

# مدلسازی عددی کوره های پخت شیشه سکوریت و بهینه سازی آن براساس الگوریتم ژنتیک

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران،  
 m-dadsetan@gmail.com

مهديس دادستان

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران،  
 a-mostafavi@araku.ac.ir

دکتر سيد عليرضا مصطفوي

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران،  
 h-safikhani@araku.ac.ir

دکتر حامد صفي خاني\*

## چکیده

در این مقاله یک کوره پخت شیشه سکوریت به صورت عددی برای بررسی عملکرد انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به منظور تولید شیشه سکوریت با استحکام بالا، شیشه خام باید در داخل کوره تا دمای  $700^{\circ}\text{C}$  گرم شود. مدل‌سازی عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده و با بررسی مدل تابش DO توزیع دما در کوره بدست آمده است. نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده‌اند. این بهینه‌سازی چندمنظوره با هدف کاهش مصرف انرژی کوره و کاهش هزینه اولیه ساخت کوره در کنار تولید شیشه سکوریت با کیفیت بالا انجام می‌شود. اثرات چندین متغیر طراحی براساس الگوریتم ژنتیک بررسی شده است. در بهینه‌سازی اثر متغیرهای طراحی مثل فاصله بین مشعل‌ها و قطعات شیشه در داخل کوره، همچنین فاصله بین مشعل‌ها با یکدیگر، طول کوره، عرض کوره، ارتفاع کوره، و ... مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش طول کوره، ارتفاع کوره، فاصله مشعل‌ها تا قطعات شیشه و ابعاد دریچه ورودی منجر به کاهش در هزینه‌های ساخت و همچنین کاهش مصرف سوخت در کنار تولید شیشه سکوریت با استاندارد مناسب می‌شود. با وجود اینکه کاهش متغیر طراحی عرض کوره نیز منجر به بهبود توابع هدف در بهینه‌سازی می‌شود، ولی مقدار آن براساس نظر طراح متناسب با کاربرد کوره می‌تواند افزایش بیابد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی، بهینه‌سازی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک، شیشه سکوریت، کوره.

## Numerical modeling and optimization based on genetic algorithm of tempered glass furnaces

Mahdis Dadsetan

Department of Mechanical Engineering, University of Arak, Arak, Iran

Dr.SeyedAlireza Mostafavi

Department of Mechanical Engineering, University of Arak, Arak, Iran

Dr.hamed Safikhani

Department of Mechanical Engineering, University of Arak, Arak, Iran

## Abstract

In this paper, a tempering glass furnace is numerically analyzed for energy performance investigation. In order to manufacture high-strength tempered glass, the glass must be heated inside the furnace at above  $700^{\circ}\text{C}$ . Numerical modeling is simulated using computational fluid dynamics and temperature distribution in the furnace is obtained by studying the DO radiation model. Numerical analysis results are validated with experimental data. The multi-objective optimization is performed to reduce the furnace energy consumption and the primary cost of constructing the furnace, coupled the production of high quality glass tempered. The effects of several design variables are investigated based on genetic algorithm. In optimization, the effects of several important design variables are investigated, which are: the distance between the torches and the pieces of glass inside the furnace, the distance between the torches with each other, the furnace length, the furnace width, the furnace height and ect. The results show that the reduction in the value of the design variables leads to reduction in the cost of manufacturing and consumption of fuel, coupled the production of tempered glass with the appropriate standard. although the reduction of the design variable in the furnace has also led to an improvement of target functions in optimization, its value can be increased according to the designer and the furnace application.

**Keywords :** Numerical modeling, multi-objective optimization, Genetic algorithm, tempered glass, furnace.

پایان می‌رسد.

## ۱- مقدمه

در مورد موضوع ذکر شده تاکنون پژوهش‌های زیادی انجام شده است که برخی از مهمترین آنها در این قسمت ذکر خواهد شد. جین وو و همکاران [۱] توزیع دما در یک کوره غلطکی را بررسی کردند. کوره غلطکی دارای مزیت گرمایش یکنواخت بدون در نظر گرفتن شکل مواد خام است و به راحتی می‌توان مواد را به طور پیوسته درون آن شارژ کرد. آنها یک مدل CFD<sup>۱</sup> از این کوره را برای آنالیز انرژی در داخل

شیشه‌های سکوریت یکی از شیشه‌های ایمن در بازار است که استفاده از آن برای جلوگیری از خطرات بالقوه در هنگام شکستن آن است. این شیشه‌ها در هنگام ساخت از یک فرایند حرارتی عبور داده می‌شوند که باعث مقاومت در برابر حرارت می‌شود و دوام بیشتری به شیشه می‌دهد. به همین دلیل به آن شیشه ایمن یا سکوریت می‌گویند. به منظور تولید شیشه سکوریت با استحکام بسیار بالا، شیشه باید در داخل کوره‌هایی با دمای  $700^{\circ}\text{C}$  تحت عملیات حرارتی قرار گیرد و پس از آن با خنک کردن سریع شیشه، عملیات سکوریت کردن به

<sup>1</sup> Computational fluid dynamics

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: h-safikhani@araku.ac.ir

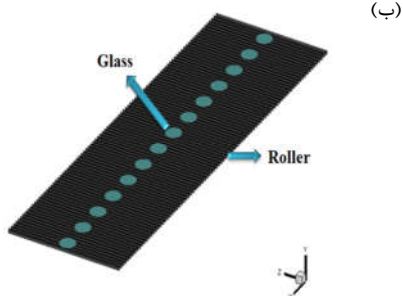
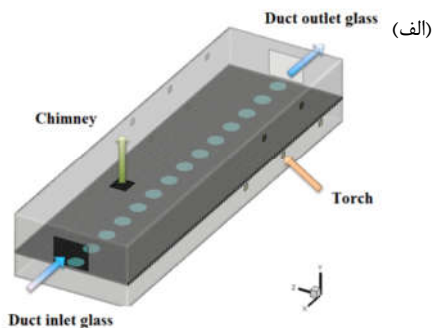
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۰۶

