سیال پایه و نانوذرات، نیروی براونی ایجاد می‌شود که باعث حرکت تصادفی ذرات در سیال پایه می‌گردد. این نیرو با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد و بنابراین یکی از نیروهای غالب بین سیال و نانوذرات محسوب می‌شود. این نیرو به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$F_{\text{Brownian}} = m_p \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (۶)$$

در رابطه ی فوق ζ_i عدد تصادفی گوسی با واریانس واحد و میانگین صفر است. Δt نشانگر گام زمانی است و S_0 شدت طیفی را نشان می‌دهد.

در مطالعه رمضانپور و همکاران [۱۴] نشان داده شد که با افزایش قطر نانوذرات از ۳۰ تا ۱۵۰ نانومتر، نیروی براونی حدود ۵۵ برابر کاهش یافته و به دنبال آن رسوب ذرات تا ۷۰٪ کاهش می‌یابد. بنابراین در مطالعه حاضر که قطر نانوذرات ۲۰ نانومتر در نظر گرفته شده، نیروی براونی یکی از مهمترین نیروهای تاثیرگذار بر حرکت رسوب نانوذرات می‌باشد.

$$S_m = \frac{1}{\delta V} \sum_{p=1}^{n_p} m_p F_p \quad (۳)$$

زیرنویس P نشان‌دهنده ی نانوذره است، m_p و F_p به ترتیب جرم نانوذره و نیروی کلی وارد بر سیال از طرف نانوذره (به ازای واحد جرم) را نشان می‌دهند. δV حجم سلول محاسباتی و n_p تعداد نانوذرات موجود در یک سلول محاسباتی است. قانون دوم نیوتن برای انتقال نانوذرات در روش لاگرانژی با توجه به نیروهای حاکم در این مسئله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_p = F_{\text{Drag}} + F_{\text{Brownian}} + F_{\text{saffman}} + F_{\text{Bouyancy}} + F_{\text{Gravity}} + F_{\text{VWD}} + F_{\text{EDL}} \quad (۴)$$

در ادامه نحوه محاسبه هریک از نیروهای ذکر شده در رابطه (۴) بیان خواهد شد.

۲-۳-۱- نیروی پسا

به دلیل حرکت نسبی میان نانوذرات و سیال، نیروی پسا در خلاف جهت حرکت نانوذرات اعمال می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{\text{Drag}} = m \frac{18\mu_f}{\rho_f d_p^2 C_c} (U - U_p) \quad (۵)$$

در رابطه ی فوق C_c ضریب تصحیح لغزشی کانینگهام (Cunningham slip correction factor) و d_p قطر نانوذره است. زمانی که ابعاد ذرات

۲-۴ حل عددی

یک حلگر عددی با استفاده از کتابخانه منبع باز OpenFOAM و اعمال تغییرات بر روی حلگر DPMFoam که پیشتر توسط رضانیور و همکاران [۱۴] توسعه داده شده، ته نشینی و انتقال نانوذرات را در ترکیب با سیال پایه شبیه سازی می‌کند. بدین منظور یک کد عددی با استفاده از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر فاز سیال مورد استفاده قرار گرفت.

این حلگر از یک بخش لاگرانژی تشکیل شده است که با الگوریتم PIMPLE برای حل بخش اویلری ترکیب می‌شود. الگوریتم‌های PIMPLE و PISO برای جریان‌های گذرا و الگوریتم SIMPLE برای جریان‌های پایا به کار می‌روند. الگوریتم PIMPLE مزایای هر دو الگوریتم PISO و SIMPLE را در اختیار دارد. در الگوریتم PIMPLE برای هر گام زمانی به نوعی حلقه SIMPLE اجرا می‌شود: یک راه حل پایا با تعدادی حلقه‌ی اصلاحی مشخص جست و جو می‌شود. پس از آن، تمام معادلات انتقال حل می‌شود که این فرآیند معادل الگوریتم PISO با تعداد مشخصی حلقه اصلاحی است. افزون بر این، الگوریتم در کل مرحله زمانی به عقب بر می‌گردد و الگوریتم PISO را دوباره با یک حدس اولیه جدید حل می‌کند. با توجه به موارد عنوان شده حل در الگوریتم PIMPLE پایدارتر است با این وجود در مقایسه با الگوریتم PISO هزینه محاسباتی بالاتری دارد. با توجه به موارد عنوان شده در این پژوهش معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی با استفاده از الگوریتم PIMPLE مورد حل قرار می‌گیرند با محاسبه‌ی انتقال اندازه حرکت بین بخش ذرات و سیال و همچنین محاسبه‌ی کسر حجمی سیال در هر سلول محاسباتی سرعت سیال محاسبه می‌شود.

گسسته سازی معادلات دیفرانسیل با استفاده از روش تفاضل مرکزی مرتبه دوم و روش اویلر مرتبه اول به ترتیب برای گرادیان فشار و مشتق زمانی استفاده شده است. همچنین از یک حلگر گرادیان مزدوج (Conjugate gradient solver) برای حل سیستم گسسته شده اویلری استفاده شد تا به وسیله‌ی پیش شرط هندسی جبری چند شبکه‌ای (GAMG) برای فشار و استفاده از روش گاوس-سایدل (Gauss-Seidel) برای هموارسازی حلگر مربوط به محاسبه‌ی سرعت برای حل معادلات اویلری استفاده شود.

به منظور ایجاد حلگر مورد نیاز در بخش لاگرانژی کد مربوط به نیروی براونی به حلگر اضافه شد و الگوریتم محاسبه‌ی نیروی براونی بر اساس مقالات مطالعه شده در پیشینه تحقیق اصلاح و به کار گرفته شد.

