

# شبیه‌سازی عددی ناحیه پخت کوره گندله‌سازی مطالعه

## موردی: مجتمع صنعتی معدنی گل‌گهر سیرجان

محمد جواد محمودآبادی<sup>۱</sup>، محسن طالبی‌پور<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

(تاریخ دریافت: 00/00/00، تاریخ پذیرش: 00/00/00)

### چکیده

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 اوپن‌فوم 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.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار اوپن‌فوم، محیط متخلخل، جریان پایا، جریان تراکم‌پذیر، جریان مغشوش

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

M. J. Mahmoodabadi and M. Talebipour

Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

(Received: 00/00/00; Accepted: 00/00/00)

### 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 downcomer pipes, the combustion chamber, the space of the furnace and the windbox, 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.

**Keywords:** Numerical simulation, Open-Foam software, Porous media, Steady-state flow, Compressible flow, Turbulent flow

<sup>۱</sup> دانشیار (نویسنده پاسخگو): mahmoodabadi@sirjantech.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد m.talebipor@gmail.com

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 ریزراکتورهای 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 راکتورهای 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.

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 نرم افزار 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.

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<sup>۱</sup>، معادلات میان‌گیری شده ناویر-استوکس به همراه معادله انرژی حاکم بر ناحیه پخت کوره تحلیل می‌گردند. در این روش، با استفاده 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 به‌طور گسترده در تحلیل مسائل صنعتی و علمی استفاده شده است که به عنوان مثال می‌توان به مواردی همچون طراحی مبدل‌های 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 راکتورهای فتوکاتالیستی [۸]، تحلیل خطوط لوله در سیستم‌های خنک‌کاری [۹]، مطالعه تشعشعات گرمایی [۱۰]، بهینه‌سازی تعداد پره‌های یک فن‌های شعاعی [۱۱]، توسعه و تحلیل یک راکتور ترموسیفون [۱۲]، مطالعه انتقال حرارت گذرا در یک خشک‌کن خورشیدی [۱۳]، شبیه‌سازی فرایندهای خشک‌کنی غذایی [۱۴] و مدل‌سازی عملیات جوش‌کاری [۱۵] اشاره نمود.

امروزه، نرم افزارهای تجاری بنا نهاده شده بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی مانند CFX، Fluent و غیره به‌طور 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<sup>۲</sup> است که امکان حل گستره وسیعی از پدیده‌های

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

<sup>2</sup> OpenFOAM<sup>(R)</sup>

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

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(PEu_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(Pu_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(Tu_i) + \nabla \cdot j = 0 \quad (3)$$

که در این معادلات،  $\rho$  چگالی،  $t$  زمان،  $u$  سرعت،  $E$  انرژی،  $T$  دما،  $\gamma$  ضریب وزنی،  $S$  چشمه،  $P$  فشار،  $\mu$  ضریب ویسکوزیته و  $\tau$  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 مدل سازی شده است.

علاوه بر این، عبارت چشمه خود نیز از ترکیب دو معادله برای مدل سازی 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.

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

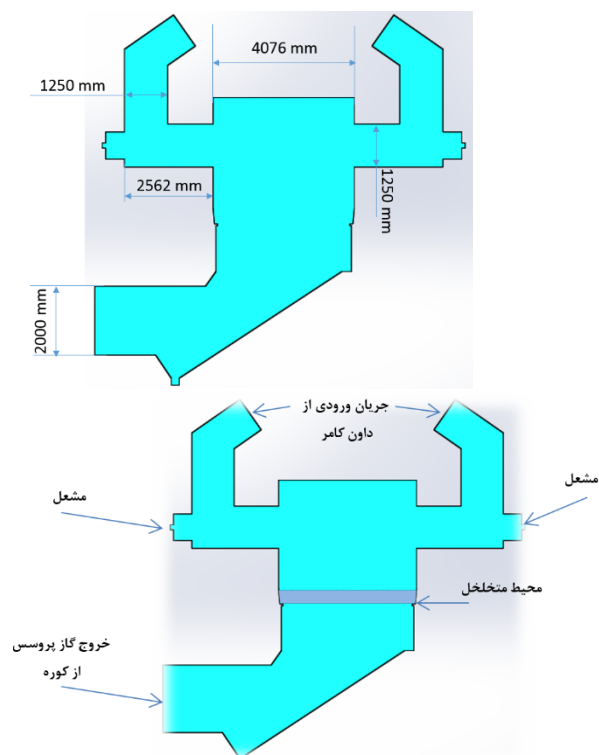
در این معادله  $D$  و  $F$  ثوابت فیزیکی مدل هستند.

