

## تحلیل عددی انتقال گرما به شمش در کوره‌های پیشگرمکن پوشر

احمد صابونچی\* و علی حاجیان نژاد\*\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۷/۳/۵ - دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۴/۴)

**چکیده:** در این مقاله، هدف تعیین توزیع دمای شمش در یک کوره پیشگرم از نوع پوشر است. بنابراین ابتدا روش صفحه‌های مجازی به عنوان یک روش ساده و کارآمد در بررسی انتقال گرمای تشعشعی در کوره‌های صنعتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و معادله‌های حاکم بر این روش در حالت دو بعدی برای شبیه‌سازی هر محفظه دلخواه بیان می‌شود. با استفاده از روش مذکور، معادله هدایت در شمش به صورت اختلاف محدود به روش عددی و با استفاده از شرایط مرزی مناسب به منظور تعیین توزیع دما در شمش در شرایط دائم حل می‌شود. در نهایت از مدل تهیه شده برای تعیین توزیع دمای شمش و گاز، توزیع شار گرما روی سطح شمش و همچنین بررسی اثر میزان تغذیه شمش به کوره بر توزیع دما استفاده خواهد شد.

واژگان کلیدی: کوره پیشگرم پوشر، اختلاف محدود، روش صفحه‌های مجازی

## Numerical Analysis of Heat Transfer of Slab in the Pusher-Type Preheat Furnaces

A. Sabounchi and A. Hajian-nejad

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

**Abstract:** *The objective of this study is to find the temperature distribution of a slab as it moves through the pusher-type preheat furnaces. First, the imaginary planes method (IPM) as a new and applicable method for calculation of radiation heat transfer in industrial furnaces is studied, and the two-dimensional form of this method is used to calculate heat flux and temperature distribution in the furnace enclosure. Next, the equation for the conduction heat transfer in a finite-difference form is developed for slabs and, finally, using IPM to calculate heat flux distribution on slabs surface, temperature distribution is obtained in the steady state condition.*

**Keywords:** *Pusher-type preheat furnace, Finite difference, imaginary planes method*

\*\* - کارشناس ارشد

\* - استادیار

$\alpha$	ضریب پخش گرما ( $m^2/s$ )	A	مساحت ( $m^2$ )
$\delta$	دلتای کرونگر	$a_n, a'_n$	ضرایب وزنی وابسته به دما
$\epsilon_k$	ضریب صدور سطح k	$C_p$	گرمای ویژه ( $J/Kg.K$ )
$\theta$	متغیر مربوط به دما (K)	$E_b$	توان صدور جسم سیاه ( $W/m^2$ )
$\rho$	جرم حجمی ( $Kg/m^3$ )	$(g\bar{s}_k), (s_j\bar{s}_k)$	ضرایب تبادل مستقیم گاز به سطح و سطح به سطح ( $m^2$ )
	بالا نویسهها		
$l, m$	مشخص کننده ناحیه حجمی	$(\bar{g}\bar{s}_k), (\bar{s}_j\bar{s}_k)$	سطوح شار مستقیم گاز به سطح و سطح به سطح ( $m^2$ )
*	تشعشع در جهت m		
i	متغیر ورودی	h	ضریب انتقال گرمای جابه جایی ( $W/m^2.K$ )
	زیرنویسهها	k	ضریب انتقال گرمای هدایتی ( $W/m.K$ )
a	محیط	$\dot{m}$	دبی جرمی ( $Kg/s$ )
b	جسم سیاه	$Q_{comb}$	نرخ گرمای حاصل از احتراق (W)
g	گاز	q	شار گرمایی ( $W/m^2$ )
i	متغیر ورودی	T	دما (K)
R, ref	متغیر مرجع	U	ضریب انتقال گرمای کلی ( $W/m^2.K$ )
s	سطح	V	سرعت شمس ( $m/s$ )

## ۱- مقدمه

مورد استفاده قرار می‌گیرد، کارهای انجام شده را می‌توان طبقه‌بندی کرد.

در مورد بررسی انتقال گرمای تشعشعی در محفظه‌ها، روش ناحیه‌ای<sup>۱</sup> [۱ و ۲] به دلیل توانایی در تحلیل مسائل گوناگون مهندسی و قابل اطمینان بودن به طور گسترده‌ای تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است و در بررسیهای مختلف ضمن استفاده از این روش، قابلیت‌های آن نیز افزایش یافته است [۳-۵]. در مرجع [۶] طرز استفاده از روش ناحیه‌ای به منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار حالت دائم و گذرای کوره‌های گرمایش فلزات توضیح داده شده است. مرجع [۷] با استفاده از همین روش به بررسی اثر متغیرهایی از قبیل خواص تشعشعی و ابعاد هندسی کوره پیشگرم پرداخته است و مرجع [۸] در مقاله‌ای کارهای انجام شده طی دو دهه اخیر را در همین زمینه مورد بررسی قرار داده است.

به منظور پیش‌بینی عملکرد، بهبود کیفیت محصول نهایی، کاهش مصرف ویژه سوخت و افزایش راندمان تولید کوره‌های پیشگرمکن نورد تحقیقات گسترده‌ای انجام می‌گیرد که به ور کلی این تحقیقات را می‌توان بر حسب هدف نهایی به دسته‌های گوناگون تقسیم‌بندی کرد. از بین این روشها، تحلیل رفتار گرمایی کوره‌های پیشگرم نورد با استفاده از مدل‌های ریاضی تلاشهای گسترده‌ای را به خود جذب کرده است در این زمینه در چند دهه اخیر با پیدایش رایانه‌های محاسباتی سریع، کارهای گوناگونی انجام گرفته که بر حسب نوع و سمت و سوی تحقیقات، این روشها را می‌توان در چند گروه تقسیم‌بندی کرد. با توجه به دمای بالای کاری کوره‌های پیشگرم، تشعشع به عنوان مهمترین مکانیزم انتقال گرما به حساب می‌آید. بر حسب روشی که برای تحلیل انتقال گرمای تشعشعی

به منظور اجتناب از صرف زمان زیاد برای انجام محاسبات پیچیده ریاضی، در مسائل مهندسی که تابعیت زمانی و ماهیت تکراری دارند می‌توان از روش صفحه‌های مجازی<sup>۲</sup> [۹ و ۱۰] به منظور تحلیل انتقال گرمای تشعشعی استفاده کرد. این روش که تقریبی از روش ناحیه‌ای است با دقت خوب، زمان بسیار کمتری نیز برای محاسبات نیاز دارد. در این زمینه مرجع [۱۱] با به کارگیری شکل ساده‌ای از این روش به بررسی انتقال گرما در حالت گذرا در یک کوره پیشگرم نورد چند ناحیه‌ای پرداخته است.

در این مقاله به منظور تحلیل تشعشع در یک کوره پیشگرم پوشر، از روش صفحه‌های مجازی در حالت دوبعدی استفاده شده است. البته در مقالاتی که این روش توضیح داده شده است [۹ و ۱۰]، در حالت خاصی که کف کوره دمای ثابت داشته باشد (مثلاً کوره‌هایی که کف آنها مذاب باشد) مسئله بررسی شده است ولی در کار حاضر طرز استفاده از این روش در یک کوره پیشگرم نورد با دمای متغیر سطح شمش و کف متحرک توضیح داده شده است.

