مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 7، ص‌ص 207-218

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

کمینه‌سازی تولید آلاینده‌ها در کنار بیشینه‌سازی تابش از یک شعله گاز طبیعی با هوای مرحله‌ای شده

مینا رسولی[1]، جواد محمودی‌مهر[2*]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی 41635-3756، mahmoudimehr@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 فروردین 1395

پذیرش: 25 خرداد 1395

ارائه در سایت: 29 تیر 1395

کلید واژگان:

شعله گاز طبیعی

مرحله‌ای نمودن هوا

بهینه‌سازی چند هدفه

آلاینده‌ها

تابش

چکیده

مرحله‌ای نمودن هوا به تأمین ناکافی هوا به ناحیه‌ی واکنشی از طریق مرحله‌ی ابتدایی، و تکمیل تأمین هوا از طریق مرحله یا مراحل بعدی اطلاق می‌گردد. مطالعه‌ی حاضر با استفاده از ابزار مدلسازی عددی، به بهینه‌سازی سیستم هوای مرحله‌ای یک مشعل با دو ورودی هوا و یک ورودی سوخت (گاز طبیعی) می‌پردازد. نسبت هم‌ارزی هوای اول (با فرض ثابت ماندن نرخ جرمی کل هوای ورودی)، و فاصله‌ی میان ورودی-های هوا به عنوان متغیرهای طراحی مساله در نظر گرفته شده‌اند. در تحقیقات پیشین، تکنولوژی مرحله‌ای نمودن هوا اساساً در جهت کاهش گسیل اکسیدنیتروژن به کار گرفته شده است. اما در مطالعه‌ی حاضر، علاوه بر گسیل اکسیدنیتروژن، گسیل مونواکسیدکربن و دوده، و انتقال گرمای تابشی از شعله به عنوان توابع هدف مورد توجه واقع شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان مرحله‌ای کردن (یا افزایش نسبت هم-ارزی هوای اول) اثرات متضادی بر توابع هدف دارد، بطوریکه، به عنوان اثرات مثبت، موجب افزایش انتقال گرمای تابشی از شعله و کاهش گسیل اکسید نیتروژن، و به عنوان اثرات منفی، موجب افزایش گسیل مونواکسیدکربن و دوده می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد زمانی‌که همگی توابع هدف نامبرده شده به صورت همزمان مورد توجه قرار گیرند، حالت بهینه، که بر اساس مفهوم جبهه‌ی پارتو انتخاب می‌گردد، حالتی است که در آن هوای اولیه در حدود 20 درصد هوای تئوری مورد نیاز باشد.

Minimization of the emission of pollutants along with maximization of radiation from an air-staged natural gas flame

Mina Rasouli, Javad Mahmoudimehr*

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
* P.O.B. 41635-3756, Rasht, Iran, mahmoudimehr@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 April 2016
Accepted 14 June 2016
Available Online 20 July 2016

Keywords:
Natural gas flame
air-staging
multi-objective optimization
pollutants
radiation

ABSTRACT

Air staging is defined as the supply of inadequate air from the primary stage to the reaction zone, and the completion of the air supply through the next stage or stages. This study is concerned with the optimization of the air staging system of a burner with two air inlets and one fuel (natural gas) inlet with the help of numerical modeling. The equivalence ratio of the primary air (with the assumption of a fixed total air mass flow rate), and the distance between the two air inlets constitute the design variables of the problem. In the previous research works, the air staging technology has been mainly employed as a method to reduce the emission of NO. However, in the current study, in addition to the emission of NO, the emissions of CO and soot, and radiative heat transfer from the flame are considered as the objective functions. The results show that increasing the level of air staging (or the equivalence ratio of the primary air) has contradictory effects on the objective functions so that, as a positive influence, it increases the radiative heat transfer from the flame and decreases the emission of NO, and as a negative effect, it increases the emission of both CO and soot. The results also indicate that when all the previously mentioned objectives are considered simultaneously, the optimal case, which is selected based on the Pareto front concept, is the case in which the primary air is about 20% of the theoretical air.

1- مقدمه

در گذشته، دغدغه‌ی مهم و اساسی در احتراق، اطمینان از احتراق کامل بوده است. اما امروزه در طراحی مشعل‌ها، علاوه بر به حداکثر رساندن بازده احتراق و حداقل کردن میزان مصرف سوخت، کمینه‌سازی انتشار آلاینده‌های ناشی از آن نیز مورد توجه است. مرحله‌ای نمودن احتراق یکی از راه‌های مورد استفاده در جهت افزایش بازده احتراق و کاهش نشر آلودگی‌ها می‌باشد که موردتوجه محققان مختلف قرار گرفته است. مرحله‌ای کردن هوا به معنای تزریق مقدار هوای لازم برای احتراق مقدار مشخصی از سوخت در چند مرحله است. این کار می‌تواند موجب کاهش دماهای احتراق و بنابراین کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن شود که وابستگی بسیار زیادی به دمای احتراق دارند [1].

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Rasouli, J. Mahmoudimehr, Minimization of the emission of pollutants along with maximization of radiation from an air-staged natural gas flame, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 207-218, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

