ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1095-1101

Optimization of Combustion Burner at Hoffman Brick Factories

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Hajilary N.*[1] *PhD,*
Rezakazemi M.[2] *PhD*

How to cite this article
Hajilary N, Rezakazemi M. Optimization of Combustion Burner at Hoffman Brick Factories. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5): 1095-1101.

ABSTRACT

The combustion system used by the Hoffman furnaces for brick factories has a very low efficiency. In the current paper, the performance of the combustion system of Hoffman furnaces of Kolet Pottery Brick Co has improved, using computational fluid dynamics (CFD) by making changes to the Hoffman furnace torch, including the converging the torch head, inserting the spring in the pipe to create the swirl flow, shortening the nozzle length for the better mixing of the fuel and air, and more. The changes were simulated in each step with the FLUENT simulation software. Based on the theoretical results and simulation, optimized torch was made and a field test was carried out on it in a brick factory and the gases from their combustion were analyzed. As a result of these reforms, the combustion efficiency of the Hoffman furnaces has increased from 27% to 47 %, and consumption of fuel oil has decreased by a third. Also, the CO value of 16854 ppm in the old torch was reduced to 298 ppm in the optimized torch and the NO value ranged from 49 to 18 ppm as a result of optimizations.

Keywords Brick Factory; Hoffman Furnace; Burner; Energy Consumption; Swirl Flow

[1]Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Golestan University, Gorgan, Iran
[2]Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical & Materials Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Correspondence
Address: Shahid Beheshti Street, Gorgan, Golestan, Iran. Postal Code: 1575949138
Phone: +98 (17) 32254164
Fax: +98 (17) 32254163
n.hajilari@gu.ac.ir

Article History
Received: March 16, 2018
Accepted: December 04, 2018
ePublished: May 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Optimization of fuel and air use in a tunnel kiln to produce coal admixed bricks [2] Transition from traditional brick manufacturing to more sustainable practices [3] Analysis and assessment of energy situation of brick industry in Iran [4] Evaluation of brick kiln performances using computational fluid dynamic [5] 3D simulation of flow in a rotary torch [6] Numerical simulation of Shazand Arak gas torches to improve combustion process [7] Simulation of Shazand power plants by numerical method and investigating the effect of primary air on the shape and location of the flame [8] Investigation of the effect of fusion mixing on the operation of heaters of natural gas pressure decompression station using simulation of CFD [9] Swirl flows [10] Enhancement of flame blowout limits by the use of swirl [11] Swirl effect on flame performance and the modeling of the swirling flames [12] Swirling air tests issuing from vane swirlers [13] The design and combustion performance of practical swirlers for integral rocket/ramjets [14] Hysteresis and transition in swirling nonpremixed flames [15] Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system [16] Numerical simulation of combustion inside a cylindrical porous burner including turbulence effects [17] Experimental study of the effect of rotation and reduction of oxidizing on the sustainability of non-condensed combustion of natural gas [18]Unit operation of chemical engineering

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بهینه‌سازی مشعل سیستم احتراق کارخانه‌های آجرپزی هافمن

نسیبه حاجیلری* PhD
گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
ماشاءالله رضاکاظمی PhD
گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده
سیستم احتراقی که در کوره‌های هافمن کارخانه‌های آجرپزی استفاده می‌شود، بازدهی بسیار پایینی دارد. در این مقاله، با انجام شبیه‌سازی دینامیک سیالات مولکولی با ایجاد تغییرات در مشعل کوره هافمن کارخانه آجر کلت شامل همگراکردن سرمشعل، قراردادن فنر در لوله برای ایجاد جریان چرخشی، کوتاه‌کردن طول نازل سوخت مشعل برای اختلاط بهتر سوخت و هوا و موارد دیگر، عملکرد سیستم احتراقی مشعل کارخانه‌های آجرپزی هافمن بهبود داده شده است. تغییرات در هر مرحله با نرم‌افزار FLUENT شبیه‌سازی شد. براساس نتایج تئوری و شبیه‌سازی، مشعل بهینه‌شده ساخته شد و در یک کارخانه آجر روی آن آزمون میدانی انجام گرفت و گازهای حاصل از احتراق آنها تحلیل شد. در نتیجه این اصلاحات، راندمان احتراق مشعل کوره هافمن از ۲۷ به ۴۷% افزایش پیدا کرده و مصرف سوخت تا یک‌سوم کاهش یافته است. همچنین مقدار CO از ۱۶۸۵۴ppm در مشعل قدیمی به ۲۹۸ppm در مشعل بهینه‌شده و مقدار NO از ۴۹ به ۱۸ppm در نتیجه بهینه‌سازی‌ها کاهش یافته است.
کلیدواژه‌ها: کارخانه آجر، کوره هافمن، مشعل، مصرف انرژی، جریان چرخشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳
*نویسنده مسئول: n.hajilari@gu.ac.ir

۱- مقدمه

صنعت آجر از نظر مقداری حدود ۹% از کل انرژی مصرفی در صنعت ایران را به خود اختصاص داده است. کل مصرف انرژی بخش صنعت در سال ۱۳۹۵ حدوداً معادل ۲۱۹/۷میلیون بشکه نفت خام بوده که ارزش آن نیز بیش از ۳/۷میلیارد دلار است. در ایران حدود ۷۰۰۰ واحد تولید آجر با ظرفیت تولید اسمی سالیانه بیش از ۵۰میلیون تُن وجود دارد که برابر با ۴۶/۱۳۷میلیون بشکه نفت خام از سبد انرژی کشور را به خود اختصاص داده است. کوره‌های آجرپزی در ایران به‌طور عمده از دو فناوری کوره‌های هافمن و تونلی استفاده می‌کنند. در هر دو مورد از مشعل‌های یکسانی در چند ردیف استفاده شده است که وارد کوره می‌شوند و پس از ترکیب سوخت و هوا در دهانه مشعل با ایجاد شعله، مرحله پخت آجر را انجام می‌دهند. متاسفانه به‌دلیل ضعف طراحی ساخت مشعل و بهره‌برداری نامناسب، احتراق صحیح صورت نمی‌گیرد و گاز زیادی هدر می‌رود و از طرف دیگر، در اثر سوختن نامناسب، مقدار گازهای نامطلوب حاصل از احتراق افزایش می‌یابد. لذا با توجه به وجود تعداد زیاد کارخانجات آجر در ایران ضروری است که سیستم احتراق موجود بهینه‌سازی شود.