## ۲- روش صفحه‌های مجازی [۹]

در این قسمت روش صفحه‌های مجازی به صورت دو بعدی در مورد یک کوره مستطیل شکل ارائه خواهد شد. در این روش مانند روش ناحیه‌ای، کوره به سطوحها و حجمهای همدم تقسیم می‌شود بنابراین هر ناحیه حجمی توسط مجموع شش سطح حقیقی و مجازی از حجمهای مجاور مجزا می‌شود (سطوح حقیقی قسمتی از جداره محفظه کوره را تشکیل می‌دهند ولی سطوح مجازی دو ناحیه حجمی مجاور را از هم جدا می‌سازند). در قسمت (الف) و (ب) از شکل (۱) به ترتیب طرز نمایش یک ناحیه حجمی در کوره با زیرنویسها و نحوه نمایش سطوح در هر المان حجمی با اعداد نشان داده شده است.

برای سطوح حقیقی و مجازی دو معادله جداگانه می‌توان نوشت، یکی معادله‌ای که نرخ خالص شار گرما از سطح

( $q_k^{l,m}$ ) را که برابر است با تفاضل بین انرژی خروجی از سطح ( $q_{o,k}^{l,m}$ ) و شار انرژی ورودی به سطح ( $q_{i,k}^{l,m}$ )، به صورت زیر بیان می‌کند

$$q_k^{l,m} = q_{o,k}^{l,m} - q_{i,k}^{l,m} \quad (۱)$$

دیگری معادله شار انرژی تشعشعی ورودی به هر سطح  $k$  واقع بر ناحیه حجمی ( $l, m$ ) که برابر است با مجموع شار انرژی تشعشعی که از گاز و شش وجه ناحیه مذکور به آن سطح می‌رسد

$$A_k^{l,m} q_{i,k}^{l,m} = \sum_{j=1}^6 (\overline{s_j s_k})^{l,m} q_{o,j}^{l,m} + (\overline{g s_k})^{l,m} E_{b,g}^{l,m} \quad (۲)$$

در معادله بالا  $\overline{s_j s_k}$  و  $\overline{g s_k}$  سطوح شار مستقیم<sup>۳</sup> هستند، برای یک گاز حقیقی این کمیتها برابر است با

$$(\overline{s_j s_k})^{l,m} = \sum_{i=0}^n a_i'(T_{s_j}, T_g)^{l,m} (s_j s_k)_i^{l,m} \quad (۳-الف)$$

$$(\overline{g s_k})^{l,m} = \sum_{i=1}^n a_i(T_g)^{l,m} (g s_k)_i^{l,m} \quad (۳-ب)$$

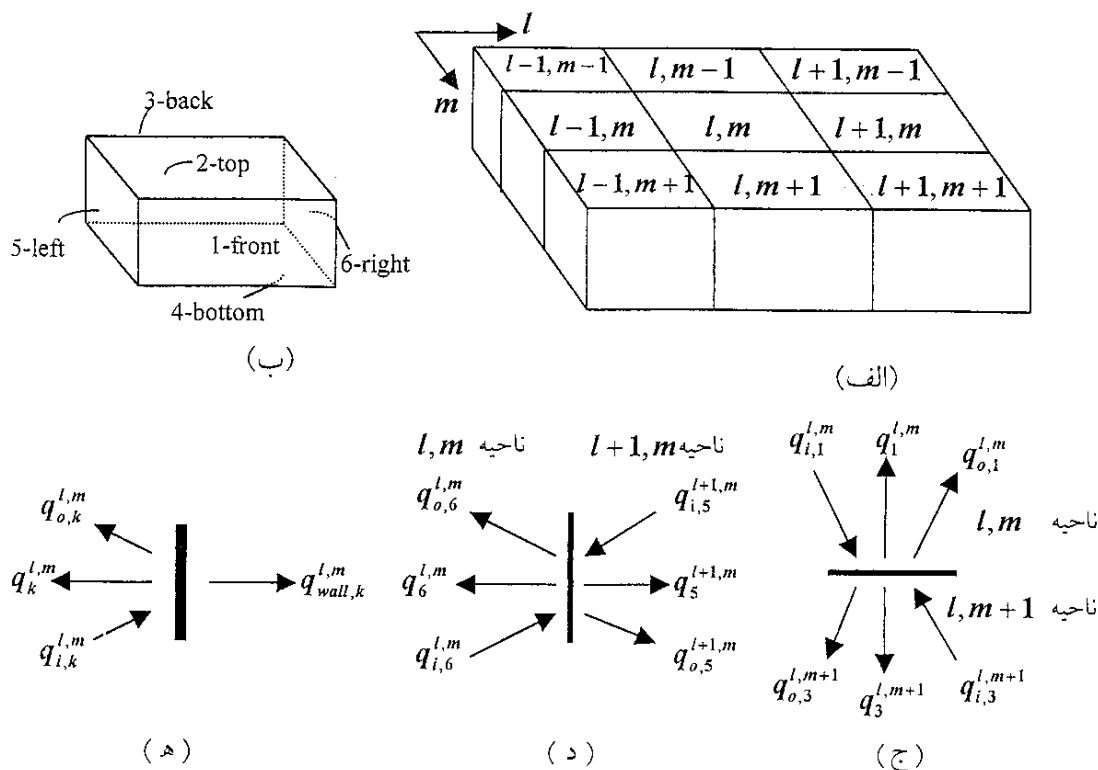
در معادله‌های بالا،  $s_j s_k$  و  $g s_k$  ضرایب تبادل سطحی مستقیم و  $n$  تعداد گازهای خاکستری در نظر گرفته شده است [۱۳].

در این مقاله این ضرایب توسط انتگرال‌گیری به روش مونت کارلو محاسبه شده است [۱۴]. در معادله‌های (۳)، ضرایب وزنی  $a^0$  و  $a'$  همراه با ضرایب تبادل سطحی مستقیم به کار رفته‌اند در حالی که در روش ناحیه‌ای از ضرایب تبادل کلی استفاده می‌شود. چون در روش صفحه‌های مجازی یک ناحیه حجمی فقط با حجمهای مجاور خود تبادل تشعشع دارد، ضرایب تبادل کلی در این روش ظاهر نمی‌شوند بنابراین در نتیجه استفاده از این روش به طور قابل ملاحظه‌ای از حجم محاسبات کاسته می‌شود. اگر گاز مورد بررسی خاکستری باشد، معادله‌های (۳) به صورت زیر در می‌آیند

$$(\overline{s_j s_k})^{l,m} = (s_j s_k)^{l,m} \quad (۴-الف)$$

$$(\overline{g s_k})^{l,m} = (g s_k)^{l,m} \quad (۴-ب)$$

اگر سطح مورد نظر حقیقی باشد شار انرژی خروجی از سطح برابر مجموع شار انرژی تشعشعی صادر شده و منعکس شده از همان سطح است، بنابراین



شکل ۱- (الف) تقسیم‌بندی کوره به ناحیه‌ها، (ب) معرفی سطوح داخل هر ناحیه حجمی، (ج) و (د) شار گرمای تشعشی بر روی صفحه‌های مجازی در جهت  $l, m$ ، (ه) شار گرمایی تشعشی بر روی سطوح حقیقی کوره

در معادله‌های بالا  $\delta_{kj}$ ، دلتای کرونیگر<sup>۱</sup> است. در معادله‌های (۸) و (۹)، عبارتهای بالایی برای سطوح حقیقی و عبارتهای پایینی برای سطوح مجازی صادق‌اند.

