



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Numerical Simulation of Pellet Furnace Firing Area Case Study: Golgohar Mining Industrial Complex in Sirjan

Mohammad Javad Mahmoodabadi ^{a,*}, Mohsen Talebipour ^b

^a Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

^b MSc, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 27 April 2023

Revised: 14 February 2024

Accepted: 18 February 2024

Keywords:

Numerical simulation,
Open-Foam software,
Porous media,
Steady-state flow,
Compressible flow,
Turbulent flow.

ABSTRACT

In this research, numerical simulation of the hot gas flow in the firing area of the pelletizing furnace in Golgohar mining-industrial complex is studied. In this regard, Open-Foam software as an objective-oriented program and based on a proper programming language is used. The considered area includes the outlet plane of the burners, the down comer pipes, the combustion chamber, the space of the furnace and the wind box, while the pellet bed is regarded as a porous media. The investigated flow is assumed as steady-state, compressible and turbulent that passes through the pellet bed having a uniform porosity percentage. In order to model the turbulent flow, an appropriate two-equations approach is employed. In addition, the walls of the furnace are assumed to be insulated, the gradients of the temperature and pressure on the walls are considered to be zero, and non-sliding condition is regarded for the boundary condition of the velocity. The simulation results illustrate that the hot gasses are diverted on the sidewalls, which could be considered as an important factor for corrosion and decreasing their life.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.30360.2442>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: mahmoodabadi@sirjantech.ac.ir

How to cite this article:

Mahmoodabadi, M., & Talebipour, M. (2024). Numerical Simulation of Pellet Furnace Firing Area Case Study: Golgohar Mining Industrial Complex in Sirjan. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(78), 249-257. doi: 10.22075/jme.2024.30360.2442

شبیه‌سازی عددی ناحیه پخت کوره گندله‌سازی مطالعه موردی: مجتمع صنعتی معدنی گل گهر سیرجان

محمد جواد محمودآبادی^{۱*}، محسن طالبی پور^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹	
واژگان کلیدی:	
شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار اوپن فوم، محیط متخلخل، جریان پایا، جریان تراکم‌پذیر، جریان مغشوش.	در این پژوهش، به شبیه‌سازی عددی مسیر عبور جریان‌های داغ در ناحیه پخت کوره گندله‌سازی مجتمع معدنی صنعتی گل‌گهر سیرجان پرداخته شده است. در این راستا، از نرم‌افزار اوپن فوم که از برنامه‌های شیء‌گرا و بر پایه یک زبان برنامه‌نویسی مناسب است بهره برده است. محدوده مورد بررسی شامل صفحه خروجی مشعل‌ها، لوله‌های داون‌کامر، محفظه احتراق، فضای درون کوره و ویندباکس بوده و بستر گندله به صورت متخلخل فرض شده است. جریان مورد نظر به صورت پایا، تراکم‌پذیر و مغشوش فرض شده است که از بستر گندله با درصد تخلخل یکنواخت عبور می‌کند. برای مدل‌سازی جریان مغشوش از یک مدل دو معادله‌ای مناسب بهره گرفته شده است. علاوه بر این، دیواره‌های کوره عایق، گرادیان دما و فشار روی دیواره‌ها صفر و شرط عدم لغزش برای شرط مرزی سرعت فرض شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاکی از انحراف جریان‌های داغ گازی به سمت دیواره‌های جانبی بوده که می‌تواند به عنوان یک عامل مهم در خوردگی و کاهش عمر آن‌ها تلقی شود.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.30360.2442>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه^۱

از الگوریتم‌های عددی، معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر سیال به معادلات جبری تبدیل و امکان حل عددی آن‌ها فراهم می‌شود. به عبارت دیگر، با تقسیم ناحیه مورد تحلیل به المان‌های کوچک‌تر، اعمال شرایط مرزی برای گره‌های مرزی و اعمال تقریب‌هایی، یک دستگاه معادلات خطی بدست می‌آید که با حل آن، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه مورد نظر حاصل می‌شود.

در سال‌های اخیر، از این استراتژی به طور گسترده در تحلیل مسائل صنعتی و علمی استفاده شده است که به عنوان مثال می‌توان به مواردی همچون طراحی مبدل‌های

تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که دمای بالاتر از ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد به عنوان دمای بحرانی سبب اکسایش شدید و تخریب آلیاژ دیواره‌های ماشین‌های پخت می‌گردد [۱]. با توجه به این ویژگی، بررسی مسیر جریان گازهای داغ با دمای بالا که در فرآیند پخت به‌وسیله مشعل‌ها ایجاد می‌گردند بسیار مهم و ضروری می‌نماید. بدین منظور، به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی^۲، معادلات میان-گیری شده ناویر-استوکس به همراه معادله انرژی حاکم بر ناحیه پخت کوره تحلیل می‌گردند. در این روش، با استفاده

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mahmoodabadi@sirjantech.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