در بهینه‌سازی مشعل‌ها و ارزیابی دستگاه‌های احتراق کارخانه‌های آجر، عوامل مختلفی چون پیش‌گرمایش سوخت و هوا، اصلاح ساختار مکانیکی مشعل، اختلاط موثر سوخت و هوا، ایجاد جریان چرخشی در مشعل و اکسیژن‌سوزکردن مشعل دخیل است. *مانجوآن* و *کوجوکادا*، بهینه‌سازی سوخت هوا در یک کارخانه تولید آجر تونلی را با استفاده از یک افزودنی انجام داده‌اند. تابع هدف، هزینه سوخت و اتلاف گرما در اگزوز است. این بررسی نشان داده که استفاده از زغال‌سنگ ترکیبی (AC)، نشر SO_2 را کاهش داده، شعله پایداری ایجاد کرده و مقدار سوخت مصرفی را کاهش داده است[1]. *گومز* و *حسین* در مطالعه‌ای بر کارخانه‌های آجر بنگلادش تمرکز کرده‌اند. حدود ۴۵۰۰ کارخانه آجر در بنگلادش وجود دارد که ۶میلیارد آجر در سال تولید می‌کنند. بیش از ۴۰۰ عدد از این کارخانه‌ها از نوع کوره BTK، ۴۰۰ کوره ثابت، ۱۵ کوره زیگزاگ، ۲۵ هافمن و ۵ کوره تونلی است. این نوع فرآیندها، آلودگی بسیار زیادی ایجاد کرده است و باید سریع‌تر از این فناوری‌ها به سمت فناوری‌های دوست‌دار محیط زیست حرکت کرد[2]. *ستاری* و *عوامی* در مقاله‌ای، موقعیت موجود صنعت آجر از منظر فناوری و نمایه‌های مربوطه، راه‌حل ممکن برای صنعت، سیاست‌گذاری برای استفاده از فناوری‌های روز و استانداردهای قابل دسترس و اثر سیاست‌گذاران در تحول این صنعت را بررسی کرده‌اند[3]. *تهذیب* در یک بررسی از نرم‌افزار CFD برای بررسی عملکرد کوره تونلی با سوخت گاز طبیعی استفاده کرده و پارامترهای عملیاتی مثل سرعت گاز، قطر درونی و فاصله بین آجرها را بهینه کرده است. در نتیجه با این بهینه‌سازی، تولید NO_X-CO_2 کاهش، مصرف سوخت کاهش و آجر باکیفیت بهتر تولید شد[4]. شبیه‌سازی سه‌بُعدی جریان در مشعل چرخشی توسط *ممهدی‌هروی* و همکاران با رویکرد شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی در دو هندسه متفاوت از مشعل انجام گرفته است که منجر به شناخت فرآیند تشکیل و پیشروی هسته گردابی شد. همچنین مطالعه‌ای روی اثرات تغییر دبی سوخت و هوای مشعل گازسوز روی پارامترهای احتراقی نقاط مختلف محفظه احتراق انجام شده است[5]. تحقیق *حسینعلی‌پور* روی شبیه‌سازی عددی مشعل‌های نیروگاه شازند اراک برای بهبود فرآیند احتراق در بویلر، از جمله پژوهش‌هایی است که با هدف کاهش آلاینده‌های تولیدشده در مشعل و سوختگی نازل آن به‌وسیله بررسی اثرات تغییرات زاویه پره‌های ورودی و دبی هوا انجام شد[6].

یکی از روش‌هایی که بازدهی احتراق را افزایش می‌دهد، استفاده از احتراق چرخشی است. شعله چرخشی Vشکل با توجه به کوتاهی طول، راندمان حرارتی بالا و کاهش آلاینده‌ها بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. از این شعله به‌طور گسترده در محفظه‌های احتراق توربین گاز، مشعل‌های چرخشی و محفظه‌های احتراق چرخشی استفاده می‌شود. دلیل اولیه و مقدماتی استفاده از چرخش، افزایش سطح شعله و افزایش پایداری شعله به‌واسطه کاهش نرخ سرعت محوری و به‌وجودآمدن مولفه سرعت شعاعی است[7]. همچنین چرخش روشی برای بالابردن کیفیت اختلاط سوخت و هوا است و ایجاد شعله چرخشی Vشکل منجر به پایدارشدن شعله، کنترل احتراق و همچنین افزایش بازده احتراق می‌شود[8]. البته ساختار هندسی مشعل، اختلاط سوخت و هوا و مشخصات جریان بر شکل شعله، پایداری آن و توزیع دما در جریان‌های چرخشی بسیار تاثیر می‌گذارد[7]. ایجاد یک منطقه گردنده می‌تواند باعث پایداری شعله شود. این منطقه گردنده می‌تواند به‌وسیله یک تجهیز جامد که در مسیر ورودی قرار می‌گیرد یا با هدایت شعله در مسیر مناسب در فضای احتراق ایجاد شود. *گوپتا* و همکاران نشان دادند که با استفاده از جریان‌های چرخشی، پایداری شعله در محفظه احتراق به‌دلیل به‌وجودآمدن ناحیه بازگردش، افزایش و طول شعله نیز کاهش می‌یابد و اختلاط جریان به‌ویژه در منطقه لایه برشی افزایش پیدا می‌کند[9]. *فیکما* و همکاران نشان دادند که چرخش جریان می‌تواند شعله را تا حد بسیار بالاتری (براساس بیشینه سرعت سوخت) نسبت به حالت بدون چرخش پایدار سازد[10]. *کر* با اندازه‌گیری مولفه‌های شعاعی و محوری سرعت نشان داد که اعمال چرخش موجب کاهش سرعت

