

تعیین توزیع دما در شمش خروجی از کوره کف گرد پیش گرم

عبدالرضا صفی خانی
دانشجوی کارشناسی ارشد

قاسم حیدری نژاد
دانشیار

بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

کوره کف گرد پیش گرم شمش فولاد در کارخانه لوله سازی اهواز بصورت عددی مدل سازی شده و در قالب یک کد کامپیوتری مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. دمای مناطق مختلف کوره که بعنوان شرایط مرزی برای حل عددی مورد نیاز است، با توجه به اندازه گیری های انجام شده توسط ترموکوپلهای نصب شده در مناطق مختلف کوره پیش گرم معین می گردد. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان می دهد که سرعت حرکت شمش در داخل کوره و شار گرمایی داده شده از طریق مشعلها مهمترین عوامل در تنظیم دمای نقاط مختلف شمش می باشند. شمش در دمای محیط وارد کوره می شود ولی توزیع مطلوب دما در لحظه خروج شمش اهمیت زیادی دارد به طوری که از سویی دمای مغز شمش باید باندازه کافی بالا باشد تا عملیات نورد براحتی صورت گیرد و غلطکها شکسته نشوند و از سوی دیگر دمای سطح شمش نیز باید آنقدر پایین باشد تا از اکسید شدن بیش از حد سطح شمش جلوگیری شود. با انجام آزمایشات عددی، بهترین مجموعه از عوامل مؤثر مشخص و معرفی می شوند. در سایر موارد گرچه زمان حضور شمش ممکن است کاهش یابد اما یا دمای مغز به حد کافی بالا نمی باشد یا در صد بسیار بالایی از سطح شمش اکسید می شود.

در بهترین شرایط ۱٫۲ درصد اکسیداسیون در سطح شمش حاصل می شود. با کاهش زمان حضور به میزان ۱۵ درصد که مستلزم افزایش دمای مناطق مختلف کوره است مقدار اکسیداسیون به ۴ درصد افزایش می یابد. مشابه شرایط استفاده شده در محاسبات، در کارخانه لوله سازی اهواز نیز اجراء شده که دماهای اندازه گیری شده برای سطح و مغز شمش تطابق خوبی را با مقادیر محاسباتی نشان می دهند. در صورت ادامه این تحقیق و منظور نمودن عوامل مؤثر دیگر می توان به دانش فنی طراحی کوره دست یافت.

کلمات کلیدی

کوزه کف گرد، پیش گرم، شمش فولاد، لوله سازی، نورد

Temperature Distribution in Steel Billet at the Exit of a Rotary Heart Pre-Heat Furnace

G. Heidarinejad
Associate Professor

Safikhani
Research Assistant

Mechanical Engineering Department,
University Tarbiat Modarres

Abstract

Rotary heart pre-heat furnace in Ahwaz pipe Mill Company is numerically simulated and analyzed using a computer code. Temperatures of different zones of furnace which are necessary as the boundary condition for the numerical simulation are measured using thermocouples. Results of the numerical simulation reveal that the velocity of motion of steel billet and the heat flux through the burners are the main controlling parameters in regulating the temperature distribution of billet. Steel billet enter the furnace at the ambient temperature, but the temperature distribution at the exit is very important. The temperature of the center-line of billet and pipe should be high enough to let the easy rolling process and prevent breakage of the rollers, and on the other hand the surface temperature of the billet should also be kept low enough to prevent the oxidation of the surface. Numerous numerical experiments are conducted to choose the best set of the effective parameters. In the other cases, although the residence time of the billet could be reduced, but it may lead to either low temperature of the centerline or increasing percentage of oxidation of the surface.

Under the best condition, 1.2 percent of oxidation is result. By reduction of the residence time of billet by 15 percent which is due to the increase of the temperature of the different zones of the furnace, the amount of oxidation increase to 4 percent. The use of the selected parameters in the real production process in the factory shows that a good research may lead to establishment of the furnace design technology.