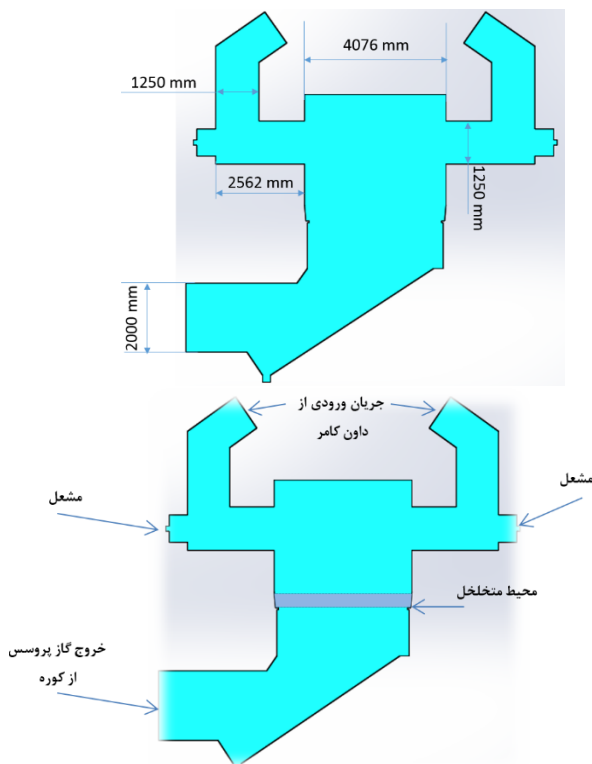
استناد به این مقاله:

محمودآبادی، محمد جواد، و طالبی پور، محسن. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی عددی ناحیه پخت کوره گندله‌سازی مطالعه موردی: مجتمع صنعتی معدنی گل‌گهر سیرجان. مدل

سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۲۴۹-۲۵۷. doi:10.22075/jme.2024.30360.2442

² Computational Fluid Dynamics (CFD)

در تحقیق حاضر، به منظور شبیه‌سازی عددی مسیر عبور جریان گازهای داغ در ناحیه پخت کوره گندله‌سازی مجتمع معدنی صنعتی گل‌گهر سیرجان، از محیط نرم افزار این فوم بهره گرفته شده است. در این راستا، ابتدا محدوده مورد نظر که شامل مشعل‌ها، محفظه احتراق، فضای درونی کوره، بستر گندله و مسیرهای ورودی و خروجی است، در محیط نرم افزار مدل‌سازی شده است. سپس، معادلات حاکم بر پدیده مورد نظر که شامل معادله پیوستگی، معادله ممنتوم و معادله انرژی است، با کدنویسی در محیط نرم‌افزار این فوم تحلیل شده‌اند. در پایان، نتایج عددی در قالب نمودارهایی به تصویر کشیده شده‌اند که به وضوح نشان می‌دهند که جریان گازهای داغ به سمت دیواره‌های جانبی منحرف شده و به عنوان مهمترین عامل کاهش عمر آن‌ها می‌تواند مدنظر قرار گیرد.



شکل (۱): محدوده موردنظر و اندازه‌های اساسی آن برای شبیه‌سازی عددی ناحیه پخت کوره گندله‌سازی.

۲- محدوده شبیه‌سازی

محدوده مورد نظر برای شبیه‌سازی بخشی از ناحیه پخت کوره گندله‌سازی است که شامل صفحه خروجی مشعل‌ها (۲ مشعل)، لوله‌های داون کامر (۲ لوله)، محفظه احتراق (۲

حرارتی [۲]، طراحی سیستم‌های تهویه [۳ و ۴]، مطالعه ایمنی فرایند و جلوگیری از اتلافات [۵]، مدل‌سازی حذف آلاینده‌های خطرناک [۶]، توزیع زمانی-فضایی انتشار [۷]، مدل‌سازی رآکتورهای فتوکاتالیستی [۸]، تحلیل خطوط لوله در سیستم‌های خنک کاری [۹]، مطالعه تشعشعات گرمایی [۱۰]، بهینه‌سازی تعداد پره‌های یک فن‌های شعاعی [۱۱]، توسعه و تحلیل یک رآکتور ترموسیفون [۱۲]، مطالعه انتقال حرارت گذرا در یک خشک‌کن خورشیدی [۱۳]، شبیه‌سازی فرایندهای خشک‌کنی غذایی [۱۴] و مدل‌سازی عملیات جوش کاری [۱۵] اشاره نمود. امروزه، نرم افزارهای تجاری بنا نهاده شده بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی مانند CFX، Fluent و غیره به طور گسترده مورد توجه محققین و مهندسين قرار گرفته‌اند. در کنار آن‌ها، نرم افزارهای متن باز نیز به‌طور وسیع مورد استفاده واقع شده‌اند که یکی از مهمترین آن‌ها در این حیطه این فوم^۳ است که امکان حل گسترده وسیعی از پدیده‌های فیزیکی را دارا است [۱۶ و ۱۷]. از مزیت‌های این نرم افزار استفاده از برنامه‌های شی‌گرا و بهره‌گیری از توانایی‌های زبان برنامه‌نویسی ++C می‌باشد. مزیت دیگر این فوم، پیوند نزدیک آن با سایر برنامه‌های پیش‌پردازش و پس‌پردازش است. همچنین، امکان دسترسی به کدهای منبع سبب شده تا کاربران این نرم افزار گسترش یافته و نسخه‌های جدیدتر آن با سرعت بیشتری ارائه شود. به عنوان مثال، در مرجع [۱۸]، یک حل‌کننده سینتیک فضا-زمان نوترونی با روش شبه استاتیک بهبود یافته بر اساس نرم افزار این فوم ارائه شده است. در مرجع [۱۹]، تجزیه و تحلیل حرارتی-هیدرولیکی جریان‌های پیچیده در بسته‌های میله‌ای با جداسازهای کابلی بر اساس چارچوب‌های انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۲۰]، مدل‌سازی حرارتی ریزرآکتورهای لوله حرارتی با استفاده از نرم افزار این فوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در مرجع [۲۱]، توسعه اولیه و راستی‌آزمایی کد تحلیل ایمنی کوپلینگ چند فیزیکی برای رآکتورهای بر پایه سرب به کمک نرم افزار این فوم انجام شده است. در مرجع [۲۲]، مطالعه عددی شار حرارتی بحرانی بر اساس مدل رابط چند مقیاسی دو فازی با استفاده از نرم افزار این فوم بررسی و مطالعه شده است.