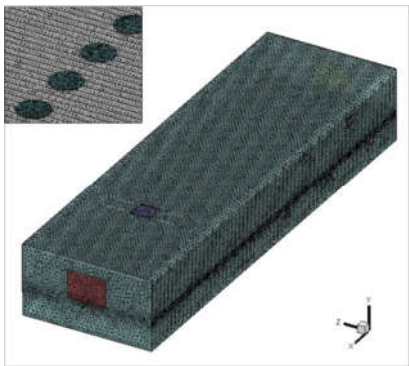
کوره ارائه نمودند و تاثیر عایق‌بندی و مدل تابش در داخل کوره را بررسی کردند. وانگ و همکاران [۲] یک آنالیز شبیه سازی برای کوره گرمایشی عمودی ارائه نمودند. آن‌ها مشخصه‌های انتقال گرما و بازده گرمایی را برای کوره گرمایشی بدست آوردند نتایج نشان داد که در مقایسه با تاثیر دمای گاز دودکش و نرخ جریان در بازده حرارتی، نرخ جریان نفت خام بیشترین تاثیر را بر بازده حرارتی کوره گرم دارد. حاج علی اکبری و حسن پور [۳] یک مدل سه بعدی برای تجزیه و تحلیل بازده کلی عملیات حرارتی در یک کوره پخت پیوسته ارائه نمودند. در این مدل انتقال گرما از سطح خارجی لوله های صاف تا نوار از طریق تابش گرمایی در نظر گرفته شد. آن‌ها اثرات چندین پارامتر مانند پهنای باند و ضخامت نوار، سرعت نوری و همچنین توان گرمایشی تولید شده توسط لوله های صاف و تاثیر آن بر روی کارایی کوره پخت پیوسته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نوار با ضخامت و عرض کم تر منجر به کاهش بازدهی می شود و قدرت گرمایی در خروجی کوره به شدت بر کارایی تاثیر می گذارد. رامامورتی و همکاران [۴] یک مدل ریاضی متشکل از مدل های لوله تابشی و کوره فضای بسته مبتنی بر تعادل انرژی و را برای ارزیابی جریان، دما و CFD روابط فیزیکی برای یک کوره تابشی پیوسته گاز سوز پیشنهاد داده‌اند. نیدر و همکاران [5] یک مدل ساده شده شامل برخی از زیر مدل‌های گاز دودکش، لوله تابشی، دیوار و نوار را با استفاده از اصول اولیه توسعه دادند. چنا و همکاران [6] مصرف انرژی و عملکرد کوره‌های بازگرم در یک کارخانه را بررسی نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش نرخ تولید کوره ها برای استفاده موثر از سوخت مساعد می‌باشد. اندازه گیری ها نشان می دهند که نزدیک به ۸۰٪ گرما در کوره ها به وسیله احتراق سوخت و ۱۵٫۷٪ به وسیله گاز دودکش داغ تامین می شود. پریته و همکاران [7] یک مدل فیزیکی را معرفی نمودند که تمام مکانیسم‌های انتقال گرمای مؤثر درون کوره را در نظر می‌گیرد. با استفاده از این روش، یک مدل ساده برای حفظ تعادل انرژی درون کوره ساخته شد و دمای نوار مرتبط با محدوده‌های عملکردی مختلف تعیین گردید. سوزوکی و همکاران [8] یک روش مدل‌سازی را پیشنهاد کرده و به طور همزمان زمانبندی و کنترل گرمایی کوره بازگرم را بهینه نمودند. فی و همکاران [9] یک مدل تحلیلی را برای محاسبه مکانیزم انتقال گرما و دمای نواری پیشنهاد کردند که می‌تواند برای فرآیندهای کنترل استفاده شود. آن‌ها یک شرط مرزی جدید شامل یک تابع چند متغیره برای نوار را تعریف کردند که برای در نظر گرفتن تاثیر قدرت گرمایی، قدرت خنک‌کنندگی و سرعت خطی در مساله بهینه‌سازی استفاده شده است. کسل و همکاران [10] یک روش مدل‌سازی جدید برای شبیه‌سازی سه‌بعدی یک کوره بازگرم شمش‌های فولادی با شعله‌های گاز طبیعی ارائه کردند. آن‌ها با ارائه یک روش جدید مدل‌سازی پایا از کوره، توزیع دما در شمش‌های فولاد را بدست آوردند. کیم و همکاران [11] احتراق در جریان آشفته و انتقال گرمای تابشی برای پیش‌بینی توزیع دما درون کوره‌های بازگرم و شار گرمایی را از طریق نرم‌افزار Fluent مدل‌سازی کردند. پریر و همکاران [12] یک کوره گاز سوز که برای لوله‌های فولادی است، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از یک روش عددی جدید برای پیش‌بینی احتراق فاز گاز، انتقال گرما و ویژگی‌های گرمایش گذرا در فولاد و داخل کوره استفاده کردند. در این شبیه‌سازی روند راه‌حل تکرارشونده‌ای را در نظر گرفته‌اند که

احتراق فاز گازی کوره در حالت پایدار و شبیه‌سازی فولاد در حالت ناپایدار، به طور جداگانه بررسی شدند. شبیه‌سازی نشان داد که ۹۳٪ از کل شار گرمایی شمش فولاد با انتقال حرارت تشعشع ایجاد شده‌است. یک مطالعه موردی برای بهینه‌سازی فرآیند گرمایش در کوره توسط جاکلیک و همکاران [13] در رابطه با فضای بین شمش‌های فولادی انجام شد. فضای بهینه بین دو قطعه برای سه اندازه‌ی مختلف با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی براساس دما، برای محاسبه انتقال حرارت در کوره بدست آمد. سینگ و همکاران [14] مدل را برای کوره غلطکی بررسی کردند. سه مدل شار گرمایی تابشی را با مدل‌های شبیه‌سازی و ساده‌سازی‌های متفاوت در کوره شبیه‌سازی کردند. مدل چهارم شار گرمای همرفتی را با حل معادلات انتقالی مورد بررسی قرار داد و پیش‌بینی دمای بهبود یافته برای قطعه کار را نشان داد. مورگادو و همکاران [15] از یک مدل گذرای دقیق استفاده کردند. آن‌ها برای حل معادلات انتقالی حاکم یک کد ریاضی فرض کردند که تابش و همرفت در کوره را پیش‌بینی کنند. در مدل دوم کوره را به مناطق مختلف تقسیم کردند که تنها انتقال گرمای تابشی را محاسبه می‌کرد. مشخص شد که مدل دوم قادر به پیش‌بینی شار گرمایی با جزئیات زیاد نیست، اما انحراف میانگین دمای پیش‌بینی‌شده در این صفحات، از مقدار واقعی را تنها ۳٪ نشان داد. جوزویاک و همکاران [16] امکان جایگزین شدن نسبی گاز طبیعی با گاز سنتز در یک کوره صنعتی مورد استفاده در بخش فولاد با استفاده از مدل CFD وابسته به زمان را مطالعه کردند. تحلیل نتایج، به عنوان مثال منحنی‌های گرمایش، محاسبه بار و توزیع دمای سطح در مقایسه با شرایط کاری معمول کوره موجود، امکان حذف گاز طبیعی بدون به خطر انداختن کیفیت عملیات حرارتی را تایید کرد. عمادی و همکاران [17] به طور عددی خصوصیات گرمایی شمش را در کوره غلطکی مورد بررسی قرار داده و اثرات رسانایی گرمایی و قابلیت تابش دیوار بر رفتار حرارتی شمش را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست‌آمده نشان داد که با افزایش قابلیت تابش نور کوره برای زمان مشخص، دمای شمش در مناطق اصلی افزایش می‌یابد اما تاثیر قابل‌توجهی بر دمای نهایی آن ندارد. پترسون و همکاران [18] روشی را برای بهینه‌سازی ساخت آهن در کوره‌های احتراقی با هدف به حداقل رساندن انتشار کربن دی‌اکسید، توسعه داده‌اند. آن‌ها این هدف را توسط یک الگوریتم ژنتیک اجرا کردند که الگوریتم حالت‌های اجرایی را بر روی یک نمودار بهینه پارتو<sup>۱</sup> نشان داده‌اند. آن‌ها حالت‌های بهینه را روی نمودار پارتو با توجه به محدودیت‌های فرآیند تحلیل کردند و راه‌حل‌های متفاوتی را برای کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای ارائه دادند. فالی و همکاران [19] بهینه‌سازی میکرومبادله‌کن گرمایی را بررسی کردند. مطالعات نشان داده‌اند که عملکرد حرارتی مبادله‌کن گرمایی به پارامترهای هندسی و شرایط جریان بستگی دارد. آن‌ها دو روش برای تعیین پارامترهای بهینه هندسی کانال‌ها در مبادله‌کن ریز گرمایی را ارائه دادند. در رویکرد اول، تحلیل CFD را با روش آنالیز تحلیلی برای محاسبه پارامترهای بهینه هندسی میکرو مبادله‌کن گرمایی ترکیب می‌کند و در روش دوم با استفاده از الگوریتم های ژنتیک چند هدفه در ترکیب