با انجام اصلاحات لازم در کتابخانه‌ی intermediate نرم افزار OpenFOAM و اضافه کردن نیروهای واندروالس و دولایه‌ی الکتروستاتیک به آن قابلیت محاسبه‌ی این نیروها به حلگر DPMFoam اضافه شد.

۳-۳-۲ نیروی برآ سافمن

ذرات ریز در یک جریان برشی تحت تأثیر نیرویی قرار می‌گیرند که عمود بر جهت حرکت آن‌هاست [۲۰]. سافمن [۲۱] رابطه‌ای برای محاسبه این نیرو پیشنهاد داد که به نیروی برآ سافمن معروف است. این نیرو به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{F}_{\text{Saffmann}} = 6\sqrt{6}\mu r_p^2 (\mathbf{U} - \mathbf{U}_p) \sqrt{\rho\mu \left| \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y} \right|} \text{sign} \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y} \right) \mathbf{e}_y \quad (7)$$

۴-۳-۲ نیروی شناوری و گرانشی

مجموع نیروهای گرانش و شناوری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{F}_{\text{Bouyancy}} + \mathbf{F}_{\text{Gravity}} = \left(\pi \frac{d_p^3}{6} \right) (\rho_f - \rho_g) \mathbf{g} \quad (8)$$

علاوه بر نیروهای بین نانوذرات و سیال پایه، برهم‌کنش میان نانوذرات و سطوح محیط متخلخل نیز در فواصل چند نانومتری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نیروهای واندروالس و دولایه الکتروستاتیک که به ترتیب به عنوان نیروهای جاذبه و دافعه عمل می‌کنند، نقش حیاتی در تجمع ذرات و رسوب آن‌ها بر روی سطوح جامد محیط متخلخل دارند.

۵-۳-۲ نیروی واندروالس

نیروی واندروالس یک نیروی جاذبه است که بین ذرات کوچک و سطوح وجود دارد. در این مطالعه، نیروی واندروالس به صورت زیر بیان شده است [۲۲]:

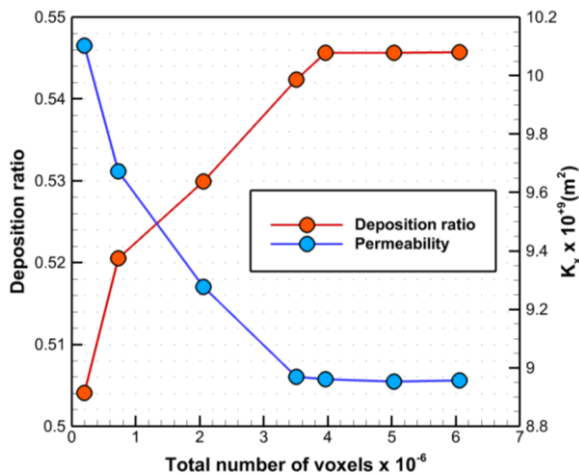
$$\mathbf{F}_{\text{VDW}} = \frac{A_H}{6} \left[-\frac{r_p}{(z - r_p)^2} - \frac{r_p}{(z + r_p)^2} + \frac{1}{z - r_p} - \frac{1}{z + r_p} \right] \quad (9)$$

۶-۳-۲ نیروی دولایه الکتروستاتیک

به دلیل وجود یون‌ها در سیال پایه، ذرات جامد در یک مایع با ثابت دی‌الکتریک بالا دارای بار الکتریکی می‌شوند و یک لایه‌ی دوتایی الکتروستاتیک در اطراف ذرات باردار تشکیل می‌شود. با استفاده از روابط هوگ-هیلی-فورتسناو، انرژی برهم‌کنش الکتروستاتیک بین دو سطح مختلف به صورت زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$\mathbf{F}_{\text{EDL}} = 2\kappa K_B T N_{E1} \left[\frac{N_{E2} - \exp(-N_{DL} Z^*)}{\exp(N_{DL} Z^*) - \exp(-N_{DL} Z^*)} \right] \quad (10)$$

در رابطه‌ی فوق $z^* = \frac{z}{r_p}$ است. N_{E1} نشانگر میزان بزرگی پتانسیل سطح نانوذره و سطح جامد می‌باشد. N_{E2} نسبت پتانسیل‌های سطح را نشان می‌دهد و N_{DL} نسبت شعاع ذره را به ضخامت دو لایه الکتروستاتیک نمایش می‌دهد. در تمام شبیه‌سازی‌ها برای پارامترهای N_{E1} و N_{E2} به ترتیب مقادیر ثابت ۵۰، ۱ و N_{DL} برابر ۵ در نظر گرفته شده است.



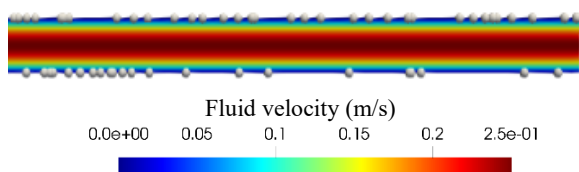
شکل ۴ نتایج استقلال از شبکه برای نسبت رسوب و نفوذپذیری.
Fig. 4 Grid independence results for deposition ratio and permeability.

۳-۲- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی، نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج ارائه شده توسط رمضانپور و همکاران [۱۴] (که در آن جریان نانوسیال در داخل یک میکروکانال شبیه‌سازی شده) مقایسه می‌گردد. یک شبکه محاسباتی با سازمان در داخل میکروکانال ایجاد شده است. برای ایجاد این شبکه از ابزار بلاک مش (BlockMesh) در نرم‌افزار این‌فوم استفاده شده است. طول میکروکانال ۲۵۰ میکرومتر و عرض آن ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است.