³ OpenVFOam^(R)

۴- مدل‌سازی جریان آشفته و یا اغتشاشی

برای مدل‌سازی جریان آشفته و یا اغتشاشی باید توجه داشت که به دلیل اینرسی بالای سیال در مقایسه با اصطکاک بین لایه‌ای، لایه‌های جریان به صراحت قابل تفکیک نبوده و جریان علاوه بر یک جهت اصلی، شامل گردابه‌های فراوانی در طیف‌های اندازه‌ای مختلف است. به طور کلی، سه روش برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارد:

(۱) شبیه‌سازی عددی مستقیم^۵: یک روش شبیه‌سازی در دینامیک سیالات محاسباتی است که در آن معادلات کامل ناویر-استوکس به صورت عددی و بدون هیچ‌گونه مدل‌سازی جریان آشفته حل می‌شوند. از آنجا که انجام محاسبات این شبیه‌سازی با توان سوم عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد، لذا هزینه این روش حتی در عددهای رینولدز پایین، بسیار زیاد بوده و در عددهای رینولدز بالا حل مساله به این روش امکان‌پذیر نیست.

(۲) شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۶: در این روش، معادلات ناویر-استوکس برای مقیاس‌های بزرگ که حاوی انرژی هستند حل شده و اثر مقیاس‌های کوچک بر مقیاس‌های بزرگ مدل‌سازی می‌شود. از نظر هزینه محاسباتی، این روش بین روش شبیه‌سازی عددی مستقیم و شبیه‌سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس قرار دارد. از آنجا که در این روش، مقیاس‌های بزرگ جریان به‌طور مستقیم حل می‌شوند لذا این روش، دقیق‌تر از روش شبیه‌سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس است.

(۳) شبیه‌سازی میانگین‌گیری رینولدز^۷ معادلات ناویر-استوکس: یکی از روش‌های مدل‌سازی آشفته‌گی است که در آن، نوسانات کم اهمیت مشخصات جریان حذف و مقادیر متوسط جایگزین آن‌ها می‌شود. در واقع، در روش متوسط-گیری زمانی رینولدز با اصلاحاتی در معادلات حاکم، نیازی به شبیه‌سازی مستقیم نوسانات با مقیاس کوچک نیست. بکارگیری این دیدگاه، منجر به روش‌های عددی متعددی برای شبیه‌سازی جریان آشفته شده است که معروف‌ترین آن‌ها مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ است که در این تحقیق نیز از این تکنیک استفاده شده است.

محفظه، فضای درونی کوره، بستر گندله و یک ویندباکس می‌باشد (شکل ۱). هندسه پالت کار به صورت ورقی با ضخامت صفر مدل شده و فقط صفحه خروجی مشعل در نظر گرفته شده است. بستر حدوداً ۴۰ سانتیمتری گندله، بصورت یک بستر متخلخل با درصد تخلخل یکنواخت مدل‌سازی شده است.

۳- معادلات حاکم

در ابتدا، می‌بایست توجه داشت که حل‌گری^۴ از نرم افزار این فوم انتخاب شود که بتواند جریان پایدار قابل تراکم و مغشوش را با در نظر گرفتن ماده متخلخل حل کند که از میان آن‌ها rhoSimplePorousFOAM این ویژگی را دارد. این حل‌گر، به حل معادلات پایستار جریان شامل معادله پیوستگی، معادله ممنتوم و معادله انرژی می‌پردازد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i) \\ = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (P E u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (P u_i) \\ + \frac{\partial}{\partial x_i} (T u_i) + \nabla \cdot j = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

که در این معادلات، ρ چگالی، t زمان، u سرعت، E انرژی، T دما، γ ضریب وزنی، S چشمه، P فشار، μ ضریب ویسکوزیته و τ تنش برشی می‌باشد. همان‌گونه که از معادله (۲) مشخص است، بستر متخلخل با افزودن یک ضریب به ترم زمانی و اضافه نمودن ترم چشمه به معادله ممنتوم مدل‌سازی شده است.