از نخستین مطالعات این زمینه می‌توان به مطالعه‌ی تجربی سیکستو و همکارانش [2] در سال 1999 اشاره نمود که از طریق مرحله‌ای کردن احتراق، میزان اکسیدنیتروژن حاصل از احتراق زباله‌های کشاورزی را کاهش دادند. در سال 2005 برگر و همکارانش [3] در یک بررسی تجربی، در بویلرهایی با سوخت چوب، از مرحله‌ای کردن هوا به کاهش قابل توجهی در میزان تولیداکسیدنیتروژن دست یافتند؛ اما از طرفی آن‌ها دریافتند مرحله‌ای کردن هوا موجب کاهش درجه حرارت در کوره و بنابراین افزایش تولید گازهایی نظیر مونواکسیدکربن می‌شود. ایلباس و همکارانش [4] در همان سال، به بررسی تاثیر ترکیب سوخت (نسبت‌های متفاوت هیدروژن و متان به عنوان سوخت) بر تولید آلودگی‌های اکسیدهای نیتروژن و مونواکسیدکربن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که زمانی که سوخت مورد استفاده هیدروژن خالص است، علاوه بر عدم تولید مونواکسیدکربن، تولید اکسیدنیتروژن تنها از مکانیزم حرارتی صورت می پذیرد. پس از آن در سال 2007 در یک مطالعه‌ی تجربی توسط بالاستر و همکارانش [5]، تاثیر قابل توجه مرحله‌ای نمودن احتراق و آئرودینامیک مشعل بر ویژگی‌های شعله‌ی گاز طبیعی و انتشار اکسیدهای نیتروژن آن مشاهده شد. در سال 2009، تان و همکارانش [6] به صورت تجربی به بررسی تاثیر مرحله‌ای کردن هوا بر میزان تولید اکسید نیتروژن و کربن نسوخته در یک کوره با سوخت زغال‌سنگ پرداختند. نتایج نشان داد که اگرچه مرحله‌ای کردن هوا به طور موثر کاهش نشر اکسیدنیتروژن را به دنبال دارد، اما در مقابل موجب افزایش کربن نسوخته می‌شود. پس از آن، لین و همکاران او [7] در سال 2010 در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی تاثیر مرحله‌ای کردن هوا بر انتشار اکسیدنیتروژن در احتراق در حالتی که سوخت مورد استفاده زغال‌سنگ ساییده شده بود، پرداختند. در این تحقیق، مقایسه‌ی احتراق مرحله‌ای و غیرمرحله‌بندی نشان داد احتراق مرحله‌ای دارای اثری محسوس در کاهش تولید اکسیدنیتروژن است. همچنین مشاهده شد نسبت استوکیومتریک تا حد زیادی بر میزان اکسیدنیتروژن تاثیرگذار است. در سال 2011 بانیکا و همکارانش [8] در یک کار عددی، جریان مافوق صوت را در یک محفظه‌ی احتراق به صورت سه-بعدی مدل کردند و اثر تزریق مرحله‌ای هوا را در آن بررسی نمودند. در این مطالعه مشاهده شد که در احتراق مرحله‌ای، از اکسیژن باقی مانده نزدیک دیوار، به طور کامل‌تری استفاده شده است. در سال 2012، لی و همکارانش [9] در یک بررسی تجربی، از طریق مرحله‌ای کردن تزریق هوا، انتشار اکسیدنیتروژن در احتراق زیست‌توده را به میزان چشم‌گیری کاهش دادند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که سطوح بالای مرحله‌ای نمودن هوا، میزان انتشار مونواکسیدکربن را افزایش می‌دهد، بنابراین باید توازنی مناسب میان میزان تولید مونواکسیدکربن و اکسیدنیتروژن لحاظ شود. در یک بررسی عددی در سال 2013 توسط ژانگ و همکارانش [10]، اثرات نسبت استوکیومتریک هوا در مرحله‌ی اول، بر احتراق زغال‌سنگ و انتشار اکسیدنیتروژن در یک کوره بررسی شد. مشاهده شد که با کاهش نرخ هوا در مرحله‌ی نخست، هم دمای گاز در خروجی کوره و هم تولید اکسیدنیتروژن به شکل چشم‌گیری کاهش می‌یابد و معمولا افزایش کربن موجود در خاکستر[1] اتفاق می‌افتد. در همان سال، فنگ و همکارانش [11] و همچنین لی و همکارانش [12] به ترتیب به صورت عددی و آزمایشگاهی، تاثیر احتراق مرحله‌ای بر کاهش نشر اکسیدنیتروژن حاصل از احتراق سوخت زغال‌سنگ را نشان دادند. در سال 2014 دیز و همکارانش [13] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، اثر مرحله‌ای کردن تزریق هوا را در احتراق نوعی زغال‌سنگ، روی انتشار اکسیدنیتروژن، مونواکسیدکربن و اکسید گوگرد بررسی کردند؛ در این تحقیق مشاهده شد که تزریق مرحله‌ای هوا میزان اکسیدنیتروژن را در خروجی کاهش می‌دهد، اما در مقابل افزایش نشر آلودگی‌هایی نظیر مونواکسیدکربن و اکسیدگوگرد را به همراه دارد. کار تجربی دیگری در سال 2014 توسط لامبرگ و همکارانش [14] انجام شد که در آن، اثر مرحله‌ای کردن هوا در گرمکن‌های مورد استفاده در مصارف خانگی بررسی شد. در این مطالعه، مرحله‌ای کردن هوا منجر به کاهش قابل توجهی در مقادیر مونواکسیدکربن و سوخت نسوخته شد.

روش‌های دیگری به غیر از مرحله‌ای نمودن احتراق نیز برای بهبود ویژگی‌های حرارتی شعله‌ها و نشر آلودگی‌های آن‌ها، توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در سال 2013 اسحق نیموری و همکاران [15] به بررسی عددی تاثیر اغتشاش جریان در یک مشعل متخلخل با سوخت متان بر ویژگی‌های شعله و میزان تولیدات آلودگی مونواکسیدکربن و اکسیدنیتروژن از آن پرداختند و مشاهده نمودند که درنظرگیری اغتشاش سبب تطابق بهتر نتایج عددی با مشاهدات تجربی می‌گردد. در همان سال، پورحسینی و مقیمان [16] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی از طریق تزریق ذرات پودر زغال‌سنگ به شعله‌ی دیفیوژن گاز طبیعی به مقادیر بالاتر انتقال حرارت تابشی از شعله دست یافتند. مطالعه‌ی زکی و زرگرآبادی [17] در سال 2014 حاکی از تاثیر قابل توجه نسبت هم‌ارزی و میزان هوادهی بر میزان تولید اکسیدنیتروژن در محفظه‌ی احتراق توربین گاز است. پورحسینی و مقیمان [18] در سال 2014 در فعالیت تجربی دیگری از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون گاز طبیعی توانستند به مقادیر بالاتر انتقال حرارت تابشی و در نتیجه راندمان حرارتی بالاتر مشعل‌های گازسوز دست یابند. البته در این کار مشاهده شد که مقادیر بالای گازوئیل منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ی مونواکسیدکربن به بیش از مقادیر مجاز می‌شود. در همان سال شفا و همکاران [19] به بررسی عددی تاثیر پارامترهای مختلف طراحی از جمله تعداد نازل‌های تزریق آمونیاک و زوایای آن‌ها در کاهش تولید آلاینده‌ی اکسیدنیتروژن به روش انتخابی غیرکاتالیستی[2] پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش تعداد نازل‌ها و در نهایت تبدیل شدن آن‌ها به یک حلقه، موجب افزایش بازده روش انتخابی غیرکاتالیستی می‌شود.

مرور انجام گرفته بر فعالیت‌های پیشین نشان می‌دهد که مرحله‌ای نمودن فرآیند احتراق راهی موثر و شناخته شده برای کاهش نشر آلودگی اکسیدنیتروژن است. مقاله‌ی حاضر علاوه بر آلودگی اکسیدنیتروژن، به بررسی تاثیر مرحله‌ای نمودن هوا بر سایر آلودگی‌ها (مونواکسیدکربن و دوده[3]) و همچنین بر میزان انتقال حرارت تابشی از شعله‌ی گاز طبیعی می‌پردازد. با توجه به اطلاعات نویسندگان، بررسی تاثیر مرحله‌ای کردن احتراق به طور همزمان روی پارامترهای مختلف در فعالیت‌های پیشین صورت نپذیرفته است. در جهت تحقیق اهداف حاضر، یک مطالعه‌ی موردی شامل دو مرحله تزریق هوا و یک مرحله تزریق سوخت (گاز طبیعی) به محفظه‌ی احتراق مورد توجه قرار گرفته و مدلسازی به ازای حالات مختلف توزیع هوا بین مراحل اول و دوم و فواصل مختلف طولی و عرضی ورودی‌های هوای اول و دوم (در مجموع 192 حالت) انجام می‌پذیرد. در بخش ارائه و تحلیل نتایج، علاوه بر بررسی جداگانه تاثیر مرحله‌ای نمودن هوا روی هر یک از توابع هدف ذکرشده، با درنظرگیری همزمان تمامی توابع هدف و به کمک مفهوم جبهه‌ی

[1] Fly ash

[2] Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)

[3] Soot

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

پارتو[1] طرح‌های بهینه از میان تمامی طرح‌های مورد بررسی گزینش و معرفی می‌گردند.