شکل ۵، توزیع سرعت سیال و موقعیت نهایی نانوذرات رسوب‌کرده حاصل از اعتبارسنجی را در زمان پایان شبیه‌سازی جریان در داخل میکروکانال نشان می‌دهد. طبق شکل، نانوذرات به صورت بزرگ‌نمایی شده به تصویر کشیده شده‌اند و روی دیواره‌های بالا و پایین کانال رسوب کرده‌اند.

در شکل ۶، نتایج اعتبارسنجی در این مطالعه نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود انطباق مناسبی بین نتایج مطالعه حاضر و مطالعه رمضانپور و همکاران [۱۴] وجود دارد.



شکل ۵ توزیع سرعت سیال و موقعیت نانوذرات رسوب کرده (به صورت بزرگ‌نمایی شده) در میکروکانال در پایان زمان شبیه‌سازی.

Fig. 5 Fluid velocity distribution and the positions of deposited nanoparticles (magnified view) in the microchannel at the end of the simulation.

فرآیند کلی حل جریان لاگرانژی در حلگر توسعه یافته اوپلری-لاگرانژی به صورت زیر است:

- اطلاعات مربوط به همه‌ی نانوذرات تعریف شده در محیط در یک ساختار مشخص ذخیره و نگهداری می‌شود.
- سرعت و موقعیت هر ذره درون هر سلول از شبکه اوپلری، شناسایی شده و محاسبه و ذخیره می‌شود.
- کسر حجمی نانوذرات در هر سلول از بخش اوپلری محاسبه می‌شود.
- بر اساس سرعت اولیه ذرات و سیال و کسر حجمی محاسبه شده نیروهای بین سیال و ذرات (شامل نیروهای پسا، براون، گرانش، شناوری و نیروهای بین سیال و دیواره (شامل نیروهای دو لایه الکترواستاتیک و واندروالس) محاسبه می‌شود و انتقال اندازه حرکت ذره سیال محاسبه می‌شود.
- ضمن محاسبه اندازه حرکت ذره سیال و انتقال آن به بخش اوپلری موقعیت جدید ذرات و سرعت آن محاسبه می‌شود و موقعیت جدید ذرات و سرعت آن به حلگر اوپلری منتقل می‌گردد.
- میدان سرعت نانوذرات برای گام زمانی بعدی محاسبه می‌شود.

معیار همگرایی برای معادلات بقا، رسیدن مانده مطلق معادلات به مقدار کمتر از 1×10^{-6} در نظر گرفته شد و گام زمانی به صورت تطبیقی (adaptive) تنظیم گردید تا عدد کورانت از مقدار حداکثر ۰/۳ تجاوز نکند.

۳- ارائه و بررسی نتایج

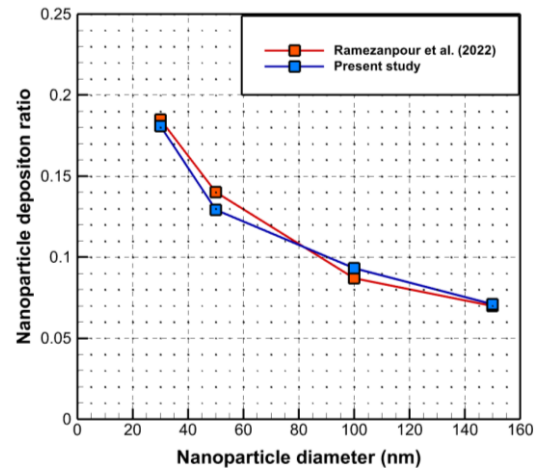
۳-۱- استقلال از شبکه

برای انتخاب شبکه محاسباتی بهینه، تحلیل استقلال نتایج از شبکه حل انجام گرفته است. یک شبکه محاسباتی بهینه نه تنها نتایج دقیق و پایداری ارائه می‌دهد بلکه تعداد کمتری از گره‌های محاسباتی را دربرمی‌گیرد. هفت شبکه مختلف برای انجام محاسبات استفاده شده و نتایج آن‌ها در قالب نسبت رسوب ذرات و نفوذپذیری محیط در شکل ۴ با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج استقلال شبکه برای نمونه با تخلخل ۸۰٪ و چگالی حفره ۳۰ انجام شده و شبکه‌های محاسباتی بهینه برای سایر نمونه‌های فوم فلزی بر اساس نتایج ارائه شده انتخاب شده است. می‌توان مشاهده کرد که شبکه محاسباتی با حدود ۴ میلیون گره می‌تواند منجر به نتایج مستقل از شبکه حل شود.

بررسی قرار گرفته است. در تصاویر ارائه شده خطوط جریان در مقاطع میانی هندسه‌ها نشان داده شده و این خطوط جریان براساس مقادیر سرعت جریان رنگ‌آمیزی شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود، تفاوت‌های قابل توجهی در ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان با تغییر چگالی حفره‌ها حاصل می‌شود. در نمونه‌ی با چگالی حفره ۳۰ PPI، بیشینه‌ی سرعت جریان در حدود 0.36 m/s مشاهده می‌شود، که بیشترین مقدار در بین چهار هندسه تولید شده است. این مقدار در هندسه‌های با چگالی حفره ۴۰، ۵۰ و ۶۰ PPI به ترتیب تا حدود 0.3 m/s ، 0.23 m/s و 0.21 m/s کاهش می‌یابد. کاهش پیوسته‌ی سرعت جریان با افزایش چگالی حفره، به‌وضوح نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت ساختار متخلخل در برابر عبور سیال است؛ زیرا افزایش تعداد حفره‌ها در واحد حجم، باعث کاهش قطر متوسط مسیرهای جریان و افزایش سطح تماس سیال با دیواره‌های جامد متخلخل شده است.