محوری شده، جبهه شعله به مشعل نزدیک شده و همچنین باعث افزایش پایداری شعله می‌شود[11]. *ماتور* و *ماکالوم* پایداری شعله نفوذی را با هوای چرخشی با شدت چرخش مختلف بررسی و بیان کردند که چرخش به‌اندازه کافی قوی، باعث به‌وجودآمدن ناحیه بازگردش مرکزی در مرکز محفظه احتراق می‌شود که این ناحیه با قطر محفظه احتراق نیز متناسب است[12]. *باکلی* و همکاران تاثیر چرخش‌های مختلف را بر بازده یک محفظه احتراق و تشکیل آلاینده‌ها بررسی و مشاهده کردند که اعمال چرخش موجب کاهش CO و NOx و همچنین افزایش بازده محفظه احتراق می‌شود[13]. *تامرز* و همکاران[14] نیز با ایجاد شعله چرخشی Vشکل و مقایسه آن با شعله‌های معمولی به این نتیجه رسیدند که شعله‌های ایجادشده در مقایسه با شعله‌های معمولی دارای طول کوتاه‌تر، توان بیشتر و آلودگی کمتری هستند. آنها با استفاده از یک ترمومتر، دمای شعله را به دست آوردند و نتایج لحظه تشکیل شعله چرخشی را برحسب دما ارایه کردند. *یو* و همکاران با چرخش‌دادن همزمان سوخت و هوا، حدود پایداری شعله غیرپیش‌آمیخته پروپان و هیدروژن را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که نتایج حالت کم‌چرخش بسیار مشابه حالت بدون چرخش است، اما در چرخش‌های بالاتر، مشابه تحقیق‌های قبلی به‌دلیل پدیدآمدن ناحیه بازگردش در نزدیک خروجی نازل سوخت، محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد. آنها همچنین بیان کردند که چرخش همزمان سوخت و هوا، باعث افزایش پایداری شعله نسبت به حالت هوای چرخشی با سوخت بدون چرخش می‌شود[15].

نیموری و همکاران در تحقیق دیگری به شبیه‌سازی عددی فرآیند احتراق درون مشعل متخلخل استوانه‌ای با درنظرگرفتن اثرات اغتشاش پرداختند و نتایج آنها نشان می‌دهد که دمای گاز به‌دست‌آمده از مدل اغتشاشی کمتر از مدل آرام بوده و به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. همچنین اثرات اغتشاش به‌واسطه افزایش پدیده نفوذ سبب افزایش ضخامت شعله می‌شود. اگرچه مقادیر حاصل برای آلاینده CO از مدل‌های آرام و اغتشاشی تقریباً برابر است، اما اثرات اغتشاش سبب می‌شود که مقادیر پیش‌بینی‌شده برای سرعت شعله و آلاینده NO به نتایج تجربی نزدیک‌تر شود[16]. به‌منظور کاهش، چرخش نسبت به دیگر راهکارهای احتراق مانند مرحله‌ای‌کردن، برگشت گازهای خروجی (FGR) و بازسوزش سوخت اثر بیشتری دارد[17].

خلأ انجام پژوهش در زمینه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم احتراق ساختار مشعل کوره‌های آجرپزی در پژوهش‌های داخلی و خارجی مشاهده می‌شود و این موضوع زمینه‌ساز مطالعه آن در پژوهش حاضر می‌شود. با توجه به فناوری قدیمی و انرژی‌بر صنعت موجود، کاهش مصرف سوخت و بهینه‌سازی سیستم احتراق تولید آجر در کارخانجات ایران در وضعیت موجود با استفاده از افزایش راندمان، بهینه‌سازی مشعل‌های موجود در کوره به‌وسیله اختلاط مناسب سوخت و هوا و ایجاد شعله‌ای با بازده حرارتی بالاتر و کاهش مصرف گازهای آلاینده بسیار ضروری است. در این مقاله به‌طور تخصصی به مشعل‌های مورد استفاده در کارخانه‌های آجرپزی ایران پرداخته می‌شود و با مطالعه عوامل موثر بر افزایش راندمان این مشعل‌ها، راهکارهای بهینه‌سازی و افزایش راندمان حرارتی آن ارایه می‌شود. راهکارهای ارایه‌شده با نرم‌افزار FLUENT شبیه‌سازی و سپس مشعل بهینه ساخته شده است. سپس مشعل قدیمی، مشعل بهینه و مشعل بهینه در نسبت سوخت و هوای بهینه در یک کارخانه آجر مورد تست میدانی قرار گرفته‌اند و گازهای حاصل از احتراق آنالیز و راندمان آنها محاسبه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

برای تست میدانی و انجام آنالیزهای مورد نیاز کارخانه آجر کلت با کوره هافمن و ظرفیت تولید ۱۰میلیون آجر سفالی و یک‌میلیون بلوک سفالی انتخاب شد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار FLUENT استفاده شد. این نرم‌افزار، امکان تغییر شبکه به‌صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه‌های غیرساخت‌یافته برای هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌سازد. نوع مش‌ها شامل شبکه‌هایی با المان‌های مثلثی (برای هندسه‌های دوبُعدی) و چهاروجهی (برای هندسه‌های سه‌بُعدی) در نظر گرفته شد. تعداد مش‌های ایجادشده برای شبیه‌سازی ۳۷۵۸ است. این بهینه‌سازی برای حل و شبکه، قابلیتی در اختیار کاربر قرار می‌دهد که نتایج را در ناحیه‌هایی که دارای گردابه‌های بزرگ (مانند لایه مرزی و غیره) باشند، دقیق‌تر سازد. این قابلیت‌ها مدت‌زمان مورد نیاز برای تولید یک شبکه خوب را در مقایسه با حل در شبکه‌های ساخت‌یافته به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. مشعل‌های طراحی‌شده نیز در سالیدورک ساخته شدند.

کلیه اندازه‌گیری‌های گازهای ناشی از احتراق در این پروژه توسط دستگاه KIGAZ 310 از شرکت کیمو انجام شده است (جدول ۱). این دستگاه با اندازه‌گیری و محاسبه پارامترهایی نظیر NOx، هوای اضافه، مونوکسیدکربن و راندمان احتراق کمک می‌کند که درک صحیحی از کیفیت احتراق انجام‌شده به دست آید.