2- معادلات حاکم و مدلسازی

در کار حاضر واکنش احتراق متان طبق روابط (1) و (2) به صورت دومرحله‌ای در نظر گرفته می‌شود [20].

$$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O \tag{1}$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \tag{2}$$

در ادامه، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر یک میدان جریان واکنشی ارائه می‌گردد.

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{3}$$

در رابطه‌ی (3)، ρ چگالی و u_i سرعت جریان متوسط است.

معادله‌ی بقای ممنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \tag{4}$$

در رابطه‌ی (4)، p فشار استاتیکی و μ گرانروی است.

در کار حاضر، به منظور مدلسازی آشفتگی از مدل تنش رینولدز[2] استفاده می‌شود. این مدل در رابطه‌ی (5) نشان داده شده است [21].

$$C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \varphi_{ij} + \epsilon_{ij} \tag{5}$$

در رابطه (5)، عبارات C_{ij}، $D_{T,ij}$، $D_{L,ij}$، P_{ij}، φ_{ij} و ϵ_{ij} به ترتیب بخش جابه‌جایی[3]، نفوذ آشفتگی[4]، نفوذ مولکولی[5]، عبارت تولید تنش[6]، کرنش فشاری[7] و بخش اتلافی[8] می‌باشند. جملات رابطه‌ی (5) به صورت روابط (6) الی (11) تعریف می‌شوند.

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k \overline{u_i' u_j'}\right) \tag{6}$$

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\mu\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\overline{u_i' u_j'}\right)\right] \tag{7}$$

$$P_{ij} = -\rho\left(\overline{u_i' u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right) \tag{8}$$

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k}\right) \tag{9}$$

$$\varphi_{ij} = -C_1\rho\frac{\varepsilon}{k}\left[\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3}\delta_{ij}k\right] - C_2\left[\left(P_{ij} - C_{ij}\right) - \frac{2}{3}\delta_{ij}(P - C)\right] \tag{10}$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3}\rho\varepsilon\delta_{ij} \tag{11}$$

در رابطه‌ی (9)، μ_t گرانروی آشفته[9] است که از رابطه‌ی (12) به دست می‌آید. همچنین عبارات P و C در رابطه‌ی (10)، به ترتیب از روابط (13) و (14) به دست می‌آیند. لازم به ذکر است σ_k، C_1، C_2 و C_μ ثوابت معادلات می‌باشند.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{12}$$

$$P = \frac{1}{2}P_{kk} \tag{13}$$

$$C = \frac{1}{2}C_{kk} \tag{14}$$

لازم به ذکر است در ورودی با فرض ایزوتروپ بودن آشفتگی، شرایط $\overline{u_i^{'2}} = (2/3)k$ و $\overline{u_i' u_j'} = 0$ برقرار است. همچنین برای سلول‌های مجاور دیواره، شرایط $(\overline{u_i'^2}/k) = 1.098$، $(\overline{u_j'^2}/k) = 0.247$، $(\overline{u_k'^2}/k) = 0.655$ و $(-\overline{u_i' u_j'}/k) = 0.255$ در نظر گرفته شده است که i نشان‌دهنده‌ی جهت مماس بر حرکت، j جهت عمود بر دیواره و k جهت عمود بر صفحه‌ی ij می‌باشد. در روابط (10) الی (12)، ε نرخ اتلافات انرژی جنبشی و k انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد. معادلات انتقال ε و k به ترتیب در روابط (15) و (16) آورده شده است [21].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] C_{\varepsilon 1}P_{ii}\frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{15}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \frac{1}{2}P_{ii} - \rho\varepsilon \tag{16}$$

σ_ε، $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$ ثوابت معادلات می‌باشند. همچنین در رابطه‌ی (16) بر روی دیواره‌ها، شرط $(\partial k/\partial n) = 0$ در نظر گرفته شده است که n جهت عمود بر دیواره را نشان می‌دهد [21].

معادله‌ی انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(k + \frac{c_p\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sum_k h_k\left(\rho D_k + \frac{\mu_t}{\mathrm{Sc}_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) + S_h \tag{17}$$

در رابطه‌ی (17)، k ضریب هدایت، c_p ظرفیت گرمایی در فشار ثابت، Pr_t عدد پرانتل آشفته، T دما، Y_k کسر جرمی گونه‌ی kام، D_k ضریب نفوذ گونه‌ی kام، Sc_t عدد اشمیت آشفته و h آنتالپی می‌باشد که روابط (18) و (19) برای آن برقرار است. همچنین S_h در رابطه‌ی (17)، عبارت چشمه مربوط به معادله‌ی انرژی است که مجموعی از مقادیر مربوط به واکنش $(S_{h,\mathrm{reaction}})$ و تابش $(S_{h,\mathrm{radiation}})$ است. $S_{h,\mathrm{reaction}}$ با توجه به رابطه‌ی (20) تعریف می‌شود.

$$h = \sum_k h_k Y_k \tag{18}$$

$$h_k = \int_{T_{\mathrm{ref}}}^{T} c_{p,k}\,dT \tag{19}$$

$$S_{h,\mathrm{reaction}} = -\sum_k \frac{h_k^o}{M_{w,k}}R_k \tag{20}$$

در رابطه‌ی (19)، T_{ref} برابر با 298.15 کلوین می‌باشد. در رابطه‌ی (20) h_k^o آنتالپی تشکیل گونه‌ی kام، R_k نرخ تولید یا نابودی گونه‌ی kام و $M_{w,k}$ وزن مولکولی گونه‌ی kام می‌باشد. R_k با توجه به رابطه‌ی (21) تعریف می‌شود [21]

$$R_k = M_{w,k}\sum_r R_{k,r} \tag{21}$$

در رابطه‌ی (21)، $R_{k,r}$ نرخ تولید یا نابودی گونه‌ی kام در واکنش rام می‌باشد. برای یک سیستم شیمیایی متشکل از N گونه می‌توان واکنش را به صورت رابطه‌ی (22) نشان داد. در رابطه‌ی (22)، M_k نشان‌دهنده‌ی گونه‌ی kام، ν_k' ضریب استوکیومتریک گونه‌ی kام در سمت واکنش‌دهنده و ν_k'' ضریب استوکیومتریک گونه‌ی kام در سمت فرآورده است. در کار حاضر، متوسط نرخ واکنش در جریان آشفته بر اساس مدل اتلاف گردابه‌ای[10] محاسبه می‌شود. در

[1] Pareto front
[2] Reynolds Stresses Model (RSM)
[3] Convection
[4] Turbulent Diffusion
[5] Molecular Diffusion
[6] Stress Production
[7] Pressure Strain
[8] Dissipation
[9] Turbulent viscosity
[10] Eddy dissipation

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

این مدل نرخ خالص تولید یا مصرف گونه‌ی kام در واکنش rام ($R_{k,r}$)، برابر با حداقل روابط (23) و (24) در نظر گرفته می‌شود [21].

$$\sum_{k=1}^{N} \nu_k^{'} M_k \rightarrow \sum_{k=1}^{N} \nu_k^{''} M_k \tag{22}$$

$$R_{k,r} = \nu_{k,r}^{'} M_{w,k} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{\nu_{R,r}^{'} M_{w,R}}\right) \tag{23}$$

$$R_{k,r} = \nu_{k,r}^{'} M_{w,k} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N \nu_{j,r}^{''} M_{w,j}} \tag{24}$$

در روابط (23) و (24)، A و B پارامترهایی تجربی هستند که مقادیر آن‌ها در مرجع [21] ارائه شده است.

