

# مطالعه‌ی عددی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی و دینامیکی کوره‌ی حرارتی پرس گرم

سعید شاعی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مصطفی باکویی (کارشناس ارشد)

محمدمتین بهزادی (دانشجوی دکتری)

مجتبی ثقی‌پور\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۱)  
دوری ۳-۲، شماره ۱، ص. ۹۷-۸۵ (پژوهشی)

پرس ایزواستاتیک گرم یا هیپ یکی از فرایندهای مورد استفاده در متالورژی پودر است. به دلیل هزینه‌ی بسیار بالای ساخت نمونه آزمایشگاهی این نوع از کوره، استفاده از شبیه‌سازی عددی به منظور مطالعه‌ی رفتار آن بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، عملکرد هندسه‌ی خاصی از یک کوره‌ی حرارتی پرس گرم به‌صورت عددی مطالعه شده است. به منظور افزایش دقت حل مسئله از مدل ترمودینامیکی گاز واقعی استفاده شده و معادلات پیوستگی، مومنتوم، آشفتگی و انرژی به‌صورت هم‌زمان حل شده است. در این پژوهش ضمن مطالعه‌ی رفتار کوره بر اساس شرایط مرزی و اولیه پیش‌فرض، تأثیر فراسنجه‌های مختلف بر رفتار کوره‌ی حرارتی پرس گرم مثل تغییر نوع گاز، دمای دیواره‌ی آبگرد، وجود یا عدم وجود سپر حرارتی، شرایط مرزی المنت و نیز فشار اولیه بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که فشار اولیه‌ی گاز داخل کوره و نیز دمای مرز آبگرد تأثیر قابل توجهی بر میزان فشار نهایی گاز کوره دارند. همچنین مطالعه‌ی تغییرات گذرای دمای ناحیه گرم در دو حالت خاموش شدن المنت می‌تواند مبنایی برای طراحی و ساخت یک سیستم کنترل دمای مناسب برای کوره باشد.

Saeed.shoaei@mech.sharif.edu  
bakouei.mostafa@mech.sharif.edu  
mohammadmatin.behzadi@mech.sharif.edu  
mtaghhipoor@sharif.ir

واژگان کلیدی: کوره‌ی حرارتی پرس گرم، شبیه‌سازی عددی، انتقال حرارت، مدل‌سازی فیزیک‌های چندگانه.

## ۱. مقدمه

با توجه به دما و فشار بالای کوره، دیواره‌ی کوره باید با ضریب اطمینان بالا ساخته شود. دیواره‌ی کوره عموماً از استیل با مقاومت بالا - که تحت فرایندهای آهن‌گری (فورج)،<sup>۱</sup> آبدهی (کوئنچ)<sup>۲</sup> و برگشت دادن (تمپر)<sup>۳</sup> قرار گرفته است - ساخته می‌شود. در بعضی از موارد، محفظه‌ی کوره به شکل سیم‌پیچ یا از اتصالات چدنی ساخته می‌شود. در مورد دیواره‌ی کوره، مطالعه‌ی تمرکز تنش و خوردگی اهمیت به‌سزایی دارد. همچنین از طریق فرایند سرمایش (به‌وسیله‌ی آبگرد تعبیه شده در بدنه)، گرمای جذب شده در دیواره دفع می‌شود. ضریب رسانش حرارتی دیواره‌ی کوره باید به اندازه‌ی کافی بالا باشد تا حرارت را به سرعت به سیال سرد منتقل کرده و دچار افزایش دما نشود. بالا رفتن دمای دیواره‌ی بدنه، تحت فشار بالا می‌تواند به شدت استحکام مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار دهد و باعث شکست شود.<sup>[۱]</sup> در کوره‌ی هیپ، هر سه فرایند انتقال حرارت - رسانش، جابه‌جایی و تشعشع - دخالت دارند. با این وجود، به دلیل استفاده از عایق‌های مناسب و نیز ضریب رسانش پایین گاز، انتقال حرارت رسانشی در این میان سهم کم‌تری خواهد داشت.<sup>[۲]</sup> برای ساخت المنت حرارتی کوره در دماهای کم‌تر از ۱۲۰۰ درجه می‌توان از آلیاژ نیکل‌کروم یا کانتال (آلیاژی از آهن، کروم و آلومینیوم) استفاده کرد. در دماهای

پرس ایزواستاتیک گرم (هیپ)<sup>۱</sup> یکی از فرایندهای مورد استفاده در متالورژی پودر است که در آن ذرات پودر شده‌ی فلزات، آلیاژها و سرامیک‌ها تحت فشار ایزواستاتیک و حرارت بالا به همدیگر چسبیده و یک جزء واحد را تشکیل می‌دهند. این روش برای کاهش تخلخل فلزات و افزایش چگالی بسیاری از سرامیک‌ها به کار می‌رود. در این فرایند ابتدا قالب قطعه‌ی مورد نظر طراحی و ساخته شده و سپس قالب از پودر موادی که قرار است با یکدیگر ترکیب شده و آلیاژ نهایی را تولید کنند پر می‌شود. در مرحله‌ی بعد، قالب در دمای بالا که مقدار آن می‌تواند به ۲۰۰۰ درجه سلسیوس نیز برسد، تحت فشار بالای ایزوتروپیک (همسانگرد) قرار می‌گیرد. بزرگی این فشار ممکن است تا حدود ۲۰۰ مگاپاسکال نیز باشد. با استفاده از این روش امکان ساخت قطعاتی با اندازه‌های مختلف (مانند تیغه‌های تراشکاری، پره‌های توربین) وجود دارد. در این روش برای اعمال فشار به قالب، از گازهای بی‌اثر مانند آرگون یا هلیوم استفاده می‌شود.<sup>[۱]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۸/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۰/۱۲، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

DOI:10.24200/J40.2022.59079.1621

بالا تر (محدوده‌ی دمایی ۱۰۰۰ تا ۱۶۵۰ درجه سلسیوس) استفاده از مولیبدن، به دلیل برخورداری از شکل‌پذیری مناسب و قابلیت تولید در اشکال مختلف (مانند سیم، نوار یا ورق) مرسوم است. همچنین مولیبدن به سادگی قابل تعمیر است. در صورت استفاده از گرمکن‌های الکتریکی (المنت) مولیبدنی، به دلیل تابعیت خطی مقاومت الکتریکی آن با دما، تغییرات دمایی داخل کوره بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. در محدوده‌های دمایی که بزرگ‌تر از دمای کاری مولیبدن باشند از گرافیت استفاده می‌شود که در این صورت می‌بایست از ولتاژ پایین و جریان بالا استفاده کرد. در دماهای بالاتر (در حدود ۲۸۰۰ درجه سلسیوس) هیترهای شبکه‌یی تنگستنی یا میله‌های پلاتینیومی می‌توانند جایگزین مناسب گرمکن‌های (هیتر) گرافیتی باشند.<sup>[۱]</sup> یکی دیگر از مواردی که در مورد کوره‌های هیپ مورد توجه قرار گرفته است، شکل هندسی المنت هاست که بر عمر و عملکرد المنت تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال در برخی مطالعات<sup>[۲]</sup> از یک هیتر  $U$  شکل استفاده شده است. باید توجه داشت که نوع گاز مورد استفاده در محفظه و حتی جنس گرمکن‌های الکتریکی (المنت‌ها) می‌تواند در خواص مکانیکی قطعه‌یی که در داخل کوره قرار دارد مؤثر واقع شود. به عنوان مثال، در مورد سرامیک‌هایی که در ساختار خود بیش از ۹۹ درصد  $Al_2O_3$  دارند، وجود کربن در اتمسفر کوره بر خواص آن‌ها تأثیر منفی می‌گذارد. از همین روی، در این حالت استفاده از مولیبدن به جای گرافیت در کوره اولویت خواهد داشت.<sup>[۳]</sup> به منظور جلوگیری از اتلاف حرارت، بهبود فرایند کنترل دمای محفظه و ایجاد یک منطقه‌ی داغ با دمای همگن، در داخل کوره از عایق حرارتی استفاده می‌شود. از جمله عایق‌های مورد استفاده می‌توان به فیبر کربن و صفحات انعطاف‌پذیر گرافیتی اشاره کرد. نکته‌ی حائز اهمیت این است که به دلیل محدودیت فضا، ضخامت عایق مورد استفاده باید حتی‌الامکان کم باشد. در عین حال، فرایند سرد شدن کوره نیز در بعضی کاربردها بایستی به اندازه کافی سریع باشد که در این موارد نیاز به استفاده از سازوکاری برای سرمایش سریع احساس می‌شود. همچنین، در چرخه‌های دمایی، کوره بایستی طوری طراحی شود که دچار فرسودگی نشده و عمر بالایی داشته باشد. به عنوان مثال فیبر سرامیکی که گاهی به عنوان عایق استفاده می‌شود، در اثر کریستالی شدن در چرخه‌های دمایی دچار فرسودگی می‌شود.<sup>[۵]</sup>

در بررسی‌های محققین، از صفحات گرافیتی انعطاف‌پذیر به عنوان عایق استفاده شده است.<sup>[۴]</sup> این صفحات دارای ضخامت کمی در حدود ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر بوده که به صورت یک در میان دارای سوراخ‌هایی با ابعاد و هندسه مشخص هستند. همچنین در فاصله‌ی بسیار کم بین صفحات، گاز آرگون به دام افتاده است. از آنجا که این گاز ضریب رسانش حرارتی کمی دارد، در این فضای کوچک اجازه‌ی حرکت (انتقال حرارت به روش جابه‌جایی) نداشته و این مسئله به افزایش مقاومت حرارتی عایق کمک می‌کند.

نقش سیال عامل مورد استفاده در کوره، اعمال فشار یکنواخت به قطعه است. به منظور جلوگیری از واکنش شیمیایی میان قطعه و سیال، عموماً از گازهای بی‌اثر در داخل کوره‌های پرس حرارتی گرم استفاده می‌شود. در گذشته استفاده از گاز هلیوم به عنوان سیال عامل کوره رایج بوده است. هلیوم نسبت به آرگون دارای چگالی کم‌تر و ضریب رسانش حرارتی بیشتری است. اما در حال حاضر به دلیل هزینه‌ی کم‌تر از گاز آرگون استفاده می‌شود. ضریب انبساط حرارتی بالای گاز آرگون باعث افزایش سهم انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. در بعضی از موارد مانند وقتی که  $Si_3N_4$  کپسوله نشده در داخل کوره قرار دارد، احتمال تجزیه‌ی جزئی سرامیک نیتريد در فضای حاوی آرگون دما بالا وجود دارد. در این شرایط از نیتروژن به جای آرگون استفاده می‌شود.<sup>[۲]</sup>

یکی دیگر از مسائلی که در خصوص فشار محفظه باید به آن توجه کرد، مسئله‌ی

کنترل فشار در سه مرحله‌ی گرمایش، ثبات<sup>۵</sup> و سرمایش است. به عنوان مثال اگر در مرحله‌ی زمان ثبات،<sup>۶</sup> فشار محفظه افزایش پیدا کند، سیستم کنترل می‌بایست به صورت خودکار مقدار کمی از گاز را از محفظه خارج کند تا فشار، ثابت باقی بماند.<sup>[۱]</sup> برای اندازه‌گیری دماهای بالا در داخل کوره عموماً از ترموکوپل‌های تنگستن - رینیوم<sup>۷</sup> استفاده می‌شود. اما دقت این نوع از ترموکوپل‌ها در دمای بالاتر از ۱۸۰۰ درجه کاهش پیدا می‌کند. در دمای بالاتر از ۱۷۰۰ درجه می‌توان از ترموکوپل پلاتینیم - رودیوم<sup>۸</sup> استفاده کرد. با این وجود استفاده از ترموکوپل تنگستن - رینیوم اقتصادی‌تر است؛ اما در دمای تقریبی ۲۰۰۰ درجه سلسیوس استفاده از آن عملاً غیر ممکن می‌شود. لازم به ذکر است که اگر محفظه‌ی داخل کوره به چند ناحیه‌ی مختلف با دماهای متفاوت تقسیم شود، باید از گروه‌های مختلفی از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما در نواحی مختلف استفاده شود.

