

## استفاده از گازهای صنعتی به عنوان سوخت جایگزین در کوره‌های باز حرارتی (مطالعه احتراقی - ترمودینامیکی)

بهار فیروزآبادی  
استاد - دانشکده مکانیک  
دانشگاه صنعتی شریف  
firoozabadi@sharif.ir

علی حکاکلی فرد  
استادیار - دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی شریف  
ahakaki@sharif.ir

محسن صفاری پور  
محقق پسادکتر - دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه صنعتی شریف  
mohsensp@mech.sharif.ir

### چکیده

ایده کاربرد این گازها به عنوان سوخت از دهه هشتاد میلادی مطرح بوده اما همواره با محدودیت‌هایی نظیر شیبه احتراق آن‌ها، نوع محفظه احتراقی و نحوه جداسازی ناخالصی‌های ذکر شده مواجه بوده است. در مقیاس صنعتی تا حدی و در بعضی از کشورهای صنعتی بهره‌مندی از گازهای گرم خروجی از سیستم آگزوز کوره‌های ذوب فولاد و سایر کوره‌ها برای مصارف گرمایش مجزا و ناحیه‌ای گزارش شده است.

احتراق دمابالا، اکسی فیول و شیوه‌های نوین گازی سازی از گام‌های مؤثر در کمینه‌سازی اثرات جانبی فوق‌الذکر استفاده از گازهای بازبافتی صنعتی است [1]. نحوه استفاده از این سامانه‌های احتراقی به‌طور مفصل در منابع مختلفی مورد بحث قرار گرفته است، اما همواره دارای ضعف و نواقصی بوده است. به‌طور عمده می‌توان به عدم استفاده مستقیم این گازها که همواره به‌صورت ترکیبی، با جداسازی ناخالصی‌ها و افزایش درصدی بعضی از گازها درون آن اشاره کرد. برای اولین بار از سیستم احتراق دمابالا و یا اکسی فیول برای احتراق ترکیبی خاص از این گازها در پژوهش آقای ژانگ و همکاران [2] مورد استفاده قرار گرفت. پژوهش صورت گرفته توسط آقای ژانگ و همکاران [2] شامل سین گس حاصل از فرایند گازی سازی و بقیه گازهای رایج صنایع فولاد نبود و در مقیاس آزمایشگاهی صورت گرفت. علاوه بر کمبودهای ذکر شده به نوع ناخالصی‌های موجود در این گازها توجه نشده است و گازی که مورد استفاده قرار گرفته بود بعد از جداسازی اجزا نامطلوب و صرف هزینه هنگفت خالص‌سازی صورت گرفت. برای اولین بار در مقیاس آزمایشگاهی، صنعتی و عددی وجود این ناخالصی‌ها به‌صورت ترمودینامیکی در کوره‌های باز حرارتی فولاد در کار آقای لیو و همکاران [3] مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. پس از آن آقای صفاری پور و همکاران [4] سیستم احتراقی مورد مطالعه توسط آقای لیو و همکاران [2] را اعتبارسنجی و به این سیستم گازهای دیگر را نیز اضافه کردند. در کاری دیگر آقای صفاری پور و همکاران [5] وجود ذرات ناخالص موجود را در فرایند احتراقی این گازهای صنعتی مورد مطالعه قراردادند. در این پژوهش به‌صورت اجمالی این سیستم احتراقی مدل‌سازی شده است. علاوه بر شبیه‌سازی احتراقی، بعضی دیگر از ناخالصی‌های موجود در این گاز مورد مطالعه ترمودینامیکی قرار گرفته است تا سایر اثرات و واکنش‌های ناخواسته این ناخالصی‌ها با مواد نسوز و عایق حرارتی داخل کوره و سطح فولاد مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