خطوط جریان در چگالی حفره‌های بالاتر خصوصاً چگالی حفره ۶۰ PPI فشرده‌تر از سایر چگالی حفره‌ها می‌باشد. فشردگی کمتر خطوط جریان در چگالی حفره‌های پایین‌تر باعث می‌شود تا جریان در مسیری پرپیچ‌وخم‌تر حرکت کند. در چگالی حفره‌های ۵۰ و ۶۰، الگوی جریان منظم‌تر و خطی‌تر شده، به‌طوری‌که در چگالی حفره ۶۰، خطوط جریان به شکل مستقیم و یکنواخت‌تر در امتداد محور طولی هندسه درآمده‌اند. با کاهش پیچ و خم جریان در این هندسه‌ها، مسیرهای جریان محدودتر و کانالیزه‌تر شده‌اند، ولی به دلیل کاهش سطح عبور سیال، مقاومت هیدرودینامیکی افزایش یافته و در نتیجه با کاهش نفوذپذیری محیط، سرعت جریان کاهش می‌یابد.

در شکل ۸، برش‌های طولی از فوم‌های فلزی با چگالی‌های حفره مختلف ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ PPI به همراه موقعیت نهایی ذرات در پایان شبیه‌سازی نمایش داده شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توزیع ذرات و میزان رسوب‌گذاری آن‌ها به‌طور مستقیم تحت تأثیر ساختار هندسی فوم و در نتیجه چگالی حفره آن قرار دارد که این موضوع بررسی شبیه‌سازی در مقیاس حفره را بیش از پیش نمایان می‌کند. در فوم با چگالی حفره ۳۰ PPI، سطح موثر تماس سیال-جامد کمتر از نمونه‌های دیگر است و با افزایش چگالی حفرات، سطح تماس سیال-جامد نیز افزایش خواهد یافت. همین امر تأثیر بسزایی در میزان ذرات بر روی دیواره حفرات خواهد داشت. در نتیجه کمترین میزان رسوب در فوم ۳۰ PPI مشاهده می‌شود. با افزایش چگالی حفره، حفره‌ها ریزتر شده، در این حالت تعداد بیشتری از ذرات در ساختار فوم به دام افتاده و رسوب‌گذاری افزایش یافته است.



شکل ۶ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج ارائه شده توسط رمضانپور و همکاران [۱۴] که در آن نسبت رسوب نانوذرات به ازای مقادیر مختلف قطر نانوذره (بر حسب نانومتر) در میکروکانال نشان داده شده است.

Fig. 6 Comparison of the present results with those reported by Ramezanpour et al. [14], showing the nanoparticle deposition ratio in the microchannel for different nanoparticle diameters (in nanometers).

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، میانگین اختلاف حدود ۴/۵ درصد به‌دست آمده است. این تطابق مناسب، صحت مدل عددی حاضر را در شبیه‌سازی جریان و رسوب‌گذاری نانوذرات در مقیاس حفره تأیید می‌کند. علت این اختلاف جزئی به ماهیت تصادفی نیروی براونی و توزیع تصادفی ذرات در ورودی دامنه محاسباتی بازمی‌گردد. در مدل اویلری-لاگرانژی، نیروی براونی به‌صورت تابع تصادفی گوسی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مسیر حرکت و زمان برخورد ذرات با دیواره‌ها ممکن است اندکی متفاوت باشد. علاوه بر این، توزیع اولیه‌ی نانوذرات در ورودی دامنه حل، نیز به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. ترکیب این دو عامل تصادفی موجب ایجاد اختلافات جزئی در مقدار نهایی رسوب می‌شود.