در دماهای بالا روش‌های اندازه‌گیری مختلفی هستند که می‌توان از آن استفاده کرد، اما تعداد کمی از آن‌ها در فشارهای بالا که کوره‌ی هیپ در آن کار می‌کند از صحت و دقت برخوردارند. روش‌های نوری که بر مبنای تابش حرارتی الکترومغناطیسی کار می‌کنند می‌توانند برای اندازه‌گیری دما بسیار مفید باشند. در این دسته از روش‌ها که دما به سادگی و با استفاده از معادله‌ی پلانک محاسبه می‌شود می‌توانند برای اندازه‌گیری دماهای بالاتر از ۲۲۰۰ درجه نیز مورد استفاده قرار بگیرند و در عین حال در عملکرد آن‌ها اختلالی به وجود نیامده و دقت آن‌ها کاهش پیدا نکند. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از روش نوری برای اندازه‌گیری دما، نشت‌بندی محفظه است. از روش نوری در محفظه با فشار ۱ گیگاپاسکال و دمای ۱۶۰۰ درجه سلسیوس و نیز محفظه با فشار ۹۸۰ مگاپاسکال و دمای ۲۰۰۰ درجه سلسیوس استفاده شده است.<sup>[۲]</sup>

یکی از مراحل کاری کوره‌ی هیپ، فرایند خنک‌کاری و سرمایش است. در این مرحله که با هدف دفع حرارت از محفظه‌ی فشار انجام می‌شود، برای جذب حرارت عموماً از آب استفاده می‌شود. گاهی برای تسریع در فرایند سرمایش کوره، از انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری استفاده می‌شود. در این حالت گاز داغ با هدایت به خارج از کوره، در مجاورت چرخه‌ی آب سرد، حرارت جذب شده از قطعه را به بیرون دفع کرده و پس از کاهش دما مجدداً به داخل کوره بازمی‌گردد. اگرچه در کوره‌های قدیمی، مرحله‌ی سرمایش گاهی تا ۲۴ ساعت زمان می‌برده، اما استفاده از انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری می‌تواند منجر به نصف شدن مدت زمان سرمایش شود.<sup>[۶]</sup>

پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی کوره‌ی حرارتی پرس گرم تمرکز کم‌تری بر استفاده از شبیه‌سازی عددی در مدل‌سازی رفتار این نوع از کوره‌ها دارند. علت این امر می‌تواند انحصاری بودن دانش ساخت این تجهیز و تعداد کم شرکت‌های سازنده آن در دنیا باشد. تحقیقات انجام شده عموماً مرتبط با استفاده از این کوره در مطالعات متالورژیکی است.

از معدود مطالعات انجام شده می‌توان به تحقیقات آکربگ<sup>[۹]</sup> و همکارانش اشاره کرد. در این پژوهش با استفاده از یک مدل پایای دوبعدی و مقارن محوری<sup>۱۰</sup> به شبیه‌سازی فرایند حرارت‌دهی و خنک‌کاری کوره‌ی ساخت شرکت آوور<sup>۱۱</sup> پرداخته شده است. اگرچه این گروه برای صحت‌سنجی نتایج خود از داده‌های تجربی (میزان حرارت خروجی از دیواره‌ی کوره، دما و فشار محفظه) استفاده کرده‌اند اما در مورد محدودیت داده‌برداری تجربی در فشار و دمای بالا، این گروه تحقیقاتی اذعان کرده‌اند که داده‌های تجربی کمی برای صحت‌سنجی وجود داشته است. در این پژوهش از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده شده و اثر تشعشع در آن نادیده گرفته شده است. در حالی که انتقال حرارت تشعشعی، به ویژه در دمای بالا، از جمله روش‌های غالب انتقال حرارت در داخل کوره است. در این پژوهش برای مطالعه‌ی آشفتنگی از مدل

در فشار و دمای بالا به صورت عددی مطالعه شده و تأثیر تغییر پارامترهای مختلف، مانند شرایط مرزی، شرایط اولیه و جنس گاز مورد استفاده، بر عملکرد آن بررسی شده است. در این مطالعه برای آن که نتایج بیش از پیش به واقعیت نزدیک باشند، ضمن استفاده از جریان آشفته و مدل ترمودینامیکی گاز واقعی، بر همکنش دینامیکی و حرارتی سیال با دیواره ی کوره و عایق در نظر گرفته شده است. همچنین تمامی معادلات انتقال حرارت رسانشی، جابه جایی و تشعشعی به صورت همزمان حل شده است. از آنجا که مسئله دارای فیزیک های چندگانه است، از نرم افزار کامسول و به منظور کاهش هزینه ی محاسباتی و افزایش سرعت حل، از یک هندسه ی دوبعدی و مقارن محوری استفاده شده است.

## ۲. معادلات حاکم بر پدیده

شبیه سازی رفتار کوره های حرارتی مشتمل بر دو بخش جریان سیال و انتقال حرارت است که به صورت متقابل بر یکدیگر اثر می گذارند. در شبیه سازی جریان سیال دو معادله ی پیوستگی و مومنتوم باید حل شوند. در بخش انتقال حرارت سیستم نیز باید معادله ی انرژی همراه با معادلات حاکم بر فیزیک تشعشع حل شود. معادلات حاکم بر پدیده های فوق عبارت اند از:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

معادله ی مومنتوم:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu (\nabla u + (\nabla u)^T)) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) + \rho g \quad (2)$$

معادله ی انرژی:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q''' \quad (3)$$

در معادله ی پیوستگی،  $u$  بیانگر سرعت و  $\rho$  چگالی سیال است. همچنین در معادله ی مومنتوم  $P$  بیانگر فشار بوده و  $g$  شتاب گرانش است. در معادله ی انرژی نیز  $T$  معرف دما بوده و  $C_p$  بیانگر ظرفیت حرارتی سیال در فشار ثابت است.  $k$  نیز ضریب رسانش در جسم جامد است. معادلات فوق با این فرض ساده سازی شده اند که پخش حرارتی ناشی از تنش کم باشد. در بسیاری از مسائل انتقال حرارت جابه جایی آزاد، این فرض مرسوم است.  $Q'''$  نیز بیانگر تولید انرژی حجمی است. معادلات مورد استفاده برای انتقال حرارت تشعشعی مطابق روابط زیر است. در این مسئله، کلیه سطوح، خاکستری، دیفیوز و کدر در نظر گرفته شده اند.

معادلات تشعشع:

$$J = \epsilon e_b(T) + \rho_a G \quad (4)$$

$$G = G_m(T) + G_{amb} + G_{ext} \quad (5)$$

$$e_b(T) = \sigma T^* \quad (6)$$

در این معادلات  $J$  بیانگر شار تابشی خارج شده از جسم است و  $G$  بیانگر شار ورودی است.  $G_m$  بیانگر تشعشع متقابل بین سطوح و  $G_{amb}$  تشعشع محیط پیرامون و  $G_{ext}$  بیانگر تشعشع ناشی از منبع خارجی است. همچنین  $\epsilon$  نشان دهنده ی ضریب

$K - \omega$  SST استفاده شده است. همچنین بر اساس این مقاله، شبیه سازی فرایند سرمایشی در حدود ۲ هفته زمان برده است که نشان از هزینه ی محاسباتی بسیار بالای مدل مورد استفاده دارد.

ژیائو پینگ<sup>۱۲</sup> به شبیه سازی فرایند سرمایش در یک کوره ی حرارتی پرس گرم پرداخته است.<sup>[۸]</sup> در این مطالعه از یک هندسه ی سه بعدی در نرم افزار  $Star - CCM+$  استفاده شده است. همچنین به منظور مش بندی هندسه از نرم افزار  $ICEM - CFD$  استفاده شده و اثر تشعشع در نظر گرفته شده است. به منظور مدل سازی آشفته گی نیز از مدل  $K - \epsilon$  استفاده شده است. هزینه ی محاسباتی مدل مورد استفاده بسیار زیاد بوده است.

مانیر<sup>۱۳</sup> و همکارانش به مدل سازی کوره ی پخت<sup>۱۴</sup> پرداخته اند.<sup>[۹]</sup> در این پژوهش ابتدا نتایج به دست آمده از طریق مقایسه ی با یک مدل تجربی صحت سنجی شده و سپس کوره های با ابعاد مختلف که حاوی قطعات با چیدمان و اشکال گوناگون بوده اند بررسی شده است. به منظور شبیه سازی از نرم افزار کامسول استفاده شده و اثرات تشعشع و تغییر شکل جسم نیز در نظر گرفته شده است. جریان سیال در داخل کوره به صورت آرام در نظر گرفته شده و از یک هندسه ی دوبعدی و مقارن محوری استفاده شده است. برای کنترل دمای کوره از یک کنترلر  $PID$  استفاده شده است. نتایج شبیه سازی سازگاری خوبی با نتایج تجربی دارد که می تواند بیانگر کارایی نرم افزار کامسول در شبیه سازی عملکرد این کوره باشد.

کندارس<sup>۱۵</sup> و همکارانش به شبیه سازی کوره پخت در مدت زمان ۱۲۰۰ ثانیه پرداخته اند.<sup>[۱۰]</sup> در این نوشتار به نرم افزار مورد استفاده برای شبیه سازی اشاره یی نشده است اما برای تولید هندسه و ایجاد مش، به ترتیب از نرم افزارهای  $Siemens NX$  و  $Ansys Meshing$  استفاده شده و نیز یک مدل دوبعدی کاربرد داشته است. برای مدل سازی آشفته گی از مدل  $Realizable K - \epsilon$  استفاده شده و به منظور مطالعه ی ترمودینامیکی رفتار سیال از مدل گاز ایده آل استفاده شده است. اگرچه دیواره ی کوره و جنس آن بر رفتار حرارتی کوره تأثیرگذار است، اما در این پژوهش از مدل سازی سطوح جامد صرف نظر شده است. همچنین دیواره ی عایق به صورت متخلخل مدل سازی شده است. از نتایج این شبیه سازی در جایگذاری و چینش مناسب قطعات مختلف در داخل کوره استفاده شده است.

مرجع<sup>[۱۱]</sup> با موضوع شبیه سازی کوره های فشار بالای مورد استفاده در تولید ابررساناها، در کنفرانس سال ۲۰۱۹ کامسول ارائه شده است. در این مطالعه از جریان آرام در یک هندسه ی دوبعدی و مقارن محوری استفاده شده است. نقطه ی ضعف این پژوهش، در چشم پوشی از اثرات انتقال حرارت تشعشعی است. در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده شکل کوره ی مورد استفاده اصلاح شده است.

چنانچه پیش تر ذکر شد، از آنجا که کوره ی حرارتی پرس گرم در دما و فشار بالا عمل می کند، مطالعه ی تجربی عملکرد کوره، حتی در مقیاس آزمایشگاهی هزینه بر بوده و از این رو استفاده از حل عددی به منظور پیش بینی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد آن حائز اهمیت است. همچنین محدود مطالعات عددی که نتایج آن منتشر شده است، هرکدام با فرض های ساده کننده یی همراه بوده اند که سبب عدم تطابق کامل مدل مورد استفاده با واقعیت شده است. از سویی، لزوماً نتایج به دست آمده برای یک هندسه خاص، قابل تعمیم به دیگر انواع کوره های حرارتی پرس گرم نیست.