معادله‌ی بقای جرم گونه‌ها:

معادله‌ی بقای جرم گونه‌ها به صورت رابطه‌ی (25) برقرار است.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\rho D_k + \frac{\mu_t}{\mathrm{Sc}_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) + R_k \tag{25}$$

مدلسازی تشعشع:

در کار حاضر، برای مدلسازی تشعشع از روش جهت گسسته[1] استفاده می‌شود که در رابطه‌ی (26) نشان داده شده است. این روش برای چندین جهت گسسته، بسته به دقت موردنظر حل می‌شود [21].

$$\nabla \cdot (I(\vec{r},\vec{s})\vec{s}) + (a+\sigma_s) I(\vec{r},\vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi} I(\vec{r},\vec{s}')\,\varphi(\vec{s},\vec{s}')\,d\Omega' \tag{26}$$

در رابطه‌ی (26)، $\vec{r}$بردار مکان، $\vec{s}$بردار جهت، $\vec{s}'$بردار جهت بازتاب شده، a ضریب جذب، n ضریب شکست، σ_s ضریب پخش، σ ثابت استفان بولتزمن، I شدت تابش، Ω' زاویه‌ی فضایی و φ تابع فاز است که در حالت تابش یکنواخت برابر با 1 درنظر گرفته می‌شود. در کار حاضر ضریب جذب با استفاده از مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری[2] [22] محاسبه می‌گردد. این مدل، طبق آنچه در رابطه‌ی (27) نشان داده شده است، ضرایب جذب محلی را به صورت تابعی از غلظت دی اکسیدکربن و بخار آب، و همچنین فشار و دما در نظر می‌گیرد. همچنین در صورت وجود دوده، این ضریب بر اساس رابطه (28) اصلاح می‌گردد. در روابط (27) و (28)، a_k و k_k به ترتیب ضریب وزنی تابع دما برای هر گونه و ضریب جذب هر گونه (براساس اطلاعات مراجع [24,23])، ρ_m چگالی دوده و b_1 و b_2 ضرایب ثابت می‌باشند. همچنین لازم به ذکر است با فرض ساده ساز، ضریب پخش گاز در سراسر محفظه برابر با 0.11 در نظر گرفته شد [25].

$$a_g = \frac{-\ln(1-\sum a_k(1-\exp(-k_k p s)))}{s} \tag{27}$$

$$a = a_g + b_1 \rho_m [1 + b_2 (T - 2000)] \tag{28}$$

شرط مرزی معادله‌ی انتقال تابش بر روی دیواره‌ها به صورت رابطه‌ی (29) در نظر گرفته می‌شود که در این معادله، I_{in} شدت تابش ورودی به سطح از جهات مختلف، I_w شرط مرزی شدت تابش روی دیواره و ε_w ضریب گسیل دیواره است.

$$I_w = \frac{(1-\varepsilon_w)}{\pi}\int I_{\mathrm{in}} \vec{s}\cdot\vec{n}\,d\Omega' + \frac{\varepsilon_w}{\pi}\sigma T_w^4 \tag{29}$$

ترم چشمه‌ی تابشی معادله‌ی انرژی برای هر سلول به صورت رابطه‌ی (30) است که در این رابطه، A کل سطوح سلول را شامل می‌شود.

$$S_{h,\mathrm{radiation}} = \int_A \left(\int I\vec{s}\cdot\vec{n}\,d\Omega'\right) dA \tag{30}$$

مدلسازی نشر اکسیدنیتروژن:

با توجه به کند بودن سرعت تشکیل اکسیدنیتروژن در مقایسه با سرعت احتراق، با ساده‌سازی، مدلسازی نشر اکسیدنیتروژن از طریق حل معادله انتقال (31) به صورت مجزا و پس از حل معادلات جریان و احتراق ذکر شده در بخش‌های قبل صورت می‌پذیرد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\mathrm{NO}}) + \nabla\cdot(\rho\vec{u}Y_{\mathrm{NO}}) = \nabla\cdot(\rho D \nabla Y_{\mathrm{NO}}) + S_{\mathrm{NO}} \tag{31}$$

در رابطه‌ی (31)، S_{NO} عبارت چشمه می‌باشد که با توجه به مکانیزم تولید اکسیدنیتروژن تعریف می‌شود. به طور عمده، تولید اکسیدنیتروژن از دو مکانیزم حرارتی[3] (زلدوویچ) و سریع[4]صورت می‌پذیرد [26,20]. نرخ تولید اکسیدنیتروژن از مکانیزم زلدوویچ در دماهای بالا اهمیت می‌یابد و از رابطه‌ی (32) قابل محاسبه می‌باشد [21].

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = 2k_{f,1}[\mathrm{O}][\mathrm{N_2}]\frac{\left(1-\frac{k_{r,1}k_{r,2}[\mathrm{NO}]^2}{k_{f,1}[\mathrm{N_2}]k_{f,2}[\mathrm{O_2}]}\right)}{\left(1+\frac{k_{r,1}[\mathrm{NO}]}{k_{f,2}[\mathrm{O_2}]+k_{f,3}[\mathrm{OH}]}\right)} \tag{32}$$

در رابطه‌ی (32) ثوابت واکنش $k_{r,1}$، $k_{r,2}$، $k_{r,3}$، $k_{f,1}$، $k_{f,2}$ و $k_{f,3}$ و رابطه‌ی مربوط به غلظت اکسیژن تک‌اتمی، در مرجع [21] ارائه شده است.

تولید اکسیدنیتروژن از مکانیزم سریع در شرایط غنی اهمیت می‌یابد و این مکانیزم توسط فنی‌مور ارائه شده است [26]. در مکانیزم سریع، نرخ تولید اکسیدنیتروژن از رابطه‌ی (33) قابل محاسبه است [21].

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = f\, k_{pr}^{'}[\mathrm{O_2}]^a[\mathrm{N_2}][\mathrm{fuel}]\exp\left(\frac{-E_a^{'}}{RT}\right) \tag{33}$$

در رابطه‌ی (33)، f به صورت تابعی از نسبت هم‌ارزی و $k_{pr}^{'}$ به صورت تابعی از دما و فشار در مرجع [21] ارائه شده است. همچنین در رابطه‌ی (33)، $E_a^{'}$ برابر با 303474.125(J/gmol) و a عبارتی است که به شرایط شعله بستگی دارد و در مرجع [21] به صورت کامل توصیف شده است.