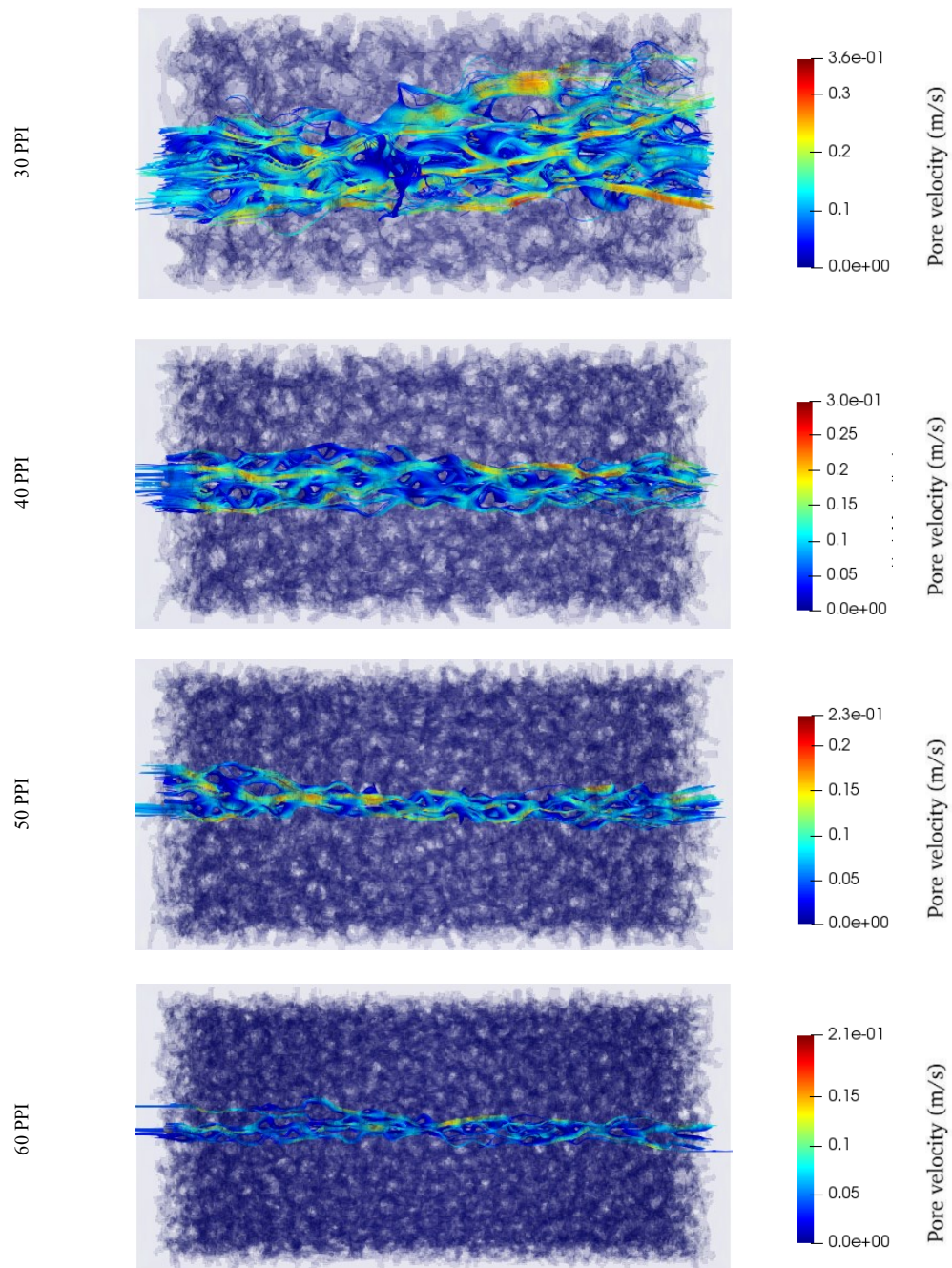
جدول ۲ مقایسه درصد اختلاف نتایج مدل حاضر و مطالعه مرجع برای اعتبارسنجی.

Table 2 Comparison of percentage differences between the present model and the reference study for validation.

Difference (%)	Deposition ratio in the present study	Deposition ratio in the reference study	Nanoparticle diameter (nm)
2.16	0.181	0.185	30
7.86	0.129	0.140	50
4.55	0.092	0.088	100
1.43	0.071	0.070	150

۳-۳- ارائه نتایج

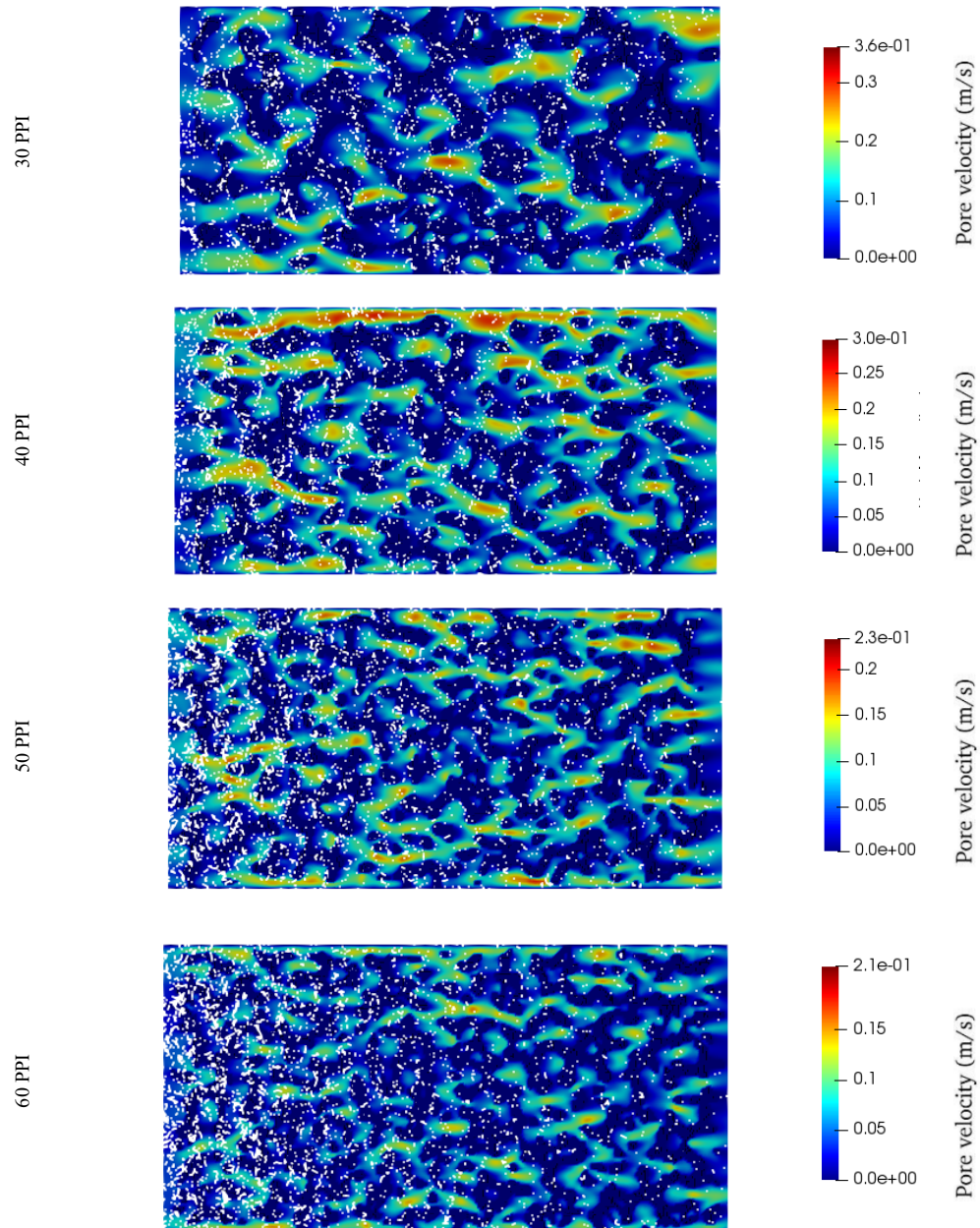
در شکل ۷، رفتار جریان سیال در چهار ساختار متخلخل با چگالی حفره‌های مختلف ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ PPI و تخلخل ثابت ۸۰٪ مورد