اگر توزیع دما و نرخ خالص تشعشع عبوری از صفحه‌های مجازی (جمله  $q_k^{l,m}$  در عبارت  $D_k^{l,m}$ ) معلوم باشد، با استفاده از روش معکوس‌سازی ماتریسها، می‌توان معادله (۷) را برای محاسبه شار انرژی خروجی از هر سطح حل کرد بنابراین

$$q_{o,k}^{l,m} = \sum_{j=1}^6 B_{k,j}^{l,m} D_j^{l,m} \quad k=1, \dots, 6 \quad (10)$$

در معادله (۱۰)،  $B_{k,j}$  معکوس ماتریس  $b_{k,j}$  است.

در روش صفحه‌های مجازی هر ناحیه حجمی فقط با مرزهای خود در ارتباط است یعنی فقط مرزهای خود را می‌بیند. ولی نواحی حجمی توسط شار گرمایی که مرزهای مشترک را قطع می‌کند با هم در ارتباط‌اند. بنابراین، یک تبادل غیر مستقیم بین همه ناحیه‌ها فراهم می‌شود. در قسمت (ج) و

$$q_{o,k}^{l,m} = \varepsilon_k^{l,m} E_{b,k}^{l,m} + (1 - \varepsilon_k^{l,m}) q_{i,k}^{l,m} \quad (5)$$

با حذف  $q_{i,k}^{l,m}$  بین دو معادله (۱) و (۵)، معادله زیر برای شار انرژی تشعشی خالص بر روی یک سطح حقیقی به دست می‌آید

$$q_k^{l,m} = \frac{\varepsilon_k^{l,m}}{1 - \varepsilon_k^{l,m}} (E_{b,k}^{l,m} - q_{o,k}^{l,m}) \quad (6)$$

همچنین با حذف  $q_k^{l,m}$  و  $q_{i,k}^{l,m}$  بین معادله‌های (۱)، (۲) و (۵) برای یک سطح حقیقی و معادله‌های (۱) و (۲) برای یک سطح مجازی، دسته معادله‌های زیر حاصل می‌شود

$$\sum_{j=1}^6 b_{k,j}^{l,m} q_{o,j}^{l,m} = D_k^{l,m} \quad k=1, \dots, 6 \quad (7)$$

$$b_{k,j}^{l,m} = \begin{cases} \delta_{kj} - (1 - \varepsilon_k^{l,m}) (\overline{s_j s_k})^{l,m} / A_k^{l,m} \\ \delta_{kj} - (\overline{s_j s_k})^{l,m} / A_k^{l,m} \end{cases} \quad (8)$$

$$D_k^{l,m} = \begin{cases} \varepsilon_k^{l,m} E_{b,k}^{l,m} + (1 - \varepsilon_k^{l,m}) E_{b,g}^{l,m} (\overline{g s_k})^{l,m} / A_k^{l,m} \\ q_k^{l,m} + E_{b,g}^{l,m} (\overline{g s_k})^{l,m} / A_k^{l,m} \end{cases} \quad (9)$$

## ۲-۲- معادله بقای انرژی برای یک ناحیه حجمی

معادله بقای انرژی برای یک ناحیه حجمی به صورت زیر

نوشته می‌شود

$$Q_{\text{comb}}^{l,m} - \sum_j A_j^{l,m} h_j^{l,m} (T_g^{l,m} - T_{s,j}^{l,m}) + \sum_k A_k^{l,m} q_k^{l,m} + \sum_{i=1}^6 \dot{m}^i C_p^i (T_g^i - T_{\text{ref}}) - \dot{m}^{l,m} C_p^{l,m} (T_g^{l,m} - T_{\text{ref}}) = 0 \quad (15)$$

در معادله بالا،  $Q_{\text{comb}}$  بیانگر مقدار گرمای آزاد شده در اثر احتراق سوخت داخل هر ناحیه حجمی است. جمله‌های دوم و سوم به ترتیب مقدار تغییرات انرژی در اثر انتقال گرمای جابه جایی و تشعشعی را نشان می‌دهند. دو جمله آخر نیز بیانگر تغییرات انتالپی محسوس در ناحیه حجمی مورد نظرند.  $h^{l,m}$  ضریب انتقال گرمای جابه جایی بین سطح حقیقی با دمای  $T_{s,j}$  و المان حجمی با دمای  $T_g$  است،  $\dot{m}^i$  دبی جرمی ورودی به هر ناحیه حجمی از ناحیه مجاور با گرمای ویژه  $C_p^i$  و دمای  $T_g^i$  است،  $\dot{m}^{l,m}$  دبی گاز خروجی از ناحیه  $(l, m)$  و  $T_{\text{ref}}$  دمای مرجعی است که انتالپی گاز نسبت به آن سنجیده می‌شود.

به طور خلاصه روش تکراری مورد استفاده برای محاسبه توزیع دما و شار گرما در داخل محفظه کوره را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

۱- توزیع دمای اولیه ای در داخل محفظه کوره در نظر گرفته می‌شود.

۲- از معادله (۱۲)، مقدار شار انرژی گرمایی بر روی صفحه‌های مجازی محاسبه می‌شود.

۳- شار انرژی خروجی از هر سطح  $q_{0,k}^{l,m}$ ، از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.

۴- برای هر سطح حقیقی با استفاده از معادله (۶)، شار انرژی تشعشعی محاسبه می‌شود.

۵- از حل همزمان معادله‌های (۱۴) و (۱۵) توسط روش نیوتن-رافسون، توزیع دمای جدید داخل محفظه کوره محاسبه می‌شود.

(ت) از شکل (۱)، چگونگی ارتباط دو ناحیه حجمی مجاور از طریق صفحه‌های مجازی در دو جهت  $l$  و  $m$  نشان داده شده است. اساس ارتباط دو ناحیه حجمی مجاور به این صورت است که شار انرژی ورودی به یک صفحه مجازی از طریق یک ناحیه حجمی، برابر است با انرژی خروجی از همان صفحه که به ناحیه حجمی مجاور وارد می‌شود. به عنوان مثال

$$q_{i,6}^{l,m} = q_{0,5}^{l+1,m}, \quad q_{i,1}^{l,m} = q_{0,3}^{l,m+1}$$

با تعریف دو کمیت زیر

$$q_6^{l,m} = q_6^{l,m} = -q_5^{l+1,m}, \quad q_1^{*,l,m} = q_1^{l,m} = -q_3^{l,m+1} \quad (11)$$

می‌توان معادله‌های زیر را برای هر صفحه مجازی نوشت

$$q_6^{l,m} = q_{0,6}^{l,m} - q_{0,5}^{l+1,m}, \quad q_1^{*,l,m} = q_{0,1}^{l,m} - q_{0,3}^{l,m+1} \quad (12)$$

بنابراین در نتیجه استفاده از معادله‌های بالا، دستگاه معادله‌ای به صورت زیر ایجاد ملشو

$$[BM] \{q_6^{l,m}, q_1^{*,l,m}\} = \{CM\} \quad (13)$$

در معادله (۱۳) ماتریس ضرایب  $[BM]$  و بردار  $\{CM\}$  به ترتیب ضرایب تبادل سطحی و توانهای صدور گاز و سطوح حقیقی را دربر دارند. اگر توزیع دما روی دیوارهای کوره و داخل گاز مشخص باشد، دستگاه خطی بالا را می‌توان حل کرد، با این وجود اگر توزیع دما در داخل کوره مشخص نباشد، معادله‌های بالا همراه با معادله بقای انرژی کلی که شامل تشعشع نیز هست برای هر ناحیه حجمی و سطحی به طور جداگانه به کار ملرود تا توزیع دما مشخص شود.