جدول ۱) مشخصات آنالایزر گازی مدل KIGAZ 310 PRO

پارامتر	سنسور	محدوده	دقت	زمان پاسخ (ثانیه)
O_2	الکتروشیمیایی	۰-۲۱%	۰/۲درصد حجمی	۳۰
CO	الکتروشیمیایی	۰-۸۰۰۰ppm	از ۰ تا ۲۰۰ppm، ±۱۰ppm از ۲۰۱ تا ۲۰۰۰ppm، ±۵% از ۲۰۰۱ تا ۸۰۰۰ppm، ±۱۰%	۳۰
NO	الکتروشیمیایی	۰-۵۰۰۰ppm	±۵ppm	۳۰
NOx	محاسبه‌شده	۰-۵۱۵۵ppm	-	
NO_2	الکتروشیمیایی	۰-۱۰۰۰ppm	از ۰ تا ۱۰۰ppm، ±۵ppm از ۱۰۱ تا ۱۰۰۰ppm، ±۲%	۵۰
دمای گازهای احتراق	ترموکوپل k	۱۰۰-۱۲۵۰°C	±۱/۱°C	٤٥
دمای محیط	داخلی NTC	۲-۱۲۰°C	±۰/۵°C	-

۳- بحث و نتایج

مکانیکال مشعل‌های کنونی مورد استفاده در کوره آجرپزی دارای نقاط قوت و ضعف هستند و امکان اصلاح طراحی آنها به‌دلیل رسیدن به احتراق بهتر وجود دارد. در اینجا منظور از احتراق بهتر، کیفیت اختلاط بهتر سوخت و هوا، ثبات شعله، درجه حرارت بالاتر شعله و مصرف کمتر سوخت با حفظ راندمان شعله است.

همان طور که در شکل ۱ مشخص است، سرمشعل‌های مورد استفاده در کوره‌های کارخانه آجر معمولاً به‌صورت شیپوره‌های واگرا یا در موارد اندکی، استوانه هستند. در این شیپوره‌های واگرا، سطح مقطع تغییر می‌کند و فرض می‌شود که فرآیند آدیاباتیک است (Q=0). برای جلوگیری از جدایش لایه مرزی بایستی زاویه واگرایی کوچک در نظر گرفته شود. برای تحلیل اتفاقات در شیپوره

می‌توان از معادله اولر استفاده کرد:

$$0 = udu + \frac{dP}{\rho} + gdz \qquad (۱)$$

در معادله اولر از تغییر ارتفاع صرف نظر می‌شود.
از معادله تغییر سرعت براساس تغییر سطح برای گازها به‌صورت زیر استفاده شد:

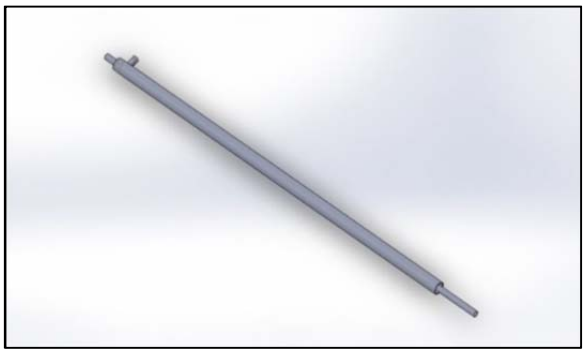
$$\frac{dA}{du} = \frac{A}{u}(M^2 - 1) \qquad (۲)$$

بر این اساس، اگر عدد ماخ کوچک‌تر از یک و سرعت مادون صوت باشد، با افزایش سطح مقطع سرعت، کاهش و اگر عدد ماخ بزرگ‌تر از یک باشد، با افزایش سطح مقطع سرعت افزایش می‌یابد.
برای بررسی تغییرات فشار از شکل دیگری از معادله اولر استفاده شد:
براساس جریان ایزونتروپیک:

$$\frac{P1}{\rho_1^{\gamma}} = \frac{P2}{\rho_2^{\gamma}} = \frac{P3}{\rho_3^{\gamma}} = \frac{P}{\rho^{\gamma}} \rightarrow P = \rho_1^{-\gamma}.\rho^{\gamma}P1 \qquad (۳)$$

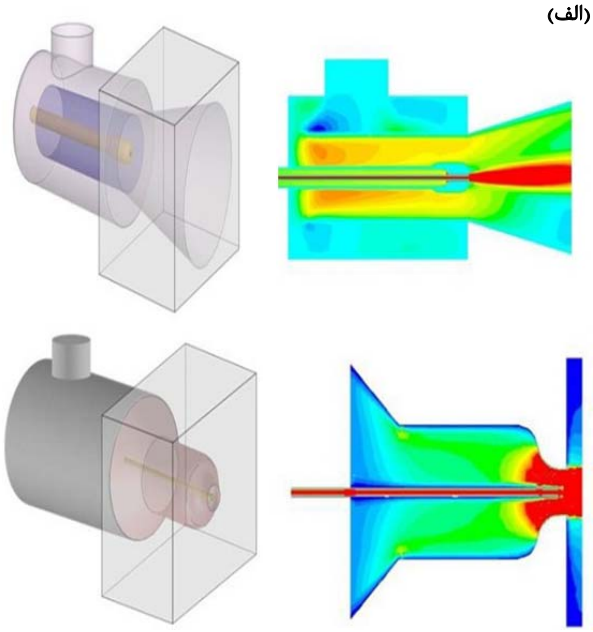
$$\int_0^u d\left(\frac{u^2}{2g_c}\right) = -\frac{P_0^{\frac{1}{\gamma}}}{\rho_0}\int_{P0}^{P}\frac{dP}{P_{\gamma}^{1}} \rightarrow u^2 = \frac{2\gamma g_c P_0}{(\gamma-1)\rho_0}\left[1-(\frac{P}{P0})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right] \qquad (٤)$$