Keywords

Rotary heart furnace, pre-heat, steel billet, pipe mill, rolling

می‌شود. توزیع دما در هر یک از این مناطق یکنواخت و ثابت فرض می‌گردد. با نوشتن معادلات تعادل جهت هر منطقه و حل یک دستگاه معادلات غیر خطی، مقادیر دما و شار حرارتی در آن منطقه بدست می‌آید. مقدار شار حرارتی که به شمش می‌رسد و ضریب هدایت جابجایی در منطقه مورد نظر به عنوان شرط مرزی جهت حل معادله هدایت حرارت بکار می‌روند. در مدل بکار رفته، محفظه تشعشی به تعدادی حجم و سطح با دمای ثابت تقسیم می‌شود. معادله تعادل شامل انتقال حرارت به صورت هدایت، جابجایی و تشعشع می‌باشد. در قسمت تشعشع، معادلات بصورت توابعی از ضرایب تبادل انرژی هستند که به سطوح شدتی بیان می‌شوند (SS, GS, GG, GS) جهت گاز-گاز، گاز - سطح و سطح - سطح). انتقال انرژی تشعشی بین دو منطقه "i" و "j" بستگی به نسبت سطوح شدتی جهت‌دار دارد [۲، ۳]. مقدار انرژی، که در منطقه گاز-سطح از گاز "i" منتشر شده و توسط سطح "j" جذب می‌شود، توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$Q_{i \rightarrow j} = \bar{G}_i S_j \delta T_{g,i}^4 \quad (1)$$

$\bar{G}_i S_j$ سطح شدتی جهت دار برحسب m^2 می‌باشد. رابطه مشابهی جهت انتقال حرارت تشعشی گاز - گاز و سطح - سطح بدست می‌آید. مقدار خالص این تبادل تشعشع بین دو منطقه گاز-سطح بصورت زیر است:

$$Q_{i \leftrightarrow j} = \bar{G}_i S_j E_{g,i} - \bar{G}_j S_i E_{g,j} \quad (2)$$

در این روابط E_j توان انتشار سطح یک جسم سیاه و $E_{g,i}$ توان انتشار جسم سیاه یک گاز می‌باشد. در سطوح شدتی جهت دار می‌توان اثر ضرایب نشر سطوح و رفتار گاز غیر خاکستری را روی تبادل تشعشع در یک محفظه بررسی نمود. تمامی مسیرهای ممکن تبادل تشعشع بین "i" و "j" که شامل تشعشع منعکس شده و جذب تشعشع تمامی سطوح غیره سیاه در محفظه می‌باشد در سطوح شدتی جهت دار در نظر گرفته شده اند [۴].

تمامی سطوح شدتی جهت دار وابسته به دما می‌باشند. با بکار بردن تئوری توسعه یافته، سطوح شدتی می‌توانند از ضرایب تبادل و مستقل از دما بدست آیند [۵]. سطوح

امروزه تحقیقات وسیعی روی توسعه مدل‌های جامع در طراحی محفظه‌های احتراق و کوره صورت می‌گیرد. ارائه یک مدل جامع، با در نظر گرفتن کلیه پدیده‌های فیزیکی حاکم در یک کوره در حال کار بدست می‌آید [۱]. این پدیده‌ها عبارتند از:

- انتقال حرارت بصورت تشعشی، جابجایی و هدایت
- جریان توربولانس گازهای حاصل از احتراق
- پدیده احتراق در کوره
- انتقال جرم اجزاء موجود در گازهای حاصل از احتراق
- در این مدلها، دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بر مبنای اصول بقاء و انتقال جرم، ممنتم و انرژی همراه با معادلات اضافی مدل توربولانس، واکنش شیمیایی و پدیده انتقال حرارت نوشته می‌شوند. با حل همزمان این معادلات، توزیع کامل جریان گازها و دمای آنها در یک محفظه محاسبه می‌شوند. مدلسازی فرآیند انتقال حرارت تشعشی به روشهای گوناگون انجام شده و هر یک از این روشها دقتهای متفاوتی دارند. دقیقترین روشها برای مدلسازی میدان تشعشی داخل محفظه‌ها، روشهای منطقه‌ای^۱ و مونتاژ کارلو^۲ می‌باشند که هر دو روش بطور وسیعی توسعه یافته‌اند [۲، ۳]. هدف این مقاله ارائه یک مدل انتقال حرارت از کوره کف گرد پیش گرم فولاد می‌باشد که می‌تواند جهت استفاده در یک سیستم کنترل دینامیکی بکار رود. هندسه کوره مورد استفاده و ورودیهای آن مربوط به کوره کف گرد پیش گرم نصب شده موجود در بخش لوله سازی شرکت فولاد خوزستان میباشد. اساسی‌ترین نیاز مدل، پیش بینی توزیع دمای داخل کوره و قطعه در حین تولید پیوسته و یا در نوسانات ایجاد شده در جریان سوخت و هوا، نوع شمش، ابعاد آن و غیره می‌باشد. نصب یک سیستم کنترل بر اساس این مدل ریاضی، بازده مطلوب حرارتی کوره و یکنواختی توزیع دما در شمش را بدنبال خواهد داشت و این امر کیفیت محصول نهایی را بالا برده و افزایش عمر تجهیزات نورد را تضمین می‌نماید [۱]. این مدل می‌تواند بر اساس مدل ریاضی در یک سیستم کنترل on-line بکار رود.