#### ۴- مدل سازی جریان آشفته و یا اغتشاشی

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

(۱) شبیه سازی عددی مستقیم: یک روش شبیه سازی در دینامیک سیالات محاسباتی است که در آن معادلات کامل ناویر-استوکس به صورت عددی و بدون هیچ گونه مدل سازی جریان آشفته حل می‌شوند. از آنجا که انجام محاسبات این شبیه سازی 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 امکان پذیر نیست.

(۲) شبیه سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۳</sup>: در این روش، معادلات ناویر-استوکس برای مقیاس‌های بزرگ که حاوی انرژی هستند حل شده و اثر مقیاس‌های کوچک بر مقیاس‌های بزرگ مدل سازی می‌شود. از نظر هزینه محاسباتی، این روش بین روش شبیه سازی عددی مستقیم و شبیه سازی به روش



شکل (۱): محدوده مورد نظر و اندازه‌های اساسی آن برای شبیه سازی عددی ناحیه پخت کوره گندله سازی.

#### ۲- محدوده شبیه سازی

محدوده مورد نظر برای شبیه سازی بخشی از ناحیه پخت کوره گندله سازی است که شامل صفحه خروجی مشعل‌ها (۲) مشعل، لوله‌های داون کامر (۲ لوله)، محفظه احتراق (۲) 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 مدل سازی شده است.

#### ۳- معادلات حاکم

در ابتدا، می‌بایست توجه داشت که حل گری<sup>۱</sup> 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 حل گر، به حل معادلات پایستار جریان شامل معادله پیوستگی، معادله ممنتوم و معادله انرژی می‌پردازد.

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

<sup>2</sup> Direct Numerical Simulation (DNS)

<sup>3</sup> Large Eddy Simulation (LES)

<sup>1</sup> Solver

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

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

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

در روابط فوق،  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$ ،  $C_{3\varepsilon}$ ،  $\sigma_\varepsilon$ ،  $\sigma_k$ ،  $\sigma_T$  ضرایب تجربی هستند که مقادیر عددی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین،  $g_i$  مولفه شتاب گرانش در راستای  $i$ ام،  $\beta$  ضریب توسعه حجمی و  $\theta$  پارامتر شناوری را نشان می‌دهند.

#### ۵- شرایط مرزی، شرایط اولیه و فرضیات مساله

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  $0.155 \left( \frac{kg}{s} \right)$  و دما  $1950 (C^0)$  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  $97825 (pa)$  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  $7/849$  کیلوگرم بر ثانیه و  $980$  درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده‌اند. برای تخمین پارامترهای مربوط به اغتشاش، طول اختلاط  $0.05$  و شدت انرژی جنبشی اغتشاش  $0.05$  در نظر گرفته شده است. همچنین، از روش دو معادله‌ای  $k - \varepsilon$  برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است. برای مدل‌سازی افت فشار سیال در بستر متخلخل گندله، یک عبارت جدید به معادله ممنوم اضافه شده است. این عبارت، با معادله زیر تعریف می‌شود که

میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر- استوکس قرار دارد. 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 معادلات ناویر- استوکس: یکی از روش‌های مدل‌سازی آشفته‌گی است که در آن، نوسانات کم‌اهمیت 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  $k - \varepsilon$  است که در این تحقیق نیز از این تکنیک استفاده شده است.

#### ۴-۱- مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$

روش دو معادله‌ای  $k - \varepsilon$ ، روشی بر پایه شبیه‌سازی میانگین-گیری رینولدز است که به‌طور 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  $\varepsilon$  یا نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته‌گی با توجه به رابطه ذیل تعیین می‌شود.