شکل ۷ نمایش تاثیر چگالی حفره‌های متفاوت در تخلخل ثابت ۸۰٪ بر سرعت جریان و توزیع خطوط جریان.
Fig. 7 Illustration of the effect of different pore densities at a constant porosity of 80% on flow velocity and streamline distribution.

این فوم باعث افزایش احتمال برخورد ذرات با دیواره‌ها و زمان اقامت بیشتر آن‌ها درون فوم شده است که نتیجه آن افزایش چشمگیر میزان رسوب‌گذاری است.

در فوم با چگالی حفره برابر با ۶۰، بیشترین میزان رسوب ذرات دیده می‌شود. این امر به دلیل افزایش سطح تماس و کاهش نفوذپذیری و در نتیجه کاهش سرعت سیال می‌باشد. در واقع، ساختار متخلخل



شکل ۸ برش طولی فوم‌های فلزی و نمایش دوبعدی موقعیت نانوذرات در پایان شبیه‌سازی.
 Fig. 8 Longitudinal sections of metallic foams and 2D representation of nanoparticle positions at the end of the simulation.

رسوب به حدود ۸۸/۵٪ رسیده است که نشان‌دهنده بیشترین مقدار رسوب در بین موارد بررسی شده است.

از سوی دیگر، در این نمودار به‌صورت کمی مشخص است که بیشترین نرخ افزایش رسوب مربوط به چگالی حفره با بازه بین ۳۰ تا ۴۰ PPI بوده و شیب منحنی پس از آن کاهش یافته است؛ این روند بیانگر آن است که با افزایش تعداد حفرات، سطح تماس و احتمال برخورد ذرات با دیواره‌ها بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان رسوب افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، کاهش شیب منحنی در مقادیر بالاتر از ۵۰ PPI نشان می‌دهد که سیستم به ناحیه‌ای با رفتار

در شکل ۹، تأثیر چگالی حفره فوم‌های فلزی بر نسبت رسوب نانوذرات نشان داده شده است. در این نمودار، محور افقی بیانگر تعداد حفره‌ها در هر اینچ (Pores Per Inch) و محور عمودی بیانگر نسبت رسوب نانوذرات است. همان‌طور که از منحنی به‌وضوح پیداست، با افزایش مقدار چگالی حفره از ۳۰ به ۶۰ PPI، مقدار نسبت رسوب نانوذرات به‌صورت صعودی افزایش یافته است. مقدار این نسبت برای فوم با چگالی حفره ۳۰ PPI حدود ۶۲٪ است که کمترین مقدار در میان نمونه‌های بررسی‌شده محسوب می‌شود. این در حالی است که با افزایش چگالی حفره به ۶۰ PPI، نسبت

نانوذرات و فوم ورونوی با تخلخل ۸۰٪ و چگالی حفره PPI ۶۰ بیشترین نرخ رسوب نانوذرات را نشان داده‌اند.

- افزایش چگالی حفره سبب ریزتر شدن منافذ و حفره‌های فوم متخلخل خواهد شد و در نتیجه تعداد بیشتری ذره در اوایل فوم‌های فلزی متخلخل رسوب خواهد کرد که این امر در کاربردهایی نظیر فیلتراسیون، سبب فیلتر شدن و به دام افتادن سریعتر ذرات می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، سازمانی یا شخصی در ارتباط با انجام این پژوهش وجود ندارد.

نقش نویسندگان: محمد دهقان (نویسنده اول)، نگارنده چکیده/مقدمه/هندسه شبکه/معادلات حاکم/تولید شبکه/فرضیات شبکه/نتایج/اعتبارسنجی/نتیجه‌گیری (۵۰٪): مجید سیاوشی (نویسنده دوم)، استاد راهنما در طراحی کلی پژوهش/هدایت علمی پروژه/نظارت بر انجام مراحل تحقیق/بازبینی نهایی مقاله (۵۰٪).