معادلات حاکم

برای تحلیل انتقال حرارت در کوره از روش منطقه‌ای استفاده شده و کوره به تعدادی مناطق مجزا تقسیم

$$\bar{G}_i \bar{G}_j = \sum_{n=1}^3 a_{g,n} (T_{g,i}) (\bar{G}_i \bar{G}_j)_{k=k_n} \quad (8)$$

$$\bar{G}_i \bar{G}_j = \sum_{n=1}^3 a_{s,n} (T_{g,i}) (\bar{G}_i \bar{G}_j)_{k=k_n} \quad (9)$$

ضرایب وزنی بصورت زیر می‌باشند.

$$a_{g,n}(T_{g,i}) = b_{1,n} + b_{2,n} T_{g,i} \quad (10)$$

$$a_{s,n}(T_i) = b_{1,n} + b_{2,n} T_i \quad (11)$$

ضرایب $b_{1,n}$ و $b_{2,n}$ و k_n بسته به مدل در نظر گرفته شده، جهت مخلوط گازهای احتراق که شامل اجزاء گاز خاکستری و شفاف می‌باشد [۳].

در یک منطقه سطحی خاکستری و دیفیوز، مجموع تشعشع خروجی از منطقه "i" به طرف دیگر سطوح و گازها ($Q_{o,i}$) میتواند بصورت زیر بیان گردد:

$$Q_{o,i} = \left[\sum_{j=1}^m \bar{S}_i \bar{S}_j + \sum_{j=1}^l S_i G_j \right] E_i \quad (12)$$

در نتیجه:

$$Q_{o,i} = \left[\sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} (\bar{S}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} + \sum_{j=1}^l \sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} (\bar{S}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} \right] E_i \quad (13)$$

$$Q_{o,i} = \varepsilon A \delta T_i^4 \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^{N_g} a_{s,n} = 1 \quad (15)$$

با توجه به معادلات ذکر شده می‌توان معادله تعادل کلی جهت هر منطقه سطحی "i" را نوشت. با توجه به قانون اول ترمودینامیک با نوشتن انرژی‌های ورودی به و خروجی از سطح:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m (\bar{S}_i \bar{S}_j) E_j + \sum_{j=1}^l (\bar{S}_j \bar{S}_i) E_{g,j} - A_i \varepsilon E_i + A_i h (T_{g,i} - T_i) \quad (16)$$

شدتی جهت دار، از سطوح تبادل کلی ($\bar{G}\bar{G}$, $\bar{G}\bar{S}$, $\bar{S}\bar{S}$) بدست آمده‌اند که خود نیز از سطوح تبادل مستقیم (gg , gs , ss) بدست می‌آیند [۴، ۶].

ضرایب نشر، جذب و عبور گازهای حاصل از محصولات احتراق بصورت مجموع دو گاز خاکستری و یک گاز شفاف در نظر گرفته شده‌اند. این اطلاعات با استفاده از ضرایب وزنی و روش حداقل مربعات جهت گازهای حاصل از احتراق برآزش شده‌اند. شار تشعشی بین هر دو منطقه متناسب با جمع ضرایب (a) مربوط به سطوح تبادل کل هر گاز می‌باشد.