علاوه بر این، عبارت چشمه خود نیز از ترکیب دو معادله برای مدل‌سازی تلفات ناشی از اینرسی و تلفات ناشی از لزجت تشکیل شده است. در این معادلات، افت فشار ناشی از تلفات لزجت با سرعت تناسب مستقیم دارد در حالی که، تلفات ناشی از اینرسی با مربع سرعت متناسب می‌باشد.

$$S_i = - \left(\mu D + \frac{1}{2} \rho |u_{jj}| F \right) u_i \quad (4)$$

در این معادله D و F ثوابت فیزیکی مدل هستند.

⁶ Large Eddy Simulation (LES)

⁷ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) models

⁴ Solver

² Direct Numerical Simulation (DNS)

در این مطالعه، شرط مرزی فشار در ویندباکس خروجی با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در کارخانه تنظیم شده است. علاوه بر این، دیواره‌های کوره عایق در نظر گرفته شده‌اند. گرادیان دما و فشار روی دیواره صفر فرض شده و برای شرط مرزی سرعت از شرط عدم لغزش استفاده شده است. پدیده احتراق سوخت مدل نشده است بلکه برای شرط مرزی مشعل‌ها فرض شده است که محصولات احتراق در دمای آدیاباتیک شعله به درون دامنه وارد می‌شوند. دبی جرمی در مشعل‌ها $(\frac{kg}{s})$ ۰/۵۵ و دما (C^0) ۱۹۵۰ در نظر گرفته شده است.

همچنین، پارامترهای مربوط به اغتشاش برای مرزهای دیوار از شرایط مرزی تابع دیواره محاسبه شده‌اند. برای فشار در خروجی مقدار ثابت (pa) ۹۷۸۲۵ به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده و برای سایر پارامترها از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شده است. دبی جرمی و دما برای جریان ورودی از کانل هود به ترتیب ۷/۸۴۹ کیلوگرم بر ثانیه و ۹۸۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده‌اند. برای تخمین پارامترهای مربوط به اغتشاش، طول اختلاط ۰/۰۰۵ و شدت انرژی جنبشی اغتشاش ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. همچنین، از روش دو معادله‌ای $k - \epsilon$ برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است. برای مدل‌سازی افت فشار سیال در بستر متخلخل گندله، یک عبارت جدید به معادله ممنتوم اضافه شده است. این عبارت با معادله زیر تعریف می‌شود که مشابه معادله پیشنهاد شده برای افت فشار در بستر شامل ذرات است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\mu}{k_{perm}} U + k_{loss} \frac{\rho}{2} U |U| \quad (10)$$

که در این معادله، μ ویسکوزیته دینامیکی، ρ چگالی سیال و U سرعت سیال است. همچنین، k_{perm} و k_{loss} نیز از طریق دو معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$k_{perm} = \frac{\phi d^2}{150(1-\epsilon)^2 \left(\frac{1}{\epsilon^3}\right)} \quad (11)$$

$$k_{loss} = 1.75 \frac{(1-\epsilon) \left(\frac{1}{\epsilon^3}\right)}{\phi d} \quad (12)$$

در معادلات فوق، ϵ کسر باطل، ϕ گرد کننده به سمت پایین است.

۶- مش بندی

برای شبیه‌سازی عددی، مش بندی تمام دامنه دو بعدی مورد مطالعه، مطابق با شکل (۲) در نظر گرفته شده است.

۴-۱- مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$

روش دو معادله‌ای $k - \epsilon$ ، روشی بر پایه شبیه‌سازی میانگین‌گیری رینولدز است که به طور گسترده در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در پدیده‌های واقعی و مسایل صنعتی به کار می‌رود. در مدل‌های آشفته‌گی دو معادله‌ای، مقیاس طول مشخصه حرکت آشفته‌گی با استفاده از یک معادله انتقال محاسبه می‌گردد. در این روش، معادله مقیاس طول مشخصه الزاماً مقیاس طول (l) را به عنوان یک متغیر مستقل نخواهد داشت بلکه هر ترکیبی به شکل $Z = k^m l^n$ را می‌توان برای محاسبه فاصله از بستر صلب (Z) در نظر گرفت. بدین منظور، ابتدا ϵ یا نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته‌گی با توجه به رابطه ذیل تعیین می‌شود.

$$\epsilon \propto \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (5)$$

با استفاده از این رابطه، مقیاس طول آشفته‌گی به صورت زیر خواهد بود.

$$l = C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon} \quad (6)$$

در رابطه فوق، C_D یک ثابت تجربی است. ترکیب این رابطه با رابطه کلموگروف-پرائنتل، مقدار لزجت گردابه‌ای v_t را خواهد داد.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

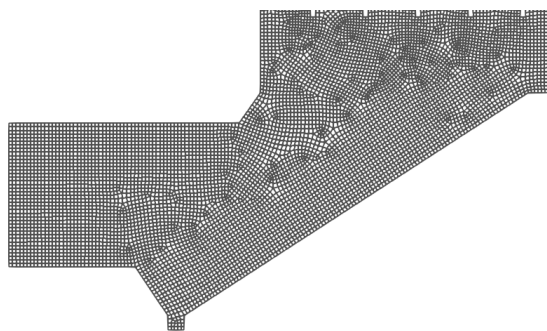
در این رابطه، C_μ یک ثابت تجربی است که مقدار آن به روش آزمایشگاهی به دست می‌آید. علاوه بر این، مقدار ϵ از معادله انتقال تعیین می‌گردد. شکل نهایی معادلات $k - \epsilon$ به صورت روابط زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \beta \cdot g_i \cdot \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \epsilon \quad (8)$$