<sup>1</sup> pareto



شکل ۱- توصیف هندسه کوره (الف) خارج کوره (ب) داخل کوره



شکل ۲- شبکه بندی کوره

برای مدل سازی اغتشاش از معادلات  $k_{\epsilon}$  استفاده شده است. معادلات  $k_{\epsilon}$  در معادلات (۳) مشاهده می شود. [23]

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (pk)}{\partial t} + \text{div}(pkU) &= \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad}(k) \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \\ \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon U) &= \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad}(\epsilon) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} \\ &\quad - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

که  $\bar{u}_i$  سرعت متوسط،  $x_i$  مکان،  $\bar{P}$  فشار متوسط،  $\rho$  چگالی ثابت گاز،  $\nu$  لزجت جنبشی و  $R_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j$  تانسور تنش رینولدز می باشد. در اینجا  $\bar{u}_i = u_i - \bar{u}_i$  مؤلفه سرعت نوسانی  $i$  ام است.

CFD بهینه سازی را انجام دادند. لیو و همکاران [20] یک بهینه سازی نظری را برای توسعه یک مبادله کن گرمایی انجام دادند. شبیه سازی عددی و بهینه سازی چند هدفه با هم ترکیب شدند تا عملکرد مبادله کن گرمایی اصلی را بهبود بخشند. جانگ و هوانگ [21] یک مدل انتقال حرارت دو بعدی برای پیش بینی توزیع دمای صفحات فولادی به منظور بدست آوردن الگوی گرمایش بهینه با حداقل مصرف انرژی در کوره های نوار داغ ارائه دادند. تاثیر توزیع دمای کوره بر الزامات طراحی، از جمله انرژی مورد نیاز برای گرم کردن یک قطعه، یکنواختی دمای کوره در خروجی کوره و دمای نهایی قطعه کار، مورد بررسی قرار گرفت. طراحی بهینه همچنین باعث کاهش مصرف انرژی در مقایسه با شرایط عملیاتی اصلی در کارخانه فولاد شد.

تا کنون روش های مختلفی برای مدل سازی و بررسی برخی از انواع کوره های صنعتی انجام شده است و عوامل تاثیرگذار بر توزیع دما در آن ها بررسی شده است. همچنین مطالعاتی بر روی روش های بهینه سازی و نتایج آن ها انجام شده است. با توجه به مطالعات انجام شده روی انواع کوره های صنعتی و بررسی روش های مدل سازی کوره ها در این مقاله به مدل سازی کوره های پخت شیشه سکوریت پرداخته می شود. این مدل سازی با هدف بررسی توزیع دما در این نوع از کوره ها و استفاده از نتایج مدل سازی به منظور بهینه سازی هندسه کوره انجام شد است. با توجه به ضرورت بهینه سازی کوره ها به منظور بهبود عملکرد و کاهش هزینه های تولید، مدل ایجاد شده بر اساس الگوریتم بهینه سازی چند هدفه مورد بهینه سازی قرار داده شده است.

## ۲- مدل سازی عددی

### ۲-۱- توصیف کوره

در این مطالعه، یک کوره پخت شیشه سکوریت همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مورد مطالعه قرار گرفته است. این کوره دارای طول ۶۹۰ سانتی متر، ارتفاع ۱۱۵ سانتی متر و عرض ۲۱۰ سانتی متر است. مطابق با شکل شیشه ها به شکل دایره با ضخامت ۴ میلی متر و قطر ۳۲ سانتی متر از ورودی کوره روی غلطک ها قرار می گیرند و بر روی آن ها در طول کوره حرکت کرده تا در انتها از قسمت خروجی کوره، خارج شوند. در دو طرف کوره ۱۰ مشعل با آرایش مثلثی قرار گرفته اند. یک دودکش بر روی دیواره بالایی کوره برای خروج محصولات احتراق، قرار گرفته است. شکل ۲، شبکه بندی کوره را نشان می دهد.

### ۲-۲- معادلات حاکم

در نرم افزار FLUENT، مدل های عددی مختلف باید قبل از انجام شبیه سازی واقعی در نظر گرفته شوند. معادلات حاکم بر مبنای موقعیت کوره انتخاب شده اند و فرضیات کافی نیز ساخته شده اند. در این مطالعه سه مدل اصلی لزجت، انرژی و تابش اتخاذ می شوند. برای جریان تراکم ناپذیر سیال، معادله پیوستگی و ممنتوم به صورت معادله (۱) و (۲) می باشد:

مدل استاندارد  $k_{\varepsilon}$  مقادیر موجود در زیر را برای ثابت هایی که در یک محدوده وسیع جریان های آشفتنه وارد می شوند، بکار می برد.