با استفاده از مدل مخلوط گاز خاکستری و گاز شفاف، شار خالص بین یک منطقه گاز "i" در دمای T_{gi} و یک منطقه مسطح "j" در دمای T_j بصورت زیر بیان می‌گردد [۳].

$$Q_{i \leftrightarrow j} = \sum_{n=1}^{N_g} a_{g,n} (T_{gi}) (\bar{G}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} E_{g,j} - \sum_{n=1}^{N_g} a_{g,n} (T_j) (\bar{G}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} E_j \quad (3)$$

هر مجموعه روی N_g جزء از گاز شامل مخلوط یک گاز شفاف با ضریب عبور K_1 ، دو گاز خاکستری با ضرایب عبور K_2 و K_3 روی سطح تبادل کل $\bar{G}_i \bar{S}_j$ می‌باشد [۷، ۸]. با توجه به روابط (۲) و (۳):

$$\bar{G}_i \bar{S}_j = \sum_{n=1}^3 a_{g,n} (T_{gi}) (\bar{G}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} \quad (4)$$

$$\bar{G}_i \bar{S}_j = \sum_{n=1}^3 a_{s,n} (T_j) (\bar{G}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} \quad (5)$$

روابط مشابهی جهت انتقال سطح - سطح نوشته می‌شود:

$$\bar{S}_i \bar{S}_j = \sum_{n=1}^3 a_{s,n} (T_i) (\bar{S}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} \quad (6)$$

$$\bar{S}_i \bar{S}_j = \sum_{n=1}^3 a_{s,n} (T_j) (\bar{S}_i \bar{S}_j)_{k=k_n} \quad (7)$$

جهت انتقال حرارت گاز - گاز نیز روابط مشابهی نوشته می‌شود:

$$E_i = \delta T_i^4$$

مناطق حرارتی مختلف کوره مطابق شکل (۱) بصورت پنج منطقه کلی شامل منطقه پیش گرم و مناطق حرارتی ۱ و ۲ و ۳ و ۴ می باشد. کوره به ۱۴۲ قسمت که برابر تعداد ردیفهای شمش موجود در کف کوره می باشد تقسیم شده است. شمش از قسمت ۱ (فضای ۱) وارد شده و در فضای ۱۴۲ از کوره خارج می شود. معادلات تعادل در هر فضا جهت سطوح موجود نوشته شده و مانند معادله (۱۶) برای هر سطح بدست می آیند.

جهت بار حرارتی بصورت میزان تغییر انتالپی شمش در حین عبور از منطقه حجمی مورد نظر بوده و جهت سطوح دیگر میزان افت حرارتی از سطوح می باشد [۹]. با حل همزمان معادلات تعادل توضیح داده شده در بالا، مجهولات سیستم که می تواند دمای مناطق مختلف و شار رسیده به آنها باشد بدست می آید [۱۰، ۱۱]. در رابطه (۱۶) h ضریب جابجایی بوده و با توجه به تغییر خصوصیات فیزیکی سیال، دما و موقعیت شمش در کوره محاسبه می شود. دمای اولیه، ابعاد شمش، گام زمانی که بیانگر حضور شمش در هر منطقه حجمی است و تعداد تقسیمات در شمش به عنوان ورودی به برنامه داده می شوند. دیگر مشخصات کلی سیستم به صورت ورودی در برنامه گنجانده شده اند. با توجه به زمان حضور در هر منطقه حرارتی، مشخصات فیزیکی شمش، گازهای حاصل از احتراق و شرایط دمایی تغییر خواهند کرد. در تجزیه و تحلیل هدایت گذرا در شمش از روش تفاضل محدود استفاده می گردد. سطح زیرین شمش عایق و سطوح جانبی آن در معرض تشعشع و جابجایی میباشند. سرعت جریان گاز داغ در نزدیکی سطوح بین شمش ها ۰/۱ سرعت جریان در بالا دست در نظر گرفته شده است [۱۲]. شرایط مرزی در هر گام زمانی متغیر در نظر گرفته می شود [۱۰]. شرایط مرزی شامل شار حرارتی وارده، گذر حجمی سیال عبوری و مشخصات فیزیکی سیال میباشند [۳، ۷]. دمای مناطق مختلف کوره که قسمتی از شرایط مرزی مساله هستند، توسط ترموکوپلهایی که در ارتفاع ۸۰ سانتیمتری در سطح بالایی شمشها در مناطق مختلف نصب شده اند اندازه گیری می شوند. تعداد این ترموکوپلها فعلاً کم است اما توصیه می شود تعداد بیشتری در هر منطقه نصب شود تا توزیع دقیقتری در دست باشد. دمای نقاط در سطح شمش در