از این رو در این پژوهش، هندسه ی خاصی از یک کوره ی حرارتی پرس گرم

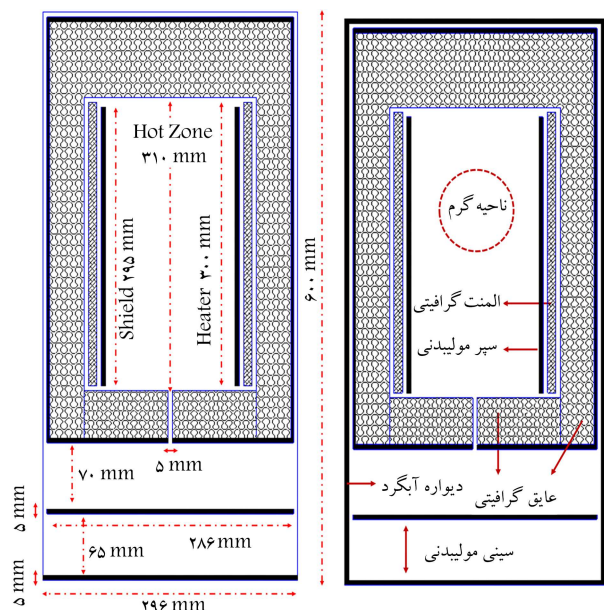
$$\begin{aligned}\sigma_{W1} &= 1 \\ \beta_2 &= 0.828 \\ \gamma_2 &= 0.44 \\ \sigma_{K2} &= 1 \\ \sigma_{W2} &= 0.856 \\ \beta_2^* &= 0.9 \\ \alpha_1 &= 0.31\end{aligned}\quad (16)$$

در نرم‌افزار کامسول، هر یک از معادلات فوق به صورت جداگانه تعریف شده و در نهایت کلیه متغیرهای مورد استفاده به کمک از فیزیک جریان غیر هم دما<sup>۱۶</sup> و انتقال حرارت تشعشعی<sup>۱۷</sup> با هم کوپل می‌شوند.

### ۳. هندسه‌ی مورد استفاده

کوره‌ی مورد مطالعه به شکل استوانه است. از این رو در این مسئله به منظور کاهش هزینه‌ی محاسباتی از یک هندسه‌ی دوبعدی و متقارن محوری استفاده شده است. المنت مورد استفاده در این کوره از جنس گرافیت و عایق مورد استفاده در کوره از جنس صفحات گرافیتی لوله شده (پتوی گرافیتی<sup>۱۸</sup>) است. در مقابل المنت، یک سیر<sup>۱۹</sup> حرارتی استوانه‌یی از جنس مولیبدن قرار دارد. بخش مرکزی کوره که در این مقاله ناحیه‌ی گرم<sup>۲۰</sup> نامیده شده است، محل قرارگیری نمونه است. به منظور افزایش مقاومت مکانیکی عایق گرافیتی، در قسمت زیرین ناحیه‌ی گرم مجرای وجود دارد که فشار بخش داخلی را به بخش خارجی عایق انتقال داده و مانع از ایجاد اختلاف فشار در طرفین عایق می‌شود. در قسمت پایینی سازه، دو عدد سینی مولیبدنی قرار دارد که اجزای جانبی کوره در آن قرار می‌گیرند. پوسته خارجی نیز به فاصله‌ی ۵ میلی‌متر از دیواره عایق قرار داشته و از بیرون با سیستم خنک‌کننده (آبگرد) در تماس است. هندسه‌ی مورد استفاده و ابعاد آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

ضریب رسانش حرارتی پتوی گرافیتی برابر با  $0.3W/K.m^2$  در نظر گرفته



شکل ۱. هندسه و ابعاد مورد استفاده در مسئله.

گسیل است که در جسم خاکستری مقدار آن برابر با ضریب جذب است.  $\sigma$  نیز ثابت بولتزمن است. در نهایت میزان انتقال حرارت تشعشعی برای هر سطح از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$q = \varepsilon(G - e_b(T)) \quad (7)$$

در این مسئله با توجه به آن که دما و فشار داخل کوره پرس گرم بالا است، به منظور افزایش دقت حل مسئله، برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های ترمودینامیکی گاز، از مدل گاز واقعی  $SRK$  استفاده شده است. شکل کلی معادلات مورد استفاده مطابق رابطه‌ی ۸ است:<sup>[۱۲]</sup>

$$P = \frac{RT}{V - b + c} - \frac{\alpha}{V^2 + \delta V + \epsilon} \quad (8)$$

در این مقاله به منظور مطالعه‌ی آشفته‌گی از مدل  $K - \omega$  استفاده شده است.<sup>[۱۲]</sup> این مدل، نسخه‌ی بهبود یافته‌ی مدل  $K - \omega$  محسوب می‌شود که در مجاورت دیواره‌ی مشابه با مدل  $K - \omega$  و در نقاط دور از دیواره‌ی مشابه با مدل  $K - \epsilon$  عمل می‌کند. در این مدل پارامترهای آشفته‌گی توسط روابط ۹-۱۴ توصیف می‌شوند.

$$(u \cdot \nabla)\omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega) \nabla K] + \frac{\gamma}{\mu_T} \rho P^* - \rho \beta_\omega \omega^2 + \gamma(1 - f_{v1}) \frac{\sigma_\omega \tau P}{\omega} \nabla K \cdot \nabla \omega \quad (9)$$

$$\begin{aligned}P^* &= \min(P_K, 10^6 \rho \beta_\omega \omega k) \\ \rightarrow P_K &= \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{\gamma}{\tau} (\nabla \cdot u)^2] - \frac{\gamma}{\tau} \rho K \nabla \cdot u\end{aligned} \quad (10)$$

$$\mu_T = \rho \frac{a_1 K}{\max(a_1 \omega, S f_{v2})} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{\tau S : S} \\ \rightarrow S &= \frac{1}{\tau} (\nabla u + (\nabla u)^T)\end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}f_{v1} &= \tanh(\theta_1^*), \theta_1 \\ &= \min[\max(\frac{\sqrt{K}}{\beta_\omega \omega l_w}, \frac{\delta_\omega \omega \mu}{\rho \omega l_w \tau}), \frac{\tau \rho \sigma_\omega \tau K}{C D_{K\omega} l_w \tau}], C D_{K\omega} \\ &= \max(\frac{\tau \rho \sigma_\omega \tau}{\omega} \nabla \omega \cdot \nabla K, 10^{-10})\end{aligned} \quad (13)$$

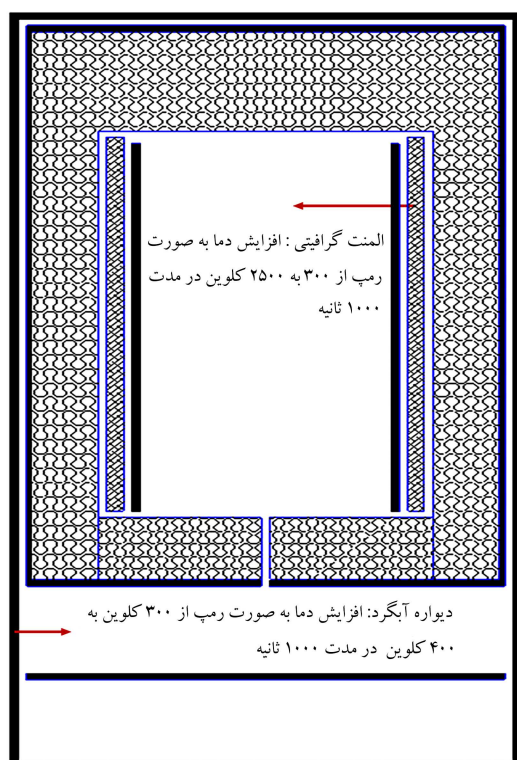
$$\begin{aligned}f_{v2} &= \tanh(\theta_2^*) \\ \rightarrow \theta_2 &= \max(\frac{\tau \sqrt{K}}{\beta_\omega \omega l_w}, \frac{\delta_\omega \omega \mu}{\rho \omega l_w \tau})\end{aligned} \quad (14)$$

در روابط فوق،  $K$  بیانگر انرژی جنبشی توربولانس،  $\omega$  بیانگر نرخ اتلاف ویژه،  $\mu$  و  $\mu_T$  به ترتیب ویسکوزیته‌ی سیال و ویسکوزیته‌ی توربولانسی هستند.  $f_{v1}$  و  $f_{v2}$  توابع میان‌یابی در نواحی نزدیک و دور از دیواره هستند.  $P^*$  نیز بیانگر نرخ تولید حجمی انرژی و  $l_w$  بیانگر فاصله تا نزدیک ترین دیواره است. سایر ضرایب نیز برحسب مقادیر تجربی، به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned}\phi &= f_{v1} \phi_1 + (1 - f) \phi_2 \\ \rightarrow \phi &= \beta, \gamma, \sigma_K, \sigma_\omega\end{aligned} \quad (15)$$

مقادیر ثوابت تجربی به کار رفته نیز برابرند با:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0.75 \\ \gamma_1 &= \frac{5}{9} \\ \sigma_{K1} &= 1\end{aligned}$$



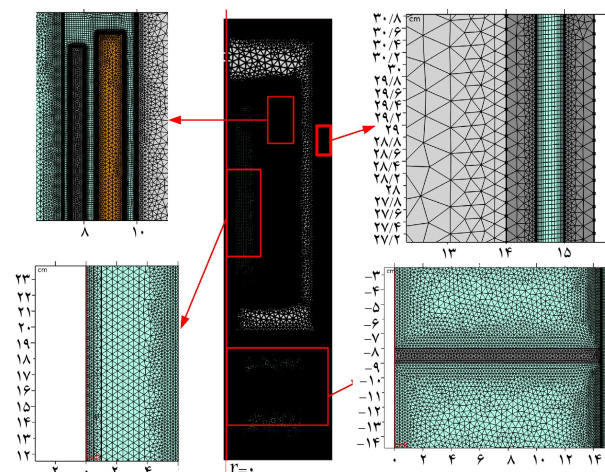
شکل ۳. شرایط مرزی پیش فرض.

## ۵. شرایط مرزی

با توجه به شکل ۳، در این مسئله به صورت پیش فرض دمای دیواره خارجی (دیواره آبگرد) برابر با ۴۰۰ درجه کلوین (برابر با پیشینه دمای مجاز برای دیواره آبگرد) و دمای المنت برابر با ۲۵۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که فرض شده است دمای دیواره آبگرد و المنت ظرف مدت زمان ۱۰۰۰ ثانیه، از مقدار اولیه ۳۰۰ کلوین تا مقدار نهایی افزایش پیدا می کند. همچنین روی تمام سطوح، شرط عدم لغزش اعمال شده است. با توجه به دمای بالای المنت، انتقال حرارت تشعشعی نقش به سزایی در تحولات داخل کوره حرارتی دارد. از این رو اثر تشعشع در تمام سطوح در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مورد بحث، در ادامه ی مقاله، جهت اختصار در نوشتار، شرایط مرزی پیش فرض نامیده شده است.

## ۶. شرایط اولیه

پس از روشن شدن المنت، دمای دیواره ها و گاز داخل کوره با گذشت زمان افزایش پیدا کرده و در نهایت به یک مقدار ثابت میل می کند. از این رو رفتار کوره دارای ماهیت گذرا و متغیر با زمان است. از این رو لازم است تا یک شرط اولیه مناسب تعیین شود. به صورت پیش فرض، دما و فشار اولیه گاز داخل کوره به ترتیب برابر با ۳۰۰ کلوین (دمای محیط) و ۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. فشار اولیه به کمک کمپرسوری که گاز را به داخل کوره تزریق می کند تأمین می شود. در ادامه، فشار گاز در اثر تبادل حرارت با المنت و در نتیجه ازدیاد دما تا مقدار مطلوب افزایش پیدا می کند. شرایط اولیه مورد اشاره، در ادامه مقاله به جهت رعایت اختصار در نوشتار، شرایط اولیه پیش فرض نامیده شده است.