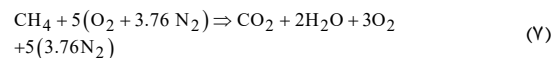
$$C_{1\varepsilon} = 1.44; \sigma_{\varepsilon} = 1.30; C_{2\varepsilon} = 1.92; C_{1k} = 1.00; C_{2k} = 1.92 \quad (4)$$

اصل بقای انرژی، کاربرد قانون اول ترمودینامیک برای المان های سیال که در جریان است، می باشد. همراه با معادلات انتقال جرم و ممتوم و معادله انرژی باید انتقال گرمای جابجایی و رسانی هم در نظر گرفته شود. معادله انرژی در معادله (۵) و (۶) نشان داده شده است. [23]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot \left( k \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \bar{v}) \right) + S_h \quad (5)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (6)$$

که در اینجا  $h$  آنتالپی،  $k$  رسانایی ملکولی،  $k_t$  گرمای ناشی از انتقال آشفتگی و  $S_h$  عبارت منبع که شامل هر منبع حرارتی حجمی می شود، است.  $S_h$  همچنین شامل موارد منبع تابش در زمانی است که مدل تابش در نظر گرفته می شود. برای مدلسازی احتراق، از هوا با دمای بالا استفاده شده است. با توجه به معادله احتراق گاز متان و با فرض نسبت استوکیومتری ۱ به ۵ سوخت به هوا برای واکنش احتراق داریم:



مقدار انتقال گرما فرایند با اختلاف آنتالپی تشکیل ورودی ها و خروجی ها برابر است. قبل از محاسبه انتقال گرما بایستی بگوییم که فرض بر این است که دما و فشار واکنش دهنده ها به ترتیب برابر با ۲۵ درجه و ۱ اتمسفر است. مقدار انتقال گرما در این فرایند برابر است با:

$$Q = \sum N_p h_p^0 - \sum N_r h_r^0 \quad (8)$$

آنتالپی تشکیل  $CO_2$ ،  $H_2O$  و  $CH_4$  به ترتیب برابر  $-393520$ ،  $-241820$  و  $-74850$  است. توجه شود که آنتالپی تشکیل عناصر پایه مثل  $O_2$  و  $N_2$  همواره صفر است.

$$Q = 1(-393520) + 2(-241820) + 3(0) + 18.8(0) - 1(-74850) = -802310 \quad (9)$$

احتراق با فرض ورود هوا با دمای بالا به داخل کوره مدلسازی شده است. با این فرض و با استفاده از مفهوم ضریب انتقال گرما در فشار ثابت، دمای هوای ورودی به کوره، به شکل زیر بدست می آید.

$$N_t = 1 + 2 + 3 + 18.8 = 24.8 \text{ [kmol]} \\ Q = 24.8 \times M_{air} \times C_{p1000K} \times (T_{air} - 298) = 802310 \quad (10)$$

$$M_{air} = 29 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right], C_{p1000K} = 1.142 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right], T_{air} = 1275 \text{ [K]}$$

انتقال گرمای تابشی در داخل کوره توسط مدل (DO) محاسبه می شود. این مدل معادله انتقال تابشی (RTE) را برای تعداد محدودی از زوایای گسسته جامد، که هر کدام با یک جهت برداری در سیستم دکارتی مرتبط هستند، حل می کند. مدل DO به دلیل ضخامت کم نوری هوا نسبت به مدل  $p_1$  انتخاب شده است. علاوه بر این، دیواره های کوره و عایق های دیواره ای کدر هستند. در نتیجه، RTE را می توان با معادلات (۱۱) و (۱۲) برای قسمت سیال و دیوار مرزی محاسبه کرد.

$$\nabla \cdot (I(\bar{r}, \bar{s}) \bar{s}) + (a + \sigma_s) I(\bar{r}, \bar{s}) = \frac{an^2 \sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\bar{r}, \bar{s}') \Phi(\bar{s}, \bar{s}') d\Omega \quad (11)$$

$$I(\bar{r}_w, \bar{s}) = \varepsilon_w n^2 \frac{\sigma T_w^4}{\pi} + \frac{1 - \varepsilon_w}{\pi} \int_0^{4\pi} I(\bar{r}, \bar{s}') \bar{s} \cdot \bar{n}_w d\Omega \quad (12) \\ \bar{s} \cdot \bar{n}_w > 0$$

در اینجا،  $I$  شدت تابش که از تابع پلانک بدست آمده و  $\alpha$  ضریب جذب،  $\sigma_s$  ضریب پراکندگی و  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن است. در سراسر شبیه سازی، در تمام موارد بدنه خاکستری فرض می شود و قابلیت تابش خاص سطوح ماده به دقت اتخاذ می شود. تنظیمات دیگر مانند گسسته سازی زوایای و ضریب پخش به طور پیش فرض تنظیم شده است. برای حل همزمان سرعت و فشار از الگوریتم simple استفاده شده است.

## ۳-۲- شرایط مرزی

مفروضات زیادی برای ساده سازی مدل قبل از ایجاد تنظیمات دقیق ایجاد شده اند. غلطک های کوره به منظور کاهش المان های مش و بهبود کیفیت مش به شکل مربع ساده شده اند. هم چنین برخلاف شرایط واقعی، قسمت ورودی و خروجی شیشه با شرط مرزی جابجایی و ضریب تشعشع  $0.93$  مدل شده است. قابلیت تابش بیشتر مواد تابعی از شرایط سطحی، دما اندازه گیری شده است. در این حالت، قابلیت تابش  $0.93$  است. در نهایت، ضریب انتقال گرمای همرفتی در دیواره های خارجی و رولر ثابت فرض شده است.

## ۴-۲- صحت سنجی

برای اعتبار سنجی مدل کوره، از ۵ ترموکوپل اندازه گیری دما در طول کوره استفاده شده است. ترموکوپل ها به دیواره ی خارجی متصل و تمام اطلاعات به منظور دریافت مقادیر تجربی در زمان کار کوره اندازه گیری شده است. نتایج این آزمایش در جدول نشان داده شده است. این نتایج با مقادیر حل عددی بدست آمده مقایسه و تایید شده است. هم چنین مقدار سوخت مصرفی کوره در یک دوره یک ماهه بدست آمده و نتایج آن با مقدار مصرفی که توسط یک کنتور که در محل کوره نصب شده، اندازه گیری و نتایج آن ها مقایسه و تایید شده است. در طول دوره یک ماهه، حدود  $27500$  متر مکعب گاز مورد

<sup>1</sup> Discrete Ordinates

<sup>2</sup> Radiative Transfer Equation

استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱- شرایط مرزی

مکان	شرط مرزی	شرط مرزی گرمایی	ضریب جابجایی	ضریب صدور تابش
Inlet_duct	wall	convection	250	0.93
Outlet_duct	wall	convection	250	0.93
roller	wall	convection	35	0.75
wall	wall	convection	30	0.93
glass	wall	coupled	-	0.9
torch	Mass flow inlet	$T_{inlet}$ $T=1275$ K	Mass flow inlet 0.9 (Kg/s)	1
chimney	Pressure outlet	Back flow temperature $T=300$ K	Pressure gauge 0(pascal)	0

جدول ۲- صحت سنجی

محل ترموکوپل در طول کوره (سانتی متر)	نتایج تجربی (کلوین)	حل عددی (کلوین)
۳۴۵	۱۰۲۱	۱۰۷۵
۴۰۱	۱۰۰۰	۱۰۸۸/۱
۵۰۰	۹۸۳	۱۰۷۶
۵۱۰	۹۶۹	۱۰۸۲
۵۶۵	۹۹۰	۱۰۸۳

### ۳- بهینه سازی

در مسائل بهینه سازی نوین، مجموعه ای از بردارهای طراحی بهینه به عنوان جواب مسأله معرفی می گردند، که پارتو خوانده می شوند. با استفاده از این جواب، طراح با توجه به نیاز خود و درجه اهمیتی که برای توابع هدف در نظر می گیرد یکی از این بردارها را برمیگزیند. این مقاله نیز با هدف بهینه سازی همزمان هزینه های اولیه تولید کوره پخت شیشه سکوریت و کاهش مصرف انرژی با حفظ کیفیت شیشه تولید شده نهایی انجام شده است.