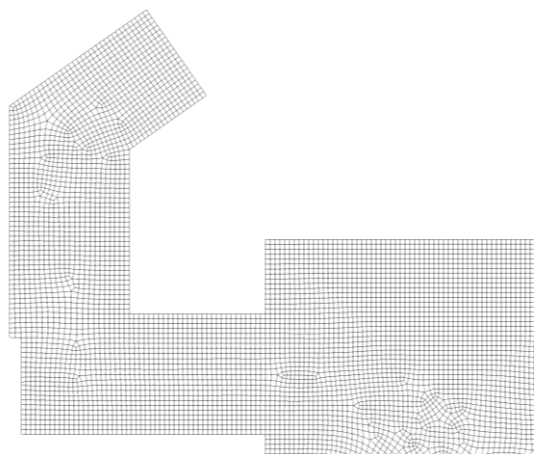
$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left(v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + C_{3\epsilon} \beta \cdot g_i \cdot \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

در روابط فوق، $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ ، $C_{3\epsilon}$ ، σ_k ، σ_ϵ و σ_T ضرایب تجربی هستند که مقادیر عددی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، g_i مولفه شتاب گرانش در راستای i ام، β ضریب توسعه حجمی و θ پارامتر شناوری را نشان می‌دهند.

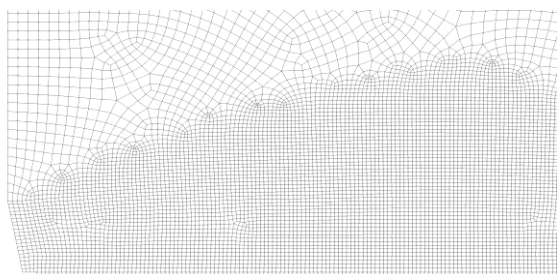
۵- شرایط مرزی، شرایط اولیه و فرضیات مساله



شکل ۳. مش‌بندی محدوده ویندباکس.



شکل ۴. مش‌بندی محدوده یک داون کامر.



شکل ۵. مش‌بندی محدوده سطح بستر گندله.

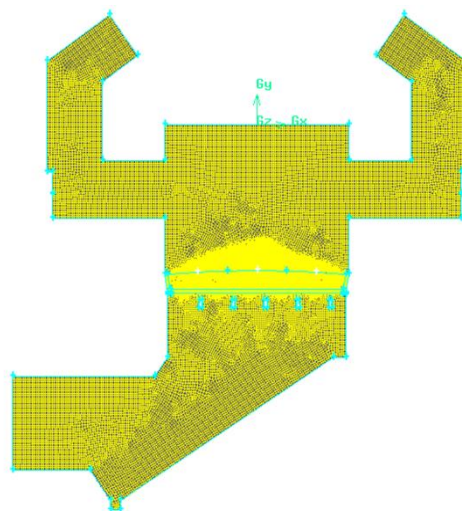
۷- شبیه‌سازی عددی

در این بخش، به شبیه‌سازی ناحیه فایرینگ کوره به کمک نرم افزار اپن فوم و با شرایط تشریح شده در بخش‌های قبل پرداخته شده است. جزئیات روش عددی مورد استفاده و مشخصات جریان مساله مطرح شده در جدول ۲ آمده است. محاسبات مربوطه، توسط توسعه زیر برنامه‌های محاسباتی مورد استفاده در نرم‌افزار منبع باز اپن فوم [۲۳] انجام گردیده است. همان‌گونه که قبلا اشاره شد، کد اپن فوم بر پایه روش حجم محدود بوده و قابلیت توسعه معادلات، شرایط مرزی و روش‌های حل مختلف بر مبنای برنامه-نویسی شی‌گرا به زبان C++ را در اختیار محققان قرار می‌دهد. در شکل‌های (۶) و (۷)، کانتورهای فشار درون

در همین راستا، به منظور امکان بررسی دقیق‌تر نحوه مش‌بندی، محدوده‌های ویندباکس، داون کامر و سطح بستر گندله به ترتیب در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱. مقادیر عددی ضرایب تجربی مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$

ϵ	
C_{μ}	۰/۰۹
$C_{1\epsilon}$	۱/۴۴
$C_{2\epsilon}$	۱/۹۲
$C_{3\epsilon}$	۰
σ_k	۱
σ_{ϵ}	۱/۳
σ_T	۰/۹

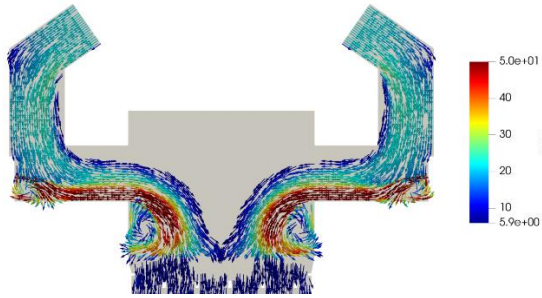


شکل ۲. مش‌بندی تمام محدوده موردنظر برای شبیه‌سازی عددی ناحیه پخت کوره گندله‌سازی.