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

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

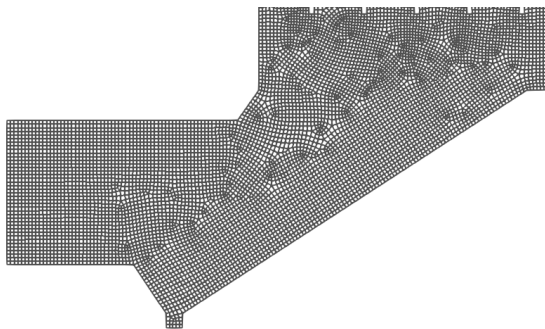
$$l = C_D \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

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

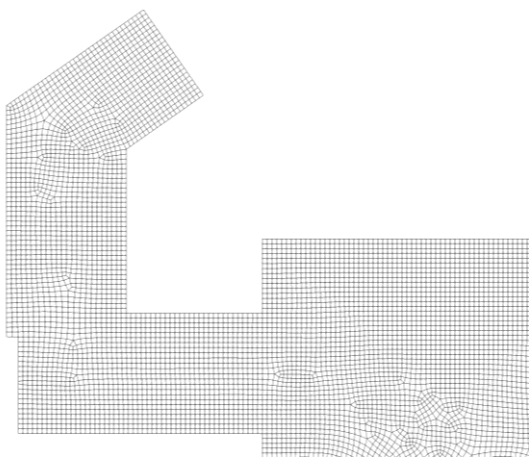
$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

جدول ۲. مشخصات روش محاسباتی و ویژگی‌های جریان.

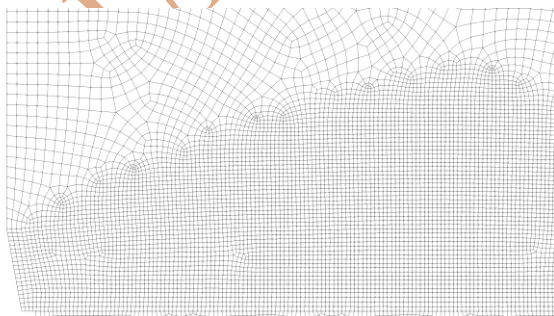
پارامترهای حل	روش محاسباتی / مقادیر عددی
ارتباط سرعت و فشار	الگوریتم پیرو
گسسته‌سازی زمانی	روش یسرو مرتبه دوم زمانی
گسسته‌سازی مکانی	روش تفاضل مرکزی محدود شده
تابع دیواره	تابع دیواره استاندارد



شکل ۳. مش‌بندی محدوده ویندباکس.



شکل ۴. مش‌بندی محدوده یک داون‌کامر.



شکل ۵. مش‌بندی محدوده سطح بستر گندله.

مشابه معادله پیشنهاد شده برای افت فشار در بستر شامل ذرات است:

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

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

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

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

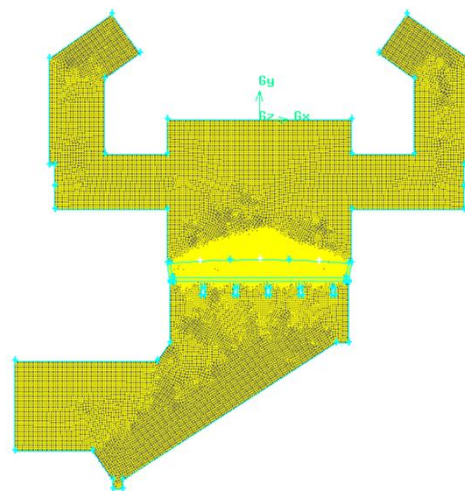
در معادلات فوق،  $\epsilon$  کسر باطل،  $\phi$  گرد کننده به سمت پایین است.

#### ۶- مش‌بندی

برای شبیه‌سازی عددی، مش‌بندی تمام دامنه دو بعدی مورد مطالعه، مطابق با شکل ۲ در نظر گرفته شده است. در همین راستا، به منظور امکان بررسی دقیق‌تر نحوه مش‌بندی، محدوده‌های ویندباکس، داون‌کامر و سطح بستر گندله به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده‌اند.