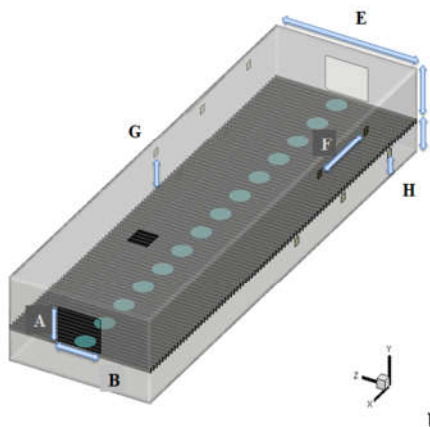
#### ۱-۳- متغیر طراحی

برای تعیین متغیرهای طراحی برای بهینه سازی کوره ابعاد هندسی موثر در کوره بررسی شده است. در شکل ۳ متغیر طراحی روی هندسه کوره مشخص شده است. حدود تغییرات هر کدام از متغیرها در جدول ۳ آمده است.

#### ۲-۳- توابع هدف

هدف از بهینه سازی کوره کاهش هزینه ها و حفظ کیفیت شیشه سکوریت شده در کوره است. برای حفظ کیفیت شیشه در خروجی

کوره لازم است شیشه به طور یکنواخت تا دمای نرمی شیشه یعنی حدود ۷۰۰ درجه سلسیوس گرم بعد از خروج از کوره سرد شود. بنابراین اگر شیشه تا دمایی کمتر از دمای تعیین شده گرم شود، شیشه سکوریت به کیفیت مطلوب نمی رسد و اگر افزایش دمای آن در کوره بیشتر از دمای تعیین شده باشد امکان ذوب شدن و یا تغییر شکل آن در کوره وجود دارد. علاوه بر آن هزینه تولید و یا خرید این نوع از کوره ها بسیار بالا می باشد. بنابراین کوره برای کاهش هزینه های اولیه و هزینه سوخت مصرفی همزمان با حفظ کیفیت شیشه سکوریت بهینه می شود. تابع هزینه کوره براساس هزینه ساخت نسبت به اندازه کوره تعیین شده است.



شکل ۳- متغیرهای طراحی

جدول ۳- حدود متغیرهای طراحی

متغیر طراحی	تا	از
A	18	7
B	70	50
C	75	55
D	55	38
E	150	60
F	60	40
G	44	20
H	20	9
Mass flow	1	0.1

### ۳-۳- الگوریتم ژنتیک

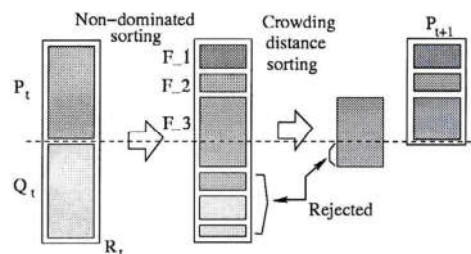
این الگوریتم از یک قسمت اصلی و سه زیر برنامه همانند ذیل تشکیل شده است:

سه زیر برنامه FNDF، FNDF و CDA به گونه ای برنامه ریزی شده اند که جمعیت داده ها را گرفته و از میان آن ها گروه های برترین اعضای جمعیت و گروه غیر برتر را ایجاد می کنند. زیر برنامه CDA برای جلوگیری از تجمع اعضای یک جمعیت در یک فاصله کوچک و خالی ماندن بقیه بازه، طراحی شده است، زیرا آنچه برای ما مطلوب است آن است که هنگامی که بهترین جبهه توسط برنامه به نمایش در می آید، اعضای جبهه روی سطح منحنی کاملاً پخش شده باشند.

### ۳-۴- قسمت اصلی الگوریتم

در قسمت اصلی برنامه ابتدا جمعیت قدیم  $P_t$  با فرزندان  $Q_t$  ترکیب می‌شوند. اندیس  $t$  نشان دهنده و شمارنده تعداد دفعات تکرار برنامه است. مجموعه جدید  $R_t$  به FNDS فرستاده می‌شود و جمعیت به صورت جبهه‌بندی شده در  $F$  باز می‌گردد. این الگوریتم، جمعیت جدید را به این شکل انتخاب می‌کند:

جمعیت جدید در  $P_{t+1}$  شکل می‌گیرد که در حال حاضر تهی است. در یک حلقه شرط کنترل می‌شود که در آن تعداد اعضای جبهه  $i$  ام و  $N$  سائز جمعیت جدید است که باید تشکیل شود. اگر هنوز جمعیت پر نشده بود (یعنی شرط نامساوی بالا صحیح بود) برنامه وارد حلقه می‌شود، این جبهه را به جمعیت جدید منتقل می‌کند و دوباره حلقه را برای جبهه بعدی کنترل می‌نماید. این عمل آن قدر تکرار می‌شود تا جمعیت جدید تا حدی پر شود که با اضافه شدن یک جبهه اندازه آن از  $N$  بزرگتر شود. شکل ۴ طرحواره این عملیات را نمایش می‌دهد.

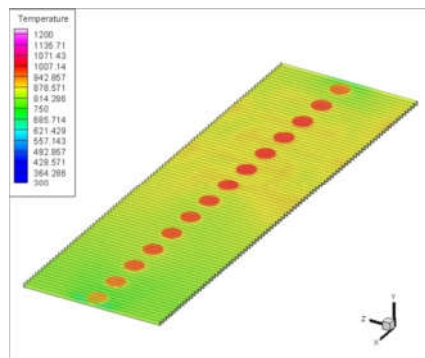


شکل ۴- الگوریتم ژنتیک

### ۴- نتایج

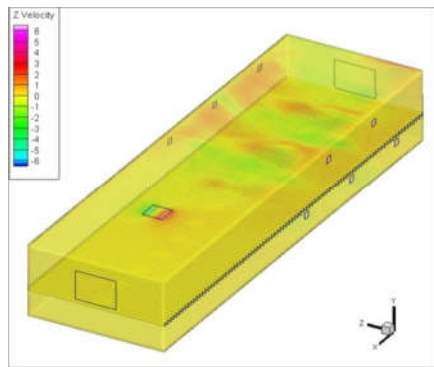
#### ۱-۴- توزیع دما و سرعت

براساس مدل ایجاد شده، توزیع دمای در شیشه، غلطک‌ها و محفظه کوره در شکل ۵ نشان داده شده است. دمای مشعل در حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس بیش‌ترین است در حالی که دما در سطح غلطک‌ها از ابتدا تا انتهای کوره افزایش می‌یابد.