### مشخصات کوره باز حرارتی فولاد

کوره باز حرارتی فولاد با مشخصات نشان داده شده در شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. این کوره دارای مشخصات آزمایشگاهی بوده که فولاد به‌صورت اسلب در آن قرار گرفته و طبق نوع آلیاژ به‌کاررفته در فولاد تا رسیدن به دمای پلاستیک حرارت می‌بیند. علاوه بر مشخصات ذکر شده

استفاده از گازهای بازبافتی از صنعت برای افزایش بازده انرژی روزبه‌روز از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. این روش می‌تواند جایگزین مطمئنی برای کاهش مصرف سوخت و بسیاری از آلاینده‌های صنعتی باشد. در این پژوهش، به‌طور مختصر به نحوه استفاده از این گازها در کوره‌های باز حرارتی فولاد اشاره شده است. نتایج بررسی‌ها، عملی بودن استفاده از این گازهای دارای ارزش حرارتی پایین را به‌وسیله مشعل‌های احتراقی دمابالا را نشان داده است. اما از طرفی دیگر بهره‌مندی از این گازها به دلیل شیوه‌های مختلف تولید آن‌ها همواره دارای ریسک بوده است. نوع سوخت اصلی و اینکه این گازها بر اساس چه فرایندی تولید شده‌اند رابطه مستقیمی با ارزش حرارتی آن‌ها و وجود سایر ناخالصی‌های موجود در این گازها دارد. از میان این گازها، سین گاز و گاز کوره‌های ذوب فولاد را می‌توان به‌راحتی و با به‌کارگیری تمهیداتی به‌عنوان سوخت جایگزین در کوره‌های باز حرارتی فولاد استفاده کرد. نتایج به‌دست آمده نشان داده است که در این سیستم احتراقی، گاز کوره‌های ذوب آهن به دلیل داشتن ارزش حرارتی پایین و مقادیر زیادی ترکیبات نیتروژن به‌راحتی قابل اشتعال نبوده و مشکلات متعدد دیگری را به سیستم احتراقی اضافه می‌کنند.

کلمات کلیدی: سوخت جایگزین، سوخت و احتراق، احتراق دمابالا، سین گاز، گاز کوره ذوب فولاد، گاز کوره کک سازی

### مقدمه

همواره مبحث نگهداشت انرژی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت به‌منظور کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌عنوان ملزومات جوامع پیشرفته بشری مطرح بوده است. در کشورهای پیشرفته مانند سوئد که دسترسی به منابع سوخت‌های فسیلی وجود ندارد، این رویکرد با جدیت تمام در راستای جایگزینی این سوخت‌ها از طریق کاهش مصرف و بیشینه کردن بازبافت انرژی صورت می‌گیرد. بخشی از این جایگزینی می‌تواند به‌صورت استفاده از گازهای بازبافتی از سایر صنایع مانند فولاد، کک سازی و زیست‌توده مطرح شود. اما بهره‌مندی مستقیم از این منابع سوختی به‌آسانی سوخت‌های فسیلی رایج نیست. ارزش حرارتی پایین، دارا بودن ناخالصی‌های مختلف به‌صورت ترکیبات کربن فعال، قیر، فلزات قلیایی، کلر، گوگرد، پتاسیم و سایر فلزات از معضلات این نوع سوخت‌هاست. به‌طور مثال، ترکیبات گاز حاصل از گازی سازی زیست‌توده وابسته به نوع زیست‌توده و فرایند تولید آن است. در مثالی دیگر می‌توان به وجود مقادیر زیادی گاز نیتروژن در بعضی از این گازهای صنعتی نام برد که دارای خاصیت خنثی در فرایند احتراقی بوده و آلاینده‌گی ناکس را به همراه خواهد داشت.