همان طور که مشخص است، در جریان واگرا و مادون صوت با افزایش سطح مقطع، فشار افزایش و در جریان فراصوت با افزایش سطح مقطع، فشار کاهش می‌یابد[18]. بنابراین از آنجایی که شیپوره مشعل در ناحیه فراصوت کار می‌کند، با افزایش سطح مقطع، فشار افزایش پیدا می‌کند، اما با افزایش فشار، پارامتر سرعت که از متغیرهای اصلی احتراق است، کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. در این حالت، سر شعله کیفیت پایینی خواهد داشت. این حالت با نرم‌افزار نیز شبیه‌سازی شد که نتایج نرم‌افزاری، پایین‌بودن بازده را در این حالت تایید می‌کند. شکل ۲، تصویر سرمشعل همگرا و واگرا را نشان می‌دهد.
براساس بررسی‌های انجام‌شده، سرمشعل از حالت دیفیوزر به حالت نازل تغییر پیدا کرد. برای مقایسه بهتر، کوره‌ای فرضی شبیه‌سازی شد و سرمشعل‌های متفاوت در دو نوع دیفیوزر و نازل در آن مورد استفاده قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سرمشعل نازل، شعله بلندتر و با سرعت بیشتری ایجاد کرده است. همچنین در کوره با تعداد سرمشعل نازل بیشتر، توزیع یکنواخت‌تری از آتش ایجاد شده است که راندمان بالاتری ایجاد خواهد کرد.



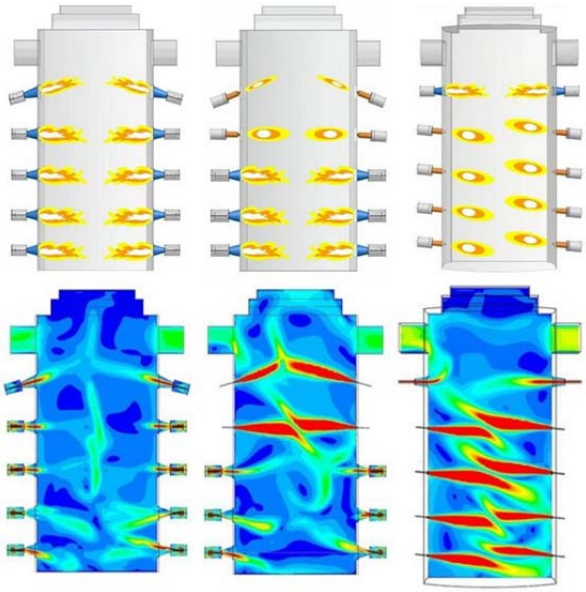
شکل ۱) هندسه دوبُعدی نازل پاشش سوخت مشعل کارخانه آجر با کوره هافمن

(الف)



(ب)

شکل ۲) شبیه‌سازی سرمشعل واگرا و همگرا؛ الف) واگرا، ب) همگرا



شکل ۳) مقایسه نتایج شبیه‌سازی سرمشعل واگرا و همگرا در کوره

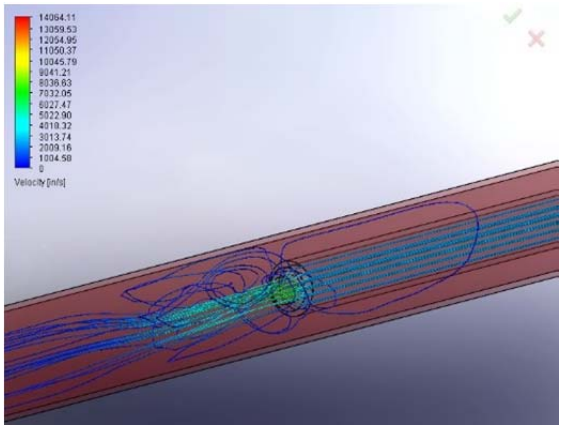
یکی از پارامترهای اصلی که بازدهی احتراق را بالا می‌برد، اختلاط مناسب سوخت و هوا است. عدم اختلاط مناسب باعث خام‌سوزی گاز و عدم تولید حرارت مناسب می‌شود. در طراحی داخلی مشعل‌های کوره آجر معمولاً نازل داخلی خروجی گاز در فاصله ۱۰سانتی‌متری دهانه خروجی مشعل تعبیه شده است. لذا زمان مناسب برای اختلاط سوخت با هوا وجود ندارد. علاوه بر ناکافی‌بودن زمان اختلاط، فرآیند اختلاط سوخت و هوا نیز به‌طور مناسب انجام نمی‌گیرد. طراحی ساده داخلی و بدون موانع، مکان نامناسبی برای اختلاط ایجاد کرده است. عدم اختلاط مناسب، موجب افزایش نیاز به هوای اضافی می‌شود و در نتیجه، اتلاف حرارتی ناشی از هوای اضافی نیز افزایش می‌یابد. حرکت هوا و سوخت در داخل لوله‌های مشعل به‌طور مستقیم و هم‌محور است که نحوه حرکت آنها در داخل لوله مشعل با نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. همان طور که نتایج نرم‌افزاری نشان می‌دهد (شکل ۴)، عمل

اختلاط به‌خوبی صورت نمی‌گیرد و در نتیجه، کیفیت احتراق مناسبی مورد انتظار نخواهد بود.