مدلسازی دوده:

با توجه به پیچیدگی‌های سینتیک تشکیل دوده، با ساده‌سازی، سینتیک تشکیل دوده به صورت مجزا از سینتیک احتراق در نظر گرفته شده و مدلسازی آن از طریق حل معادله انتقال (34) پس از حل معادلات جریان و احتراق صورت می پذیرد [27].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\mathrm{Soot}}) + \nabla\cdot(\rho\vec{u}Y_{\mathrm{Soot}}) = \nabla\cdot\left(\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_{t,\mathrm{Soot}}}\nabla Y_{\mathrm{Soot}}\right) + R_{\mathrm{Soot}} \tag{34}$$

در رابطه‌ی (34)، Y_{Soot} کسر جرمی دوده، $\mathrm{Pr}_{t,\mathrm{Soot}}$ عدد پرانتل آشفته برای انتقال دوده و R_{Soot} نرخ تولید دوده می‌باشد. نرخ خالص تولید دوده (R_{Soot})، از تفاوت میان نرخ تشکیل آن ($R_{\mathrm{Soot,form}}$) و نرخ احتراق آن ($R_{\mathrm{Soot,comb}}$) طبق رابطه‌ی (35) به دست می‌آید.

$$R_{\mathrm{Soot}} = R_{\mathrm{Soot,form}} - R_{\mathrm{Soot,comb}} \tag{35}$$

نرخ تشکیل دوده طبق رابطه‌ی تجربی (36) به دست می‌آید.

$$R_{\mathrm{Soot,form}} = C_s P_{\mathrm{fuel}} \varphi^r \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \tag{36}$$

در رابطه‌ی (36)، C_s ثابت تشکیل دوده، P_{fuel} فشار جزئی سوخت، φ نسبت هم‌ارزی و (E/R) دمای فعالسازی است؛ همچنین مقادیر ثوابت از جمله r در مرجع [21] موجود است. نرخ احتراق دوده، از حداقل دو عبارت که در روابط (37) و (38) آورده شده است، به دست می‌آید.

[1] Discrete Ordinates (DO)
[2] WSGGM
[3] Thermal
[4] Prompt

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

$$R_1 = A\rho Y_{\text{Soot}}\frac{\varepsilon}{k} \quad (37)$$

$$R_2 = A\rho\left(\frac{Y_{\text{ox}}}{\nu_{\text{Soot}}}\right)\left(\frac{Y_{\text{Soot}}\nu_{\text{Soot}}}{Y_{\text{Soot}}\nu_{\text{Soot}} + Y_{\text{fuel}}\nu_{\text{fuel}}}\right)\frac{\varepsilon}{k} \quad (38)$$

در روابط (37) و (38)، Y_{ox} و Y_{fuel} به ترتیب کسر جرمی اکسنده و سوخت، و A، ν_{Soot} و ν_{fuel} ثوابتی تجربی هستند [27].

لازم به ذکر است از توابع دیواره استاندارد[1] [28] برای مدلسازی سرعت، دما، کسر جرمی هر یک از گونه‌ها و نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی در سلول‌های مجاور دیواره استفاده شده است.

3- اعتبارسنجی حل عددی حاضر

قبل از بحث بر روی نتایج، ابتدا مدلسازی حاضر از طریق مقایسه با نتایج تجربی مرجع [25] صحت‌سنجی می‌شود. نمای شماتیک مطالعه‌ی موردی که به صورت محوری متقارن است در شکل 1 نشان داده شده است. همان‌طور که شکل 1 نشان می‌دهد سوخت گازی متان در یک مرحله و هوا در دو مرحله وارد محفظه می‌شوند و احتراق به صورت غیرپیش‌آمیخته انجام می‌شود. اطلاعات هندسی و شرایط مرزی مورد نیاز به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 نشان داده شده است؛ همچنین برای خروجی، شرط مرزی فشار و برابر با یک اتمسفر در نظر گرفته شده است. دیوار جانبی محفظه‌ی احتراق به صورت دما ثابت و برابر با 300 کلوین و دیوار میان ورودی سوخت و هوای اول، عایق درنظر گرفته شده است و همه‌ی دیواره‌ها به صورت جسم سیاه با ضریب گسیل یک در نظر گرفته شده است.

برای شبکه‌بندی میدان حل از نرم‌افزار گمبیت و برای شبیه‌سازی این جریان واکنشی از نرم‌افزار فلوانت و روش حجم محدود استفاده شده است. برای اصلاح سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل[2] و برای گسسته‌سازی معادلات از روش بالادست جریان مرتبه‌ی اول[3] استفاده شده است.

پس از بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی میدان حل، شبکه با تعداد 43500 سلول برای ادامه‌ی کار انتخاب شده است. همچنین با بررسی عدم وابستگی نتایج تابشی به تعداد جهات گسسته، تعداد 128 جهت گسسته در محاسبات تابشی لحاظ گردید. شکل‌های 2 و 3 مقایسه‌ی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی را به ترتیب برای نمودارهای دما و سرعت روی خط مرکزی (محور) و همچنین شکل‌های 4 و 5 این مقایسه را به ترتیب برای نمودارهای دما و سرعت روی خط عرضی x=150mm نشان می‌دهد. متوسط تفاوت داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدلسازی برای نمودارهای 2 الی 5 به ترتیب برابر با 9، 16، 10 و 14 درصد می‌باشد.

4- بحث و نتایج

در کار حاضر، از طریق تغییر نحوه‌ی توزیع هوا بین دو ورودی هوا و همچنین تغییر فواصل عرضی و طولی میان ورودی‌های هوا که در شکل 6 به ترتیب با L_1 و L_2 نشان داده شده است، به جستجوی حالتی با کمترین میزان آلاینده‌ها در خروجی و بیشترین میزان کل انتقال گرمای تابشی پرداخته می‌شود؛ منظور از تابش در مطالعه‌ی حاضر، تابش خالص دریافتی دیواره جانبی می‌باشد. لازم به ذکر است در تمامی حالات مورد بررسی، نرخ جرمی سوخت ورودی و نرخ جرمی کل هوای ورودی (مجموع هوای اول و دوم) ثابت در نظر گرفته می‌شود.

[1] Standard wall functions
[2] simple
[3] First Order Upwind Method

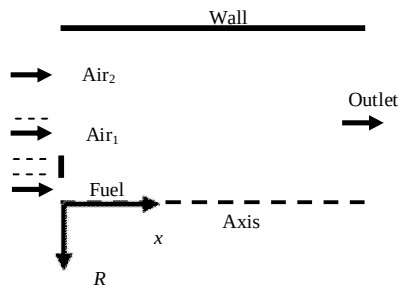

Fig. 1 Schematic view of combustion chamber

شکل 1 نمای شماتیک محفظه‌ی احتراق

جدول 1 اطلاعات هندسی مطالعه‌ی موردی [25]

Table 1 Geometrical data of case study [25]

مکان مورد نظر	اطلاعات(اندازه)
محدوده‌ی شعاعی ورودی سوخت (mm)	R=0-3
محدوده‌ی شعاعی ورودی هوای اولیه (mm)	R=7.5-22.5
محدوده‌ی شعاعی ورودی هوای ثانویه (mm)	R=22.5-293
قطر محفظه‌ی احتراق (mm)	586
طول محفظه‌ی احتراق (mm)	990

جدول 2 شرایط مرزی مطالعه‌ی موردی [25]

Table 2 Boundary conditions of case study [25]