این کوره دارای سیستم احتراقی دمابالا بوده که دارای مشعل‌های مجهز به سیستم احتراقی غیر پیش آمیخته می‌باشد. داده‌های گازهای به‌کاررفته در این پژوهش به‌صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

مدل احتراقی:

$$P(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int_0^1 f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1} df} \quad (1)$$

$$\alpha = \tilde{f} \left( \frac{\tilde{f}(1-\tilde{f})}{\tilde{f}^2} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\beta = (1-\tilde{f})\alpha \quad (3)$$

$$\bar{\rho} = \left( \int_0^1 \frac{P(f)}{\rho(f, \tilde{h})} df \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k \right) + \bar{\omega}_k \quad (5)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, N$

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_f - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_{ex} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \bar{\rho} g \quad (7)$$

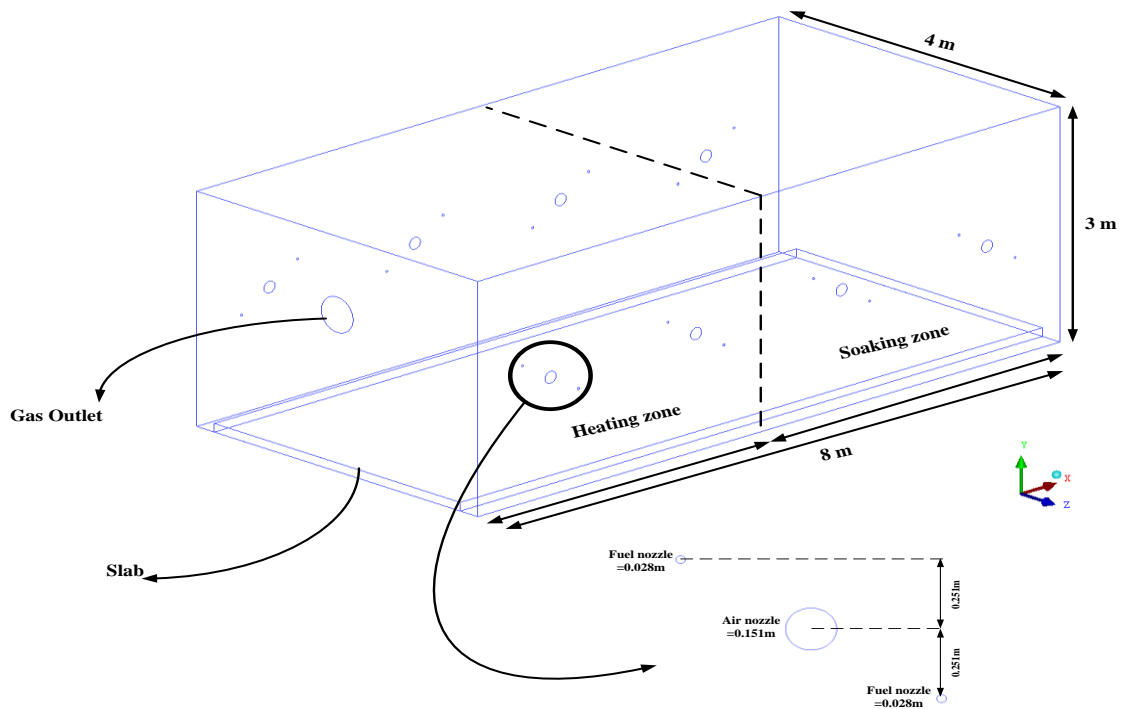
$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h} \right) + S_h \quad (8)$$

**مدل احتراقی-ترمودینامیکی**

مدل احتراقی-ترمودینامیکی در پژوهش حاضر بر اساس کوپلینگ بین نرم‌افزارهای ANSYS FLUENT 18.0، MATLAB 9.3 و Thermo-Calc صورت گرفته است. این کوپلینگ بر اساس ذخیره‌سازی داده‌های سیالاتی در فضای محاسباتی برای هر المان و تطبیق آن با داده‌های ترمودینامیکی در سطح تماس گازهای حاصل از احتراق و فلز بر اساس معادلات زیر به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است [6-9].