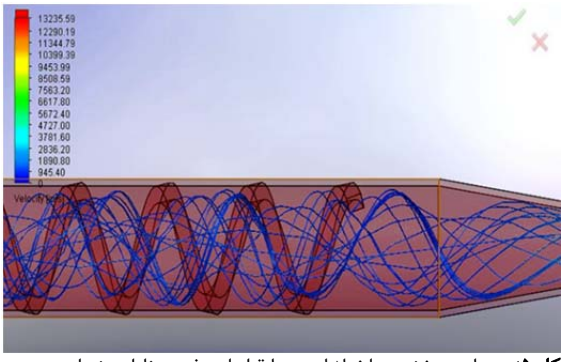
طبق تحقیقات علمی[10-14]، دادن حرکت چرخشی به ترکیب سوخت و هوا علاوه بر اختلاط بهتر، باعث پایداری بیشتر و افزایش سطح شعله نیز می‌شود. ایجاد جریان چرخشی هوا، امتیاز دیگری هم دارد و آن برگشت دوباره گازهای داغ شعله به منطقه اشتعال است که باعث افزایش دما در این منطقه به‌خصوص در موارد تابشی، در اطراف دهانه مشعل می‌شود که این عمل باعث افزایش میزان احتراق می‌شود. برای ایجاد جریان چرخشی در طراحی اولیه، پروانه‌ای مورب برای ایجاد این حرکت طراحی شد. براساس مبانی تئوری و تئوری اختلاط، افزایش محسوس بازدهی قابل پیش‌بینی بود. اما در مرحله ساخت و اجرا عملاً اجرای این امر به‌علت کوچک‌بودن فضای داخلی لوله مشعل امکان‌پذیر نبود. در مرحله بعد، برای ایجاد جریان چرخشی و اعمال تغییرات در طراحی داخلی لوله از خطوط خان داخل اسلحه الگوبرداری شد. بنابراین فنری با سطح مقطع دایره‌ای طراحی شد که در داخل لوله مشعل قرار بگیرد و حرکت چرخشی مورد انتظار ایجاد شود و مخلوط سوخت و هوا بتوانند به‌خوبی با هم ترکیب شوند. نتایج شبیه‌سازی و تئوری نشان داد که به‌علت دایره‌ای‌بودن لبه‌های فنر، مخلوط سوخت و هوا طبق قوانین آیرودینامیک، به‌جای چرخش در جهت پیچش فنر، از روی آن سُر می‌خورد و باعث کاهش کیفیت اختلاط و چرخش می‌شود. لذا سطح مقطع فنر به حالت مربع تغییر داده شد. انتظار می‌رود در این حالت، اختلاط سوخت و هوا بهتر انجام شود. سطح مقطع فنر با توجه به سایز لوله مشعل یک‌میلی‌متر در نظر گرفته شد. یکی از پارامترهای تاثیرگذار، بهینه‌کردن تعداد گام‌های فنر است. گام‌های زیاد، توانایی اعمال ایجاد جریان چرخشی در مخلوط را نداشتند و گام‌های کوتاه نیز به‌علت ایجاد موانع و تراکم زیاد موجب پس‌زدن مخلوط می‌شدند. براساس نتایج شبیه‌سازی با فنری با تعداد گام ۳۰ در مشعل مورد نظر، نتایج بهتری به دست آمد. تحلیل نرم‌افزاری نحوه اختلاط جریان، نشانگر مخلوط‌شدن کامل سوخت و هوا در داخل لوله مشعل است. نتایج نرم‌افزاری مشعل بهینه‌شده با ایجاد جریان چرخشی توسط فنر در شکل ۵ آورده شده است.

در مشعل اولیه، لوله نازل سوخت بلند بوده و تقریباً تا انتهای دهانه خروجی امتداد یافته است و در نتیجه آن، سوخت و هوا زمان کمی برای اختلاط داشتند. لذا برای ایجاد اختلاط بهتر لوله نازل سوخت، ۵۰سانتی‌متر کوتاه شد و در نتیجه، زمان بیشتری برای اختلاط با هوا به گاز داده شد. پس از اعمال تغییرات در رابطه با نحوه اختلاط و زمان اختلاط، نتایج تئوریک و شبیه‌سازی، اختلاط بهتر سوخت و هوا را نشان داد. برای حل مشکل انحراف شعله در سرمشعل از یک لوله ۳۰سانتی‌متری با سطح مقطع کوچک‌تر در سرمشعل استفاده شد (شکل ۶) تا زمان کافی برای تبدیل حرکت چرخشی به حرکت مستقیم به مخلوط احتراق بدهد. سپس دهانه لوله اضافه‌شده بر دهانه مشعل قدیمی، با زاویه ۴۵درجه پخ زده شد تا سرعت خروجی مخلوط احتراق افزایش یابد. افزایش سرعت باعث بلندترشدن طول شعله و احتراق می‌شود. بعد از اعمال تمام تغییرات، مشعل بهینه‌سازی‌شده طراحی شد (شکل ۷).

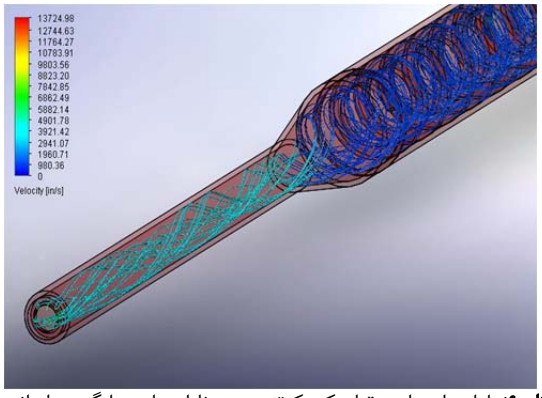
مشعل طراحی‌شده ساخته شد و برای انجام تست میدانی و انجام آنالیزها در کوره‌های کارخانه آجر کلت نصب شد. برای تحلیل نتایج، ابتدا از شعله ایجادشده به‌صورت کیفی عکس‌برداری شد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، انجام این تغییرات و ایجاد حرکت چرخشی سوخت و هوا به‌طور مشهود در کیفیت شعله قابل رویت است.



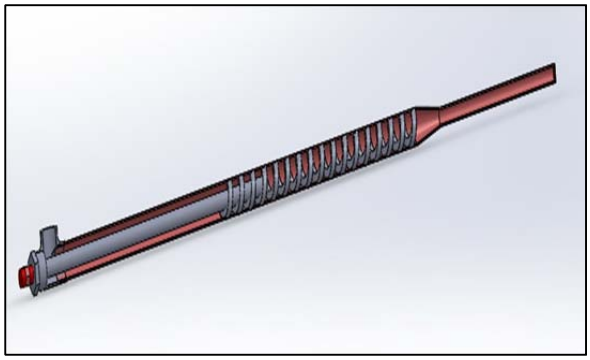
شکل ۴) شبیه‌سازی حرکت سوخت و هوا در داخل لوله‌های مشعل موجود