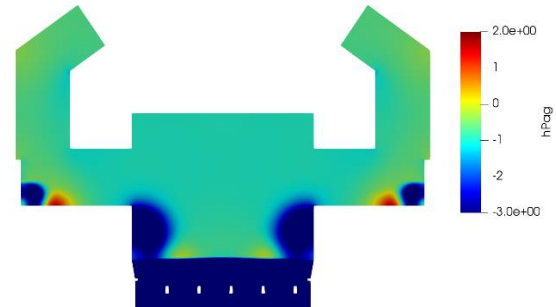
جدول ۲. مشخصات روش محاسباتی و ویژگی‌های جریان.

روش محاسباتی/ مقادیر عددی	پارامترهای حل
الگوریتم پیزو	ارتباط سرعت و فشار
روش پسر دو مرتبه دوم زمانی	گسسته‌سازی زمانی
روش تفاضل مرکزی محدود شده	گسسته‌سازی مکانی
تابع دیواره استاندارد	تابع دیواره

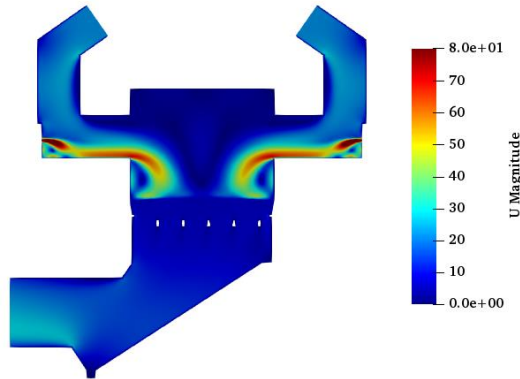
کوره و درون ویندباکس به ترتیب آورده شده‌اند. علاوه‌براین، الگوی جریان گاز درون کوره در شکل‌های (۸) تا (۱۰) به تصویر کشیده شده‌اند. شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) به ترتیب کانتورهای سرعت درون کوره، داون کامر، ویندباکس و بستر گندله را نمایش می‌دهند.



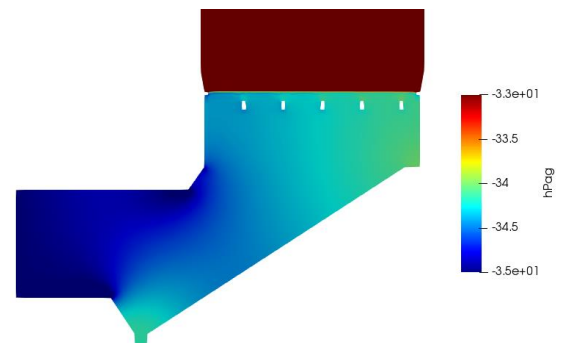
شکل ۱۰. الگوی جریان درون کوره در ناحیه پخت.



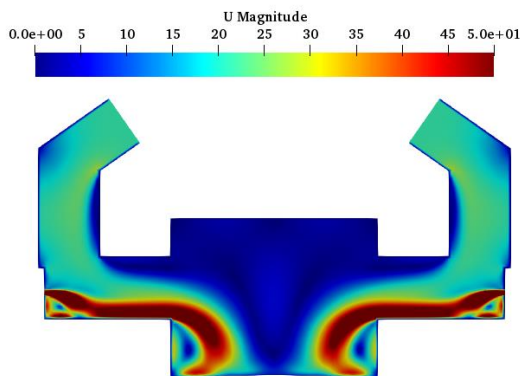
شکل ۶. کانتور فشار درون کوره در ناحیه پخت.



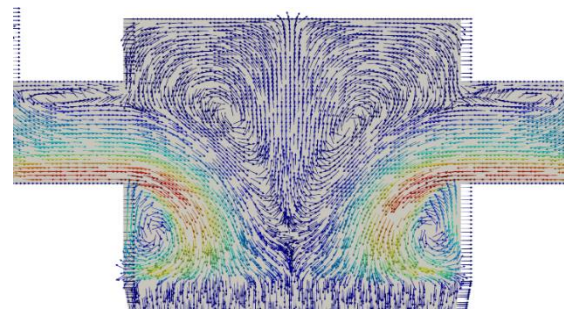
شکل ۱۱. کانتور سرعت گاز درون کوره در ناحیه پخت.



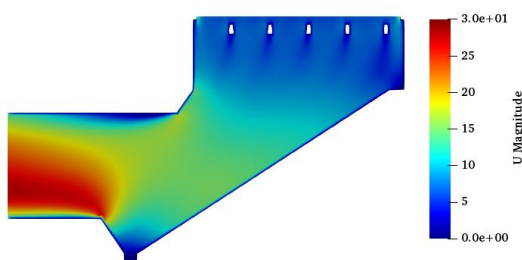
شکل ۷. کانتور فشار درون ویند باکس.



