

Modeling of fluid flow in porous catalysts base aluminum with simulated using computational fluid dynamics and linear regression methods

MohamadAli Ahmadzadeh¹, Azadeh Jafarizadeh², *Masoud Panjepour³

1- Master of Science Student, Department of Materials Engineering, Isfahan university of technology, Isfahan, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Materials Engineering, Isfahan university of technology, Isfahan, Iran

3- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Isfahan university of technology, Isfahan, Iran

Citation: Ahmadzadeh M. Jafarizadeh A, Panjepour M. Modeling of fluid flow in porous catalysts base aluminum with simulated using computational fluid dynamics and linear regression methods, Metallurgical Engineering, 2025; 27(4): 256-264 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2027105.1402>

doi : <https://doi.org/10.22076/me.2024.2027105.1402>

ABSTRACT

The unique properties of metal foams have led to the increasing use of these structures in industrial applications such as catalysts. To accurately design engineering systems and high-efficiency catalysts, it is necessary to study the fluid flow behavior. Therefore, this study aimed to investigate the effect of different geometric parameters of the porous medium on fluid flow and to present a linear regression model for predicting Forichmer equation coefficients ($\Delta P / L = \alpha v + \beta v^2$) using computational fluid dynamics (CFD) and linear regression statistical method. For this purpose, in the first stage, foams based on real geometry and with different pores diameter and porosities were made by the Voronoi method. Then, using CFD simulation, the effect of foam structural parameters on fluid flow was investigated. The results indicated that the coefficients of the Forichmer equation and the pressure drop significantly depend on the geometrical parameters of the foam. In the second stage, due to the structural complexity of the foam and the high volume of the computational cost in this method, linear regression models were used to provide a continuous model based on the structural properties of the foam to model the coefficients of the Forichmer equation. The results demonstrated that the model is very accurate in predicting the coefficients of the Forichmer equation in terms of the geometric parameters of the foams. Also, the results obtained from linear regression models demonstrated that the proposed approach effectively predicts fluid flow in large-scale porous catalysts with minimal error.

Keywords: Catalyst, Simulation, Fluid flow, CFD, Linear regression model.

Received: April 22, 2024

Accepted: July 1, 2024

■ ■
*Corresponding Author:

Masoud Panjepour, PhD

Address: Department of Materials Engineering, Isfahan university of technology, Isfahan, Iran

Tel: +98 (31) 33917539

E-mail: panjepour@iut.ac.ir

مدل سازی جریان سیال در کاتالیزورهای متخلخل پایه آلومینیومی با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی و روش رگرسیون خطی

محمدعلی احمدزاده^۱، آزاده جعفری زاده^۲، *مسعود پنجه پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

خواص منحصر به فرد فوم های فلزی سبب استفاده روز افزون این ساختارها در کاربردهای صنعتی نظیر کاتالیزورها شده است. به منظور طراحی دقیق سیستم های مهندسی و کاتالیزورهایی با بازده بالا، بررسی رفتار جریان سیال امری ضروری است. لذا هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف محیط متخلخل بر جریان سیال و ارائه یک مدل رگرسیون خطی برای پیش بینی ضرایب معادله فوریچمر ($\Delta P/L = \alpha v + \beta v^2$) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و روش آماری رگرسیون خطی است. بدین منظور در مرحله اول فوم هایی براساس هندسه واقعی و با قطر و درصد تخلخل های مختلف به روش تجمع Voronoi ساخته و مش بندی شد. سپس با استفاده از شبیه سازی CFD به بررسی تأثیر پارامترهای ساختاری فوم بر جریان سیال پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که ضرایب معادله فوریچمر و مقادیر گرایان فشار به صورت قابل توجهی به پارامترهای هندسی فوم بستگی دارند. در مرحله دوم، به دلیل پیچیدگی های ساختاری فوم و حجم بالای شبکه محاسباتی در این روش، از مدل های رگرسیون خطی برای ارائه یک مدل پیوسته بر حسب خواص ساختاری فوم به منظور مدل سازی ضرایب معادله فوریچمر استفاده شد. نتایج حاصل شده نشان داد که مدل ساخته شده در پیش بینی ضرایب معادله فوریچمر بر حسب پارامترهای هندسی فوم ها دقت بالایی دارد. همچنین نتایج به دست آمده از مدل های رگرسیون خطی نشان داد که رویکرد پیشنهادی یک روش مؤثر برای مطالعه و پیش بینی جریان سیال در کاتالیزورهای متخلخل در مقیاس بزرگ با حداقل خطا است.