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

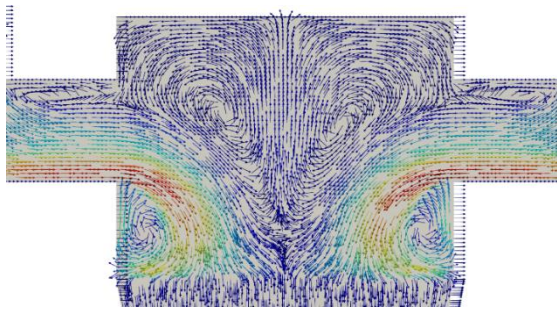
$C_\mu$	۰/۰۹
$C_{1\epsilon}$	۱/۴۴
$C_{2\epsilon}$	۱/۹۲
$C_{3\epsilon}$	۰
$\sigma_k$	۱
$\sigma_\epsilon$	۱/۳
$\sigma_T$	۰/۹



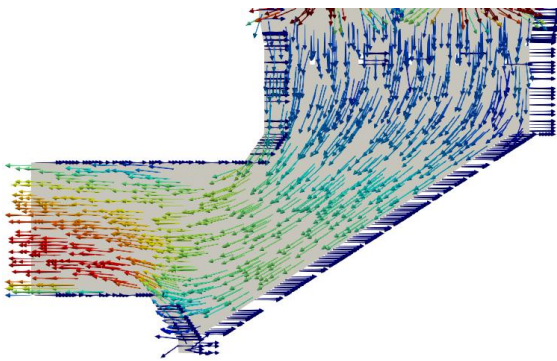
شکل ۲. مش‌بندی تمام محدوده موردنظر برای شبیه‌سازی عددی ناحیه پخت کوره گندله‌سازی.

## ۷- شبیه‌سازی عددی

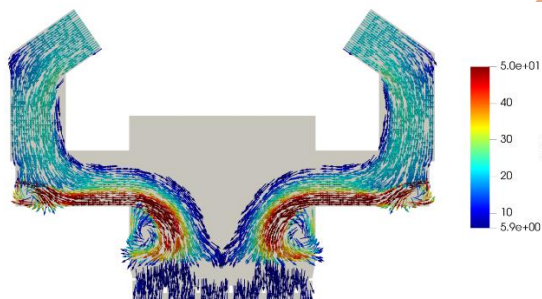
در این بخش، به شبیه‌سازی ناحیه فایرینگ کوره به کمک نرم افزار این فوم و با شرایط تشریح شده در بخش‌های قبل پرداخته شده است. جزئیات روش عددی مورد استفاده و مشخصات جریان مساله مطرح شده در جدول ۲ آمده است. محاسبات مربوطه، توسط توسعه زیر برنامه‌های محاسباتی مورد استفاده در نرم‌افزار منبع باز این فوم [۲۳] انجام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



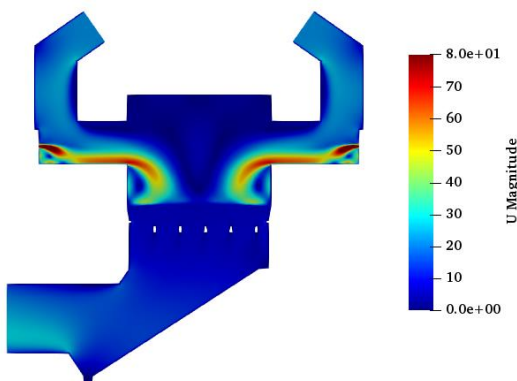
شکل ۸. الگوی جریان بخش فوقانی کوره.



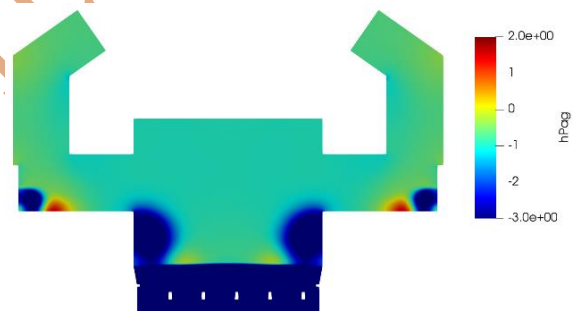
شکل ۹. الگوی جریان درون ویند باکس.