## ۲-۱- معادله بقای انرژی برای یک سطح حقیقی

برای یک المان سطح واقع بر دیواره کوره، معادله بقای

انرژی کلی به این صورت نوشته می‌شود

$$h_k^{l,m} (T_g^{l,m} - T_{s,k}^{l,m}) - q_k^{l,m} - U_k^{l,m} (T_{s,k}^{l,m} - T_a) = 0 \quad (14)$$

در این معادله  $U_k$  ضریب انتقال گرمای کلی دیواره و  $T_a$  و  $T_{s,k}$  به ترتیب دمای هوای محیط و دمای المان سطح مورد بررسی‌اند.

۶- دماهای به دست آمده با مقادیر قبلی مقایسه میشوند، اگر اختلاف آنها از مقدار مجاز (در اینجا از دقت ۰/۰۰۱ کلوین استفاده شده است) کمتر بود حل همگرا شده است در غیر این صورت مراحل قبلی از مرحله دوم به بعد تکرار می شود.

### ۳- شبیه سازی کوره و فرضهای مورد استفاده

همان طور که می دانیم مکانیزمهای مختلف گرمای داخل کوره شامل تشعشع، جابه جایی و هدایت به همراه واکنشهای شیمیایی ناشی از احتراق سوخت است که بررسی همه جانبه این عوامل کار بسیار مشکل و شاید ناممکن باشد. بنابراین، بر حسب اهداف اصلی هر تحقیق، استفاده از فرضهای ساده کننده اجتناب ناپذیر خواهد بود چرا که در عین سادگی مسئله می توان به نتایج مفیدی نیز دست یافت. بر همین اساس با توجه به شکل (۲) که یک کوره پیشگرم از نوع پوشر<sup>۷</sup> با سه ناحیه گرمایی را نشان می دهد و با توجه به نحوه حرکت شمش و اصول کلی حاکم بر این نوع کوره ها می توان از فرضیات زیر برای شبیه سازی ریاضی مسئله استفاده کرد.

#### ۱-۳- فرضیات

۱- در این بررسی به منظور توضیح نحوه کاربرد روش صفحه های مجازی در تحلیل انتقال گرما در کوره های پیشگرم، محاسبات فقط برای یک محفظه مستطیلی، شکل (۳)، که مدلی از قسمت فوقانی یکی از نواحی گرمایش کوره شکل (۲) است، انجام می شود.

۲- مطابق شکل (۴)، الگوی گرمای حاصل از احتراق و گاز عبوری از کوره با تقارن کامل در جهت عرض کوره در نظر گرفته می شود. بنابراین می توان از تغییرات دمای شمش در جهت عرض کوره صرف نظر کرد و انتقال گرما در شمش را به صورت دو بعدی بررسی کرد

۳- با صرف نظر از مقاومت گرمایی تماس بین سطوح جانبی شمشها، کف کوره به صورت یکپارچه که با سرعت ثابت در حرکت است بررسی می شود.

۴- به منظور بررسی رفتار حالت دائم کوره، میدان احتراق و جریان گاز ثابت در نظر گرفته می شود.

۵- از اثر تیرهایی که با آب<sup>۸</sup> خنک می شوند و شمش روی آنها حرکت می کند صرف نظر می شود.

۶- مطابق شکل (۲)، می توان فرض کرد که شمش از طرف سطح بالا و پایین خود به طور یکسان گرما دریافت می کند بنابراین اولاً می توان فقط نیمه بالایی محفظه کوره را بررسی کرد و ثانیاً از فرض تقارن در جهت ضخامت شمش استفاده کرد.

#### ۲-۳- معادله هدایت در شمش

برای بررسی بهتر، شکل عمومی کوره را به صورت شکل (۳) در نظر بگیرید. در این شکل نمای جانبی از یک کوره مستطیلی نشان داده شده است. سطح شمشها در اثر تبادل تشعشع با دیگر سطوح محفظه و گاز حاصل از احتراق و انتقال گرمای جابه جایی، تحت تأثیر شار گرمایی  $q(x)$  است. معادله انتقال گرمای هدایتی در شمش در حالت دو بعدی به صورت زیر بیان می شود [۱۵]

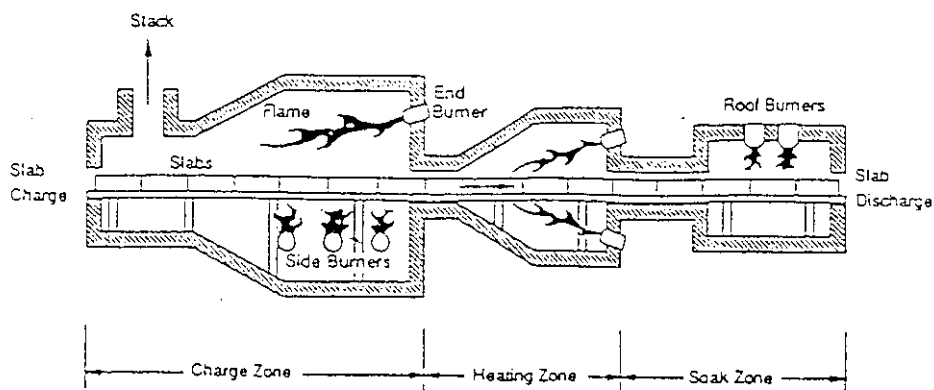
$$\rho C_p V \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad T = T(x, y) \quad (16)$$

در معادله (۱۶) از پخش محوری گرما<sup>۹</sup> در جهت حرکت شمش صرف نظر شده است. از طرفی شرایط مرزی حاکم بر مسئله را می توان به صورت زیر بیان کرد

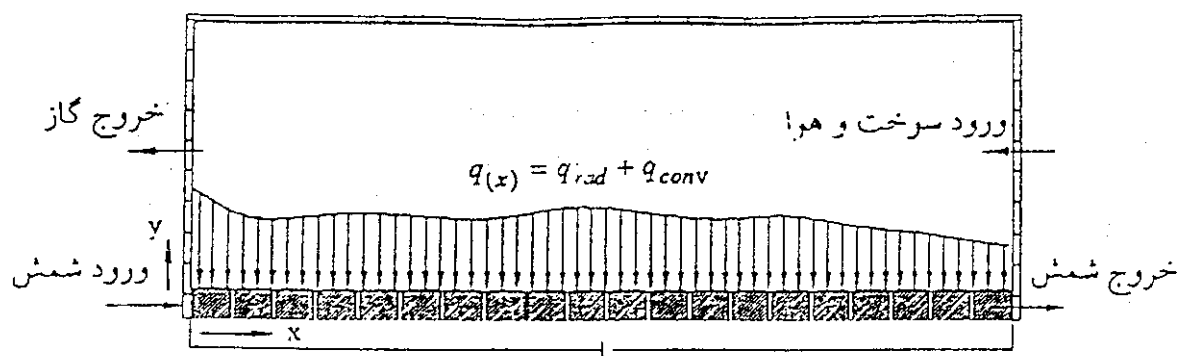
$$T(0, y) = T_0, \quad \frac{\partial T(0, x)}{\partial y} = 0, \quad k \frac{\partial T(x, L)}{\partial y} = q(x) \quad (17)$$

در معادله بالا،  $T_0$  دمای اولیه شمش در ورود به کوره است و  $q(x)$  مجموع شار گرمایی موضعی ناشی از تشعشع و جابه جایی روی سطح شمش است.