پارامتر ورودی	سوخت	هوای اول	هوای دوم
سرعت محوری (ms^{-1})	21.9	5	0.3
سرعت شعاعی (ms^{-1})	0	0	0
انرژی جنبشی آشفتگی (m^2s^{-2})	2.2	0.28	0.004
نرخ اتلافات انرژی جنبشی (m^2s^{-3})	500	35.5	0.0002
دما (K)	295	295	295
کسرجرمی اکسیژن	0	0.2315	0.2315
کسرجرمی نیتروژن	0.2152	0.7685	0.7685
کسرجرمی متان	0.7638	0	0
کسرجرمی دی‌اکسیدکربن	0.021	0	0

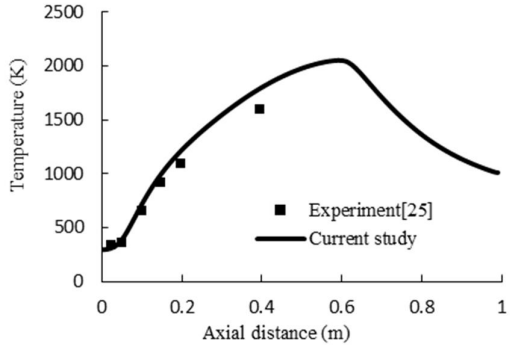

Fig.2 Comparison of present modeling and experiment: temperature on centerline

شکل 2 مقایسه‌ی مدلسازی حاضر و نتایج تجربی: دما روی خط مرکزی

نسبت هم‌ارزی هوای اول به عنوان معیار نحوه‌ی توزیع هوا مورد نظر قرار می‌گیرد و به صورت رابطه‌ی (39) تعریف می‌شود.

$$\varphi_{\text{هوای اول}} = \frac{\left(\frac{\text{جرم سوخت}}{\text{جرم هوای اول}}\right)_{\text{واقعی}}}{\left(\frac{\text{جرم سوخت}}{\text{جرم هوای اول}}\right)_{\text{تئوری}}} \quad (39)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

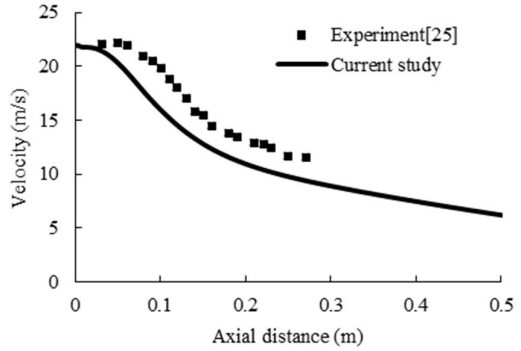

Fig. 3 Comparison of present modeling and experiment: velocity on centerline

شکل 3 مقایسه‌ی مدلسازی حاضر و نتایج تجربی: سرعت روی خط مرکزی

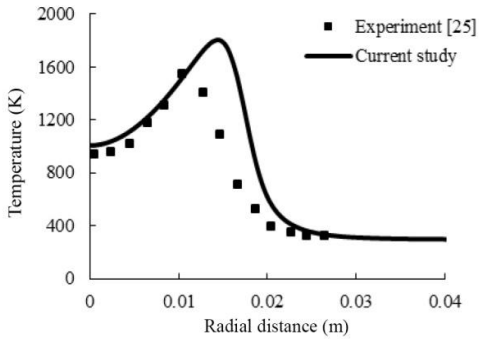

Fig.4 Comparison of present modeling and experiment: temperature on transveral line of x=150mm

شکل 4 مقایسه‌ی مدلسازی حاضر و نتایج تجربی: دما روی خط عرضی x=150mm

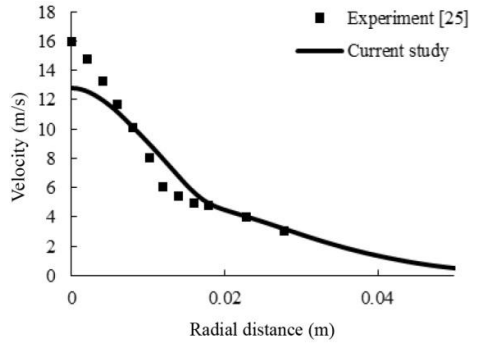

Fig.5 Comparison of present modeling and experiment: velocity on transveral line of x=150mm

شکل 5 مقایسه‌ی مدلسازی حاضر و نتایج تجربی: سرعت روی خط عرضی x=150mm

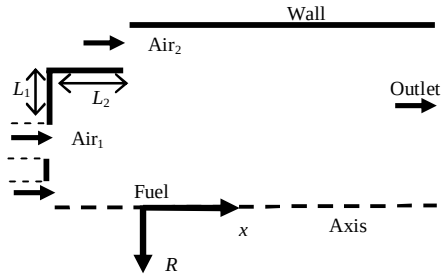

Fig. 6 Schematic view of geometrical variables

شکل 6 نمایی شماتیک از متغیرهای هندسی

بنابراین در ادامه منظور از φ همان نسبت هم‌ارزی مربوط به هوای اول است که $(1/\varphi)$ بیشتر از 1 به معنای رقیق بودن سوخت و $(1/\varphi)$ کمتر از 1 به معنای غنی بودن سوخت نسبت به هوای اول می‌باشد. در ادامه، نتایج در چهار بخش ارائه می‌گردد. در بخش اول هندسه ثابت و مشابه حالت مرجع فرض می‌شود (شکل1) و تنها از طریق تغییر $(1/\varphi)$ (از0.1 تا 1.2 با گام 0.1) به بررسی تاثیر نحوه‌ی توزیع هوا بین دو ورودی هوا پرداخته می‌شود. در این بخش هر یک از توابع هدف (میزان تابش از شعله و میزان نشر هر یک از آلاینده‌های اکسیدنیتروژن، دوده و مونواکسیدکربن) به صورت جداگانه مورد توجه قرار می‌گیرد و به ازای هر تابع هدف، بهترین نحوه‌ی توزیع هوا بین دو ورودی هوا (بهترین مقدار φ هوای اول) معرفی شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش دوم، فواصل عرضی و طولی میان هوای اول و دوم (L_1 و L_2 در شکل6) و نحوه‌ی توزیع هوا (با معیار φ) به طور همزمان تغییر داده می‌شود و تاثیر این تغییر همزمان بر هر یک از توابع هدف، به صورت جداگانه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که مقادیر درنظرگرفته شده برای L_1 برابر با 0، 15، 30 و 45 میلی‌متر و برای L_2 برابر با 0، 100، 200 و 300 میلی‌متر می‌باشد. بنابراین در مجموع به تعداد 192=4×4×12 حالت تولید شبکه و حل عددی انجام می‌پذیرد. تا اینجا در دو بخش اول و دوم، توابع هدف به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. در بخش سوم، توابع هدف آلودگی شامل نشر اکسیدنیتروژن، نشر دوده و نشر مونواکسیدکربن به صورت همزمان مورد توجه واقع می‌شود و بهترین طرح از میان 192 طرح از نقطه‌نظر تولیدات آلاینده‌ها معرفی می‌گردد. در این بخش، طرح بهینه با استفاده از مفهوم جبهه‌ی پارتو گزینش می‌شود. در نهایت در بخش چهارم، تمامی چهار تابع هدف یعنی تابع هدف مربوط به ویژگی حرارتی شعله (میزان تابش از آن) به همراه سه تابع هدف مربوط به تولیدات آلاینده‌ها به صورت همزمان مورد توجه قرار می‌گیرد و بر این اساس بهترین طرح معرفی می‌شود.