شکل ۲. شبکه بندی هندسه حل.

شده است.<sup>[۴]</sup> همچنین ضریب گسیل گرافیت برابر با ۰٫۸ و ضریب گسیل حرارتی مولیبدن برابر با ۰٫۱ در نظر گرفته شده است.

## ۴. شبکه بندی

چنان که در شکل ۲ مشاهده می شود، در این مسئله به دلیل وجود مجراهای با ضخامت مختلف برای حرکت سیال از شبکه بندی بی سازمان و دو نوع شبکه ی مثلثی و مربعی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از مش با سازمان در این هندسه، تعداد مش تا پنج برابر افزایش پیدا کرده و این مسئله منجر به افزایش هزینه ی محاسباتی مسئله می شود. در کانال های با ضخامت کم، ناحیه ی سرمایش و نیز نواحی اطراف المنت و سپر، از شبکه ی مربعی استفاده شده است. به منظور شبکه بندی قسمت هایی که دارای تغییرات اندازه شبکه اند، از شبکه ی مثلثی استفاده شده است. به منظور افزایش دقت در محاسبه گرادیان دما و میدان سرعت در مجاورت دیواره، از شبکه ی لایه مرزی استفاده شده است. در سایر قسمت ها که گرادیان دما و سرعت در آن کوچک تر است از شبکه های بزرگ تر و با نرخ رشد بیش تر استفاده شده است تا در عین حفظ دقت، هزینه ی محاسباتی مسئله و مدت زمان حل کاهش پیدا کند.

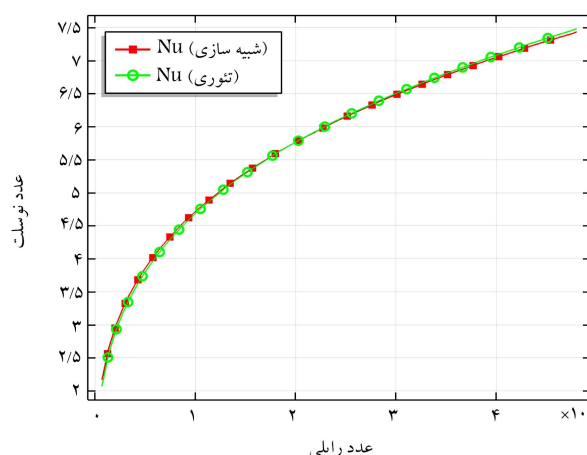
به منظور مطالعه ی استقلال از شبکه، سه شبکه مختلف به نام های  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  تولید شده است. در شکل ۲ شبکه  $C_1$  نشان داده شده است. در شبکه های  $C_2$  و  $C_3$  اندازه کوچک ترین و بزرگ ترین المان مورد استفاده به ترتیب ۲ و ۳ برابر المان های مورد استفاده در شبکه  $C_1$  است. تعداد المان مورد استفاده در شبکه های  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  به ترتیب برابر با ۱۱۱۶۶۵، ۴۴۲۵۵ و ۲۶۱۳۹ عدد است. نتایج به دست آمده برای شار خروجی از دیواره ی آبگرد، متوسط دما و فشار کوره در حالت شبه پایا نشان می دهد که تغییر اندازه شبکه، بیشترین اثر را بر فشار محفظه می گذارد که البته میزان این تغییر در سه شبکه بندی مذکور کم تر از ۱ درصد است و لذا نتایج مستقل از مش بوده است.

به این ترتیب در ادامه برای آن که علاوه بر کاهش هزینه ی محاسباتی، مسئله از دقت قابل قبولی برخوردار باشد از شبکه ی  $C_2$  استفاده شده است. در این حالت متوسط کیفیت مش از لحاظ معیار خوابیدگی<sup>۲۱</sup> برابر با ۸۹٫۹ و متوسط کیفیت مش از لحاظ معیار لحاظ کننده ی نسبت منظری<sup>۲۲</sup> ۷۱٫۹ است و در لایه مرزی از ۶ لایه با ضخامت ۰٫۱ میلی متر استفاده شده است.

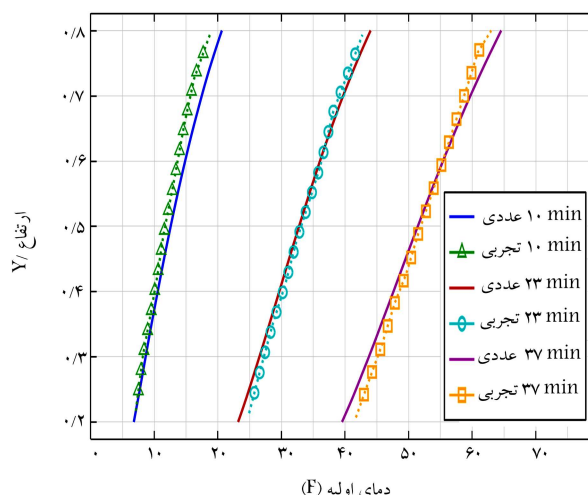
## ۷. اعتبارسنجی

به منظور راستی‌آزمایی نتایج، مسائلی که در آن انتقال حرارت تشعشی و جابه‌جایی به صورت توامان وجود دارد را به دو پدیده جداگانه انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشی تفکیک کرده و سپس نتایج روش عددی را براساس نتایج مطالعات قبلی صحت‌سنجی می‌کنند. [۱۴-۱۶] در نوشتار حاضر نیز به دلیل عدم دسترسی به نتایج تجربی کوره پیشنهادی، ابتدا مسئله به دو قسمت انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشی تقسیم شده و سپس نتایج مربوط به هریک از این روش‌ها صحت‌سنجی شده است. به منظور راستی‌آزمایی حل عددی انتقال حرارت جابه‌جایی، نتایج شبیه‌سازی انتقال حرارت در داخل یک محفظه مربعی شکل دو بعدی، با استفاده از مدل نرم‌افزاری مورد بحث با نتایج تجربی کتون [۱۷] مقایسه شده است (شکل ۴). بیشینه اختلاف بین نتایج حل عددی با نتایج تجربی کم‌تر از ۱ درصد است.

در این مدل‌سازی از فرض تقارن محوری استفاده شده است. از این رو با استفاده از این مدل، نتایج مربوط به انتقال حرارت در کوره‌ی استوانه‌یی شکل ایوانز [۱۸] استخراج شده و نتایج به دست آمده و با نتایج گزارش شده در مرجع اصلی مقایسه شده است (شکل ۵).



شکل ۴. مقایسه نتایج روش حل عددی پژوهش حاضر با نتایج کتون. [۱۷]



شکل ۵. بررسی انتقال حرارت در کوره استوانه‌یی شکل ایوانز با استفاده از مدل مورد استفاده در مقاله. [۱۸]

در ادامه مشابه با مقاله ون اک، [۲۵] انتقال حرارت تشعشی به ترتیب در بین سه صفحه متقاطع، در داخل یک بلوک مکعبی و میان دو صفحه‌ی موازی مدل‌سازی شده است. مقدار دما و شار حرارتی عبوری از هریک از صفحات در حالت پایا به صورت عددی محاسبه شده و با مقادیر حاصل از حل عددی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خطای مدل عددی مورد استفاده در مقایسه با روابط تحلیلی کم‌تر از ۱ درصد است.

## ۸. نتایج

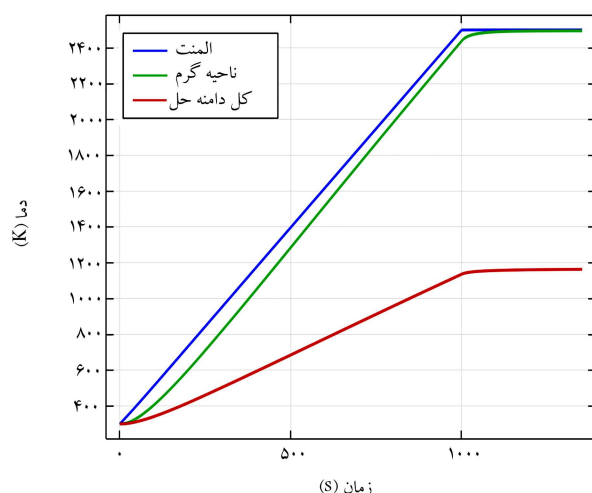
در ادامه نتایج حاصل از حل مسئله برای شرایط مرزی و اولیه پیش فرض ارائه شده و پس از آن تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر عملکرد کوره‌ی حرارتی پرس گرم بررسی شده است.

### ۱.۸. حل مسئله با استفاده از شرایط مرزی و اولیه پیش فرض

در شکل ۶ نمودار تغییرات دمای متوسط گاز در ناحیه گرم و دمای متوسط گاز در کل محفظه ترسیم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، با توجه به شرایط مرزی و اولیه مورد استفاده در مسئله، مقدار متوسط دما بعد از گذشت ۱۱۰۰ ثانیه به سمت یک مقدار ثابت میل کرده است. مقدار دمای متوسط ناحیه گرم در حدود ۲۵۰۰ کلوین و مقدار دمای متوسط محفظه ۱۲۰۰ کلوین است.

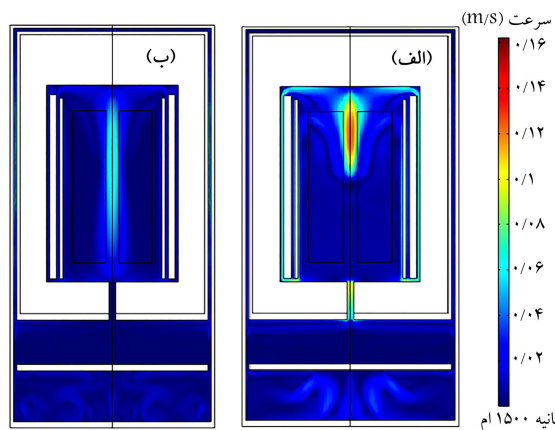
در شکل ۷ نمودار تغییرات فشار گاز آرگون در داخل کوره نشان داده شده است. با توجه به آن که افزایش فشار متأثر از افزایش دماست، با ثابت شدن دما، فشار نیز به سمت یک مقدار ثابت متمایل شده است. فشار نهایی محفظه برابر با ۱۵۰۰ بار است.

در شکل ۸، کانتور توزیع دمای گاز آرگون در ثانیه ۱۵۰۰ نشان داده شده است. در این پژوهش مقدار متوسط دما به عنوان معیار شبه پایا شدن رفتار کوره در نظر گرفته شده است. پس از شبه پایا شدن رفتار کوره، تغییرات دما در بخش‌های پایینی کوره با گذشت زمان بسیار ناچیز خواهد بود؛ زیرا عملاً جریان از بخش‌های داخلی به بخش‌های خارجی نفوذ پیدا نکرده و سازوکار انتقال حرارت به سیال ناحیه پایینی



شکل ۶. نمودار تغییرات دمای متوسط ناحیه گرم و دمای متوسط کل محفظه برحسب زمان (با استفاده از شرایط مرزی و اولیه پیش فرض).