جدول ۱: مشخصات سوخت‌های به‌کاررفته در این پژوهش

ترکیبات گاز [درصد حجمی]	نوع سوخت			
	گاز مرجع [2]	سین گاز	گاز کوره ذوب‌آهن	گاز کوره کک سازی
CH <sub>4</sub>	12.9	-	-	26.0
H <sub>2</sub>	25.5	50.0	2.1	58
O <sub>2</sub>	-	-	-	-
N <sub>2</sub>	24.8	-	52.3	5.0
CO	23.7	50.0	19.9	5.0
CO <sub>2</sub>	10.6	-	22.7	1.0
H <sub>2</sub> O	1.3	-	3.0	2.0
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.2	-	-	-
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	-	-	3
ارزش حرارتی [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	6	10	2.7	18



شکل ۱- شماتیک شکل کوره باز حرارتی فولاد

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \bar{\rho}\varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$\mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.09, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \text{ and } \sigma_\varepsilon = 1.3. \quad (13)$$

مدل ترمودینامیکی:

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_{p(i)} T^{p(i)} \quad (14)$$

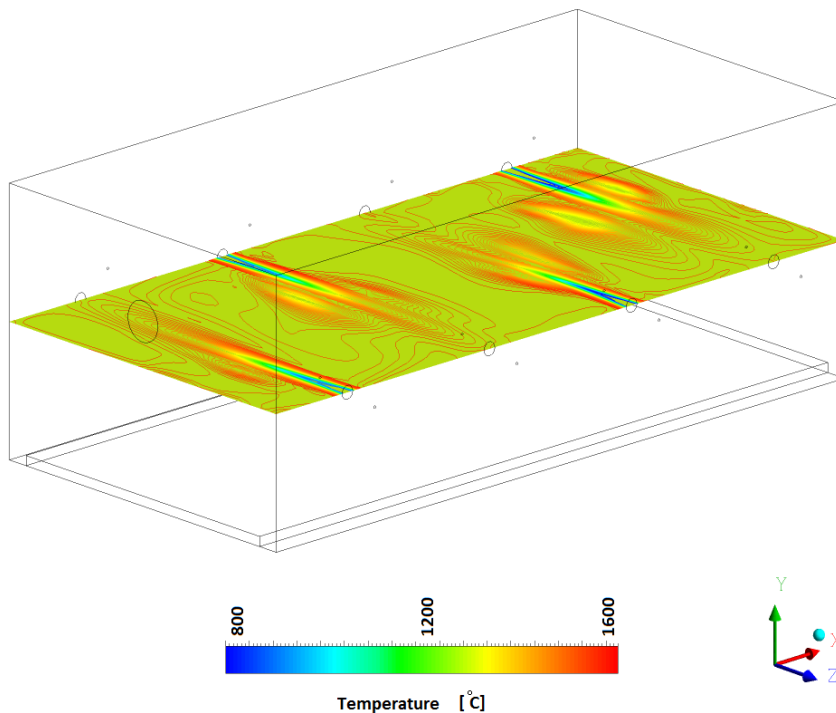
$$\Delta H(T) = H_{298}^0 + \int_{298}^T C_p(T) dT \quad (15)$$

$$\Delta S(T) = S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{C_p(T)}{T} dT \quad (16)$$