شکل ۵) جریان چرخشی و اختلاط بهتر با قراردادن فنر در نازل مشعل



شکل ۶) لوله با سطح مقطع کوچک‌تر در سر نازل برای جلوگیری از انحراف سرمشعل



شکل ۷) مشعل بهینه‌سازی‌شده

شکل ۸) شعله کوره بعد از بهینه‌سازی

نتایج حاصل از آنالیز گازهای حاصل از احتراق کارخانه آجر با مشعل قدیمی #۱، مشعل بهینه‌شده #۲ و مشعل بهینه‌شده در نسبت سوخت به هوا بهینه در جدول ۲ آمده است. حداکثر راندمان حرارتی برای کوره هنگامی حاصل می‌شود که احتراق با کمترین هوای اضافی صورت گیرد و کمترین اتلاف حرارتی را داشته باشیم. بنابراین هر چقدر مقدار هوای اضافی برای احتراق کامل بتواند به حد تئوری نزدیک‌تر شود، از میزان افت حرارتی کاسته می‌شود. طبق محاسبات تئوری انجام‌شده، مقدار هوای مورد نیاز برای احتراق بهینه برابر با ۱۰/۸برابر مقدار سوخت گاز طبیعی ورودی است. در تست میدانی، این نسبت تنظیم شد. البته بسته به نوع و سایز خط گاز ورودی و ارزش حرارتی گاز منطقه، این نسبت بالا و پایین می‌شود.

جدول ۲) آنالیز گازهای حاصل از احتراق مشعل قدیمی

جزء	واحد	مشعل ۱	مشعل ۲	مشعل ۳
O_2	%	۱۱/۳	۱۳/۵٤	٦/۲
CO	ppm	٦۷۰	٤۱٤	۲۹۸
Amb T	سلسیوس	۱۹/۷	٤۳/۲	۱۹/۵
Gas T	سلسیوس	۹٦۰/۳	۹٦۰/۳	۱۰۰۷/۷
NO	ppm	٤۹	۳۲	۱۸
SO_2	ppm	۰	۰	۰

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقدار CO از ۱۶۸۵۴ppm در مشعل قدیمی به ۲۹۸ppm با مشعل بهینه‌سازی‌شده کاهش پیدا کرده است. این امر بیانگر آن بوده که احتراق ناقص بسیار کاهش یافته است. علاوه بر این، مقدار NO از ۴۹ به ۱۸ppm در نتیجه بهینه‌سازی‌ها کاهش یافته است.

با توجه به روابط حاکم برای تعیین راندمان و میزان افت ناشی از احتراق، محاسبات مربوطه انجام گرفت. روابط به‌کاررفته در معادلات ۵ تا ۹ بیان شده‌اند.

$$CO2 = \frac{CO2\,\max \times (21\% - O2)}{21\%} \quad (۵)$$

$$qA+= \left((FT - AT) \times \left(\frac{A2}{21\% - O2} + B \right) \right) - kk \quad (۶)$$

$$\eta+= 100 - qA \quad (۷)$$

$$\lambda = \frac{CO2max}{CO2} \quad (۸)$$

$$uCO = CO \times \lambda \quad (۹)$$

نتایج به‌دست‌آمده برای سه مشعل فوق در جدول ۳ نشان داده شده که بیانگر راندمان بهتر در سرمشعل #۳ است.

جدول ۳) مقایسه راندمان مشعل #۱، #۲ و #۳

پارامتر	مشعل ۱	مشعل ۲	مشعل ۳
FT	۶۷۰	۹۶۰/۳	۱۰۰۷/۷
AT	۱۹/۷	۴۳/۲	۱۹/۵
CO	۱۶۸۵۴	۴۱۴	۲۹۸
O_2	۱۱/۳	۱۳/۵۴	۶/۲
CO_2	۵/۴	۴/۲	۸/۳
ازدست‌دادن گاز دودکش (%)	۷۲/۵	۶۱/۱	۵۲/۹۶
نسبت هوا	۲/۲	۲/۸	۱/۴
مونوکسید کربن رقیق	۲۳۹۱۴	۸۳۸	۸۹۶
بازده (%)	۲۷/۵۳	۳۸/۹	۴۷/۰۳

در تست میدانی، سر نازل خروجی گاز به قطر یک‌میلی‌متر کاهش داده شد. در شرایط مشابه مقایسه بین دو مشعل اولیه با نازل ۳میلی‌متری و مشعل بهینه‌سازی‌شده با نازل یک‌میلی‌متر انجام شد. گاز و هوای ورودی برای هر دو مشعل به‌طور یکسان تنظیم شد. مشعل بهینه‌سازی‌شده با نازل یک‌میلی‌متر، دمای حدود ۸۶۰°C و مشعل‌های معمولی مورد استفاده با نازل گاز ۳میلی‌متر دمای ۸۸۰°C را ایجاد کردند. با توجه به شرایط یکسان و ۳برابربودن قطر نازل اولیه نسبت به مشعل بهینه‌شده و اندازه‌گیری دبی می‌توان نتیجه گرفت که مشعل بهینه‌سازی‌شده، دو سوم مشعل معمولی مورد استفاده، گاز مصرف می‌کند. علاوه بر این، با بهینه‌سازی فرآیندی مثل اضافه‌کردن سیستم کنترلی به کوره‌های هافمن و اضافه‌شدن قابلیت تنظیم پخت اتوماتیک، قابلیت توقف سیستم، انواع آلارم‌های مربوط به عملکرد نامناسب کوره‌سوز، آلارم‌هایی که در صورت خرابی هر کدام از تجهیزات اعلام شود، می‌توان مشکلات موجود در کارخانه‌های آجر را تا حد زیادی برطرف کرد. همچنین با اندازه‌گیری دمای دقیق هر قمیر در هر لحظه (اعم از قمیرهای در حال پخت و پیش‌گرم)، بالابردن دمای کوره به‌صورت مناسب تا رسیدن به دمای پخت، اعلام پخت آجر، خاموش‌شدن قمیر و سایر موارد می‌توان بازدهی را در کوره‌های هافمن بالا برد.

۴- نتیجه‌گیری

با وجود تعداد زیاد کوره‌های آجرپزی در ایران، تاکنون در مورد بهینه‌سازی مشعل این کوره‌ها کاری انجام نشده بود. در این پژوهش نتایج زیر به دست آمده است:

۱- مشعل با سرمشعل همگرا، بازده بالاتر و کیفیت احتراق بهتری را نسبت به مشعل با سرمشعل واگرا ایجاد می‌کند.