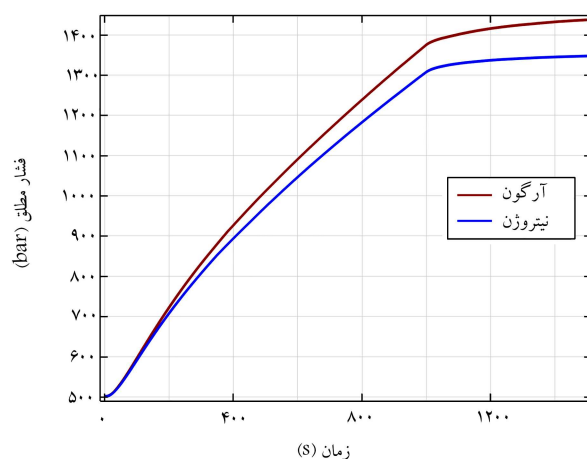




شکل ۹. الف) کانتور توزیع سرعت گاز آرگون در ثانیه ۵۰۰. ب) کانتور تغییرات سرعت گاز آرگون در ثانیه ۱۵۰۰ (با استفاده از شرایط مرزی و اولیه پیش فرض).

جدول ۱. مقایسه جرم مورد نیاز گاز آرگون و نیتروژن مورد نیاز (بر اساس شرایط مرزی و اولیه پیش فرض).

نوع گاز	جرم مورد نیاز (kg)
آرگون	۱۴۰۵۵
نیتروژن	۸۰۴۴

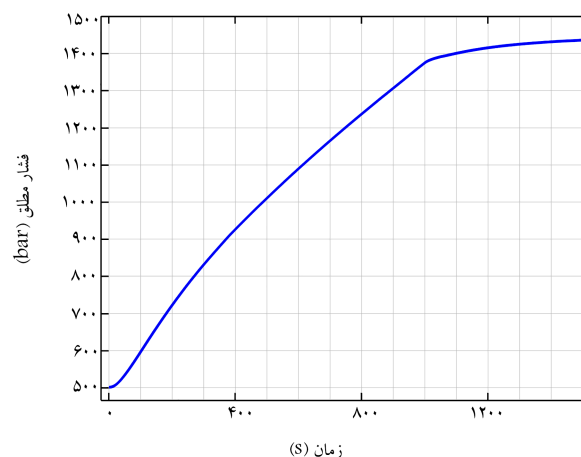


شکل ۱۰. تغییرات فشار در گذر زمان برای گاز آرگون و نیتروژن.

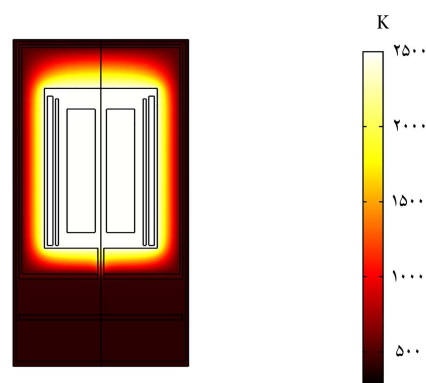
حرارتی گاز در مقایسه با اینرسی سایر اجزای کوره کم تر است؛ اما با دانستن مقدار جرم گاز داخل کوره می توان در خصوص سایر مسائل مثل هزینه ی مربوط به تأمین گاز و توان مصرفی کمپرسور اطلاعات دقیق تری به دست آورد. جرم گاز آرگون و نیتروژن مورد استفاده در داخل کوره در جدول ۱ گزارش شده است.

یکی از مسائل مورد مطالعه در این پروژه، مقایسه تغییرات فشار در اثر تغییر نوع گاز است. با توجه به تفاوت در مقدار ضریب تراکم پذیری گازهای مختلف، انتظار می رود تغییرات چگالی و در نتیجه تغییرات فشار متفاوت باشند. با توجه به شکل ۱۰ تغییرات فشار گاز نیتروژن از گاز آرگون کم تر است (حدود ۱۰۰ بار).

در شکل ۱۱ تغییرات دمایی گازهای آرگون و نیتروژن بر حسب زمان با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج به دست آمده تفاوت چشمگیر و قابل ملاحظه یی میان تغییرات متوسط دما بر حسب زمان برای گاز آرگون و نیتروژن نشان نمی دهد. علت این امر تأثیر کم انتقال حرارت رسانشی و اینرسی حرارتی پایین ماده در فاز گازی است که



شکل ۷. نمودار تغییرات فشار گاز آرگون بر حسب زمان (با استفاده از شرایط مرزی و اولیه پیش فرض).



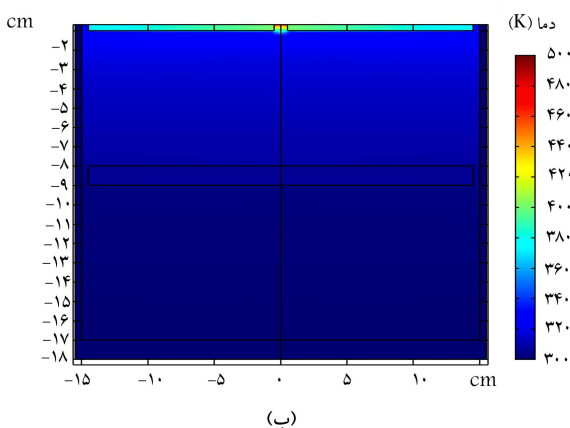
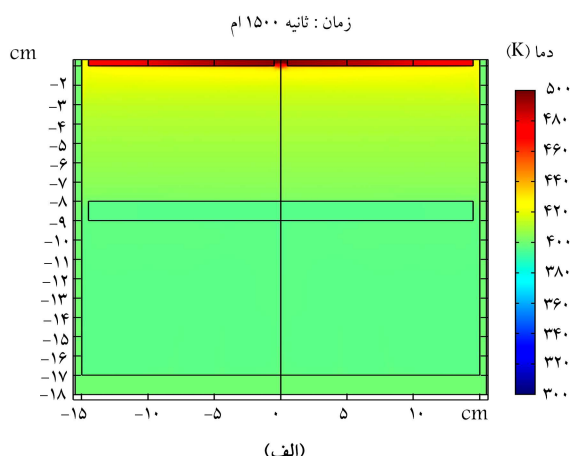
شکل ۸. کانتور توزیع دما در داخل کوره در ثانیه ۱۵۰۰ با استفاده از شرایط مرزی و اولیه پیش فرض.

عمدتاً از نوع رسانشی است. در نتیجه با توجه به مقدار کم رسانایی حرارتی گاز و عایق، زمان زیادی لازم است تا حرارت به بخش های پایین تر نفوذ پیدا کند. در شکل ۹ الف کانتور توزیع سرعت گاز آرگون در داخل کوره، در ثانیه ۵۰۰ نشان داده شده است. در این لحظه، از آن جا که هنوز رفتار کوره به حالت پایا نرسیده است، جریان جابه جایی آزاد در داخل کوره برقرار است و لذا سرعت در ناحیه ی گرم بیشتر است.

از ثانیه ۱۵۰۰ به بعد (شکل ۹ ب)، جایی که رفتار کوره شبه پایا شده است، سازوکار غالب انتقال حرارت تشعشع خواهد بود و جابه جایی آزاد در داخل ناحیه ی گرم ضعیف می شود. با این وجود، در خارج از ناحیه ی گرم، چون مرزها دمای پایینی دارند، کماکان انتقال حرارت جابه جایی آزاد برقرار بوده و نوسانات جریان سیال مشاهده می شود. با توجه به این نکته می توان گفت که رفتار کوره هیچگاه مطلقاً پایا نمی شود و همواره مقدار کوچکی از نوسان در نتایج حل وجود خواهد داشت. (این شرایط که در آن میزان تبادل حرارتی سیستم با محیط اطراف و همچنین تغییرات دمایی ناحیه گرم ثابت شده اما جریان های گردابه یی و نوسانی در آن وجود دارد در این نوشتار حالت شبه پایا نامیده شده است).

## ۲.۸. بررسی تأثیر گاز مورد استفاده در داخل کوره

میزان جرم گاز در واکنش حرارتی سیستم تأثیر زیادی نخواهد داشت چرا که اینرسی



شکل ۱۲. الف) دمای دیواره‌ی آبگردد ۴۰۰ کلوین؛ ب) دمای دیواره آبگردد ۳۰۰ کلوین.

سیال می‌شود. این موضوع مبین حساسیت بالای فشار سیستم به عملکرد سامانه آبگردد و خنک‌کاری است. در چنین شرایطی، سامانه کنترلی کوره بایستی قادر باشد با سازوکار مجزایی فشار تعیین شده در سیستم را تأمین کند.

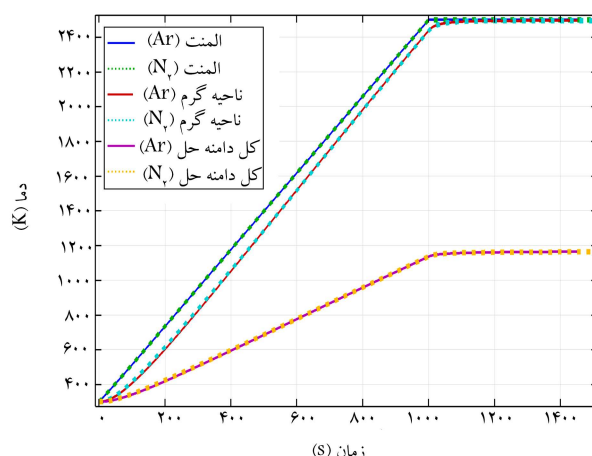
به منظور بررسی علت این پدیده کانتورهای توزیع دما و چگالی سیال در مجاورت سینی‌های مولیدنی زیرین کوره که در نزدیکی دیواره‌ی آبگردد (ناحیه‌ی سرمایشی) قرار دارند ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که علت کم‌تر بودن فشار گاز در حالتی که دمای دیواره آبگردد برابر با ۳۰۰ کلوین است، کم‌تر بودن دمای قسمت‌های مجاور سینی و ناحیه‌ی سرمایشی است.

لازم به ذکر است که در ادامه‌ی حل، در کلیه حالت‌ها، به منظور پیشینه شدن شار حرارتی خروجی از دیواره آبگردد، دمای آن برابر با ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است.

#### ۴.۸. بررسی تأثیر سیر حرارتی بر رفتار سیستم

در برخی از انواع کوره‌های پرس گرم در مقابل المنت حرارتی از یک سیر حرارتی استفاده می‌شود.<sup>[۶۵]</sup> در ادامه، تأثیر عدم وجود سیر و نیز استفاده از دو جنس مختلف گرافیتی و مولیدنی برای آن بررسی شده است. در شکل ۱ موقعیت قرارگیری سیر در هندسه‌ی کوره نشان داده شده است.

در ابتدا چگونگی توزیع جریان و تغییرات سرعت سیال در داخل کوره بررسی شده است. چنانچه در شکل ۱۳ نشان داده شده است، در صورت عدم استفاده از سیر، توزیع سرعت یکنواخت‌تر خواهد بود که این مسئله به معنای انتقال حرارت



شکل ۱۱. بررسی تغییرات دمای سطح المنت، دمای ناحیه‌ی گرم و متوسط گاز در حضور گاز آرگون و نیتروژن.

جدول ۲. مطالعه‌ی تأثیر تغییر شرایط مرزی دیواره آبگردد.

عنوان		دمای دیواره‌ی آبگردد	
		۴۰۰ کلوین	۳۰۰ کلوین
شار حرارتی خروجی از ناحیه سرمایش (W)		۴۵۱۵	۴۸۷۱
		۲۴۹۴	۲۴۹۴
متوسط دمای گاز در کل فضای داخلی (K)		۱۱۶۳	۱۱۰۱
		۱۳۴۷	۱۰۲۳
فشار سیال (bar)		۱۰۲۳	۱۳۴۷

باعث می‌شود تغییر در جرم گاز، اثر قابل توجهی بر رفتار دمایی آن نداشته باشد.