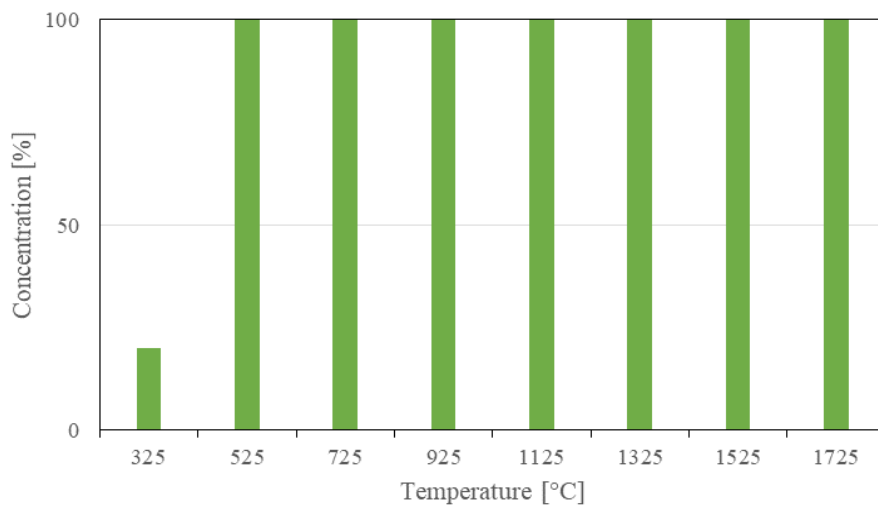
$$\Delta G(T) = \Delta H(T) - T\Delta S(T) \quad (17)$$

### نتایج و بحث

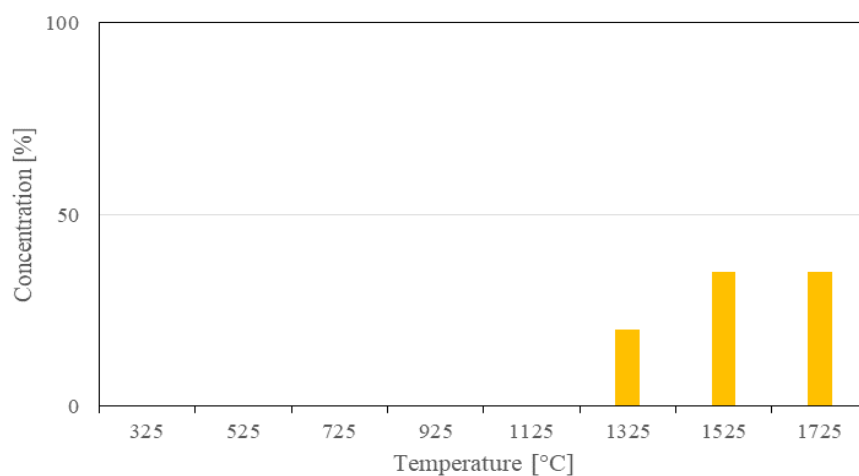
به منظور بررسی و مطالعه سیستم احتراقی-ترمودینامیکی گازهای صنعتی نمودار شکل‌های ۲-۵ ارائه گردیده است. نمودار شکل شماره ۲ به راحتی و آشکارا پخش نسبتاً یکنواخت دما را در صفحه اتصال مشعل‌ها نشان می‌دهد. این پخش یکنواخت دما بیانگر کارآمدی سیستم احتراقی دمابالا در توزیع یکنواخت حرارت در سراسر کوره با حرارتی فولاد است. این یکنواختی دما بیشتر زمانی بروز می‌کند که جت فعال شعله‌های غیر پیش آمیخته در مرکز فضای کوره به هم نزدیک می‌شوند. در شکل‌های شماره ۳-۵ به دلیل بررسی‌های قبلی در مراجع [4, 5] به بیان تنها ترکیبات فسفات و نیز ترکیب آن‌ها با مواد عایق حرارتی سطح داخلی کوره اکتفا شده است. از آنجاکه در این پژوهش کلیه گازهای صنعتی مورد مطالعه قرار گرفته است و در بعضی از این گازها به خصوص سین گاز حاصل از چوب ترکیبات فسفات نیز وجود دارد نمودار شکل‌های ۳-۵ ارائه شده است.  $P_2O_5$  یکی از این اکسیدهاست که بسیار فعال بوده و قابلیت ترکیب با عایق نسوز که  $CaO$  و  $Al_2O_3$  را دارد. شکل شماره ۳ نشان‌دهنده  $P_2O_5$  که رفتار آن به تنهایی و در صورت عدم ترکیب با مواد عایق نشان داده شده است. از این شکل به راحتی قابل مشاهده است که این اکسید در دمای بالاتر از ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد به فاز گاز تبدیل شده و عملاً برای سیستم احتراقی نمی‌تواند مشکلی ایجاد کند و احتمال ترکیب آن با آلیاژ فولاد بسیار ضعیف است. از طرف دیگر اگر  $P_2O_5$  با  $CaO$  و  $Al_2O_3$  ترکیب شود، احتمال تغییر فاز آن از جامد به گاز بسیار کمتر شده و می‌تواند در نواحی خاصی از کوره متمرکز شده و با آلیاژ فولاد ترکیبات اکسید خاصی دهد که به راحتی قابل جدایش از سطح فولاد نباشد. این تغییر فاز از جامد به گاز به ترتیب در نمودار شکل‌های ۴ و ۵ برای  $CaO$  و  $Al_2O_3$  نمایش داده شده است.