4-1- تاثیر مرحله‌ای کردن هوا بر هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه

جدول 3 با درنظرگیری هر تابع هدف به صورت جداگانه به معرفی بهترین و بدترین طرح پرداخته است. این جدول بر اساس حالاتی است که هندسه‌ی محفظه ثابت و مشابه با حالت مرجع است و تنها نسبت هم‌ارزی هوای اول و یا به عبارتی دیگر نحوه‌ی توزیع هوا بین دو ورودی هوا در آن‌ها متفاوت است. لازم به ذکر است که در این جدول، علاوه بر بهترین طرح، بدترین طرح نیز معرفی شده است تا از طریق مقایسه‌ی بهترین و بدترین طرح، نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در ادامه با در نظرگیری هریک از توابع هدف به صورت جداگانه به تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، بیشترین میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره زمانی رخ می‌دهد که ناحیه‌ی اول احتراق بسیار غنی باشد($(1/\varphi)$ = 0.1)؛ به عبارتی دیگر هوای مرحله‌ی اول از هوای تئوری مورد نیاز بسیار کمتر باشد؛ در مقابل کمترین میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره مربوط به حالتی است که هوای مرحله‌ی اول کمی بیشتر از میزان هوای تئوری باشد ($(1/\varphi)$ = 1.2). کانتورهای دما در دو حالت حداکثر و حداقل میزان تابش از شعله به دیواره‌ی جانبی در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی‌که هوای اول کمتر از میزان هوای تئوری است ($(1/\varphi)$ = 0.1)، سطح وسیع‌تر شعله عاملی برای تابش بیشتر صورت پذیرفته از آن می‌باشد. به منظور تجزیه و تحلیل علت، نمودار نرخ واکنش روی خط عرضی x=400mm در شکل 8 نشان داده شده است. با

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

جدول 3 بهترین و بدترین مقدار هر یک از توابع هدف و درجات متناظر مرحله‌ای نمودن هوا

Table 3 Best and worst values of each objective function and the corresponding level of air-staging

پارامتر	مقدار	$\frac{1}{\varphi}$
حداکثرمیزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره (W)	6096.49	0.1
حداقل میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره (W)	2389.66	1.2
حداکثر میزان کل اکسیدنیتروژن درخروجی (ppm)	23.4	1.2
حداقل میزان کل اکسیدنیتروژن درخروجی (ppm)	9.78	0.1
حداکثرمیزان کل دوده درخروجی (ppm)	1.64	0.1
حداقل میزان کل دوده درخروجی (ppm)	0.111	1.2
حداکثرمیزان کل مونواکسیدکربن درخروجی (ppm)	8.44	0.1
حداقل میزان کل مونواکسیدکربن درخروجی (ppm)	0.398	1.1

توجه به شکل 8، هنگامی‌که هوای مرحله‌ی اول کمتر از میزان هوای نظری مورد نیاز است، امکان احتراق تمامی سوخت در ناحیه‌ی اول وجود ندارد، بنابراین از نرخ واکنش (شدت واکنش) کاسته شده و واکنش با نفوذ هوا از اطراف (هوای ثانویه) در فواصل شعاعی بیشتری انجام می‌شود. اما در مقابل در شرایط نزدیک به استوکیومتریک برای مرحله‌ی اول احتراق، واکنش با شدت بیشتر و در محدوده‌ی باریک‌تر انجام شده است. با توجه به نمودار دما روی خط عرضی x=400mm در شکل 9، آزادشدن انرژی واکنش در محدوده‌های وسیع‌تر برای حالت $(1/\varphi) = 0.1$، موجب کاهش قله‌ی دما می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر دما در شعله با تابندگی حداکثر تقریبا برابر با 1986 کلوین و در شعله با تابندگی حداقل تقریبا برابر با 2096 کلوین می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه انرژی آزاد شده از فرآیند احتراق ثابت است، دمای کپه‌ای گازها در خروجی محفظه‌ی احتراق که معیاری از انرژی محسوس گازهای خروجی است، با میزان تشعشع از شعله به دیواره‌ها رابطه‌ی عکس دارد و میزان آن در حالاتی که کل تابش از شعله حداکثر و حداقل است، به ترتیب برابر با 405 و 439 کلوین است. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، بیشترین میزان اکسیدنیتروژن در خروجی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان هوای مرحله‌ی اول تقریبا برابر میزان تئوری و کمی بیشتر از آن باشد $(1/\varphi) = 1.2)$ و کمترین میزان آن زمانی اتفاق می‌افتد که میزان هوای مرحله‌ی اول بسیار کمتر از مقدار تئوری باشد $(1/\varphi) = 0.1)$؛ همان‌طور که جدول 3 نشان می‌دهد طرح با حداکثر میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره و طرح با حداقل میزان کل تولید اکسیدنیتروژن در خروجی، و همچنین طرح با حداقل میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره و طرح با حداکثر میزان کل تولید اکسیدنیتروژن در خروجی معادل یکدیگر هستند؛ به عبارتی قسمت‌های (a) و (b) شکل 7 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی کانتورهای دمای مربوط به حداقل و حداکثر تولید اکسیدنیتروژن نیز می‌باشد. یکی از دلایل را می‌توان در دماهای شعله جستجو نمود. همان‌طور که ذکر شد، شعله با بیشترین میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره با دماهای حداکثر پایین‌تری همراه است و تولید اکسیدنیتروژن نیز وابستگی شدیدی به دما دارد [26,20].

همان‌طور که جدول 3 نشان می‌دهد، حداکثر میزان کل دوده درخروجی زمانی رخ می‌دهد که ناحیه‌ی اول احتراق بسیار غنی باشد $(1/\varphi) = 0.1)$؛ در مقابل کمترین میزان کل دوده درخروجی مربوط به حالتی است که هوای مرحله‌ی اول تقریبا برابر با میزان هوای تئوری و کمی بیشتر از آن باشد $(1/\varphi) = 1.2)$. این مشاهده با این واقعیت کلی که شعله‌های غنی منجر به

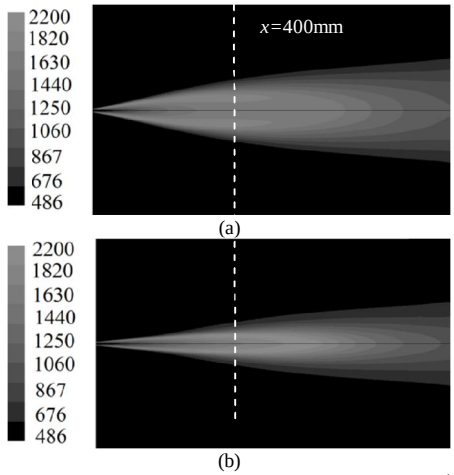

Fig. 7 Contours of temperature (K), a) maximum Radiation ($\frac{1}{\varphi}$ = 0.1), b) minimum Radiation ($\frac{1}{\varphi}$ = 1.2)

شکل 7 کانتور دما بر حسب کلوین؛ a) بیشترین میزان تابش ($\frac{1}{\varphi}$ = 0.1)، b) کمترین میزان تابش ($\frac{1}{\varphi}$ = 1.2)