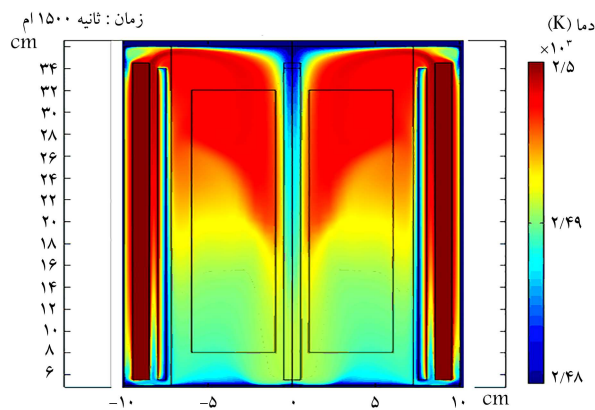
#### ۳.۸. بررسی تأثیر تغییر شرایط مرزی دیواره آبگردد بر پاسخ مسئله

تعیین شرط مرزی مناسب روی دیواره‌ی آبگردد از این جهت که در طراحی مبدل حرارتی نقش دارد حائز اهمیت است. پیش‌تر مسئله برای حالت دمای دیواره ثابت (برابر با ۴۰۰ کلوین) حل شده است. در ادامه تأثیر استفاده از شرط مرزی دما ثابت ۳۰۰ کلوین روی دیواره آبگردد بررسی شده است.

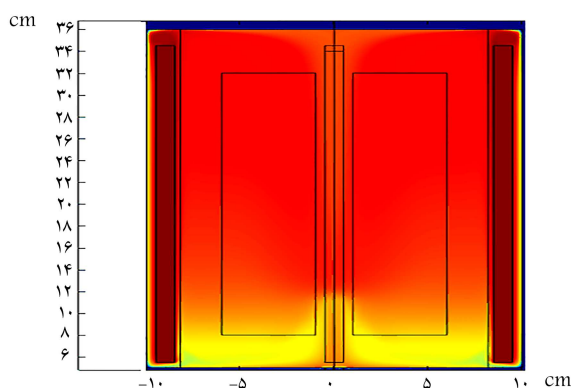
در جدول ۲ شار حرارتی خروجی از دیواره آبگردد، متوسط دمای کل گاز، متوسط دمای ناحیه گرم و فشار حالت شبه پایای سیستم نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در حالت شبه پایای کوره، شار حرارتی خروجی از دیواره آبگردد با تغییر دمای آن از ۴۰۰ به ۳۰۰ کلوین حدود ۱۰ درصد افزایش پیدا کرده است. از سویی، تغییر شرط مرزی دیواره آبگردد، تأثیر به‌سزایی در متوسط دمای ناحیه گرم نداشته است (کم‌تر از ۱ کلوین)؛ اما متوسط دمای گاز در کل فضای کوره، با فرض استفاده از شرط مرزی دما ثابت ۳۰۰ کلوین، در حدود ۶۰ درجه کلوین نسبت به قبل کاهش یافته است.

همچنین فشار حالت شبه پایای سیال در ازای شرط مرزی دمای دیواره ۳۰۰ کلوین و دمای دیواره ۴۰۰ کلوین به ترتیب برابر با ۱۰۴۸ و ۱۴۲۲ بار بوده است. به بیان دیگر کاهش ۱۰۰ درجه‌ی دمای دیواره موجب کاهش ۲۶ درصدی فشار

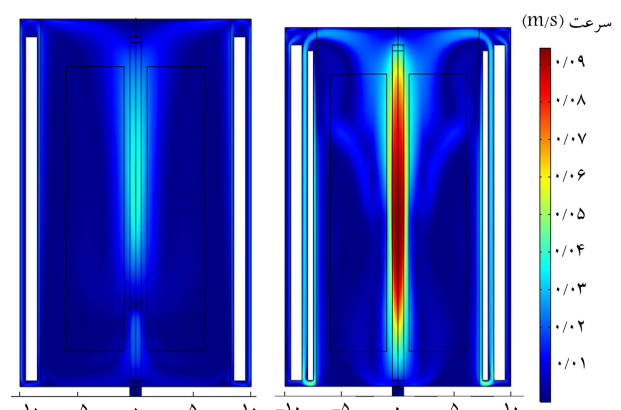




الف) سیر گرافیتی؛ زمان: ۱۵۰۰ ثانیه ام



ب) فاقد سیر گرافیتی.



الف) سیر گرافیتی؛ ب) فاقد سیر گرافیتی.

شکل ۱۳. الف) توزیع اندازه‌ی سرعت سیال در حالت وجود سیر گرافیتی در حالت پایا؛ ب) توزیع اندازه‌ی سرعت سیال در نبود سیر حرارتی در حالت پایا.

جابه‌جایی ضعیف‌تر با قطعه‌ی تعبیه شده در مرکز کوره است. در صورت استفاده از سیر، جریان سیال، در فضای محدود بین سیر و المنت سرعت گرفته و در قسمت بالایی کوره به سمت مرکز کوره پرتاب می‌شود که این امر عامل غیر یکنواختی بیشتر در توزیع سرعت سیال است.

به طریق مشابه، درخصوص توزیع دما، استفاده از سیر باعث می‌شود تا جریان داغ به سمت خط مرکزی کوره هدایت شود. بنابراین در حالتی که از سیر استفاده نشود توزیع دما یکنواخت‌تر است (شکل ۱۴)؛ بنابراین به نظر می‌رسد در شرایطی که نیاز به انتقال حرارت جابه‌جایی با شدت بیشتری باشد، استفاده از سیر می‌تواند مؤثر واقع شود.

در شکل ۱۵، تأثیر هر یک از حالت‌های مورد بحث بر شار حرارتی جذب شده توسط دیواره‌ی سرد بررسی شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، در صورتی که سیر حرارتی در کوره وجود نداشته باشد، شار بیشتری از دیواره آگردد خارج می‌شود. زمانی که سیر وجود نداشته باشد، توزیع دما در ناحیه گرم یکنواخت‌تر شده و مقدار دما نیز بیشتر می‌شود. این موضوع سبب می‌شود تا حرارت بیشتری از ناحیه‌ی گرم به بخش سینی‌های زیرین و ناحیه‌ی دیواره‌ی آگردد منتقل بشود و در نتیجه دمای این نواحی نیز در حالت بدون سیر بیشتر باشد (شکل ۱۶). لذا می‌توان انتظار داشت که نرخ انتقال حرارت خروجی از کوره نیز در حالت بدون سیر بیشتر باشد. همچنین در صورت استفاده از سیر گرافیتی، پیش از رسیدن به حالت شبه پایا مشاهده می‌شود که حرارت بیشتری از دیواره دفع می‌شود (در مقایسه با سیر مولیبدنی). علت این امر را می‌توان تابش بیشتر گرافیت نسبت به مولیبدن و انتقال حرارت از آن به دیواره دانست.

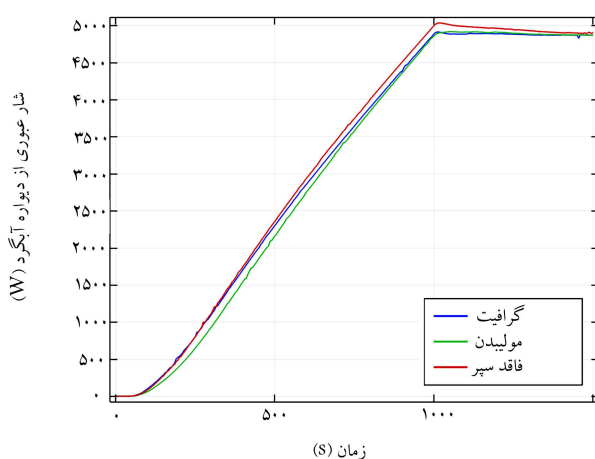
در شکل ۱۷ تأثیر وجود و جنس سیر حرارتی بر فشار گاز آرگون بررسی شده است. با توجه به این که متوسط دمای کل گاز و دمای گاز در ناحیه‌ی گرم در نبود سیر حرارتی بیشتر از سایر حالات است لذا مشاهده می‌شود که فشار نهایی گاز نیز در این حالت بیشتر خواهد بود.

## ۵.۸. بررسی تأثیر مقدار ضریب رسانش حرارتی عایق بر رفتار

### سیستم

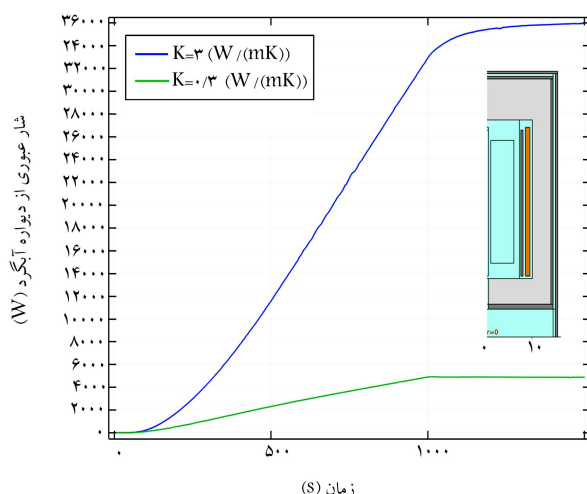
یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد کوره‌های پرس گرم، ضریب رسانش حرارتی عایق مورد استفاده در آن است. استفاده از عایق حرارتی با ضریب رسانشی کوچک، منجر

شکل ۱۴. الف) توزیع دما در حالت وجود سیر گرافیتی در حالت پایا؛ ب) توزیع دما در نبود سیر حرارتی در حالت پایا.

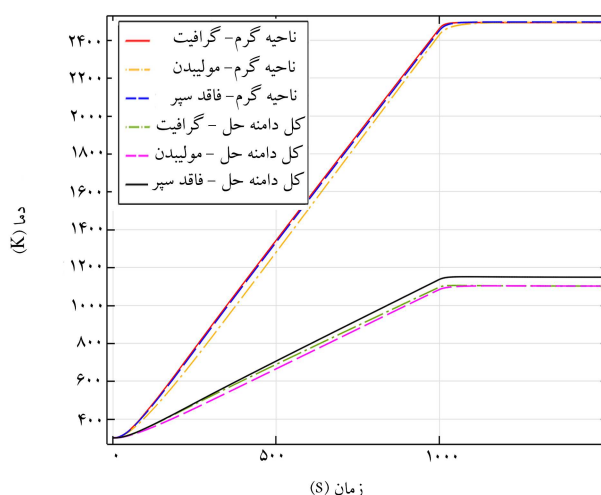


شکل ۱۵. بررسی تأثیر وجود و جنس سیر حرارتی بر شار خروجی از ناحیه سرمایش.