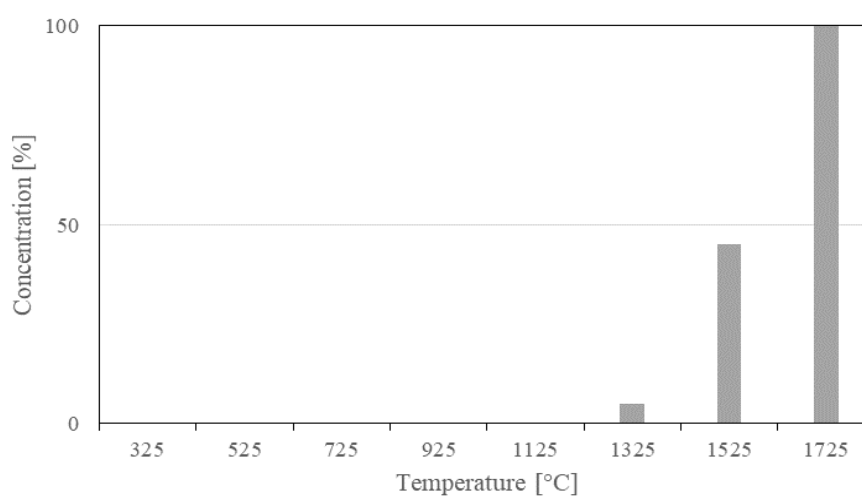
شکل ۲- توزیع دما برای گاز مرجع و در صفحه اتصال مشعل‌های غیر پیش آمیخته [4, 5]



شکل ۳- نمودار تغییر فاز ناخالصی  $P_2O_5$  در دماهای متناسب با کوره باز حرارتی فولاد



شکل ۴- نمودار تغییر فاز ناخالصی  $P_2O_5+CaO$  در دماهای متناسب با کوره باز حرارتی فولاد



شکل ۵- نمودار تغییر فاز ناخالصی  $P_2O_5+Al_2O_3$  در دماهای متناسب با کوره باز حرارتی فولاد

نتیجه گیری

$u_p$	Particle velocity	$[m/s]$
$\bar{Y}_k$	Favre-Averaged mass fraction of species	$[-]$
$\mu$	Dynamic viscosity of gas flow	$[kg/m.s]$
$\bar{\rho}$	Reynolds-Averaged density of species	$[kg/m^3]$
$\rho_f$	Density of gas mixture	$[kg/m^3]$
$\rho_p$	Density of particle	$[kg/m^3]$
$\bar{\tau}_{ij}$	Viscous diffusion tensor	$[\frac{kg}{m^2.s^2}]$
$\bar{\omega}_k$	Net production rate of species	$[\frac{kg}{m^3.s}]$