واژه های کلیدی: کاتالیزور، شبیه سازی، جریان سیال، CFD، مدل رگرسیون خطی.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳ | پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

۱. مقدمه

در پیل های سوختی، افزایش افت فشار یک مزیت محسوب می شود. لذا نفوذپذیری یک عامل مهم در گرایان فشار در محیط متخلخل است. بنابراین، درک رفتار جریان سیال و مقادیر گرایان فشار فوم های فلزی اهمیت ویژه ای دارد. بسیاری از محققان [۲، ۶، ۷]، با استفاده از معادله دوپویت-فوریچمر (معادله ۱) به بررسی گرایان فشار در فوم ها بر حسب سرعت ظاهری پرداختند:

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha v + \beta v^2 \quad (1)$$

در این معادله $\Delta P/L$ گرایان فشار، v سرعت ظاهری، α و β به ترتیب ثابت های مربوط به ترم های داری و غیر داری هستند. یکی دیگر از مدل های معروف مورد استفاده در محیط های متخلخل، معادله ارگان

در سال های اخیر فوم های فلزی به دلیل ویژگی های منحصر به فردشان از جمله خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی و الکتریکی مطلوب [۱-۳] در کاربردهای گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند. این کاربردها شامل سیستم های چند منظوره مانند مبدل های حرارتی، لوله های گرمایش، جمع کننده های خورشیدی، سلول های سوختی، پایه کاتالیست، فیلتر و غیره است [۴، ۵]. مقاومت در برابر جریان سیال در این دسته از کاربردها یک عامل مهم به شمار می رود که توسط پارامتر نفوذپذیری اندازه گیری می شود که خود تابعی از خصوصیات پیچیده هندسی فوم است. نفوذپذیری از این جهت مهم است که کاهش میزان گرایان فشار باعث کاهش در مصرف انرژی شده و در مواردی مانند انتقال جرم واکنش دهنده

* نویسنده مسئول:

دکتر مسعود پنجه پور

نشانی: دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تلفن: ۳۳۹۱۵۷۳۹ (۳۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: panjepour@iut.ac.ir

مدل های محاسباتی فراهم شد. یکی از زبان های برنامه نویسی که به صورت چشمگیری قدرتمند و در عین حال ساده می باشد، زبان پایتون است. در طی سالیان اخیر، زبان برنامه نویسی پایتون در پیاده سازی مدل های رگرسیون خطی موفق ظاهر شده و توانسته است نیاز محققین را در زمینه پیاده سازی الگوریتم های پیچیده خطی و غیرخطی برطرف سازد. رگرسیون خطی به عنوان یکی از اصلی ترین روش های مدل سازی آماری داده های پیوسته، استفاده می شود [۹]. این روش سعی دارد تا بتواند ارتباطی میان داده (ها) مستقل و یک متغیر وابسته پیدا نماید. در حقیقت رگرسیون خطی احتمال رخ دادن هر یک از متغیرهای مستقل را به شرط رخداد یک متغیر وابسته بررسی میکند. محققین بسیاری سعی در توسعه و استفاده از معادلات رگرسیون خطی به منظور مدل سازی رفتارهای ساده و پیچیده پدیده های طبیعی داشته اند [۱۰-۱۲].

در این مطالعه ابتدا تأثیر پارامترهای ساختاری بر عبور سیال از درون فوم با نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است. در نهایت، به منظور کاهش حجم محاسباتی حاصل از محاسبات عددی و حل معادلات حاکم، با استفاده از روش آماری رگرسیونی خطی، ضرایب داری و غیرداری معادله فورچمر مدل سازی و نتایج آن با دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

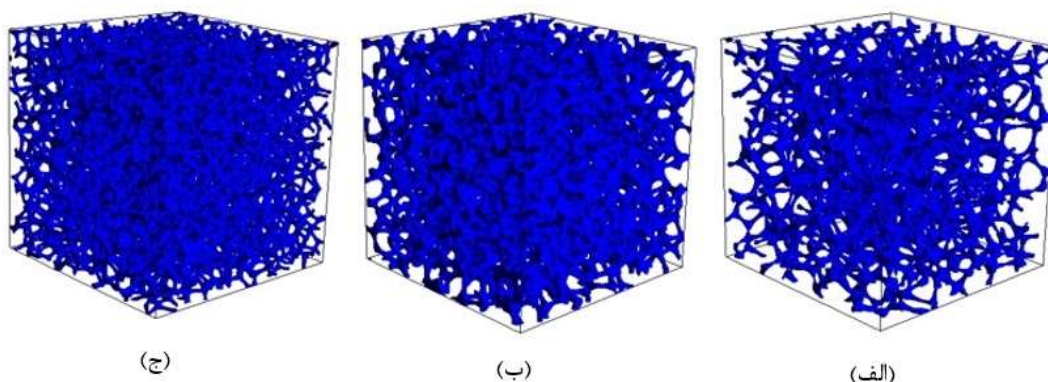
هندسه فوم

هندسه مورد نیاز برای شبیه سازی با استفاده از تصاویر میکروتوموگرافی نرم افزار Geodict طراحی و ساخته شد. در شکل ۱ نمونه ساخته شده توسط نرم افزار ارائه شده است. در این تحقیق ۲۱۷ فوم با قطر تخلخل و درصد تخلخل های مختلف تهیه شد. همه این فوم ها دارای ساختار تصادفی هستند که بر اساس روش تجمع Voronoi تهیه می شوند.