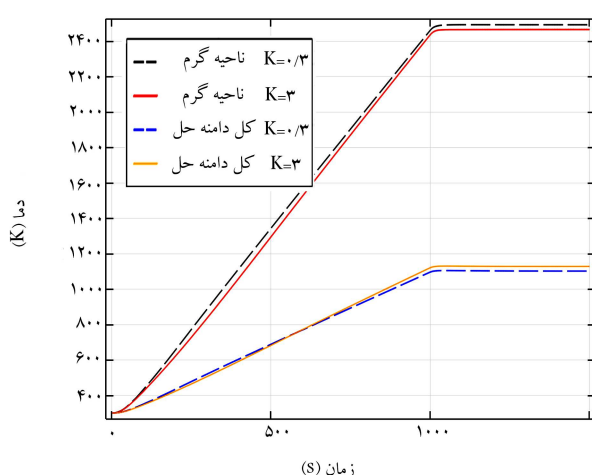
به کاهش میزان اتلاف حرارتی می‌شود. از سویی اگر ضریب رسانش حرارتی عایق بیش از اندازه کوچک باشد، مرحله‌ی سرد شدن محفظه طولانی مدت خواهد بود. تمام نتایجی که پیش‌تر ارائه شده، با فرض استفاده از عایق، با ضریب هدایت حرارتی  $0.3 \text{ W/m.K}$  به دست آمده است. عایق مورد استفاده در کوره باید در برابر تنش‌های حرارتی و چرخه‌های حرارتی از مقاومت مکانیکی خوبی برخوردار باشد و در عین حال تحمل دمای ناحیه گرم را نیز دارا باشد. در کوره‌های دما بالا، از



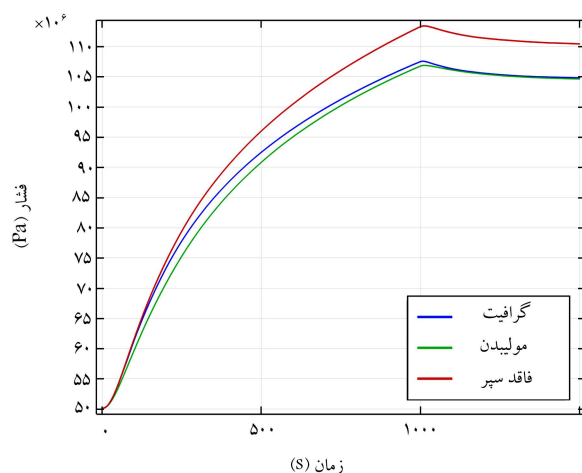
شکل ۱۸. مقایسه‌ی مقدار شار حرارتی خروجی از ناحیه‌ی سرمایش با در نظر گرفتن ضریب رسانش حرارتی ۰/۳ و ۳ وات بر متر کلوین برای عایق.



شکل ۱۶. تأثیر استفاده از سپر حرارتی بر تغییرات دما.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی متوسط دمای گاز در کل هندسه‌ی حل و نیز متوسط دمای گاز در ناحیه‌ی گرم در ازای مقادیر مختلف ضریب رسانش حرارتی عایق.



شکل ۱۷. بررسی تأثیر سپر حرارتی بر فشار گاز آرگون.

محفظه گرم کاهش می‌یابد اما متوسط دمای کل کوره افزایش یافته است.

علت این امر را می‌توان بالاتر رفتن دمای قسمت زیرین کوره (گاز موجود در مجاورت سینی‌های دستگاه) بر اثر افزایش انتقال حرارت از طریق دیواره‌ی عایق به قسمت زیرین دانست (شکل ۲۰).

در شکل ۲۱ کانتور توزیع دما در داخل کوره نشان داده شده است. با افزایش ضریب رسانش حرارتی مشاهده می‌شود که دمای دیواره افزایش یافته و حرارت به سمت ناحیه سرد (قسمت زیرین کوره) نیز منتقل شده است.

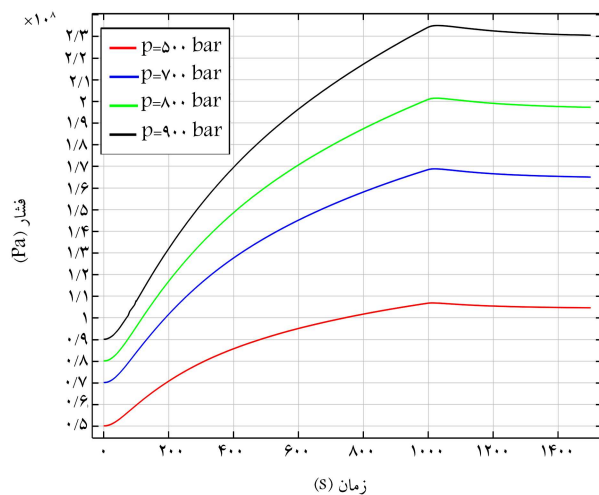
## ۶.۸. بررسی تأثیر تغییر شرایط اولیه بر نتایج مسئله

یکی از عوامل مؤثر بر فشار نهایی گاز داخل کوره در حالت شبه پایا، فشار اولیه است. به منظور بررسی تأثیر فشار اولیه بر پاسخ شبه پایای کوره، مسئله با استفاده از مقادیر مختلف ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ بار برای فشار اولیه حل شده و نتایج به دست آمده با نتیجه حاصل از فشار اولیه برابر با ۵۰۰ بار مقایسه شده است. تغییرات فشار گاز آرگون بر حسب زمان، در ازای مقادیر مختلف فشار اولیه در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

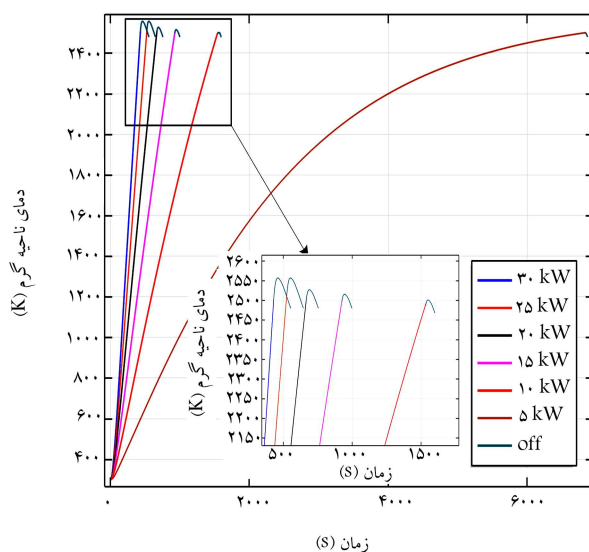
گرافیت به عنوان عایق حرارتی استفاده می‌شود. گرافیت دارای ضریب رسانش بالایی (بزرگ‌تر از ۲۵ وات بر متر کلوین) است. با استفاده از برخی راهکارهای نوآورانه می‌توان ضریب رسانش حرارتی گرافیت را تا حدود  $0.3 \text{ W/m.K}$  یا کمتر کاهش داد. برای پاسخ به این که در صورت استفاده از عایق با ضریب رسانش حرارتی بالا، رفتار سیستم چه تغییری می‌کند، در ادامه و به عنوان نمونه تأثیر استفاده از عایق با ضریب رسانش حرارتی  $3 \text{ W/m.K}$  در حضور گاز آرگون بررسی شده است.

در شکل ۱۸ مقدار شار حرارتی خروجی از ناحیه‌ی سرمایش بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با تغییر ضریب رسانش حرارتی عایق از ۰/۳ به عدد ۳، شار حرارتی دیواره‌ی سرد در حالت شبه پایا از حدود ۴۵۰۰ وات به حدود ۳۶۰۰۰ وات تغییر کرده است. این مسئله به معنی نیاز به سامانه‌ی سرمایشی به مراتب قوی‌تر است که ممکن است با الزامات فنی سازه‌ی کوره سازگار نباشد.

در شکل ۱۹ دمای متوسط محفظه گرم و نیز دمای متوسط کل محفظه برای هر دو حالت ضریب رسانش عایق بررسی شده است. اگرچه تغییرات رفتاری دمای کوره در حالت شبه پایا با تغییر ضریب رسانش حرارتی عایق تغییر زیادی نمی‌کند، بر اساس انتظاری که از عملکرد دستگاه و دقت آن وجود دارد، تغییرات اندک دمای نیز می‌تواند حائز اهمیت باشد. چنانچه انتظار می‌رود، با افزایش ضریب رسانش حرارتی عایق و در نتیجه افزایش شار حرارتی خروجی از دیواره آبگردد، دمای متوسط



شکل ۲۲. تغییرات فشار گاز آرگون بر حسب زمان در ازای مقادیر مختلف فشار اولیه.



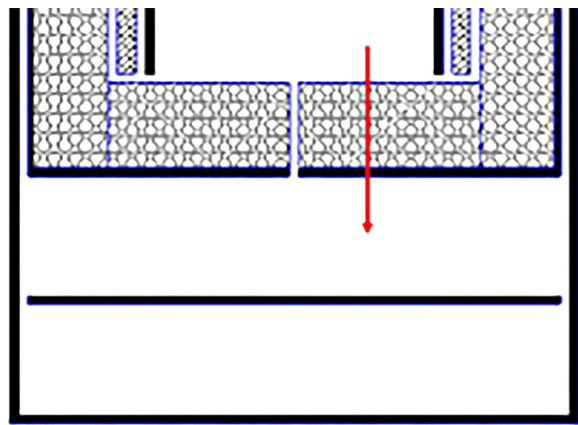
شکل ۲۳. تغییرات متوسط دما در ناحیه گرم با گذر زمان طی دو گام متوالی ناحیه‌ی سبز رنگ، پاسخ سیستم در حالت خاموش بودن المنت را نشان می‌دهد.

شده و در ادامه تغییرات دمای ناحیه گرم و المنت بر حسب زمان مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این قسمت، معیار توقف حل، رسیدن متوسط دمای ناحیه گرم به مقدار  $250^{\circ}\text{C}$  کلون بوده است.

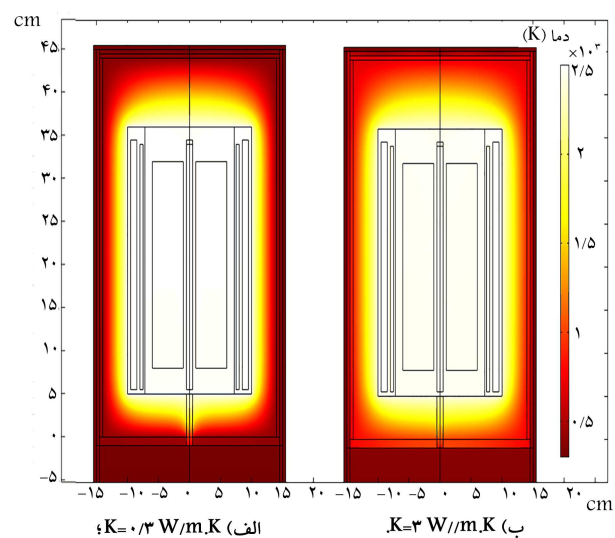
با رسیدن متوسط دمای ناحیه گرم به عدد  $250^{\circ}\text{C}$ ، المنت خاموش شده و رفتار گذرای کوره در لحظات ابتدایی فرایند سرمایش تا جایی که متوسط دمای ناحیه گرم برابر با  $248^{\circ}\text{C}$  کلون (این مقدار به صورت اختیاری انتخاب شده است) شود بررسی شده است.

در این قسمت فشار اولیه کوره برابر با  $80^{\circ}\text{C}$  بار و دمای دیواره آبگرد برابر با  $30^{\circ}\text{C}$  کلون در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۲۳ در حالتی که میزان شار المنت زیاد باشد، دمای ناحیه‌ی گرم به صورت خطی و در مدت زمان کوتاهی به  $250^{\circ}\text{C}$  درجه کلون می‌رسد. در مقابل اگر شار المنت کم باشد (به ویژه در حالت شار ۵ کیلووات) مدت زمان زیادی برای رسیدن به دمای  $250^{\circ}\text{C}$  کلون نیاز است و تغییرات دمای سیستم نیز خطی نیست.

رفتار سیستم پس از خاموشی المنت در تمامی نمودارها با رنگ سبز نمایش



شکل ۲۰. افزایش انتقال حرارت به قسمت زیرین کوره از طریق عایق با افزایش ضریب رسانش حرارتی عایق.



شکل ۲۱. مقایسه‌ی توزیع دما برای دو ضریب رسانش حرارتی مختلف برای عایق.