در استفاده از گازهای صنعتی جایگزین به جای سوخت اصلی، بایستی سیستم احتراقی-ترمودینامیکی را به صورت همزمان بررسی کرد. بررسی همزمان این دو سیستم نه تنها باعث کشف اثرات جانبی سیستم طراحی شده را بر سایر سامانه های درگیر دیگر نشان می دهد بلکه به راحتی می تواند از سرمایه گزاری های گزاف آینده نیز جلوگیری کند. این سیستم احتراقی با کاربرد مجدد گازهای صنعتی می تواند نقش بسیار مهمی در کاهش آلودگی های زیست محیطی در شهرهای صنعتی بازی کند. نتایج به دست آمده در تحقیقات گذشته ثابت کرده بود که گازهای دارای ارزش حرارتی پایین نیازمند دستگاہی است که با بازیاب حرارتی سطح دمای سیستم را بالا ببرد. تا سیستم احتراقی بتواند به راحتی مکانیزم خوداشتعالی را برای این گازها فراهم کند. وجود ناخالصی ها چه به صورت مجزا و چه به صورت سایر ترکیبات بایستی به درستی مورد مطالعه قرار گیرد تا سطح فعالیت آن ها و میل ترکیبی آن ها با آلیاژهای فولاد به درستی شناخته شود. این شناسایی می تواند هزینه های هنگفت صنایع فولاد و سایر صنایع وابسته برای جداسازی اکسیدها از سطح فولاد را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد.

مراجع

- 1- Weber, R., Smarta, J.P., Kamp, W., 2005, "On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air", *Proceedings of the Combustion Institute*, **30**, pp. 2623–2629.
- 2- C. Zhang, T. Ishii, and S. Sugiyama, "Numerical Modeling of the Thermal Performance of Regenerative Slab Reheat Furnaces," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 32, no. 6, pp. 613–631, 1997.
- 3- H. Liu, M. Saffaripour, P. Mellin, C. E. Grip, W. Yang, and W. Blasiak, "A thermodynamic study of hot syngas impurities in steel reheating furnaces - Corrosion and interaction with oxide scales," *Energy*, vol. 77, pp. 352–361, 2014.
- 4- M. Saffaripour, M. Ersson, L. T. I. Jonsson, N. Andersson, M. H. Saffaripour, and P. G. Jönsson, "On the Implementation of Producer Gases as Alternative Fuels in Steel Reheating Furnaces," in *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2015.
- 5- M. Saffaripour, N.Å.I Andersson, M. Ersson, L. T. I. Jonsson, J. Niska, A. Rensgard, and P. G. Jönsson, "The Behavior Of Impurities During Producer Gas Implementation As Alternative Fuel In Steel Reheating Furnaces: A Cfd And Thermo-Chemical Study," in *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2016.
- 6- "ANSYS Fluent Theory Guide," vol. 15317, no. November, p. 514, 2013.
- 7- P. S. B. Sundman, "TCCS (Thermo-Calc Classic Version S) Users' Guide," *Found. Comput. Thermodyn.*, p. 509, 2008.
- 8- S. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow," *Series in computational methods in mechanics and thermal sciences*. pp. 1–197, 1980.
- 9- P. M. Walsh, D. J. Mormie, and B. F. Piper, "Size distribution of ash particles formed during combustion of low-sulfur residual fuel oil in an electric utility boiler," pp. 1231–1236, 1992.

فهرست علائم

$F_D$	Inverse of relaxation time	$[1/s]$
$F_{ex}$	Other forces per unit mass of particle	$[m/s^2]$
$g$	Gravity	$[m/s^2]$
$\bar{h}$	Favre-Averaged enthalpy	$[\frac{J}{kg}]$
$\bar{P}$	Reynolds-Averaged pressure	$[\frac{kg}{m.s^2}]$
$Pr$	<u>Prandtl number</u>	$[-]$
$S_h$	Other volumetric heat sources	$[\frac{w}{m^3}]$
$u_f$	Fluid flow velocity	$[m/s]$
$\tilde{u}_i$	Favre-Averaged gas mixture velocity	$[m/s]$