است. این معادله برای جریان سیال اطراف بستر ثابت متشکل از ذرات کروی به صورت زیر ارائه شده است (معادله ۲) [۸]:

$$\frac{\Delta P}{L} = A \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} S_0^2 \mu v + B \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} S_0 \rho v^2 \quad (2)$$

در این معادله ε درصد تخلخل و S_0 سطح ویژه و A و B ثابت های ارگان هستند که برای بسترهای ثابت به ترتیب برابر با $4/2$ و $0/292$ است. معادله ارگان برای محیط های فشرده متشکل از ذرات کروی ارائه شده است. در محیط متخلخلی همانند فوم ها به علت پیچیدگی هندسه، معادله ارگان نیاز به اصلاحاتی برای کاربرد دارد. اگرچه محققان زیادی به اصلاح معادله ارگان پرداختند، اما به دلیل پیچیدگی های ساختاری فوم ها امکان ارائه یک مدل کلی که به طور همزمان تأثیر چندین پارامتر را نشان دهد وجود ندارد. با این حال، روش های شبیه سازی عددی دقیق (مانند دینامیک سیالات محاسباتی) در یک مدل هندسی استاندارد به محققان در برآورد ضرایب معادله ارگان کمک می کند. در برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه، از سلول کلون به عنوان ساختار فوم استفاده شده است ولی فرضیات موجود در این ساختارها باعث بروز خطا در محاسبات می شود. بنابراین، بسیاری از محققان در مطالعات خود از هندسه واقعی فوم ها استفاده کردند. اگرچه استفاده از هندسه واقعی فوم یک روش مطمئن برای تجزیه و تحلیل اثرات پارامترهای هندسی فوم بر روی جریان سیال با استفاده از شبیه سازی عددی CFD است، اما دو مشکل عمده مانع عملکرد این روش می شود. اولاً تعداد زیاد شبکه محاسباتی، اصلی ترین مشکل در این روش است. ثانیاً با تغییر پارامترهای ساختاری فوم (شامل قطر تخلخل، درصد تخلخل، قطر بازوهای جامد، فاکتور پیچش و سطح ویژه) انجام شبیه سازی برای هر فوم ضروری است. بنابراین استفاده از روشی برای ارائه مدلی بر اساس تمامی مشخصات ساختاری فوم به منظور پیش بینی گرادیان فشار اهمیت بسزایی دارد. با پیشرفت روزافزون علوم کامپیوتری و توسعه زبان های برنامه نویسی، امکان توسعه



شکل ۱: تصاویر سه بعدی فوم هایی با درصد تخلخل های ۸۵٪ و قطر تخلخل های (الف) ۱۰۰۰ μm (ب) ۱۵۰۰ μm (ج) ۲۰۰۰ μm .

معادلات حاکم

در شبیه‌سازی بر اساس هندسه واقعی فوم، معادلات حاکم بر جریان‌های تک فاز برای شبیه‌سازی جریان اعمال می‌شود. نوع جریان مورد استفاده شده در حالت پایدار و سه‌بعدی و سیال مورد استفاده برای شبیه‌سازی هوا می‌باشد. برای یک جریان تراکم ناپذیر نیوتنی، معادلات پیوستگی و ناویر استوکس به صورت زیر بیان می‌شوند که با استفاده از روش حجم محدود حل شدند:

$$\nabla[\rho v] = 0 \quad (3)$$

$$\nabla[\rho v v] = -\nabla P + \nabla[\mu \nabla v] \quad (4)$$

که در آن v سرعت، P فشار، ρ چگالی سیال و μ ویسکوزیته دینامیکی است. الگوریتم SIMPLE برای حل زوج سرعت و فشار استفاده شده و معیار همگرایی در حل معادلات 10^{-6} در

نظر گرفته شده است. همچنین از تأثیرات گرانش صرفه نظر شد.

شرایط مرزی

در شکل ۲ شرایط مرزی حاکم بر حل معادلات به صورت شماتیکی نشان داده شده است. این شرایط مرزی عبارت‌اند از:

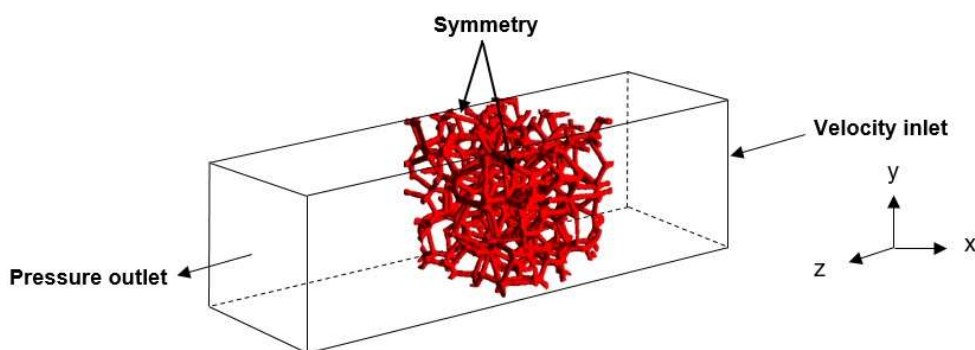
- مرز ورودی: velocity inlet

- مرز خروجی: pressure outlet

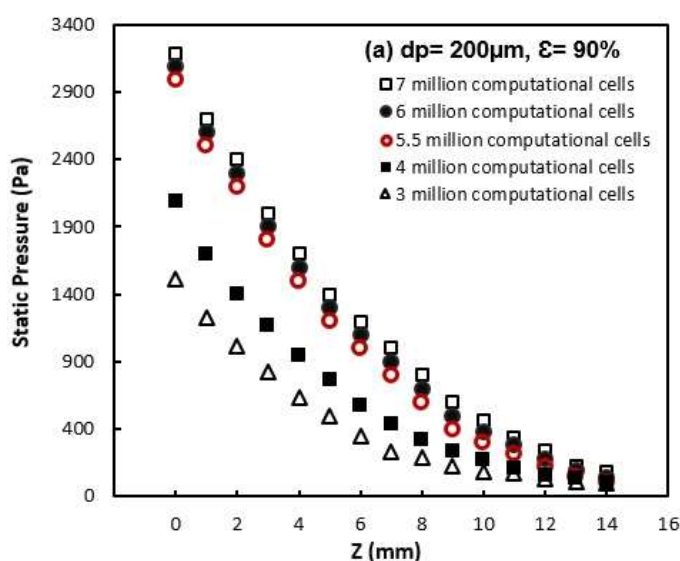
- سطوح بازوهای جامد: no slip

- مرزهای جانبی: symmetry

برای مش‌بندی نمونه‌ها، از مش هگزاهدرال استفاده شد. به منظور بررسی مستقل شدن تعداد سلول‌ها از حل مقادیر فشار استاتیک در طول فوم اندازه‌گیری شد. برای مثال در شکل ۳ استقلال از مش نمونه‌ای با قطر تخلخل‌های ۲۰۰ میکرومتر نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار نشان داده شده است یک شبکه محاسباتی ساختاریافته با تعداد مش ۵ میلیون در این نمونه مناسب تشخیص داده شد.



شکل ۲: محدوده محاسباتی و شرایط مرزی استفاده شده در این مطالعه.



شکل ۳: استقلال از مش نمونه‌ای با ۹۰٪ تخلخل و قطر تخلخل ۲۰۰ میکرومتر.

رگرسیون خطی

رگرسیون خطی یک روش آماری برای مدل سازی رابطه خطی بین یک متغیر و یک یا چند متغیر توضیحی است. رگرسیون با یک متغیر توضیحی، رگرسیون خطی (معادله ۵) ساده نامیده می شود.

$$E[x] = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_ix_i = \sum_{i=1}^N w_ix_i \quad (5)$$

در حالی که رگرسیون با بیش از یک متغیر، به رگرسیون خطی چندگانه موسوم است [۱۳]. در رگرسیون خطی، روابط با استفاده از توابع پیش بینی خطی مدل سازی می شوند و پارامترهای ناشناخته مدل (نظیر ضرایب مدل رگرسیونی) از آموزش مدل رگرسیون خطی حاصل می شوند. متغیرهای مستقل می توانند شامل توابع پیچیده تری نسبت به x باشند و مدل های رگرسیون خطی مراتب بالاتر را شکل دهند. یکی از تکنیک های متداولی که استفاده می شود، تکنیک گسترش چند جمله ای (PCE) [۱۴] است. در این روش، هر متغیر مستقل در متغیر مستقل دیگر ضرب و بدین ترتیب، مدل های رگرسیون خطی مراتب بالا حاصل می شود. از این رو با استفاده از این روش، می توان مدل های غیر خطی را نیز مدلسازی نمود. از معیارهایی که برای ارزیابی کمی دقت مدل نهایی استفاده می شود، می توان به معیار میانگین قدر مطلق خطا^۱ (MAE) و میانگین جذر مربعات^۲ (RMSE) اشاره نمود (معادلات ۶ و ۷).

$$MAE = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{pred} - y_{real}) \right| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{pred} - y_{real})^2} \quad (7)$$

در این مطالعه با طراحی یک معادله مرتبه سوم و الگوریتم کاهشی بر مبنای کاهش میزان خطا به وسیله زبان برنامه نویسی پایتون، به طراحی مدلی رگرسیونی به منظور پیش بینی گرادیان فشار درون یک بستر متخلخل پرداخته شده است. در ابتدا، یک معادله رگرسیون خطی مرتبه سوم با متغیرهای مستقل که شامل پارامترهای ساختاری فوم می باشد، ساخته می شود که در آن ضریب هر متغیر مستقل، مجهول است. به منظور پیدا نمودن بهترین ضرایب، از الگوریتم کاهشی بر مبنای کاهش میزان خطا استفاده می شود. در ابتدای این الگوریتم، یک معادله درجه سوم پیش ساخته شده با زبان برنامه نویسی پایتون وارد یک حلقه می شود. داده های آموزشی که در واقع متغیرهای مستقل و وابسته (پارامترهای ساختاری فوم به عنوان متغیرهای مستقل و ضرایب دارسی و غیردارسی به عنوان متغیر وابسته، در دو معادله متفاوت) هستند، در معادله

قرار می گیرند. ضرایب در ابتدا به صورت تصادفی انتخاب می شوند. پیش بینی گرادیان فشار حاصل از معادله با نتیجه حاصل از CFD مقایسه می شود. در گام بعدی، مقادیر مجذور میانگین مربعات اختلاف (RMSE) حاصل از مقادیر CFD و پیش بینی مدل تهیه شده، به عنوان تابع خطا شناخته می شود و تا به رسیدن به یک همگرایی مطلوب، بهینه سازی ضرایب ادامه پیدا خواهد کرد. لازم به ذکر است که تعیین ضرایب متغیرهای مستقل، به صورت همزمان تعریف شده است.