به دلیل اینکه کوره ها عموماً در دماهای بالا کار می کنند، بنابراین تغییرات دمای شمش در طول کوره زیاد است در نتیجه ضریب انتقال گرمای هدایتی به صورت تابعی از دمای شمش در نظر گرفته شده است [۱۶]. بنابراین معادله دیفرانسیل از نوع



شکل ۲- شکل شماتیک یک کوره پیشگرم پوشر امروزی



شکل ۳- مدل هندسی قسمت بالایی ناحیه شارژ شمش به کوره (مقطع طولی کوره)

(الف) الگوی جریان در کوره

→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6
→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6
→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6	→ 1/6

صفحه تقارن در طول کوره

(ب) الگوی احتراق در کوره

1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	0	0	0	0	0
1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	0	0	0	0	0
1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	0	0	0	0	0

صفحه تقارن در طول کوره

شکل ۴- (الف) الگوی جریان، (ب) الگوی احتراق، به صورت کسری از دبی کل گاز ورودی و گرمای حاصل از احتراق سوخت

پاره‌ای و غیر خطی است که برای حل آن می‌توان از روش کیرشهف<sup>۱۰</sup> استفاده کرد. در روش کیرشهف با تعریف متغیر  $\theta$  که وابسته به دمای  $T$  است، می‌توان معادلاتی شبیه به معادله (۱۶) را خطی کرد. یعنی

$$\theta = \frac{1}{k_R} \int_{T_R}^T k(T) dT \quad (18)$$

در معادله بالا  $k_R = k(T_R)$  و  $T_R$  دمای مرجعی است که به این ترتیب  $\theta$  نیز از نظر ابعادی شبیه به  $T$  خواهد شد. در نتیجه استفاده از تعریف بالا، معادله (۱۶) به صورت زیر در می‌آید

$$V \frac{\partial \theta}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}, \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (19)$$

شرایط مرزی معادله (۱۷) نیز بر حسب متغیر جدید  $\theta$  قابل بیان هستند. همان‌طور که مشخص است معادله (۱۹) از نوع معادله‌های سهموی است که دارای یک عبارت جابه‌جایی در جهت  $x$  و یک عبارت پخش گرما در جهت  $y$  است. برای حل این معادله به روش عددی می‌توان از ترکیب دو روش کرانک نیکلسون<sup>۱۱</sup> و روش بالا دست جریان<sup>۱۲</sup> استفاده کرد. بنابراین معادله (۱۹) به صورت زیر در می‌آید

$$V \frac{\theta_{i,j} - \theta_{i+1,j}}{\Delta x} = \frac{\alpha}{2} \left( \frac{\theta_{i,j+1} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}}{\Delta y^2} + \frac{\theta_{i+1,j+1} - 2\theta_{i+1,j} + \theta_{i+1,j-1}}{\Delta y^2} \right) \quad (20)$$

در معادله بالا، اندیسهای  $(i, j)$  مربوط به تغییرات در دو جهت  $(x, y)$  است. جزئیات دیگر مربوط به حل این معادله به طریق عددی در مرجع [۱۵] بیان شده است.

#### ۴- روش کلی بررسی انتقال گرما در کوره

قبل از بیان روش حل، توجه به این نکته ضروری به نظر می‌رسد که در بررسی کلی مسئله انتقال گرما در کوره به ناچار بایستی از دو شبکه حل استفاده کرد، یکی شبکه حلی که تحلیل انتقال گرمای تشعشی در کوره مورد استفاده قرار می‌گیرد و دیگری شبکه حلی که برای بررسی انتقال گرمای هدایتی در شمش مورد نیاز است. در روش صفحه‌های مجازی از یک

شبکه با المانهای محدود استفاده می‌شود ولی در بررسی هدایت در شمش شبکه مورد استفاده باید دیفرانسیلی باشد تا روش عددی همگرا شود. بنابراین، شرایط مرزی در مرز مشترک دو شبکه باید به طور مناسب به کار روند مثلاً به جای توزیع دمای سطح شمش که در اثر حل معادله هدایت در شبکه دیفرانسیلی به دست آمده است، روی المانهای بزرگتر مورد استفاده در روش صفحه‌های مجازی، از دمای متوسطی استفاده شود. با توجه به این مطلب روش حل را می‌توان در مراحل زیر خلاصه کرد

- ۱- توزیع دمای اولیه‌ای برای سطح شمش حدس زده می‌شود
- ۲- توسط روش صفحه‌های مجازی، شار گرما روی سطح شمش مشخص می‌شود
- ۳- با استفاده از معادله (۲۰)، توزیع دمای دو بعدی در شمش تعیین می‌شود
- ۴- دمای محاسبه شده برای سطح شمش با دمای فرض شده در مرحله اول مقایسه می‌شود، اگر اختلاف آنها از مقدار خطای مورد نظر (در این مقاله ۰/۱ درجه کلوین) کمتر بود جواب نهایی مشخص شده است در غیر این صورت باید مراحل دوم به بعد با دمای جدید محاسبه شده تکرار شود.

#### ۵- نتایج به دست آمده از برنامه رایانه‌ای

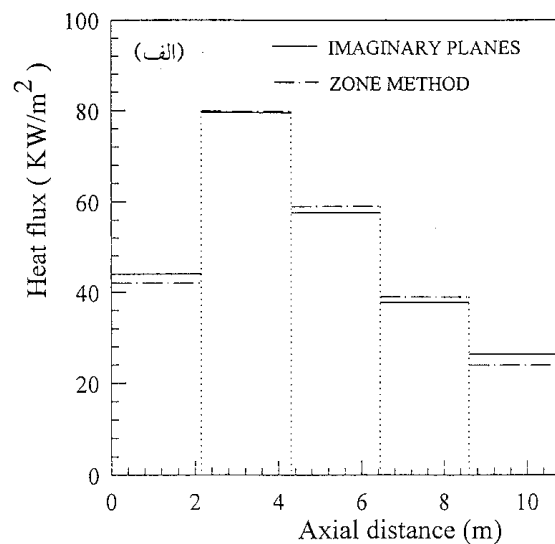
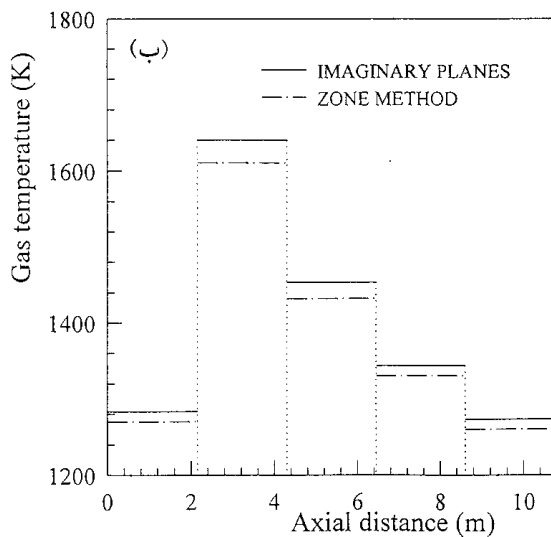
در این قسمت نتایج برای کوره‌های با ابعاد هندسی موجود در جدول (۱) ارائه شده است. برای انجام محاسبات انتقال گرما، محفظه کوره به ۱۰ ناحیه در جهت طولی و ۶ ناحیه در جهت عرضی تقسیم شده است. در شکل (۵) شبکه مورد استفاده در محاسبات و همچنین الگوی جریان گاز و الگوی گرمای حاصل از احتراق مورد استفاده در این شبکه به صورت کسری از مقادیر کلی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل تقارن شرایط در جهت عرض کوره، نیمی از عرض کوره در محاسبات وارد خواهد شد.