با توجه به شکل ۲۲ می‌توان گفت که میان مقدار فشار حالت شبه پایای کوره و فشار اولیه گاز آرگون یک رابطه‌ی خطی برقرار است. معادله‌ی ریاضی حاکم بر فشار حالت شبه پایا برحسب فشار اولیه مطابق با رابطه‌ی ۱۷ است. در این رابطه،  $P_s$  معرف فشار حالت شبه پایای کوره و  $P_i$  بیانگر فشار اولیه‌ی کوره برحسب بار است. ضریب رگرسیون این معادله برابر با ۹۹٫۹۶ درصد است.

$$P_s = 3.1317P_i - 528.74 \quad (17)$$

به عنوان مثال چنانچه هدف دست‌یابی به فشار تقریبی  $2000$  بار در حالت شبه پایای کوره باشد، لازم است تا فشار اولیه برابر با  $80^{\circ}\text{C}$  بار انتخاب شود. لازم به ذکر است که در ادامه‌ی مقاله، نتایج ارائه شده بر مبنای فشار اولیه برابر با  $80^{\circ}\text{C}$  بار است. تغییرات فشار اولیه تأثیر قابل توجهی بر سایر نتایج ندارد.

## ۷.۸. بررسی تأثیر تغییر شرایط مرزی المنت بر پاسخ مسئله

پیش‌تر مسئله با فرض شرط مرزی دما ثابت برای المنت حرارتی حل شده و تأثیر استفاده از شرط مرزی شار ثابت روی المنت حرارتی بررسی شده است. به این منظور از مقادیر مختلف شار برای المنت، در بازه ۵ تا  $3^{\circ}\text{C}$  کیلووات با گام ۵ استفاده

جدول ۳. مدت زمان لازم برای تغییرات دمایی در ازای مقادیر مختلف شار، افزایش دما تا ۲۵۰۰ کلوین و کاهش دما به ۲۴۸۰ کلوین.

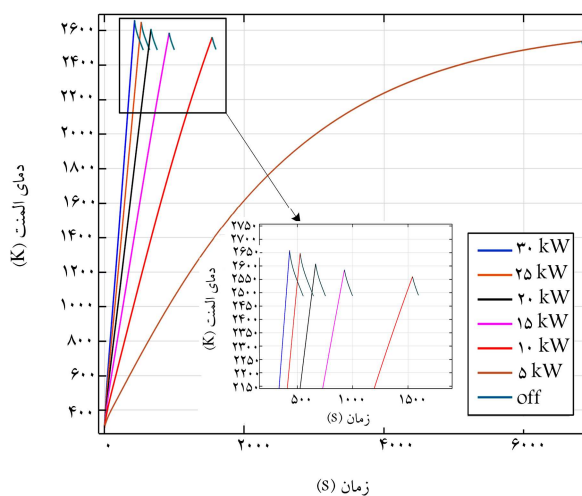
شارالمنت (KW)	زمان رسیدن متوسط دمایی	زمان بازگشت متوسط دمایی
ناحیه گرم به ۲۵۰۰ کلوین	ناحیه گرم به ۲۴۸۰ کلوین	
بر حسب ثانیه	بر حسب ثانیه	
۵	۶۸۳۰	۳۵
۱۰	۱۵۴۰	۵۳
۱۵	۹۲۵	۷۳
۲۰	۶۶۵	۸۹
۲۵	۵۲۵	۱۲۰
۳۰	۴۳۰	۱۲۳

حرارتی پرس گرم به صورت عددی مطالعه شده است. در این مقاله، به منظور افزایش دقت حل مسئله از مدل ترمودینامیکی گاز واقعی استفاده شده و معادلات پیوستگی، مومنتوم، آشفستگی و انرژی به صورت همزمان توسط نرم افزار کامسول حل شده و انتقال حرارت با استفاده از رسانش، جابه جایی و تشعشع انجام شده است. همچنین ضمن مطالعه رفتار کوره بر اساس شرایط مرزی و اولیه پیش فرض، تأثیر تغییر جنس گاز، دمای دیواره آبرگرد، وجود یا عدم وجود سپر حرارتی، شرایط مرزی المنت و نیز فشار اولیه بر رفتار کوره‌ی حرارتی پرس گرم بررسی شده است.

تغییر جنس گاز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار دمایی کوره نداشته و فشار حالت شبه پایای کوره را نیز چندان دستخوش تغییر نمی‌کند. با این وجود، مقدار جرم کل گاز موجود در داخل کوره با افزایش چگالی گاز بیشتر می‌شود که این مسئله در اندازه قیمت کمپرسور و دیگر تجهیزات تولید فشار مؤثر است.

کاهش دمای دیواره‌ی آبرگرد بر متوسط دمای محفظه‌ی گرم تأثیر به سزایی ندارد، اما کاهش ۱۰۰ درجه‌ی دمای آن منجر به افزایش ۱۰ درصدی حرارت خروجی از کوره و نیز کاهش ۶۰ درجه‌ی متوسط دمای کل کوره می‌شود. مهم‌ترین تأثیر عملکرد سامانه آبرگرد بر فشار نهایی کوره است. با تغییر دمای دیواره آبرگرد از ۴۰۰ کلوین به مقدار ۳۰۰ کلوین، فشار حالت شبه پایای کوره ۳۲۴ بار (در حدود ۲۵ درصد) کاهش یافته است.

استفاده از سپر حرارتی، ضمن آن که منجر به کاهش حرارت خروجی از کوره می‌شود، چگونگی توزیع سرعت و دما در داخل کوره را دستخوش تغییر می‌کند. وجود سپر حرارتی باعث می‌شود که جریان داغ به سمت خط مرکزی کوره هدایت شود. چنانچه از سپر حرارتی استفاده نشود، توزیع دما و سرعت یکنواخت‌تر است. تغییرات ضریب رسانش حرارتی عایق تأثیر به سزایی بر دمای حالت شبه پایای کوره ندارد، اما منجر به تغییرات قابل توجهی در مقدار حرارت خروجی از کوره می‌شود. فشار اولیه‌ی کوره، با فشار نهایی و شبه پایای کوره یک رابطه‌ی خطی دارد. چنانچه از شرط مرزی شار ثابت بر روی المنت استفاده شود، با افزایش شار حرارتی، مدت زمان رسیدن دمای داخل کوره به یک مقدار مشخص، کاهش می‌یابد. چنانچه شارالمنت بالا باشد، حتی پس از خاموش شدن المنت نیز، به دلیل بالاتر بودن دمای المنت نسبت به گاز داخل کوره، افزایش دمای محفظه گرم متوقف نمی‌شود؛ اما اگر بزرگی شارالمنت کوچک باشد، فرایند سرمایش بلافاصله آغاز می‌شود.



شکل ۲۴. متوسط دمای گاز بر روی المنت حرارتی در گذر زمان در شرایط شارهای ثابت ۵ تا ۳۰ کیلووات روی المنت.

داده شده و به منظور بررسی دقیق‌تر، تصویر آن بزرگ‌نمایی شده است. در مواردی که شارالمنت زیاد بوده، حتی پس از خاموش شدن المنت نیز برای مدتی دمای ناحیه‌ی گرم افزایش یافته است. با توجه به شکل ۲۴ و مقایسه آن با شکل ۲۳ می‌توان گفت تأخیر زمانی پاسخ سیستم، تفاوت دمایی بین المنت و ناحیه‌ی گرم در زمانی است که دمای ناحیه‌ی گرم به ۲۵۰۰ می‌رسد (دمای المنت بالاتر است)؛ اما این پدیده در شارهای پایین المنت (به ویژه شار ۵ کیلووات) مشاهده نمی‌شود.

در نتیجه مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا متوسط دمای ناحیه گرم از ۲۵۰۰ به ۲۴۸۰ کلوین برسد. در جدول ۳ مدت زمان رسیدن ناحیه گرم به ۲۵۰۰ کلوین و نیز مدت زمان کاهش دما از ۲۵۰۰ به ۲۴۸۰ کلوین در حالت‌های مختلف گزارش شده است.

## ۹. نتیجه‌گیری

کوره‌ی حرارتی پرس گرم یکی از فرایندهای مورد استفاده در متالورژی پودر است که در دما و فشار بالا کار می‌کند. از این رو مطالعه‌ی تجربی عملکرد دستگاه هزینه‌ی زیادی در بر دارد. در این پژوهش، عملکرد هندسه خاصی از یک کوره‌ی

## پانویسها

1. hot isostatic pressure (HIP)
2. forging
3. quenching
4. tempering
5. dwell
6. dwell time
7. tungsten-rhenium
8. rhodium
9. akerberg
10. 2-D axisymmetric
11. avure technologies
12. Xiaoping
13. maniere
14. sintering furnace
15. chandras
16. non-isothermal flow
17. heat transfer with surface-to-surface radiation
18. graphite felt
19. shield
20. hot zone
21. skewness
22. aspect ratio
23. Catton
24. evans
25. Van Eck

## منابع (References)

1. Brook, Richard.J., ed. "Concise encyclopedia of advanced ceramic materials", Elsevier (2012).
2. Bocanegra-Bernal, M. "Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics", *Journal of Materials Science*, **39**(21), pp. 6399-6420 (2004).
3. Gopinathan, M., Mehra, R.K., and Runkle, J.C. "Hot isostatic pressing furnaces", *IEEE Control Systems Magazine*, **20**(6), pp. 67-82 (2000).
4. Moritoki, M. and et al. "Heat insulator for hot isostatic pressing apparatus", Kabushiki Kaisha Kobe Seiko Sho, Kobe, Japan (1986).
5. Nakai, t., Yoneda, M., Masuoka, I. and et al. "Hot isotropic pressure devise", Kobe Steel, Ltd., Kobe-shi (JP) (2014).
6. Ahlfors, M. and et al. "High pressure heat treatment-phase transformation under isostatic pressure in HIP", *Hot Isostatic Pressing: HIP'17*, **10**, p. 149 (2019).
7. Åkerberg, A., *CFD Analyses of the Gas Flow Inside the Vessel of a Hot Isostatic Press* (2012).
8. Wu, X., Zhang, Y., He, X. and et al.. "Analysis of flow and heat transfer in the furnace of hot isostatic press", *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, **51**(6), pp. 39-44 (2016).
9. Manière, C., Zahrah, T. and Olevsky, E.A. "Fluid dynamics thermo-mechanical simulation of sintering: uniformity of temperature and density distributions", *Applied Thermal Engineering*, **123**, pp. 603-613 (2017).
10. Chandras, A. and Sonawane, C. "Numerical simulation of hot isostatic pressing process utilized during sintering of tool inserts", in *Advances in Industrial and Production Engineering*, Springer. pp. 101-115 (2019).
11. Bosque, E., Trociewitz, U. and English, L. "An Overpressure furnace: understanding performance and analysed design improvements", *In Excerpt From the Proceedings of the 2019 COMSOL Conference*, Boston (2019).
12. Redlich, O. and Kwong, J.N. "On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. fugacities of gaseous solutions", *Chemical Reviews*, **44**(1), pp. 233-244 (1949).
13. Barati, H. and et al. "Assessment of different turbulence models for the motion of non-metallic inclusion in induction crucible furnace", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing (2016).
14. Mikhailenko, S.A., Miroshnichenko, I.V. and Sheremet, M.A. "Thermal radiation and natural convection in a large-scale enclosure heated from below: Building application", *In Building Simulation*, Springer (2021).
15. Tighchi, H.A., Sobhani, M. and Esfahani, J.A. "Effect of volumetric radiation on natural convection in a cavity with a horizontal fin using the lattice boltzmann method", *The European Physical Journal Plus*, **133**(1), pp. 1-18 (2018).
16. Li, R. and et al. "Effect of surface radiation on natural convective flows and onset of flow reversal in asymmetrically heated vertical channels", *International Journal of Thermal Sciences*, **65**, pp. 9-27 (2013).
17. Catton, I. "Natural convection in enclosures", *In International Heat Transfer Conference Digital Library*, Begel House Inc (1978).
18. Evans, L., Reid, R. and Drake, E. "Transient natural convection in a vertical cylinder", *AIChE Journal*, **14**(2), pp. 251-259 (1968).
19. Van Eck, R., Klep, M. and Van Schijndel, J. "Surface to surface radiation benchmarks", *In Proceedings of the Comsol Conference*, Munich, Germany (2016).