۳. نتایج و بحث

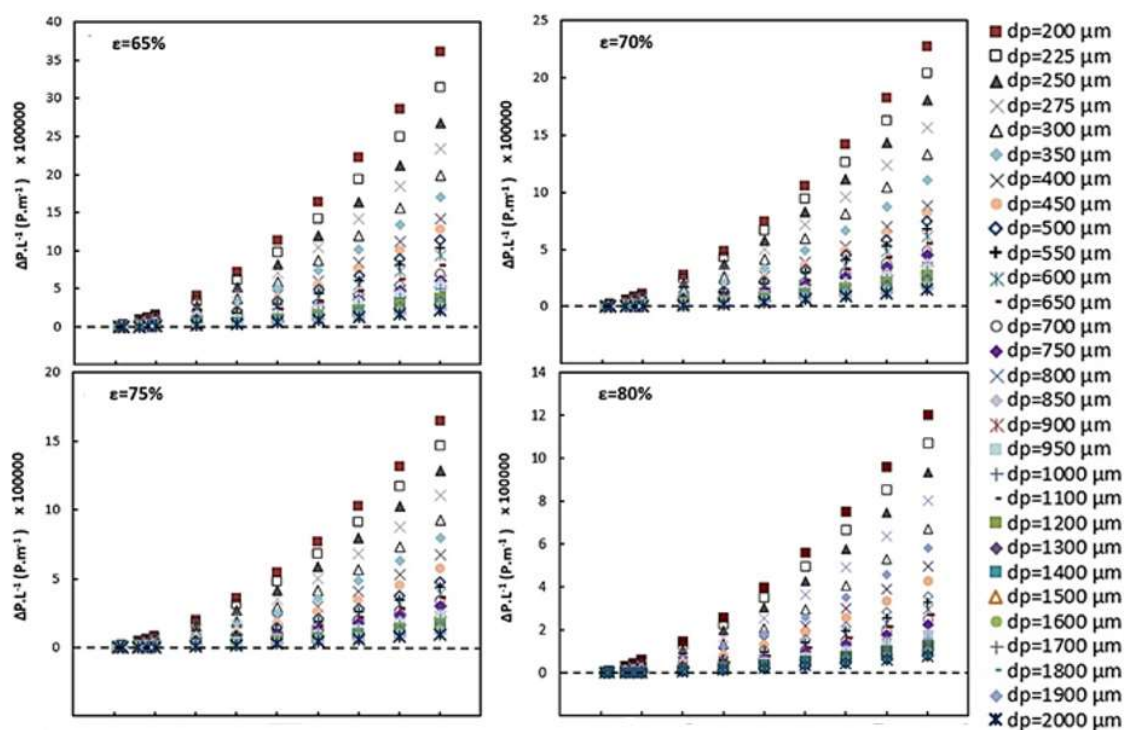
نتایج افت فشار

در شکل ۴ تغییرات گرادیان فشار برای نمونه هایی با قطر تخلخل ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر و درصد تخلخل های ۶۵ تا ۸۰ درصد بر حسب سرعت ورودی (۰/۱ تا ۸ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است با افزایش درصد تخلخل، گرادیان فشار به دلیل کاهش اینرسی و اثرات اصطکاک کاهش می یابد [۱۵]. همچنین نتایج حاصل شده نشان داد که تغییرات درصد تخلخل در مقایسه با قطر تخلخل تأثیر بیشتری در تغییرات گرادیان فشار دارد. به منظور درک بهتر از تغییرات گرادیان فشار، از معادله فورچمر (معادله ۱) استفاده شد. این معادله نشان می دهد که گرادیان فشار از دو بخش خطی و غیر خطی تشکیل شده است. در واقع در سرعت های کم، گرادیان فشار توسط نیروهای ویسکوزی کنترل می شود (رابطه خطی) در حالی که در سرعت های بالا، نیروهای اینرسی گرادیان فشار را کنترل می کنند (رابطه غیر خطی) [۱۶]. به منظور صحت سنجی داده های شبیه سازی، در شکل ۵ نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از سایر مطالعات تجربی مقایسه شد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، تطابق قابل قبولی بین نتایج به دست آمده با سایر مطالعات تجربی وجود دارد.