از آنجا که هدف اصلی این مقاله ارائه روشی برای شبیه‌سازی گرمایی کوره‌ها بوده است بنابراین مقایسه نتایج



جدول ۱- ابعاد هندسی و مقادیر ورودی برنامه رایانه‌ای

متغیر	مقادیر عددی و توضیحات
طول × عرض × ارتفاع (کوره)	8×6×1.2 (m)
سوخت	گاز طبیعی
دبی جرمی گاز	1.2 (kg/s)
دمای هوا و سوخت ورودی	650 (K)
دمای هوای محیط	298 (K)
حرارت آزاد شده از احتراق	4.2×10 <sup>6</sup> (W)
نوع گاز	خاکستری
ضریب قابلیت جذب گاز	0.175 (m <sup>-1</sup> )
ضریب صدور دیواره‌های جانبی و سقف کوره	۰/۷
ضریب صدور سطح شمش	۰/۸
ضریب صدور دیواره‌های ورودی و خروجی کوره	۰/۸
ضریب انتقال گرمای کلی دیواره‌های جانبی و سقف کوره	1.25 (W/m <sup>2</sup> K)
ضریب انتقال گرمای کلی دیواره‌های ورودی و خروجی کوره	0.005 (W/m <sup>2</sup> K)
ضریب انتقال گرمای جابه جایی سقف، دیواره‌های جانبی و کف	25 (W/m <sup>2</sup> K)
ضریب انتقال گرمای جابه جایی دیواره‌های ورودی و خروجی	50 (W/m <sup>2</sup> K)
گرمای ویژه گاز در فشار ثابت	1300 (J/kgK)
ضریب پخش حرارت شمش	7.55×10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> /s)
سرعت شمش در کوره	2.97 (mm/s)
ضخامت شمش	200 (mm)



شکل ۵- مقایسه نتایج روش صفحه‌های مجازی با روش ناحیه‌های [۹]  
(الف) توزیع شار گرما بر روی کف کوره، (ب) توزیع دمای گاز

حاصل از این برنامه با آنچه در عمل اتفاق می‌افتد امکان‌پذیر نیست، به همین دلیل برای حصول اطمینان از صحت عملکرد برنامه رایانه‌ای تهیه شده، ابتدا نتایج به دست آمده از برنامه با نتایج موجود در مرجع [۹] برای کوره‌ای با طول  $10/75\text{ m}$  که کف آن در دمای ثابت  $1033$  کلوین است مقایسه شده است. سایر مشخصات مورد استفاده در مرجع یاد شده موجود است. نتایج به دست آمده از این مقایسه در شکل (۵) ارائه شده است، در این شکل توزیع شار گرمایی متوسط بر روی کف کوره و همچنین دمای متوسط گاز در هر ناحیه نشان داده شده است. در شکل مذکور نتایج به دست آمده از دو روش ناحیه‌ای و صفحه‌های مجازی با هم مقایسه شده‌اند. این شکل دقت روش صفحه‌های مجازی را نسبت به روش ناحیه‌ای نشان می‌دهد. مقدار متوسط اختلاف نتایج به دست آمده از دو روش، در مورد دمای گاز  $10$  درجه کلوین و در مورد شار گرمایی  $2\text{ KW/m}^2$  است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دقت روش صفحه‌های مجازی با توجه به تقریبهایی که در آن به کار رفته است در مورد مسائل مهندسی قابل قبول است.

در شکل (۷) توزیع دمای گاز، سقف و دیواره‌های جانبی کوره نشان داده شده است. از این شکل مشخص است که در نتیجه استفاده از جریان یک بعدی گاز، اختلاف دمای سقف و دیواره‌های کوره ناچیز است. همچنین به دلیل اینکه در نیمی از طول کوره احتراق در نظر گرفته نشده است (در عمل نیز در چند متر ورودی کوره مشعلی وجود ندارد و شمشها فقط با گاز حاصل از احتراق پیشگرم می‌شوند)، دمای گاز در قسمت ورودی کوره در نتیجه تبادل گرما با سطح شمش کاهش می‌یابد، البته شکل منحنی توزیع دمای گاز در کوره تا حدود زیادی به الگوی احتراق در نظر گرفته شده بستگی دارد که تعیین این منحنی یکی از متغیرهای مهم در تعیین عملکرد کوره‌هاست.

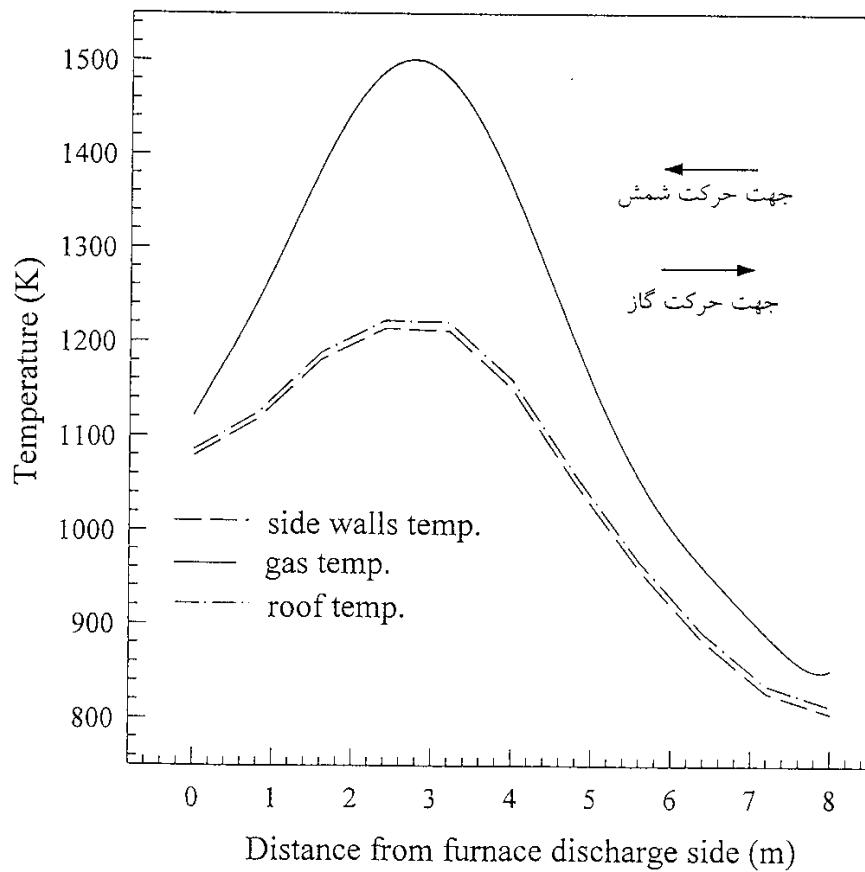
توزیع شار گرمایی اعمال شده بر روی سطح شمشها در اثر تشعشع و جابه‌جایی در شکل (۸) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در قسمتی از کوره که احتراق وجود دارد