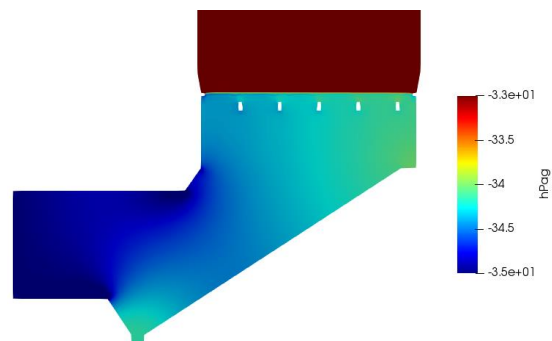
شکل ۱۰. الگوی جریان درون کوره در ناحیه پخت.



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



شکل ۶. کانتور فشار درون کوره در ناحیه پخت.



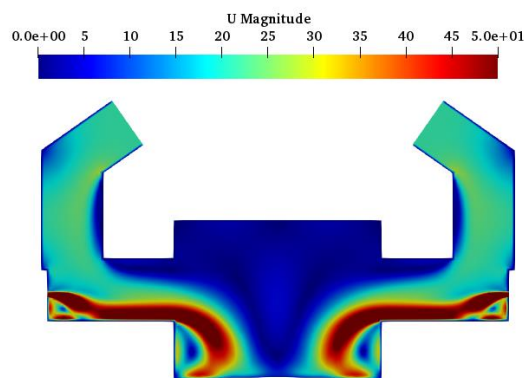
شکل ۷. کانتور فشار درون ویند باکس.

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 مدل-سازی افت فشار سیال در بستر متخلخل گندله، یک عبارت جدید به معادله ممنتوم 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 سایه‌دوال‌ها 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.

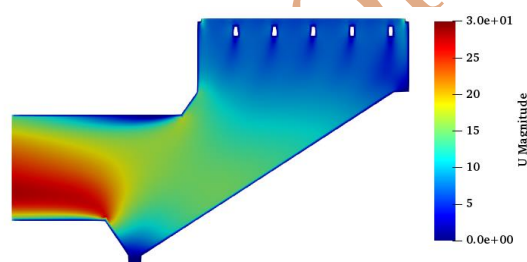
- ✓ بررسی تاثیر اندازه مکش‌ها بر روی الگوی جریان،
- ✓ بررسی تاثیر شرایط هندسی کوره بر روی الگوی جریان،
- ✓ بررسی تاثیر سایز گندله‌های خام بر روی الگوی جریان،
- ✓ بررسی تاثیر سایز گندله‌های هارد لایر و ساید لایر بر الگوی جریان.

#### تقدیر و تشکر

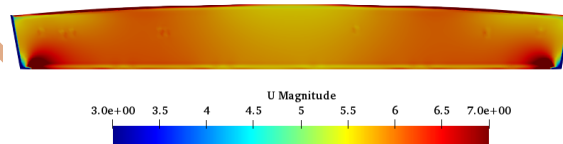
از مجتمع معدنی-صنعتی گل‌گهر سیرجان به دلیل حمایت مالی از انجام این پروژه تحت قرارداد  $98/5/16/3666$ .



شکل ۱۲. کنتور سرعت درون دان کامر.



شکل ۱۳. کنتور سرعت درون ویند باکس.



شکل ۱۴. کنتور 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 حل‌گر rhoSimplePorousFOAM کمک گرفته شد تا معادلات جریان پایستار شامل معادله پیوستگی، معادله ممنتوم و معادله انرژی به‌طور همزمان حل شوند. برای شبیه‌سازی جریان آشفته از روش دو معادله‌ای  $k - \epsilon$ ، که روشی بر پایه

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*, 2020.

9. Ghafari, H. “Computational fluid dynamics (CFD) analysis of pipeline in the food pellets cooling system”, *Journal of Stored Products Research*, Vol. 87, 101581, 2020.