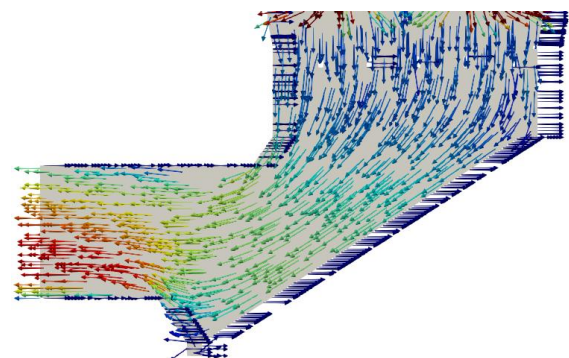
شکل ۱۲. کانتور سرعت درون دان کامر.



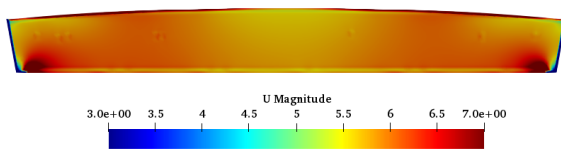
شکل ۸. الگوی جریان بخش فوقانی کوره.



شکل ۱۳. کانتور سرعت درون ویند باکس.



شکل ۹. الگوی جریان درون ویند باکس.



شکل ۱۴. کانتور سرعت در بستر منحنی گندله.

۸- خلاصه و پیشنهادات

در این تحقیق، به شبیه‌سازی ناحیه پخت کوره گندله‌سازی به کمک نرم افزار این فوم پرداخته شد. محدوده مورد نظر برای شبیه‌سازی، شامل صفحه خروجی مشعل‌ها (۲ مشعل)، لوله‌های داون کامر (۲ لوله)، محفظه احتراق (۲ محفظه)، فضای درونی کوره، بستر گندله و یک ویندباکس در نظر گرفته شد. هندسه پالت کار به صورت ورقی با ضخامت صفر مدل و فقط صفحه خروجی مشعل در نظر گرفته شد. بستر گندله بصورت یک بستر متخلخل با درصد تخلخل یکنواخت مدلسازی شد. برای تحلیل جریان پایدار قابل تراکم و مغشوش با در نظر گرفتن ماده متخلخل از حل گر rhoSimplePorousFOAM کمک گرفته شد تا معادلات جریان پایستار شامل معادله پیوستگی، معادله ممنوم و معادله انرژی به طور همزمان حل شوند. برای شبیه‌سازی جریان آشفته از روش دو معادله‌ای $k - \epsilon$ که روشی بر پایه شبیه‌سازی میانگین‌گیری رینولدز است و به طور گسترده در شبیه‌سازی پدیده‌های واقعی و مسایل صنعتی به کار می‌رود، استفاده شد. شرط مرزی فشار در ویندباکس خروجی با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در کارخانه تنظیم شد درحالی‌که دیواره‌های کوره عایق در نظر گرفته شدند. گرادیان دما و فشار روی دیواره صفر و از شرط عدم لغزش برای شرط مرزی سرعت استفاده شد. برای شرط مرزی مشعل‌ها فرض شد که محصولات احتراق در دمای آدیاباتیک شعله با دبی جرمی $0/55$ کیلوگرم بر ثانیه و دما 1950 درجه سانتیگراد به درون دامنه وارد می‌شوند. همچنین، پارامترهای مربوط به اغتشاش برای مرزهای دیوار از شرایط مرزی تابع دیواره محاسبه شدند. شرط مرزی فشار در خروجی مقدار ثابت 97825 پاسکال در نظر گرفته شده

و برای سایر پارامترها از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شد. دبی جرمی و دما برای جریان ورودی از کانل هود به ترتیب $7/849$ کیلوگرم بر ثانیه و 980 درجه سانتیگراد لحاظ شد. برای تخمین پارامترهای مربوط به اغتشاش طول اختلاط $0/05$ و شدت انرژی جنبشی اغتشاش $0/05$ در نظر گرفته شد. نهایتاً، برای مدل‌سازی افت فشار سیال در بستر متخلخل گندله، یک عبارت جدید به معادله ممنوم اضافه شد. در بخش نتایج شبیه‌سازی، کانتورهای فشار، الگوی جریان گاز و کانتورهای سرعت درون کوره، دان کامر، ویند باکس و بستر گندله برای دو وضعیت متفاوت سطح بستر گندله به تصویر کشیده شدند. بررسی نتایج حاصل نشان می‌دهند که جریان‌های داغ‌گازی به سمت اطراف کوره و نزدیک به سایدوال‌ها منحرف شده و یکی از عوامل موثر در کاهش عمر آن‌ها می‌باشد. بر همین اساس، موارد زیر جهت انجام تحقیقات بیشتر و پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌گردند.

- ✓ بررسی تاثیر اندازه مکش‌ها بر روی الگوی جریان،
- ✓ بررسی تاثیر شرایط هندسی کوره بر روی الگوی جریان،
- ✓ بررسی تاثیر سایز گندله‌های خام بر روی الگوی جریان،
- ✓ بررسی تاثیر سایز گندله‌های هارد لایر و ساید لایر بر الگوی جریان.