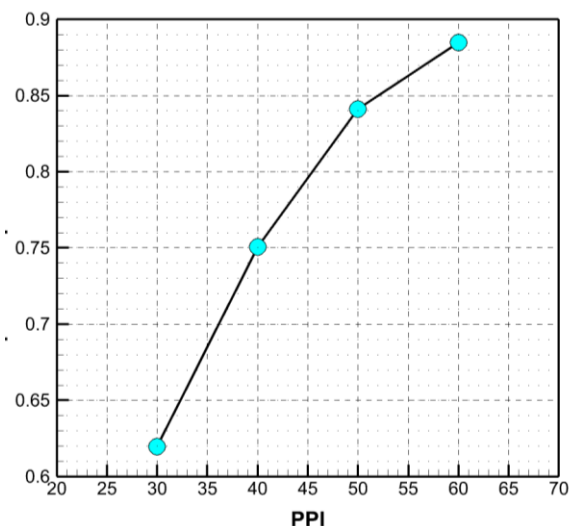
فهرست علائم

ثابت هاکامر برای نانوذره	A_H
اعداد تصادفی برای محاسبه نیروی حرکت براونی	A_i
ضریب تصحیح لغزش کانینگهام	C_c
قطر نانوذره (nm)	d_p
نیرو بر واحد جرم (N/kg)	F
نیروی شناوری بر واحد جرم (N/kg)	F_B
نیروی شناوری بر واحد جرم (N/kg)	F_{Br}
نیروی پسا بر واحد جرم (N/kg)	F_D
نیروی دولایه الکترواستاتیکی بر واحد جرم (N/kg)	F_{EDL}
نیروی گرانش بر واحد جرم (N/kg)	F_G
نیروی برآ سافمن بر واحد جرم (N/kg)	F_{SL}
نیروی واندروالس بر واحد جرم (N/kg)	F_{VDW}
ثابت بولتزمن	k_b
جرم (kg)	m
تعداد نانوذرات	n_p
بزرگی پتانسیل سطح	N_{E1}
نسبت پتانسیل سطح	N_{E2}
دما (K)	T
سرعت (m/s)	U

علائم یونانی

لزجت دینامیکی سیال (kg / m . s)	μ
چگالی (kg / m^3)	ρ
حجم سلول محاسباتی (m^3)	δV
گام زمانی (s)	Δt
مسیر آزاد میانگین مولکول‌ها (m)	λ
پتانسیل سطحی	ψ
ثابت دی الکتریک محلول	ϵ

مجبانی نزدیک می‌شود؛ به این معنا که پس از رسیدن به حد مشخصی از چگالی حفرات، تغییرات نسبت رسوب بسیار کند شده و منحنی تمایل دارد به مقدار نهایی نسبت رسوب یعنی ۱۰۰٪، همگرا شود. در این حالت، بخش عمده‌ای از ذرات، رسوب کرده‌اند و تنها درصد اندکی از ذرات در فاز سیال باقی می‌مانند. بنابراین، در نواحی با چگالی حفره بالاتر، افزایش بیشتر تعداد حفرات تأثیر کمتری بر نسبت رسوب دارد و منحنی رسوب‌گذاری به صورت مجانبی به مقدار نهایی خود میل می‌کند.



شکل ۹ نسبت رسوب برای چگالی حفره‌های متفاوت.

Fig. 9 Deposition ratio for different pore densities.

۴- جمع‌بندی

در این مطالعه، رفتار انتقال و رسوب نانوذرات در فوم‌های فلزی متخلخل با ساختار هندسی ورونوی، به استفاده از مدل اویلری-لاگرانژی و روش حل عددی حجم محدود در محیط نرم‌افزاری اپن‌فوم مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز اصلی بر تأثیر چگالی حفره (تعداد حفره در هر اینچ PPI) بر نرخ رسوب نانوذرات در فوم‌هایی با تخلخل ثابت ۸۰٪ بوده است. شبیه‌سازی جریان نانوذرات در سیال پایه با در نظر گرفتن نیروهای کلیدی نظیر پسا، براونی، گرانش، شناوری، برآ سافمن و همچنین، نیروهای واندروالس و دولایه الکترواستاتیکی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش نانوذرات با دیواره محیط متخلخل انجام شده است. مهمترین نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به شرح زیر جمع‌بندی کرد:

- افزایش چگالی حفره منجر به افزایش سطح فوم‌های متخلخل، کاهش نفوذپذیری محیط متخلخل و کاهش سرعت سیال در حفره‌های محیط متخلخل می‌شود. افزایش سطح تماس و کاهش سرعت سیال سبب افزایش نسبت رسوب شده است. افزایش چگالی حفره از ۳۰ به ۶۰ PPI افزایش حدود ۲۶/۵٪ نسبت رسوب را سبب شده است. فوم فلزی ورونوی با تخلخل ۸۰٪ و چگالی حفره PPI ۳۰ کمترین نرخ رسوب