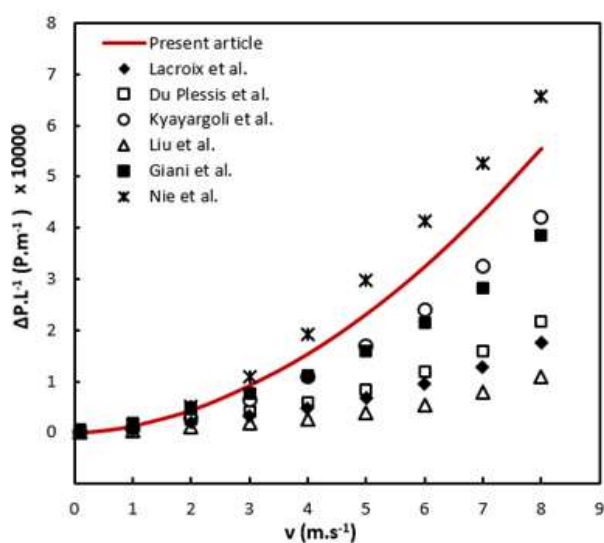
محاسبه ضرایب دارسی و غیردارسی

با تطبیق نتایج گرادیان فشار با معادله ۱ می توان مقادیر ضرایب دارسی (α) و غیردارسی (β) را تعیین نمود (شکل ۶). در شکل تغییرات ضرایب α و β بر حسب قطر تخلخل در درصد تخلخل های مختلف نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است با افزایش قطر تخلخل و درصد تخلخل، ضرایب α و β کاهش می یابد. اگرچه چندین رابطه ریاضی برای محاسبه ضرایب α و β و در نهایت گرادیان فشار پیشنهاد شده است اما پیچیدگی های ساختاری فوم، ارائه یک معادله واقعی بر اساس پارامترهای ساختاری فوم به منظور پیش بینی گرادیان فشار در مقیاس بزرگ را دشوار کرده که این مسئله حجم محاسباتی زیادی را تحمیل میکند. با استفاده از روش آماری رگرسیون خطی می توان این مشکل را برطرف کرد.

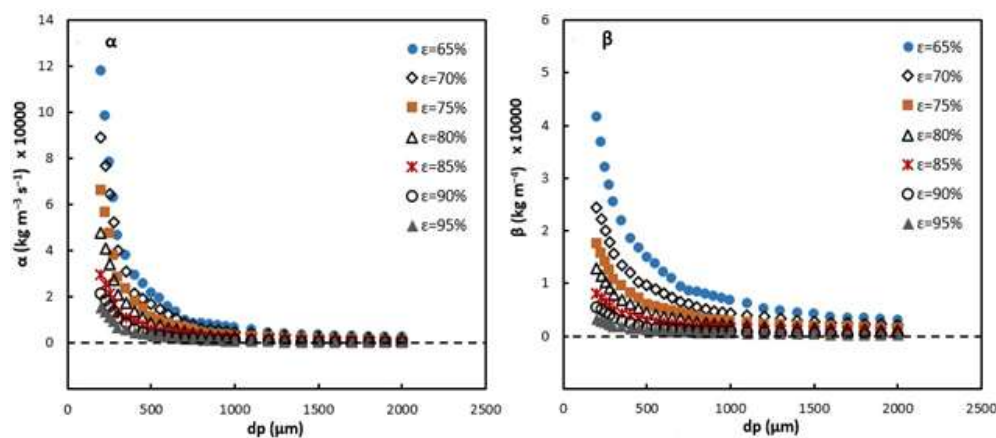
1 polynomial chaos expansion
2 Mean absolute error
3 Root-mean-square deviation



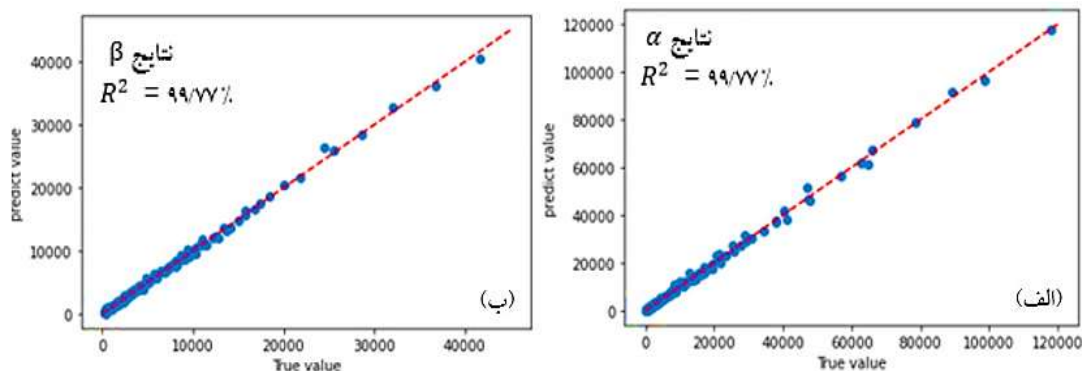
شکل ۴: تغییرات گرادیان برحسب سرعت در فوم‌ها با قطرهای تخلخل ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر با قطرهای متفاوت.



شکل ۵: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام گرفته با نتایج تجربی سایر محققین [۳، ۱۷-۲۱].



شکل ۶: تغییرات ضرایب α و β بر حسب قطر تخلخل در درصدهای تخلخل مختلف.

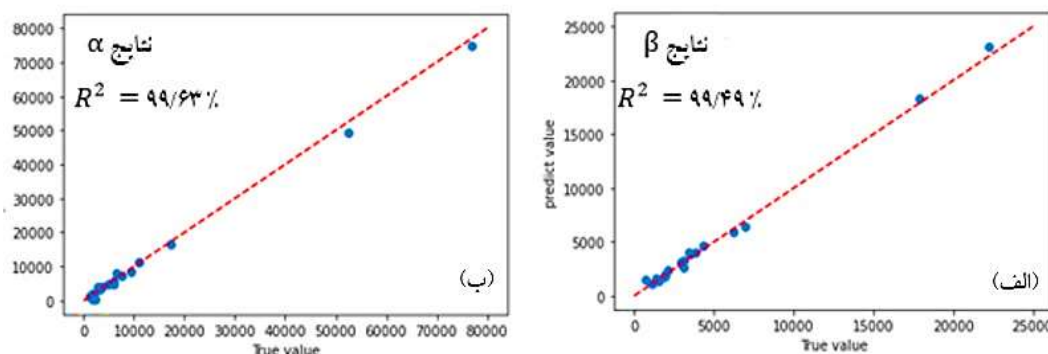


شکل ۷: مقایسه نتایج حاصل از CFD و پیش بینی مدل رگرسیونی در پیش بینی ضرایب α (الف) و β (ب).