شارگرما نیز بیشینه است. همچنین در این شکل توزیع دمای سطح و مغز شمش در طول کوره نشان داده شده است. در موقع ورود شمش به کوره، دمای سطح و مغز آن یکسان است ولی به واسطه تبادل گرمای مستقیم، دمای سطح شمش با سرعت بیشتری نسبت به دمای مغز افزایش می‌یابد که در نهایت، دمای سطح و مغز شمش اختلاف زیادی می‌یابند. در اینجا ذکر این نکته مهم است که در هنگام خروج شمش از کوره، این اختلاف دما نباید از  $20^\circ\text{C}$  بیشتر باشد که در عمل این مشکل با افزایش تعداد نواحی کوره، طول کوره و همچنین بیش بینی ناحیه یکنواخت کننده در کوره‌ها مرتفع می‌شود. در حقیقت شکل (۸) قسمتی از ابتدای کوره که ناحیه گرمایش است را نشان می‌دهد. در شکل (۹) توزیع دمای سطح شمش برای چند حالت که کوره با بهره‌وریهای مختلف کار می‌کند نشان داده شده است. مطابق این شکل افزایش سرعت حرکت شمش باعث کاهش میزان گرمای جذب شده توسط آن می‌شود.

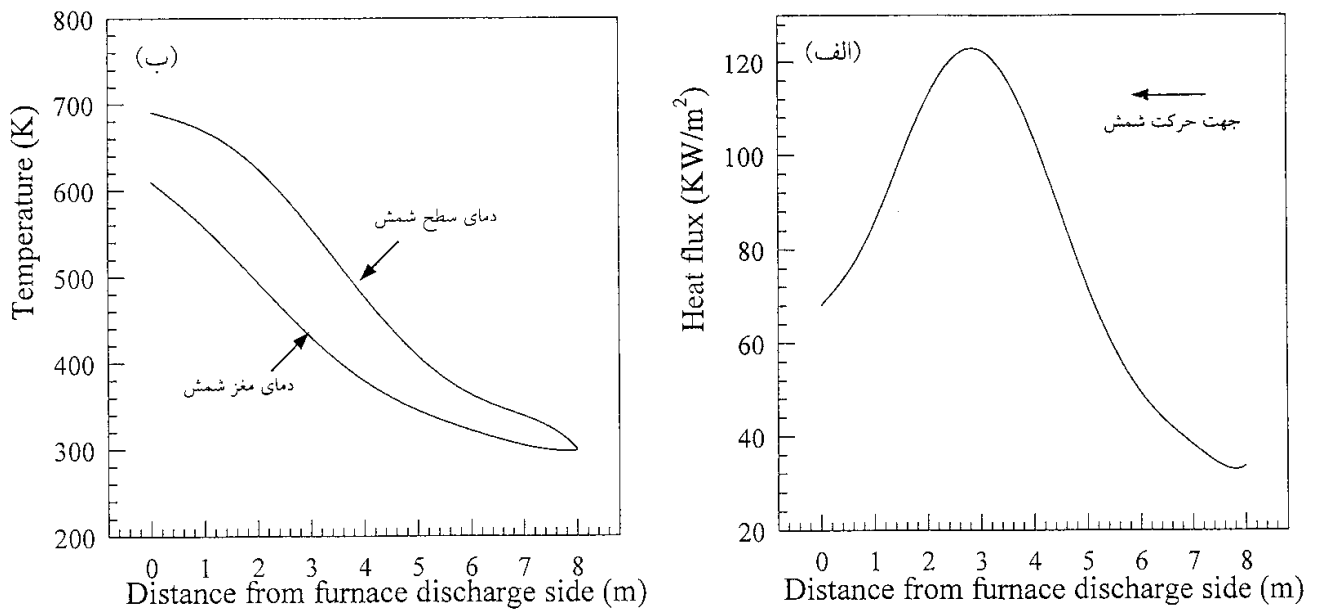
در شکل (۱۰) نیز پروفیل‌های دمای دو بعدی شمش در مقاطع مختلف کوره نشان داده شده است. مطابق این شکل با عبور شمش از کوره گرادپان دمایی نسبتاً بزرگی بین لایه‌های مختلف شمش ایجاد می‌شود بنابراین باید به این نکته توجه داشت که اندازه این اختلاف دما نباید از مقداری بیشتر شود زیرا در غیر این صورت باعث بروز ترک‌هایی بین لایه‌های مختلف شمش و در نتیجه خرابی کیفیت محصول نهایی خواهد شد.

## ۶- نتیجه گیری

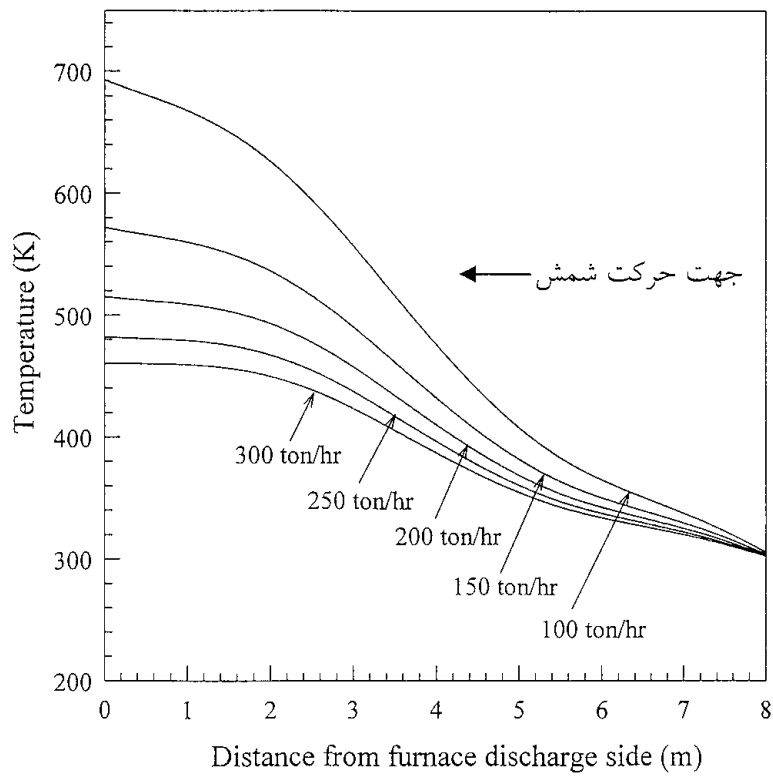
در این مقاله به منظور بیان طریقه استفاده از روش صفحه‌های مجازی در تحلیل انتقال گرما در یک کوره واقعی، ابتدا نتایج حاصل از این روش با نتایج ارائه شده در مرجع [۹] برای حالت خاصی مقایسه شد. سپس از این روش برای محاسبه توزیع دمای شمش در یک کوره مستطیل شکل که مدلی از یک ناحیه کوره واقعی است استفاده شد که در حقیقت هدف اصلی این