شکل ۵- توزیع دما در کوره

دمای قطعات شیشه نیز از ابتدا تا انتهای کوره افزایش می‌یابد. هیچ داده تجربی پیوسته‌ای از پروفیل دمای قطعات شیشه در داخل کوره به علت دمای بالا و فاصله طولانی وجود ندارد. شیشه‌ها تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند و داخل کوره به دمای مطلوب می‌رسند. کانتور سرعت در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود سرعت جریان هوا در نزدیکی مشعل‌ها بیشترین مقدار خود را داراست و در فاصله‌های دورتر سرعت کاهش می‌یابد. از آنجا که سرعت جریان در جهت  $Z$  نشان داده شده است سرعت جریان مشعل‌های سمت چپ کوره مقدار منفی را نشان می‌دهند.



شکل ۶- کانتور سرعت

#### ۲-۴- طول بهینه کوره

طول کوره به عنوان یکی از متغیرهای طراحی در هندسه کوره بر توابع هدف بهینه‌سازی موثر است اما به دلیل ایجاد خطا در فرآیند بهینه‌سازی به طور جداگانه مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. علت ایجاد خطا مربوط به هندسه کوره می‌شود.

جدول ۴- نتایج بهینه‌سازی طول

شماره	طول کوره (cm)	دبی ورودی (Kg/s)	دمای شیشه در خروجی (K)	هزینه (\$)
۱	۶۹۰	۰٫۹	۹۷۶٫۲۲۵	۴۷۰۸٫۲۵
۲	۶۰۰	۰٫۹	۹۸۱٫۳۶۹	۴۲۰۴٫۱۶۷
۳	۶۰۰	۰٫۷۲	۹۷۸٫۶۲	۴۲۰۴٫۱۶۷
۴	۵۴۵	۰٫۷۲	۹۸۲٫۶۵	۳۹۱۰٫۸۳۳
۵	۴۸۵	۰٫۵۴	۹۸۷٫۷	۳۵۸۸٫۳۳۴
۶	۴۴۵	۰٫۳۶	۹۷۰٫۲۱	۳۳۰۵

جدول ۵- نمونه‌ای از کوره های بررسی شده در بهینه‌سازی

number	متغیرهای طراحی								تابع هدف		
	a	b	c	d	E	f	g	h	Mass flow(kg/s)	price	$T_{out}(K)$
1	7.13	50.25	55.25	38.21	61.12	40.25	20.3	9.13	0.107	2823.1	1000.3
2	7.49	50.75	59.25	40.64	69.30	50.25	21.71	9.98	0.128	2979.8	1002.4
3	7.84	51.25	63.25	43.07	77.48	45.25	23.12	10.83	0.148	3139.1	993.72
4	8.20	51.75	67.25	45.49	85.67	55.25	24.53	11.67	0.169	3300.9	991.2
5	8.55	52.25	71.25	47.92	93.85	42.75	25.94	12.52	0.190	3465.1	987.92
6	8.91	52.75	56.05	50.35	102.03	52.75	27.35	13.36	0.210	3477.7	991.48
7	9.26	53.25	60.05	52.78	110.22	47.75	28.77	14.21	0.231	3643.1	988.81
8	9.62	53.75	64.05	38.55	118.4	57.75	30.18	15.06	0.252	3671	987.02
9	9.97	54.25	68.05	40.98	126.58	41.5	31.59	15.9	0.273	3838.1	983.8
10	10.33	54.75	72.05	43.41	134.76	51.5	33.01	16.75	0.293	4007.9	983.63
:											
157	7.10	50.39	55.404	38.136	61.125	40.071	20.3	9.057	0.109	2823.6	1000.8
158	8.63	52.153	71.096	47.927	93.852	42.929	25.947	12.6	0.190	3463.9	987.8

داشت که تغییر در اندازه قطعات شیشه ورودی به کوره می‌تواند منجر به تغییر این حالت شود. زیرا در حالت B عرض کوره بیشتر است و می‌توان در کوره شیشه با ابعاد بزرگتری را سکوریت کرد. بنابراین انتخاب میان حالت بهینه، وابسته به نظر طراح و کاربرد آن متفاوت است. توزیع دما در سه کوره مشخص شده در نمودار پارتو در شکل ۸ آمده است. نمودار آبی رنگ در شکل ۸ مربوط به حالت اولیه کوره است که طول اولیه آن حدود ۷ متر است و توزیع دما در آن مشخص شده است. نمودار قرمز رنگ حالت C در نمودار پارتو و نمودار سبز رنگ حالت B را نشان می‌دهد. در دو حالت بهینه شده طول کوره ۴٫۸۵ متر است.

همان طور که مشاهده می‌شود در این دو حالت توزیع دما در کوره بیشتر از حالت اولیه است این در حالی که سوخت مصرفی کوره نسبت به حالت A کاهش یافته است. افت دما در نقطه سوم در نمودار حالت B و C مربوط به افت انرژی در نزدیکی خروجی شیشه در کوره می‌شود. در نزدیکی ورودی و خروجی شیشه به علت خروج هوای گرم از این قسمت ها افت دما در تمام حالت‌ها مشاهده می‌شود. با مقایسه توزیع دما در حالت B و C در دو نقطه اولیه نمودار، مشاهده می‌شود که در طول کوره دما در حالت B یکنواخت تر از حالت C است علت که علت آن مربوط به بزرگتر بودن عرض کوره در این حالت است. در حالت C کمتر بودن عرض کوره منجر به کاهش فاصله بین مشعل‌ها در دو طرف کوره می‌شود و در نهایت باعث افزایش دما در مرکز کوره در نزدیکی مشعل‌ها می‌شود. لازم به ذکر است که این غیر یکنواختی دما در حالت C باعث کاهش کیفیت شیشه سکوریت و غیریکنواختی دما در شیشه نمی‌شود که علت آن کوچک بودن ابعاد شیشه نسبت به ابعاد کوره است. دما در انتهای کوره در حالت B کمتر از حالت C است. علت آن بزرگتر بودن درجه خروجی شیشه در این حالت، نسبت به حالت C است. در نتیجه دبی بیشتری از هوای گرم به بیرون از کوره می‌رود و افت دما در انتهای کوره افزایش می‌یابد.

در جدول ۶ مقدار متغیرهای طراحی و توابع هدف در این سه حالت آمده است.