الگوریتم کاهشی بر مبنای کاهش میزان خطا، ضرایب چند جمله‌ای‌های مذکور محاسبه شد. از مزیت این روش می‌توان به کاهش چشمگیر حجم محاسبات حاصل از شبیه‌سازی و پیوسته سازی مقادیر ضرایب معادله فورچمر در دامنه مورد بررسی در این پژوهش اشاره کرد. پس از به دست آوردن بهینه‌ترین ضرایب این چندجمله‌ای درجه سه، به ارزیابی عملکرد آن پرداخته شد. بدین منظور در ابتدا پارامترهای ساختاری فوم‌های مورد استفاده در این مطالعه در چندجمله‌ای درجه سوم نهایی وارد شد و نتایج آن با مقادیر حاصل از CFD مقایسه شد (شکل ۷). همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است تطابق قابل قبولی بین نتایج حاصل از این معادله با نتایج حاصل از شبیه‌سازی وجود دارد $R^2 = 99.77\%$. ذکر این نکته حائز اهمیت است که فوم‌های تصادفی تهیه شده جدید در تعیین ضرایب بهینه چندجمله‌ای درجه سوم استفاده نشده است. در شکل ۸ نتایج حاصل از محاسبات CFD با نتایج حاصل از چندجمله‌ای درجه سوم برای فوم‌های تصادفی مذکور بررسی شده است.

نتایج مدل رگرسیون خطی

از آنجایی که محاسبات دینامیک سیالاتی از حجم محاسباتی بسیار زیادی برخوردار است، کاهش حجم محاسباتی ضروری به نظر می‌رسد. از این رو با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون، در ابتدا به ایجاد دو رگرسیون چندجمله‌ای درجه سوم جداگانه برای هر یک از ضرایب α و β پرداخته شد. هر کدام از چندجمله‌ای‌ها شامل متغیرهای مستقل (شامل پارامترهای ساختاری فوم) و یک متغیر وابسته (ضرایب داریسی یا غیرداریسی) می‌باشد. در معادله فورچمر به دلیل وجود یک رابطه غیر خطی بین ضرایب α و β و گردایان فشار از تکنیک PCE دو معادله درجه سوم ساخته شد. در واقع بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که معادله درجه دوم نمی‌تواند دقت بسیار خوبی داشته باشد. همچنین معادلات با درجات بالاتر از ۳، دقت به مقدار بسیار ناچیزی افزایش یافته اما حجم محاسباتی به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. از این رو یک معادله درجه سوم مطلوب به نظر می‌آید. با برآزش نمودن ضرایب α و β در معادلات درجه سوم با استفاده از



شکل ۸: مقایسه نتایج حاصل از CFD و پیش‌بینی مدل رگرسیونی برای نمونه‌های تصادفی در پیش‌بینی ضرایب α و β .

جدول ۱: نتایج حاصل از ارزیابی کمی دو مدل رگرسیونی مرتبط با ضرایب α و β

Model	MAE (Kg.m ⁻¹ s ⁻¹)	RMSE (Kg.m ⁻¹ s ⁻¹)
α	۷۷۷	۱۱۰۵
β	۲۹۹	۳۷۵

References

- [1] S. Dabbaghi, A. Jafarizade, M. Panjepour, and M. Meratian, "NUMERICAL SIMULATION OF FLUID FLOW THROUGH METALLIC FOAMS: A GENERAL CORRELATION FOR DIFFERENT LENGTH SIZES AND PORE CHARACTERISTICS," Special Topics & Reviews in Porous Media: An International Journal, vol. 12, no. 1, 2021.
- [2] A. Jafarizade, M. Panjepour, M. Meratian, and M. D. Emami, "Numerical simulation of gas/solid heat transfer in metallic foams: A general correlation for different porosities and pore sizes," Transport in porous media, vol. 127, no. 2, pp. 481-506, 2019.
- [3] M. Pahlevaninezhad, M. D. Emami, and M. Panjepour, "The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed," Energy, vol. 73, pp. 160-176, 2014.
- [4] Z. Wu et al., "Experimental and numerical studies of the pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications," Applied Energy, vol. 87, no. 2, pp. 504-513, 2010.
- [5] J. Richardson, M. Garrait, and J.-K. Hung, "Carbon dioxide reforming with Rh and Pt-Re catalysts dispersed on ceramic foam supports," Applied Catalysis A: General, vol. 255, no. 1, pp. 69-82, 2003.
- [6] M. Zafari, M. Panjepour, M. D. Emami, and M. Meratian, "Microtomography-based numerical simulation of fluid flow and heat transfer in open cell metal foams," Applied Thermal Engineering, vol. 80, pp. 347-354, 2015.
- [7] M. Zafari, M. Panjepour, M. Meratian, and M. D. Emami, "CFD simulation of forced convective heat transfer by tetrakaidecahedron model in metal foams," Journal of Porous Media, vol. 19, no. 1, 2016.
- [8] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns," Chem. Eng. Prog., vol. 48, pp. 89-94, 1952.
- [9] S. Weisberg, Applied linear regression. John Wiley & Sons, 2005.
- [10] L. Yang, M. Bibby, and R. Chandel, "Linear regression equations for modeling the submerged-arc welding process," Journal of Materials Processing Technology, vol. 39, no. 1-2, pp. 33-42, 1993.
- [11] K. J. Preacher, P. J. Curran, and D. J. Bauer, "Computational tools for probing interactions in multiple linear regression, multilevel modeling, and latent curve analysis," Journal of educational and behavioral statistics, vol. 31, no. 4, pp. 437-448, 2006.
- [12] E. R. Edelman, S. M. van Kuijk, A. E. Hamaekers, M. J. de Korte, G. G. van Merode, and W. F. Buhre, "Improving the prediction of total surgical procedure time using linear regression modeling," Frontiers in medicine, vol. 4, p. 85, 2017.