خروج از کوره و قبل از ورود به نورد توسط پیرومترهای دستی اندازه گیری و ثبت می شود.

روش عددی مورد استفاده تفاضل محدود می باشد که در نقاط داخلی بصورت تفاضل مرکزی و در مرزها با توجه به شرایط مرزی مناسب نوشته میشود. برنامه کامپیوتری به زبان فورترن نوشته شده و روی کامپیوتر شخصی اجرا گردیده است. شبکه محاسباتی و دیگر پارامترهای عددی طوری انتخاب میشوند که نتایج حاصل مستقل از مقدار عددی آنها باشد.

۳- بحث و نتیجه گیری

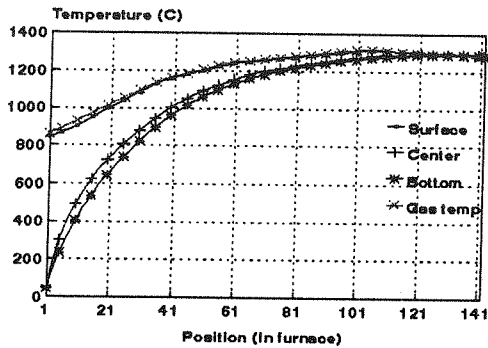
برنامه برای زمانها و دماهای مختلف جهت زونها اجرا شده و بهترین توزیع دما در کوره، همچنین بهترین زمان که شمش پس از عبور از زونها دمای یکنواختی داشته باشد، بدست آمده اند. دمای اندازه گیری شده سطح شمش به هنگام خروج از کوره که طبق شرایط بالا در کارخانه تنظیم شده باشد، با مقدار محاسبه شده از برنامه در حدود ۵-۲ درجه سانتیگراد اختلاف را نشان می دهد لذا کوره طبق این شرایط که فرآیند تولید مطلوب میباشد تنظیم گردید. دمای زونها حرارتی ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در شرایط مطلوب به ترتیب ۱۱۵۰۰ و ۱۲۴۰ و ۱۳۲۰ و ۱۲۸۰ درجه سانتیگراد می باشند. زمان حضور شمش در مناطق کوچکتر ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده و زمان کلی حضور ۲/۳۶ ساعت می باشد.

همانطور که در شکل های (۲) و (۳) و (۴) نشان داده شده است، دمای مغز شمش به ۱۲۹۰ درجه سانتیگراد که دمای مطلوب جهت انجام عملیات نورد شمش با استاندارد ASTM, API برای لوله های بدون درز می باشد می رسد [۱۳]. در شکل (۲) دمای سطوح شمش و دمای گازهای حاصل از احتراق با توجه به منطقه ای که شمش در آن حضور دارد نشان داده شده است. در شکل (۳) دمای مغز شمش در حالت طولی برای زونهای مختلف کوره نشان داده شده است. شکل (۴) نیز مانند شکل (۳) می باشد با این تفاوت که دمای سطح تماس شمش که روی کف کوره قرار دارد، ارائه گردیده است.