10. Yi, H., Feng, Y., and Wang, Q. “Computational fluid dynamics (CFD) study of heat radiation from large liquefied petroleum gas (LPG) pool fires”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019.

11. Aureliano, F. S., Carlos, L., and Guedes, V. “Computational fluid dynamics (CFD): behavioral study and optimization of the blades number of a radial fan”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 38, pp.1324-1329, 2019.

12. Cho, B. A., and Pott, R.W. M. “The development of a thermosiphon photobioreactor and analysis using Computational Fluid Dynamics (CFD)”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 363, 2019.

13. Demissie Tegenaw, P., Gebreslasie Gebrehiwot, M., and Vanierschot, M. “On the comparison between computational fluid dynamics (CFD) and lumped capacitance modeling for the simulation of transient heat transfer in solar dryers”, *Solar Energy*, Vol. 184, 2019.

14. Malekjani, N., and Jafari, S. M. “Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches”, *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 78, 2018.

15. Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., and Sarvestani, K. “Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 129, 2019.

16. Mangani, L., Moukalled, F., and Darwish, M. “The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with

## تعارض منافع

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

## ۹- مراجع

1. Mukhopadhyay, G., and Bhattacharyya, S. “An Investigation on the Cracking of Pallet Side Walls at a Sinter Plant”, Vol. 12, pp. 354–360, 2012.

2. Sharifi, K., Sabeti, M., and Yousefi, H. “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*. Vol. 154, 106398, 2020.

3. Kim, R., Hong, S., and Lee, I. “Computational fluid dynamics for non-experts: Development of a user-friendly CFD simulator (HNVR-SYS) for natural ventilation design applications”, *Biosystems Engineering*, Vol.160, 107617, 2020.

4. Jiao, Z., Yuan, S., and Wang, Q. “Optimization of dilution ventilation layout design in confined environments using Computational Fluid Dynamics (CFD)”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 60, 2019.

5. Shen, R., Jiao, Z., and Wang, Q. “Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 67, 104252, 2020.

6. Moreira, R. P. M., Reina, A. C., and Puma, G. L. “Computational fluid dynamics (CFD) modeling of removal of contaminants of emerging concern in solar photo-Fenton raceway pond reactors”, *Chemical Engineering Journal*, 127392, 2020.

7. Sun, D, Shi, X, and Zhang, L. “Spatiotemporal distribution of traffic emission based on wind tunnel experiment and computational fluid dynamics (CFD) simulation”, *Journal of Cleaner Production*, 124495, 2020.

8. Moreira, R. P. M., and Puma, G. L. “Multiphysics Computational Fluid-Dynamics (CFD) Modeling of



20. Price D., Roskoff N., Radaideh M.I., and Kochunas B. "Thermal Modeling of an eVinci™-like heat pipe microreactor using OpenFOAM". *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 415, 112709, 2023.
21. Ou W., Gong Z., Gu Z., Pan Q., Zhang L., and Dai J. "Preliminary development and verification of an OpenFOAM-based multi-physics coupling safety analysis code for Lead-based reactor". *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 194, 110095, 2023.
22. Dione F., Cong T., Zhang X., Jayeola M.A., and Zhang Z. "Numerical study on the critical heat flux based on the two-phase multi-scale interface model using OpenFOAM". *Progress in Nuclear Energy*. Vol. 164, 104852, 2023.
23. OpenFOAM, the Open Source CFD Toolbox, User Guide, Version 2.2.2, 28th September; <http://www.openfoam.org/doc>.
- OpenFOAM® and Matlab (Fluid Mechanics and Its Applications)", Springer, 2015.
17. Nobrega, J., and Jasak, H. *OpenFOAM®: Selected Papers of the 11th Workshop*, Springer, 2019.
18. Zhou X., Zhang D., Li X., Deng J., Tian W., Qiu S., Su G., He X., and Yu H. "Development of a neutron space-time kinetics solver with improved quasi-static method based on OpenFOAM". *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 419, 112990, 2024.
19. Wu J., Tang Z., and Cai J. "Thermal-hydraulic analysis of LBE flow in rod bundles with wire spacers based on heat transfer framework of OpenFOAM". *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 417, 112843, 2024.