نتایج حاصل شده در شکل ۷ و ۸ نشانگر عملکرد بسیار مطلوب روش رگرسیون چندجمله‌ای در مقایسه با روش CFD است. به‌منظور ارزیابی کمی مقادیر خطای هر یک از مدل‌ها، از معیارهای MAE و RMSE (معادلات ۷ و ۸) استفاده شد و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل در شکل‌های ۷ و ۸ و همچنین ارزیابی دو معیار MAE و RMSE، می‌توان استنباط کرد که معادله رگرسیونی به‌دست‌آمده عملکرد بسیاری خوبی داشته و توانسته است حجم محاسباتی را به‌صورت بسیار چشمگیری کاهش دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه شبیه‌سازی جریان سیال در فوم‌های فلزی بر اساس هندسه واقعی آن‌ها انجام شد و دو مدل رگرسیونی درجه سه به‌منظور پیش‌بینی ضرایب معادله فوریچمر به‌عنوان تابعی از پارامترهای ساختاری فوم ارائه شد. نتایج حاصل شده نشان داد که استفاده از هندسه واقعی فوم در شبیه‌سازی عددی روشی کارآمد برای بررسی اثرات پارامترهای هندسه فوم است. با این حال با تغییر ویژگی‌های فوم، شبیه‌سازی برای هر فوم ضروری است. بنابراین این روش حجم محاسباتی زیادی را شامل شد. این مسئله با استفاده از رگرسیون خطی اصلاح شد. در این روش از پارامترهای ساختاری فوم مانند قطر تخلخل، قطر بازوهای جامد و درصد تخلخل به‌عنوان متغیرهای ورودی استفاده شد. نتایج حاکی از عملکرد بسیار مطلوب مدل‌های رگرسیونی ($R^2 \approx 99\%$) در پیش‌بینی ضرایب معادله فوریچمر برحسب پارامترهای ساختاری فوم است. بنابراین با استفاده از این روش حجم محاسباتی حاصل از حل معادلات حاکم به‌طور چشمگیری کاسته و مقادیر ضرایب معادله فوریچمر پیوسته سازی گردید.

- [13] D. A. Freedman, Statistical models: theory and practice. cambridge university press, 2009.
- [14] T. Crestaux, O. Le Maître, and J.-M. Martinez, "Polynomial chaos expansion for sensitivity analysis," Reliability Engineering & System Safety, vol. 94, no. 7, pp. 1161-1172, 2009.
- [15] K. K. Bodla, J. Y. Murthy, and S. V. Garimella, "Microtomography-based simulation of transport through open-cell metal foams," Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, vol. 58, no. 7, pp. 527-544, 2010.
- [16] K. Boomsma, D. Poulikakos, and Y. Ventikos, "Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 24, no. 6, pp. 825-834, 2003.
- [17] M. Lacroix, P. Nguyen, D. Schweich, C. P. Huu, S. Savin-Poncet, and D. Edouard, "Pressure drop measurements and modeling on SiC foams," Chemical engineering science, vol. 62, no. 12, pp. 3259-3267, 2007.
- [18] P. Du Plessis, A. Montillet, J. Comiti, and J. Legrand, "Pressure drop prediction for flow through high porosity metallic foams," Chemical Engineering Science, vol. 49, no. 21, pp. 3545-3553, 1994.
- [19] P. Khayargoli, V. Loya, L. Lefebvre, and M. Medraj, "The impact of microstructure on the permeability of metal foams," in CSME forum, 2004, vol. 2004, pp. 220-228.
- [20] J. Liu, W. Wu, W. Chiu, and W. Hsieh, "Measurement and correlation of friction characteristic of flow through foam matrixes," Experimental thermal and fluid science, vol. 30, no. 4, pp. 329-336, 2006.
- [21] L. Giani, G. Groppi, and E. Tronconi, "Mass-transfer characterization of metallic foams as supports for structured catalysts," Industrial & engineering chemistry research, vol. 44, no. 14, pp. 4993-5002, 2005.