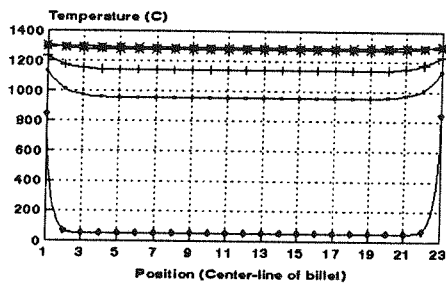
طبق استاندارد مورد استفاده در کارخانه، لازم است اختلاف دمای مغز و سطح شمش حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای هر متر عمق شمش باشد که جهت شمش

با مقطع ۲۰×۲۰ سانتیمتر اختلاف دمای مناسب بایستی حدود ۱۰ درجه سانتیگراد باشد. برنامه برای حالتی که کاهش زمان حضور شمش در هر منطقه، به میزان ۱۵٪ و ۲۵٪ کمتر از حالت مطلوب باشد نیز اجرا شده است. در این حالات دمای مناطق مختلف کوره همانند حالت مطلوب قبلی در نظر گرفته شده اند. در حالت ۱۵٪ کاهش زمان که در شکل های (۵) و (۶) نشان داده شده است، دمای سطح به حالت مطلوب نورد که ۱۲۹۰ درجه سانتیگراد می باشد می رسد ولی دمای مغز در حدود ۱۱۰ درجه کمتر از دمای سطح می باشد. در حالت ۲۵٪ کاهش زمان، همانطور که در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده است، دمای سطح کمتر بوده و به نسبت دمای مغز نیز کمتر می باشد و اختلاف دمای مغز و سطح شمش بیش از ۱۳۰ درجه سانتیگراد است. برنامه در حالت ۱۵٪ کاهش زمان و افزایش دمای مناطق کوره به میزان ۱۲۵۰، ۱۲۸۰، ۱۳۳۰، ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد نیز اجرا شده است. در این حالت دمای مغز نسبتاً افزایش یافته و همانطور که در شکل های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است، به ۱۲۱۰ درجه سانتیگراد می رسد ولی دمای سطح نیز افزایش یافته و ۱۳۲۰ درجه سانتیگراد می شود.

ایجاد اختلاف دمای زیاد بین سطح و مغز شمش در مناطق مختلف کوره باعث کاهش کارایی کوره و افزایش میزان اکسیداسیون سطح شمش می شود که گذشته از زیان مالی مشکلاتی را برای تجهیزات کوره در پی خواهد داشت [۱۳]. میزان اتلاف یا اکسید شمش به ازای دماها و زمانهای مختلف اندازه گیری گردید. در حالت توزیع دمایی مطلوب با توجه به دماهای یاد شده جهت مناطق مختلف کوره، میزان اکسیداسیون بطور متوسط ۱٫۲ درصد وزن اولیه می باشد ولی این میزان در حالت ۱۵٪ کاهش زمان افزایش دماها بطور متوسط به ۴ درصد وزن اولیه می رسد.

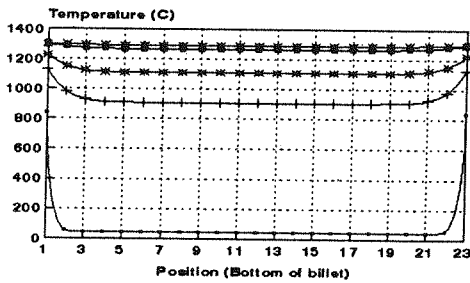


شکل (۲) توزیع دما برای سطوح و مغز شمش و گاز داغ در موقعیت های مختلف کوره.



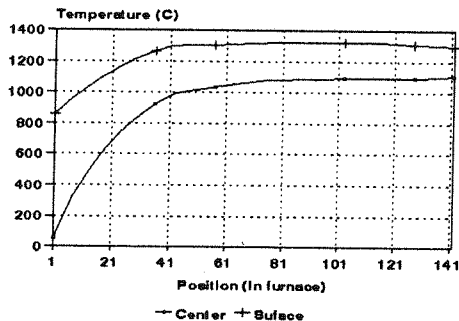
Zone 1 + Zone 2 * Zone 3 → Zone 4 * Outlet → Inlet (preheat)

شکل (۳) توزیع دما برای مغز شمش در حالت طولی (محور تقارن) در زونهای مختلف.