تقدیر و تشکر

از مجتمع معدنی-صنعتی گل‌گهر سیرجان به دلیل حمایت مالی از انجام این پروژه تحت قرارداد $98/5/16/3666$.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

مراجع

- [1] G. Mukhopadhyay, and S. Bhattacharyya. "An Investigation on the Cracking of Pallet Side Walls at a Sinter Plant." *Journal of Failure Analysis and Prevention* 12 (2012): 354-360.
- [2] K. Sharifi, M. Sabeti, and H. Yousefi. "A good contribution of computational fluid dynamics (CFD) and GA-ANN methods to find the best type of helical wire inserted tube in heat exchangers." *International Journal of Thermal Sciences* 154 (2020): 106398.
- [3] R. Kim, S. Hong, and I. Lee. "Computational fluid dynamics for non-experts: Development of a user-friendly CFD simulator (HNVR-SYS) for natural ventilation design applications." *Biosystems Engineering* 160 (2020): 107617.
- [4] Z. Jiao, S. Yuan, and Q. Wang. "Optimization of dilution ventilation layout design in confined environments using Computational Fluid Dynamics (CFD)." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 60 (2019): 195-202.

- [5] R. Shen, Z. Jiao, and Q. Wang. "Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 67 (2020): 104252.
- [6] R.P.M. Moreira, A.C. Reina, and G.L. Puma. "Computational fluid dynamics (CFD) modeling of removal of contaminants of emerging concern in solar photo-Fenton raceway pond reactors." *Chemical Engineering Journal* 413 (2020): 127392.
- [7] D. Sun, X. Shi, and L. Zhang. "Spatiotemporal distribution of traffic emission based on wind tunnel experiment and computational fluid dynamics (CFD) simulation." *Journal of Cleaner Production* 282 (2021): 124495.
- [8] R.P.M. Moreira, and G.L. Puma. "Multiphysics Computational Fluid-Dynamics (CFD) Modeling of Annular Photocatalytic Reactors by the Discrete Ordinates Method (DOM) and the Six-Flux Model (SFM) and Evaluation of the Contaminant Intrinsic Kinetics Constants." *Catalysis Today* 361 (2020): 77-84.
- [9] H. Ghafari. "Computational fluid dynamics (CFD) analysis of pipeline in the food pellets cooling system." *Journal of Stored Products Research* 87 (2020): 101581.
- [10] H. Yi, Y. Feng, and Q. Wang. "Computational fluid dynamics (CFD) study of heat radiation from large liquefied petroleum gas (LPG) pool fires." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 61 (2019): 262-274.
- [11] F.S. Aureliano, L. Carlos, and V. Guedes. "Computational fluid dynamics (CFD): behavioral study and optimization of the blades number of a radial fan." *Procedia Manufacturing* 38 (2019) 1324-1329.
- [12] B.A. Cho, and R.W.M. Pott. "The development of a thermosiphon photobioreactor and analysis using Computational Fluid Dynamics (CFD)." *Chemical Engineering Journal* 363 (2019): 141-154.
- [13] P.D. Tegenaw, M.G. Gebrehiwot, and M. Vanierschot. "On the comparison between computational fluid dynamics (CFD) and lumped capacitance modeling for the simulation of transient heat transfer in solar dryers." *Solar Energy* 184 (2019): 417-425.
- [14] N. Malekjani, and S.M. Jafari. "Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches." *Trends in Food Science & Technology* 78 (2018): 206-223.
- [15] O. Ahmadi, S.B. Mortazavi, and K. Sarvestani. "Modeling of boiler phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations." *Process Safety and Environmental Protection* 129 (2019): 25-39.
- [16] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish. "The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab (Fluid Mechanics and Its Applications)." (2015).
- [17] J. Nobrega, and H. Jasak. OpenFOAM®: Selected Papers of the 11th Workshop, Springer, 2019.
- [18] X. Zhou, D. Zhang, X. Li, J. Deng, W. Tian, S. Qiu, G. Su, X. He, and H. Yu. "Development of a neutron space-time kinetics solver with improved quasi-static method based on OpenFOAM." *Nuclear Engineering and Design* 419 (2024): 112990.
- [19] J. Wu, Z. Tang, and J. Cai. "Thermal-hydraulic analysis of LBE flow in rod bundles with wire spacers based on heat transfer framework of OpenFOAM." *Nuclear Engineering and Design* 417 (2024): 112843.
- [20] D. Price, N. Roskoff, M.I. Radaideh, and B. Kochunas. "Thermal Modeling of an eVinci™-like heat pipe microreactor using OpenFOAM." *Nuclear Engineering and Design* 415 (2023): 112709.
- [21] W. Ou, Z. Gong, Z. Gu, Q. Pan, L. Zhang, and J. Dai. "Preliminary development and verification of an OpenFOAM-based multi-physics coupling safety analysis code for Lead-based reactor." *Annals of Nuclear Energy* 194 (2023): 110095.
- [22] F. Dione, T. Cong, X. Zhang, M.A. Jayeola, and Z. Zhang. "Numerical study on the critical heat flux based on the two-phase multi-scale interface model using OpenFOAM." *Progress in Nuclear Energy* 164 (2023): 104852.
- [23] OpenFOAM, the Open Source CFD Toolbox, User Guide, Version 2.2.2, 28th September; <http://www.openfoam.org/doc>.