با کاهش طول کوره در هنگام بهینه‌سازی تعدادی از قطعات شیشه درون کوره، در خارج از کوره قرار می‌گیرند و این امر موجب ایجاد پیام خطای هندسی در نرم‌افزار می‌شود. برای پیدا کردن طول بهینه در کوره، ۶ حالت متفاوت با ایجاد هندسه جدید بررسی شده است. یک حالت به عنوان حالت بهینه براساس توابع هدف انتخاب شده است. سپس هندسه برای طول بهینه شده با استفاده از ابزار بهینه‌سازی نرم-افزار برای سایر متغیرهای طراحی بهینه‌سازی شده است. نتایج بهینه سازی طول کوره در جدول ۴ آمده است.

### ۳-۴- نتایج بهینه‌سازی

برای طول بهینه بدست آمده در بخش قبلی، مطابق الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی انجام شده است. در جدول ۵ تعدادی از حالت‌های بررسی شده برای هندسه کوره آمده است.

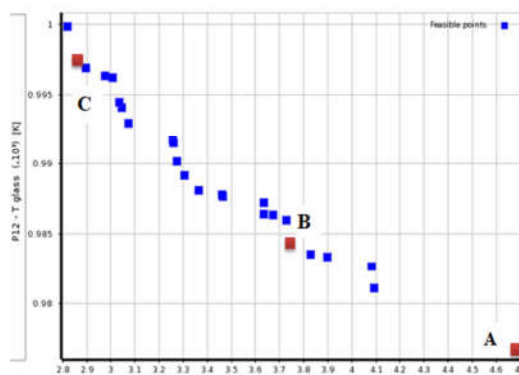
در شکل ۷ نمودار پارتو آورده شده است. این نمودار اندازه‌های مختلف کوره در محدوده تعیین شده براساس تابع هزینه و دمای خروجی شیشه نشان می‌دهد. هر یک از نقاط در نمودار پارتو نشان دهنده مشخصات یک کوره با متغیرهای طراحی مختلف بر اساس توابع هدف می‌باشد. سه نقطه در این نمودار مشخص شده و توابع هدف برای آن‌ها توضیح داده شده است.

نقاط جدول در نمودار با رنگ قرمز مشخص شده است. حالت A در نمودار پارتو حالت اولیه کوره است در مقایسه با حالت B، طول کوره و دیگر متغیرهای طراحی به جز عرض کوره در حالت A بیشتر از حالت B است به همین دلیل هزینه ساخت کاهش پیدا کرده است که مطلوب است. علاوه بر آن دبی سوخت مصرفی، هم به دلیل کاهش تعداد مشعل‌ها و هم به دلیل تغییر در متغیرهای طراحی کاهش یافته است. در حالت C هزینه ساخت کوره حدود ۲ برابر نسبت به حالت اولیه کاهش داشته و دبی سوخت مصرفی هم به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است این در حالی است که دما خروجی به ۹۹۷ کلوین رسیده که نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. بنابراین حالت C بهینه‌ترین حالت از نظر کاهش هزینه و حفظ کیفیت نهایی را ارائه می‌دهد. باید توجه

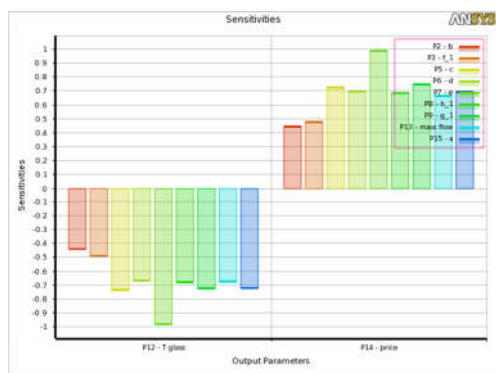
جدول ۶- ویژگی های سه حالت مشخص شده در پارتو

نقطه	متغیر طراحی								تابع هدف		
	a	b	c	d	E	f	g	h	Mass flow(kg/s)	price	$T_{out}(K)$
A	15	63	67	48	105	50	42	10	0.9	4708.25	976.22
B	10.22	67.41	57.35	19.89	127.29	46.095	31.44	16.88	0.273	3745.8	984.38
C	7.3	50.25	55.25	38.21	64.08	40.286	20.3	9.11	0.115	2862.9	997.25

همچنین طول کوره که در قسمت قبلی بررسی شده، به دلیل تاثیر بر دمای شیشه و هزینه ساخت و مقدار گاز مصرفی کوره از حساسیت بیشتری نسبت به سایر متغیرهای طراحی کوره برخوردارند. کمترین مقدار مربوط به ابعاد دریچه خروجی شیشه از کوره است. کوچک شدن این دریچه تنها منجر به کاهش اتلاف شار گرمایی از طریق آن به خارج از کوره می‌شود. سایر متغیرهای طراحی به طور کلی مربوط به محل قرار گرفت مشعل در کوره و فاصله آن تا قطعات شیشه درون کوره می‌شود که بر توزیع دما در کوره و قطعات شیشه درون کوره تاثیر دارد.



شکل ۷- نمودار پارتو

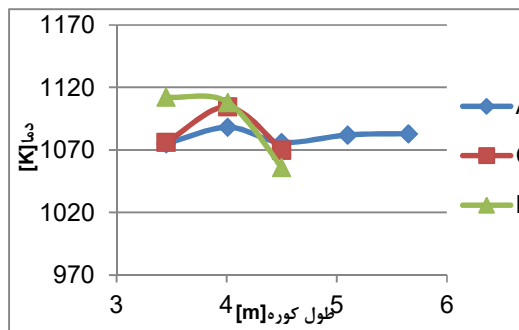


شکل ۹- آنالیز حساسیت

### ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه به مدلسازی عددی کوره پخت شیشه سکوریت و بهینه‌سازی متغیرهای طراحی هندسه کوره برای کاهش هزینه تولید کوره و حفظ کیفیت شیشه سکوریت شده نهایی پرداخته شده است. در ابتدا به معرفی کوره، فرآیند سکوریت کردن شیشه، کاربرد و اهمیت آن در زندگی و ضرورت مطالعه درباره‌ی آن‌ها پرداخته شده و سپس به بررسی مطالعات گذشته مربوطه پرداخته شد. پس از آن معادلات و فرضیات حاکم بر مسئله و شرایط مرزی تعیین و مدلسازی انجام شد. با تعیین هزینه ساخت کوره و دمای خروجی شیشه به عنوان تابع هدف و متغیرهای طراحی بهینه‌سازی انجام شده و نتایج آن بدست آمده است. نتایج مدلسازی و بهینه‌سازی کوره نشان می‌دهد که:

- نتایج مدلسازی توزیع دما در کوره و یکنواختی دما در قطعات شیشه را نشان داده می‌دهد.