منابع

- flow and heat transfer in open-cell metal foams considering Brownian motion," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 221, p. 119847, 2023, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2023.119847](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.119847).
- [13] E. Sepehri and M. Siavashi, "Pore-scale direct numerical simulation of fluid dynamics, conduction and convection heat transfer in open-cell Voronoi porous foams," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 137, p. 106274, 2022, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106274](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106274).
- [14] M. Ramezanpour, M. Siavashi, A. Q. Raeini, and M. J. Blunt, "Pore-scale simulation of nanoparticle transport and deposition in a microchannel using a Lagrangian approach," *J. Mol. Liq.*, vol. 355, p. 118948, 2022, doi: [10.1016/j.molliq.2022.118948](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118948).
- [15] M. Ramezanpour, M. Siavashi, H. Khoshtarash, and M. J. Blunt, "Transport and deposition of nanoparticles in porous media at the pore scale using an Eulerian-Lagrangian method," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 161, p. 105536, 2024, doi: [10.1016/j.jtice.2024.105536](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105536).
- [16] S. Andarwa, H. B. Tabrizi, and G. Ahmadi, "Effect of correcting near-wall forces on nanoparticle transport in a microchannel," *Particuology*, vol. 16, pp. 84–90, 2014, doi: [10.1016/j.partic.2013.11.007](https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.11.007).
- [17] D. J. Young and R. J. Kearney, "Brownian particle deposition in a directly simulated turbulent channel flow," *Phys. Fluids*, vol. 5, no. 6, pp. 1427–1437, 1993, doi: [10.1063/1.858785](https://doi.org/10.1063/1.858785).
- [18] R. Paknahad, M. Siavashi, and M. Hosseini, "Pore-scale fluid flow and conjugate heat transfer study in high-porosity Voronoi metal foams using multi-relaxation-time regularized lattice Boltzmann (MRT-RLB) method," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 141, p. 106607, 2023, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106607](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106607).
- [19] A. Li and G. Ahmadi, "Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 209–226, 1992, doi: [10.1080/02786829208959550](https://doi.org/10.1080/02786829208959550).
- [20] I. S. Akhatov, J. M. Hoey, O. F. Swenson, and D. L. Schulz, "Aerosol focusing in micro-capillaries: Theory and experiment," *J. Aerosol Sci.*, vol. 39, no. 8, pp. 691–709, 2008, doi: [10.1016/j.jaerosci.2008.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.04.004).
- [21] P. G. Saffman, "The lift on a small sphere in a slow shear flow," *J. Fluid Mech.*, vol. 22, no. 2, pp. 385–400, 1965, doi: [10.1017/S0022112065000824](https://doi.org/10.1017/S0022112065000824).
- [22] P. Huang, J. S. Guasto, and K. S. Breuer, "The effects of hindered mobility and depletion of particles in near-wall shear flows and the implications for nanovelocimetry," *J. Fluid Mech.*, vol. 637, pp. 241–265, 2009, doi: [10.1017/S0022112009990656](https://doi.org/10.1017/S0022112009990656).
- [23] R. Hogg, T. W. Healy, and D. W. Fuerstenau, "Mutual coagulation of colloidal dispersions," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 62, pp. 1638–1651, 1966, doi: [10.1039/TF9666201638](https://doi.org/10.1039/TF9666201638).
- [1] G. Boccardo, C. Marchisio, and F. Tosco, "A review of transport of nanoparticles in porous media: From pore-to-macroscale using computational methods," *Nanomater. Detect. Remov. Wastewater Pollut.*, pp. 351–381, 2020, doi: [10.1016/B978-0-12-818489-9.00015-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818489-9.00015-1).
- [2] S. K. Das, S. U. S. Choi, and H. E. Patel, "Heat transfer in nanofluids—A review," *Heat Transf. Eng.*, vol. 27, no. 10, pp. 3–19, 2006, doi: [10.1080/01457630600904593](https://doi.org/10.1080/01457630600904593).
- [3] X. Ling, Z. Yan, Y. Liu, and G. Lu, "Transport of nanoparticles in porous media and its effects on the co-existing pollutants," *Environ. Pollut.*, vol. 283, p. 117098, 2021, doi: [10.1016/j.envpol.2021.117098](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117098).
- [4] K. Nawaz, J. Bock, and A. M. Jacobi, "Thermal-hydraulic performance of metal foam heat exchangers under dry operating conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 119, pp. 222–232, 2017, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2017.03.012](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.012).
- [5] N. Seetha, A. Raoof, M. M. Kumar, and S. M. Hassanizadeh, "Upscaling of nanoparticle transport in porous media under unfavorable conditions: Pore scale to Darcy scale," *J. Contam. Hydrol.*, vol. 200, pp. 1–14, 2017, doi: [10.1016/j.jconhyd.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.03.004).
- [6] G. Gerber, D. A. Weitz, and P. Coussot, "Propagation and adsorption of nanoparticles in porous medium as traveling waves," *Phys. Rev. Res.*, vol. 2, no. 3, p. 033074, 2020, doi: [10.1103/PhysRevResearch.2.033074](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.033074).
- [7] G. Liang and I. Mudawar, "Review of single-phase and two-phase nanofluid heat transfer in macro-channels and micro-channels," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 136, pp. 324–354, 2019, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.086](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.086).
- [8] J. Fan and L. Wang, "Review of heat conduction in nanofluids," *J. Heat Transf.*, vol. 133, no. 4, 2011, doi: [10.1115/1.4002633](https://doi.org/10.1115/1.4002633).
- [9] O. Mahian, A. Kianifar, S. Z. Heris, et al., "Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows—Part I: Fundamentals and theory," *Phys. Rep.*, vol. 790, pp. 1–48, 2019, doi: [10.1016/j.physrep.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.11.004).
- [10] S. Ghafouri, M. Alizadeh, S. M. Seyyedi, H. H. Afrouzi, and D. D. Ganji, "Deposition and dispersion of aerosols over triangular cylinders in a two-dimensional channel: Effect of cylinder location and arrangement," *J. Mol. Liq.*, vol. 206, pp. 228–238, 2015, doi: [10.1016/j.molliq.2015.02.018](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.02.018).
- [11] A. Malvandi, M. Zamani, S. J. Hosseini, and S. A. Moshizi, "Figure of merit for optimization of nanofluid flow in circular microchannel by adapting nanoparticle migration," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 118, pp. 328–338, 2017, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2017.02.081](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.081).
- [12] H. Khoshtarash, M. Siavashi, M. Ramezanpour, and M. J. Blunt, "Pore-scale analysis of two-phase nanofluid