۲- حرکت هوا و سوخت در داخل لوله‌های مشعل موجود به‌طور مستقیم و هم‌محور است که عدم اختلاط مناسب، موجب افزایش نیاز به هوای اضافی می‌شود و در نتیجه، اتلاف حرارتی ناشی از هوای اضافی نیز افزایش می‌یابد.

۳- دادن حرکت چرخشی به ترکیب سوخت و هوا علاوه بر اختلاط بهتر، باعث پایداری بیشتر و افزایش سطح شعله نیز می‌شود.

٤- قراردادن فنر در داخل لوله مشعل باعث اختلاط بهتر سوخت و هوا می‌شود.

۵- با کوتاه‌کردن نازل سوخت، زمان بیشتری برای اختلاط سوخت و هوا فراهم شد.

٦- با بهینه‌سازی ساختار مشعل، راندمان از ۲۷/۵ به ۳۸/۹% افزایش پیدا کرده، همچنین با بهینه‌سازی نسبت سوخت و هوا، بازده به ٤۷% رسیده است.

۷- با بهینه‌سازی ساختار مشعل، مقدار سوخت مصرفی تا یک‌سوم کاهش یافته است.

در مجموع با بهینه‌سازی ساختار مشعل و همچنین اضافه‌کردن سیستم‌های کنترلی به کوره‌های هافمن می‌توان مقدار انرژی مصرفی را کاهش و همچنین آلودگی‌های ناشی از خروج گازهای نامطلوب حاصل از احتراق را کاهش داد.

تشکر و قدردانی: این طرح با حمایت دانشگاه گلستان با شماره طرح ۶۶۵۲ انجام شده است. همچنین از کمک‌های آقای مهندس *خسرو مودنی* و شرکت تدبیر انرژی هیرکان در انجام این پژوهش صمیمانه تشکر می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (بطور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی و چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتوای علمی و ادبی مقاله حاضر، حاصل فعالیت علمی نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که این اثر حاصل پژوهشی مستقل بوده و هیچ گونه تضاد منافعی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: نسیبه حاجیلری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۷۰%)؛ ماشاءالله رضاکاظمی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰%)

منابع مالی: این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه گلستان با شماره طرح ٦٦٥٢ انجام شده است.

منابع

1- Mancuhan E, Kucukada K. Optimization of fuel and air use in a tunnel kiln to produce coal admixed bricks. Applied Thermal Engineering. 2006;26(14-15):1556-1563.

2- Gomes E, Hossain I. Transition from traditional brick manufacturing to more sustainable practices. Energy for Sustainable Development. 2003;7(2):66-76.

3- Sattari S, Avami A. Analysis and assessment of energy situation of brick industry in Iran. Proceedings of the WSEAS International Conference on Energy Planning, Energy Saving, Environmental Education, 14-16 October, 2007, Arcachon, France. Arcachon: WSEAS; 2007.

4- Tehzoeb AH, Bhuiyan M, Jayasuriya N. Evaluation of brick kiln performances using computational fluid dynamic. Energy and Environmental Engineering. 2013;1(2):86-93.

5- Mammahdi Heravi H, Bidkhori M, Sayerd N. 3D simulation of flow in a rotary torch. 2nd Iranian Combustion Conference, 24 January-12 February, 2008, Mashhad, Iran. Tehran: Iranian Combustion Institute; 2007. [Persian]

6- Hosseinali Pour SM, Bagh sheikhi M, Raja A, Barghi MH. Numerical simulation of Shazand Arak gas torches to improve combustion process. 7th Conference of Electricity Powerhouse, 18-19 February, 2015, Bandar Abbas, Iran. Bandar Abbas: Management Company of Electricity Powerhouse; 2015. [Persian]

7- Mousavi Tarshizi SE, Rafiei A, Saadati E. Simulation of Shazand power plants by numerical method and investigating the effect of primary air on the shape and location of the flame. 20th International Power Conference, 14-16 November, 2005, Tehran, Iran. Tehran: Tavanir Company; 2005. [Persian]

8- Hashem Abadi SH, Sheikhani H, Pishbin SI. Investigation of the effect of fusion mixing on the operation of heaters of natural gas pressure decompression station using simulation of CFD. 20th Annual Conference of Mechanical Engineering, 15-17 May, 2012, Shiraz, Iran. Shiraz: University of Shiraz; 2012. [Persian]

9- Gupta AK, Lilley DG, Syred N. Swirl flows. 1st Edition. Tunbridge Wells: Abaqus Press; 1984.

10- Feikema D, Chen RH, Driscoll JF. Enhancement of flame blowout limits by the use of swirl. Combustion and Flame. 1990;80(2):183-195.

11- Kerr NM. Swirl effect on flame performance and the modeling of the swirling flames. Journal of the Institute of Fuel. 1965;38(299):527-538.

12- Mathur ML, Maccallum NR. Swirling air tests issuing from vane swirlers. Journal of the Institute of Fuel. 1976;41:238-240.

13- Buckley PL, Craig RR, Davis DL, Schwartzkopf KG. The design and combustion performance of practical swirlers for integral rocket/ramjets. AIAA Journal. 1983;21(5):733-740.

14- Tummers MJ, Hübner AW, Van Veen EH, Hanjalić K, Van Der Meer TH. Hysteresis and transition in swirling nonpremixed flames. Combustion and Flame. 2009;156(2):447-459.

15- Yu B, Kum SM, Lee CE, Lee S. Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system. Energy. 2013;49:375-383.

16- Nimvari ME, Maerefat M, Khosravi El-Hossaini M, Jouybari NF. Numerical simulation of combustion inside a cylindrical porous burner including turbulence effects. Modares Mechanical Engineering. 2014;13(12):36-74. [Persian]

17- Rouhani A, Tabe Jamaat S, Adeli A. Experimental study of the effect of rotation and reduction of oxidizing on the sustainability of non-condensed combustion of natural gas. 3rd Combustion Conference of Iran, 22-23 Feb, 2009, Tehran, Iran. Tehran: Iranian Combustion Institute; 2009. [Persian]

18- Smith J, McCabe W, Harriott P, emeritus. Unit operation of chemical engineering. New York: McGraw Hill; 2004.