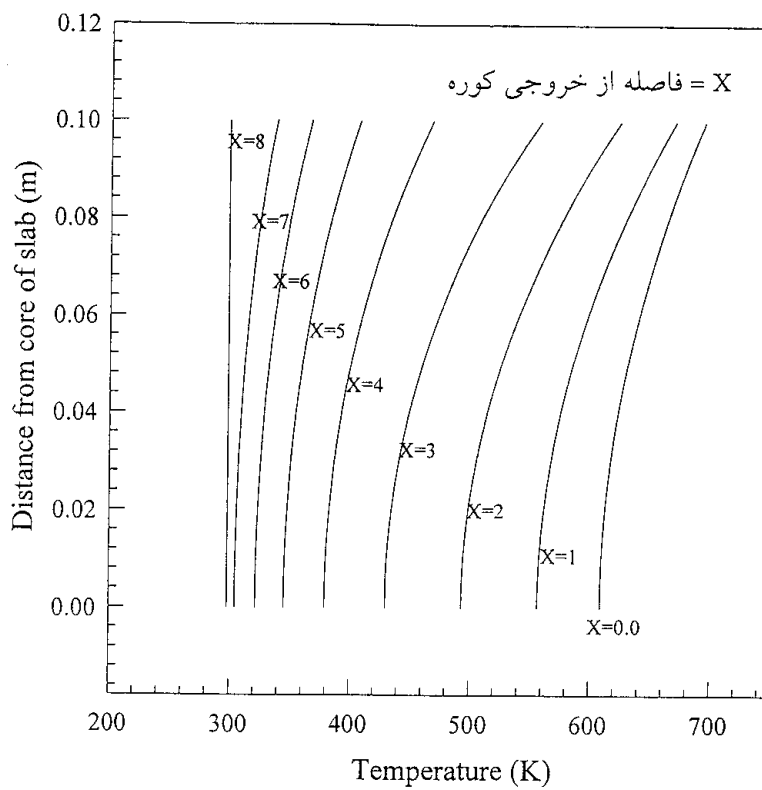
شکل ۶- توزیع دمای گاز، سقف و دیواره‌های جانبی کوره



شکل ۷- (الف) توزیع شار گرما بر روی سطح شمش در کوره، (ب) توزیع دمای سطح و مغز شمش در طول کوره



شکل ۸- توزیع دمای سطح شمش بر حسب سرعت تغذیه شمشها به کوره



شکل ۹- نحوه تغییر دما از مرکز تا سطح شمش در موقعیتهای مختلف کوره

با توجه به الگوریتم عددی مورد استفاده برای تحلیل انتقال گرمای کلی در یک کوره می‌توان به تواناییهای آن به طور خلاصه اشاره کرد. این روش علاوه بر اینکه قادر است هر سه نوع از مکانیزم انتقال گرما را در کوره بررسی کند قادر است اثر متغیرهایی نظیر خواص تشعشی و ترموفیزیکی محفظه کوره و گاز حاصل از احتراق، میزان تغذیه شمش به کوره، شرایط مرزی گوناگون، میزان تلفات گرما و اثر عواملی نظیر توزیع میدان جریان گاز و احتراق در کوره را مورد بررسی قرار دهد. در پایان می‌توان گفت که اگرچه در این مقاله از شکل ساده‌ای برای کوره استفاده شد ولی روش بیان شده توانایی بررسی یک کوره با شکل واقعی را دارد.

کار تحقیقاتی بوده است، نتایج به دست آمده به خوبی این مطلب را تأیید می‌کنند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به قابلیت‌های روش صفحه‌های مجازی اشاره کرد. اولاً به دلیل ماهیت فرمولبندی مخصوص، این روش زمان کمی برای انجام محاسبات نیاز دارد و سرعت همگرایی آن زیاد است به طوری که در مقایسه‌ای که در مرجع [۹] انجام شده است، مدت زمان مورد نیاز کمتر از ۰/۱ زمان مورد نیاز در روش ناحیه‌ای است. ثانیاً بر خلاف سادگی ذاتی که در فرمولبندی این روش مشاهده می‌شود از دقت قابل قبولی برای تحلیل مسائل مهندسی برخوردار است و از سوی دیگر این روش قادر است برای بررسی مسائلی با شکل هندسی پیچیده به کار رود

## واژه نامه

- |                            |                                   |                            |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1. zone method             | 5. weighting factors              | 9. axial conduction        |
| 2. imaginary planes method | 6. Kronecher delta                | 10. Kirchoff's method      |
| 3. directed flux areas     | 7. continous-pusher type furnaces | 11. Crank-Nichelson method |
| 4. exchange factors        | 8. skids                          | 12. upwind method          |

## مراجع

- Hottel, H.C., and Cohen, E.S., "Radiant Heat Exchange in a Gas-Filled Enclosure: Allowance for Non-Uniformity of Gas Temperature," *A.I.ch.E. J.*, Vol. 4, No. 1, pp. 3-14, 1958.
- Hottel, H. C., and Sarofim, A.F., *Radiative Transfer*, McGraw-Hill. New York, 1967.
- Larsen, M. E., and Howell, J.R., "The Exchange Factor Method: An Alternative Basis For Zonal Analysis of Radiating Exclosures," *J. Heat Transfer*, Vol. 107, 1979.
- Steward, F. R., and Tennankore, K. N., *J. Inst. Energy LII*, Vol. 107, 1979.
- Vercammen, H. A., and Forment, G. F., "An Improved Zone Method Using Monte Carlo Techniques for the Simulation of Radiation in Industrial Furnaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 328-336, 1980.
- Tucker, R.J., "Evaluation and Development of the Zone Method for Modelling Metal Heating Furnaces," Dissertation, Open University (UK), 1991.
- Chapman, K.S., et. al., "Modelling and Parametric Studies of Heat Transfer in a Direct-Fired Continuous Reheating Furnace," *Metallurgical Transactions B.*, Vol. 22B, pp. 513-521, August 1991.
- Yuen, M.Y.D., "The Modelling of Heat Transfer in Hot Strip Rolling," *Recent Advances in Heat Transfer and Micro-Structure Modelling for Metal Processing, ASME*, MD-Vol. 67, pp.223-231, 1995.
- Charette, A., Erchiqui, F., and Kocaeffe, Y. S., "The Imaginary Planes Method for the Calculation of Radiative Heat Transfer in Industrial Furnaces," *Can. J. Chem. Engng*, Vol. 67, pp. 378-384, 1989.
- Charette, A., Larouche, A., and Kocaeffe, Y.S., "Application of Imaginary Planes Method to Three-Dimensional Systems," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 33, No. 12, pp. 2671-2681, 1990.
- Herapath, R.G., and Peskett, S., "Excess Oxygen and Temperature Control in Furnaces-a Dynamic Modelling Study," *J. Inst. of Energy*, pp. 171-184, 1987.
- Acharya, A.D., and Chattopad. S., "Reheat Furnace Temperature Control and Performance at Essar Steel," *Iron and Steel*, pp. 31-36, 1998.

13. Smith, T. F., Shen, Z. F., and Friedman J. N., "Evaluation of Coefficient for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *J. Heat Transfer*, Vol. 104, No. 4, pp. 602-608, 1982.
14. Press, William H., Teukolsky, et. al., *Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing*, 2nd Edi., 1992.
۱۵. حاجیان نژاد، ع، "بررسی انتقال حرارت در شمش هنگام عبور از کوره پیش گرم نورد،" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان، زمستان ۱۳۷۶.
16. Browne, K.M., "The Thermal Conductivity of Carbon Steels," *Recent Advance in Heat Transfer and Micro-Structure Modelling for Metal Processing*, ASME, Md-Vol. 67, pp.105-113, 1995.