شکل ۸- مقایسه توزیع دما در کوره‌های اولیه و بهینه شده نمودار پارتو

در شکل ۹ حساسیت متغیرهای طراحی نسبت به توابع هدف در نتایج بهینه‌سازی آمده است. نشان می‌دهد بیشترین حساسیت مربوط به عرض کوره، فاصله مشعل‌های بالایی تا غلطکها و ارتفاع سطح بالایی کوره تا غلطکها است. به طور کلی کاهش فاصله مشعل‌ها تا قطعات شیشه درون کوره منجر به افزایش دمای شیشه می‌شود. کاهش ارتفاع سطح بالایی کوره تا غلطکها و عرض کوره با توجه به تابع هزینه ساخت کوره، از یک سو منجر به کاهش هزینه ساخت اولیه می‌شود و از سوی دیگر به دلیل کاهش فضای کوره منجر به افزایش دما در شیشه‌ها می‌شود. در نهایت افزایش دما در شیشه‌ها و کاهش فضای کوره، منجر به کاهش دبی سوخت مصرفی در کوره می‌شود. به طور کلی سه متغیر طراحی D، C و E مربوط به ارتفاع کوره و عرض آن و



- [12] Rene Prieler, Bernhard Mayr, Martin Demuth, Burkhardt Holleis, Christoph Hochenauer, Prediction of the heating characteristic of billets in a walking hearth type reheating furnace using CFD. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 92. 675-688, 2016.
- [13] Jaklic A., Kolenko T., Zupancic B., The influence of the space between the billets on the productivity of a continuous walking-beam furnace, *Appl. Therm. Eng.* 25. 783-795, 2005.
- [14] V.K. Singh, P. Talukdar, Comparisons of different heat transfer models of a walking beam type reheat furnace, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 47. 20-26, 2013.
- [15] T. Morgado, P.J. Coelho, P. Talukdar, Assessment of uniform temperature assumption in zoning on the numerical simulation of a walking beam reheating furnace, *Appl. Therm. Eng.* 76. 496-508, 2015.
- [16] Piotr Jóźwiak, Jarosław Hercog, Aleksandra Kiedrzyńska, Krzysztof Badyda. CFD analysis of natural gas substitution with syngas in the industrial furnaces. *Energy*. 179. 593-602, 2019.
- [17] Emadi A., Saboonchi A., Taheri M., Hassanpour S., Heating characteristics of billet in a walking hearth type reheating furnace. *Applied Thermal Engineering*. 63. 396-405, 2014.
- [18] Frank Pettersson, Henrik Saxén & Kalyanmoy Deb. Genetic Algorithm-Based Multicriteria Optimization of Ironmaking in the Blast Furnace. *Materials and Manufacturing Processes*, 24. 343-349, 2009.
- [19] Kwasi Foli, Tatsuya Okabe, Markus Olhofer, Yaochu Jin, Bernhard Sendhoff. Optimization of micro heat exchanger: CFD, analytical approach and multi-objective evolutionary algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 49. 1090-1099. (2006)
- [20] Chunbao Liu, Weiyang Bu, Dong Xu. Multi-objective shape optimization of a plate-fin heat exchanger using CFD and multi-objective genetic algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 111. 65-82, 2017.
- [21] Jiin-Yuh Jang, Jun-Bo Huang. Optimization of a slab heating pattern for minimum energy consumption in a walking-beam type reheating furnace. *Applied Thermal Engineering*. 85. 313-321, 2015.
- [22] Renan Hilbert, Ga'bor Janiga, Romain Baron, Dominique The'venin. Multi-objective shape optimization of a heat exchanger using parallel genetic algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 49. 2567-2577, 2006.
- [23] Marler R.T. and Arora J.S.. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct Multidisc Optim.* 26. 369-395, 2004.
- [24] Versteeg H.W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method, 1995.
- [25] THEODORE L. BERGMAN, ADRIENNE S. LAVINE, FRANK P. INCROPERA, DAVID P. DEWITT. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. SEVENTH EDITION*, 2007.
- [26] Marler R.T. and Arora J.S.. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct Multidisc Optim.* 26. 369-395. (2004)
- [27] Deb K., *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Wiley, London, 2001.

- همین طور می‌توان توزیع سرعت جریان هوای گرم از خروجی مشعل‌ها در کوره تا اطراف قطعات شیشه را بررسی کرد.
- با کاهش ابعاد کوره تا مقدار بهینه می‌توان هزینه ساخت کوره را کاهش داد.
- هم چنین کاهش ابعاد کوره منجر به کاهش هزینه‌های جاری مربوط به سوخت مصرفی کوره تا حد قابل توجهی می‌شود.
- نتایج نشان می‌دهد که با کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینه تولید، دمای خروجی شیشه کمتر از  $700^{\circ}\text{C}$  نمی‌شود و شیشه تا دمای نرمی جام آن افزایش یافته و در نهایت سکوریته با کیفیت مناسب ایجاد می‌شود.

## ۶- منابع

- [1] Jinwoo O, Ukmin H, Jaehyung P, Hoseong L. Numerical investigation on energy performance of hot stamping furnace. *Applied Thermal Engineering*. 147.694-706, 2019.
- [2] Wang Ch, Zhou Y, Liang Z, Yang F. Heat transfer simulation and thermal efficiency analysis of new vertical heating furnace. *Case Studies in Thermal Engineering*. 13. 400-414, 2019.
- [3] Hajaliakbari N, Hassanpour S, Analysis of thermal energy performance in continuous annealing furnace, *Appl. Energy*. 206. 829-842, 2017.
- [4] Ramamurthy H, Ramadhyani S, Viskanta R. A thermal system model for a radiant tube continuous reheating furnace. *J Mater Eng. Perform.* 4. 519-531, 1995.
- [5] Niederer M, Strommer S, Steinboeck A, Kugi A. Nonlinear model predictive control of the strip temperature in an annealing furnace. *J Proc Control*. 48. 1-13, 2016.
- [6] Chena, T., Chungb Y., Liuc J. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. *Heat and Mass Transfer*. 32. 695-706, 2005.
- [7] Prieto M, Fernández F, Rendueles J. Development of stepwise thermal model for annealing line heating furnace. *Ironmaking Steelmaking*. 32. 165-170, 2005.
- [8] Suzuki M., Katsuki K., Imura J., optimization of slab permutation scheduling and heat controlling for a reheating furnace, *J. Process Contr.* 24(1). 225-238, 2014.
- [9] Fei W, Wang Y-Q, Qin S-R. Modeling of strip heating process in vertical continuous annealing furnace. *J Iron Steel Res Int.* 19. 29-36, 2012.
- [10] Casal M., Porteiro J., Míguez J.L., Vázquez A., New methodology for three dimensional simulation of a walking beam type reheating furnace in steady state, *Appl. Therm. Eng.* 86. 69-80, 2015.
- [11] J.G. Kim, K.Y. Huh, I.T. Kim, Three-dimensional analysis of the walking beam type slab reheating furnace in hot strip mills, *Numer. Heat Transf., Part A: Appl.* 38. 589-609, 2000.