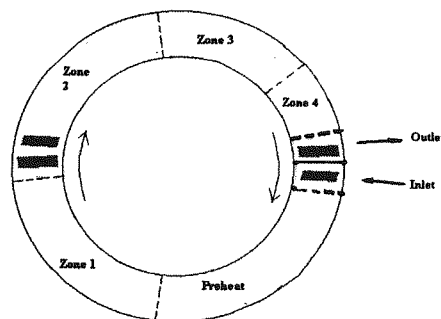


Inlet (preheat) + Zone 1 * Zone 2 → Zone 3 * Zone 4 → Outlet

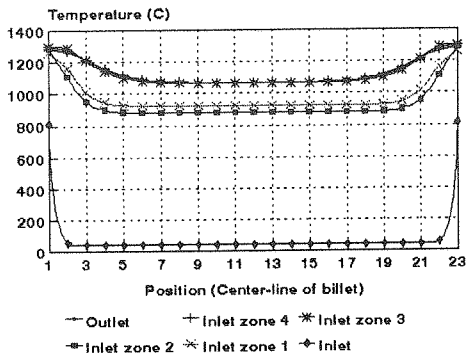
شکل (۴) توزیع دما برای سطح تماس شمش یا کف کوره در حالت طولی (محور تقارن) در زونهای مختلف.



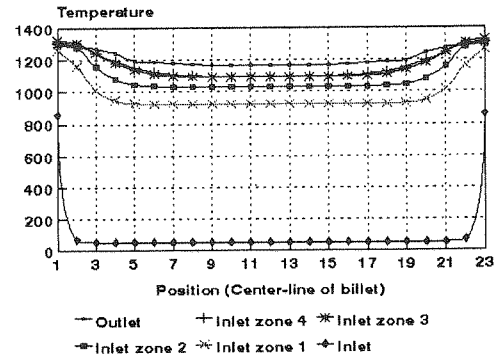
شکل (۵) توزیع دما برای سطح و مغز شمش در موقعیت های مختلف کوره برای ۱۵٪ کاهش زمان حضور.



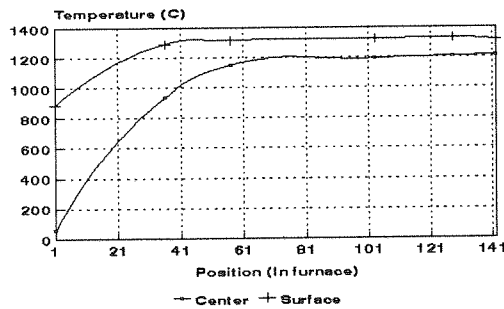
شکل (۱) نمای کلی کوره کف گرد در کارخانه لوله سازی اهواز استفاده شده در مدل ریاضی.



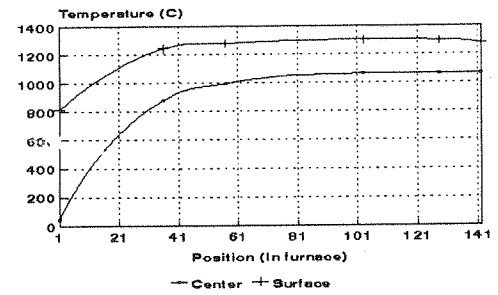
شکل (۸) توزیع دما برای مغز شمش در حالت طولی (محور تقارن) در زونهای مختلف برای ۲۵٪ کاهش زمان حضور.



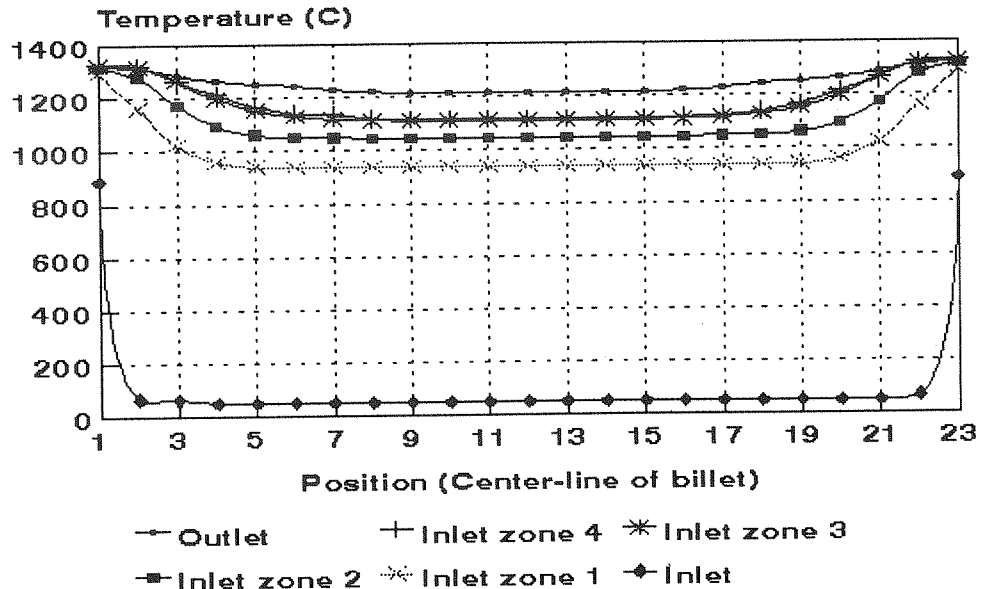
شکل (۶) توزیع دما برای مغز شمش در حالت طولی (محور تقارن) در زونهای مختلف برای ۱۵٪ کاهش زمان حضور.



شکل (۹) توزیع دما برای سطح و مغز شمش در موقعیت های مختلف کوره برای ۱۵٪ کاهش زمان حضور همراه با افزایش دمای زونها مختلف.



شکل (۷) توزیع دما برای سطح و مغز شمش در موقعیت های مختلف کوره برای ۲۵٪ کاهش زمان حضور.



شکل (۱۰) توزیع دما برای مغز شمش در حالت طولی (محور تقارن) در زونهای مختلف برای ۱۵٪ کاهش زمان حضور همراه با افزایش دمای زونها مختلف.

- [1] Tucker R.J., Advances in radiation transfer for gas fired furnace design, IMechE 1995, C510/149/95.
- [2] Malasekera W.M.G. and James E.H, Radiative heat transfer calculations in three dimensional complex geometries, *J. Of Heat Transfer*, vol. 18, 1996.
- [3] Rhine J.M., Tucker R.J, *Modeling of Gas-Fired Furnaces and Boilers and Other Industrial Heating Processes*, British gas in association with McGraw Hill Book Company, 1991.
- [4] Larsen M.E. and Howell J.R., The exchange factor method an alternative basis for zonal analysis of radiating enclosures, *J. of Heat Transfer*, vol. 107, pp. 936-942, 1985.
- [5] Noble J.J., The zone method explicit matrix relation for total exchange areas, *Int'l. J. Heat Mass Transfer*, vol. 18, pp. 261-269, 1975.
- [6] Vercammen H.V.J. and Froment G.F., An improved zone method using Mont Carlo technique for simulation of radiation in industrial furnaces, *Int'l. J. Heat Mass Transfer*, vol. 23, pp. 329-337, 1980.
- [7] Park H.M, Ahluwalia R.K, IM K.H, Three dimensional radiation in absorbing-emitting-scattering media using the modified differential approximation, *Int'l. J. Heat Mass Transfer*, vol. 36, no. 5, pp.118-1189, 1993.
- [8] Sigh B.P. and Kaviany M, Modeling Radiative heat transfer in packed beds, *Int'l. J. Heat Mass Transfer*, vol. 35, no. 6, pp.1397-1405, 1992.
- [9] Tucker R.J., Direct exchange areas for calculation radiation transfer in furnaces, *J. of Heat Transfer*, vol. 108, pp. 707-710, 1986.
- [10] Selcuk N. and Tahiroglu Z., Exact numerical solutions for radiative heat transfer in cylindrical furnaces, *Int'l. J. for numerical methods in engineering*, vol. 26, pp.1201-1212, 1988.
- [11] Mehta R.C., Numerical solution of nonlinear heat conduction problem with a radiation boundary condition, *Int'l. J. for numerical methods in engineering*, vol. 20, pp. 1057-1066, 1984.
- [12] Najm H.N., Numerical investigation of the instability of premixed dump combustors, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, M.I.T, May 1989.
- [13] Schurko R.J. et al, Computer control of reheat furnaces, *Iron and Steel Engineers*, vol. 64, 1987.