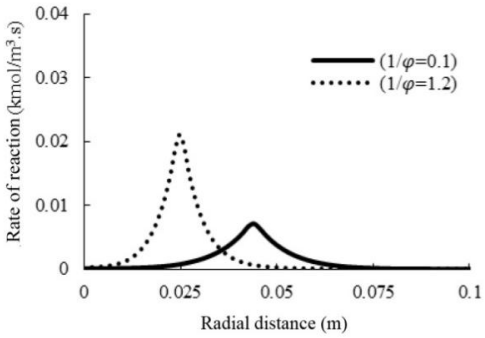

Fig. 8 Comparison of rate of reaction on transveral line of x=400mm for the cases with maximum and minimum radiation

شکل 8 مقایسه‌ی نرخ واکنش روی خط عرضی x=400mm میان حالات با حداکثر و حداقل تابش

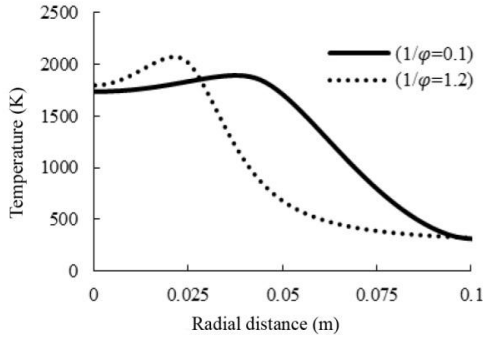

Fig. 9 Comparison of temperature on transveral line of x=400mm for the cases with maximum and minimum radiation

شکل 9 مقایسه‌ی دما روی خط عرضی x=400mm میان حالات با حداکثر و حداقل تابش

تولید دوده‌ی بیشتری می‌شوند، مطابقت دارد. لازم به ذکر است مونواکسیدکربن نیز دارای تحلیلی مشابه با دوده است و روندی یکسان با آن دارد [26,20,1].

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

4-2- تاثیر همزمان مرحله‌ای نمودن هوا و فواصل طولی و عرضی دو ورودی هوا بر هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه

جدول 4 همانند جدول 3 به معرفی بهترین طرح برای هر تابع هدف پرداخته است؛ اما با این تفاوت که در آن علاوه بر تغییر نسبت هم‌ارزی هوای اول، تغییر هندسه نیز لحاظ شده است و مقایسه میان تمامی 192 حالت (هم از نظر هندسه و هم از نظر نحوه‌ی توزیع هوا بین ورودی‌های اول و دوم) صورت می‌پذیرد.

مقایسه‌ی جدول‌های 3 و 4 نشان می‌دهد که از نقطه‌نظر نسبت هم‌ارزی هوای اول، چه با تغییر هندسه و چه بدون تغییر هندسه، حداکثر میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره و حداقل میزان کل اکسیدنیتروژن در خروجی، در شرایط غنی‌تر بودن ناحیه‌ی اول احتراق، و حداقل میزان کل دوده در خروجی و حداقل میزان کل مونواکسیدکربن در خروجی در شرایط نزدیک به تئوری بودن هوای اول رخ می‌دهد (اگرچه در جدول 3 حداقل دوده و حداقل مونواکسیدکربن به ترتیب در شرایط $(1/\varphi) = 1.2$ و $(1/\varphi) = 1.1$ رخ داده، ولی در جدول 4 حداقل دوده در $(1/\varphi) = 0.9$ و حداقل مونواکسیدکربن در $(1/\varphi) = 0.8$ رخ داده است). همچنین مقایسه‌ی جدول‌های 3 و 4 نشان می‌دهد زمانی‌که در کنار مرحله‌ای نمودن، از تغییر فواصل طولی و عرضی میان مراحل نیز استفاده شود، می‌توان به مقادیر بهتری از توابع هدف (مقادیر بیشتری از تابش از شعله و مقادیر کمتری از نشر هر یک از آلودگی‌ها) دست یافت. بر این اساس، جدول 4 در مقایسه با جدول 3، افزایش 25 درصدی در میزان تابش از شعله، کاهش 35 درصدی در نشر اکسیدنیتروژن، کاهش 98 درصدی در تولید دوده و کاهش 99 درصدی در میزان مونواکسیدکربن را نشان می‌دهد.

4-3- معرفی بهترین طرح از نقطه‌نظر تولیدات آلودگی (درنظرگیری سه تابع هدف آلودگی به طور همزمان)

گزینش طرح مناسب در این بخش با در نظر گیری همزمان سه تابع هدف میزان نشر اکسیدنیتروژن، دوده و مونواکسیدکربن با استفاده از مفهوم جبهه‌ی پارتو صورت می‌پذیرد. جبهه‌ی پارتو مجموعه‌ای از طرح‌ها می‌باشد که هیچ طرح غالب (برتر) نسبت به آن‌ها وجود ندارد. طرح غالب طرحی است که حداقل از نظر یک تابع هدف بهتر باشد و از نظر سایر توابع هدف بدتر نباشد [29]. با توجه به درنظرگیری همزمان سه تابع هدف ذکرشده، جبهه‌ی پارتو سه بعدی است که دو نما از سه نمای آن (به منظور خلاصه‌سازی) در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده است.

جدول 4 بهترین مقدار هریک از توابع هدف و مقادیر متناظر مرحله‌ای کردن هوا و فواصل میان ورودی‌های هوا

Table 4 Best value of each objective function and the corresponding level of air-staging and distances between the air inlets

پارامتر	مقدار	$\frac{1}{\varphi}$	L_1 (mm)	L_2 (mm)
حداکثرمیزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره (W)	7644.28	0.1	30	300
حداقل میزان کل اکسیدنیتروژن درخروجی (ppm)	6.33	0.1	30	200
حداقل میزان کل دوده در خروجی(ppm)	0.00001	0.9	0	300
حداقل میزان کل مونواکسیدکربن در خروجی (ppm)	0.0002	0.8	0	300

همان‌طور که در شکل‌های 10 و 11 مشاهده می‌شود، از میان 192 طرح مورد بررسی، 16 طرح در جبهه‌ی پارتو واقع شده است. جدول 5 اطلاعات مربوط به این 16 طرح را نشان می‌دهد. هریک از طرح‌های موجود روی جبهه‌ی پارتو می‌تواند به عنوان طرح برگزیده انتخاب گردد. اما به منظور پیشنهاد تنها یک طرح به عنوان طرح برگزیده، طرحی انتخاب می‌شود که فاصله‌ی آن از نقطه‌ی آرمانی حداقل باشد. نقطه‌ی آرمانی نقطه‌ای است که مقدار هر یک از توابع هدف آن، بهترین مقداری باشد که 192 طرح مورد بررسی به آن دست یافته‌اند. به عبارتی دیگر مقادیر توابع هدف مختلف آن، بهترین مقادیر گزارش شده در جدول 4 باشد. ضمنا برای آن‌که مقادیر توابع هدف مختلف با هم قابل قیاس باشند، از روش بی‌بعدسازی توابع هدف [29] طبق رابطه‌ی (40) استفاده می‌شود.

$$F_{ij}^{n} = \frac{F_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(F_{ij})^2}} \tag{40}$$

در رابطه‌ی (40)، F هریک از اهداف، i زیرنویس هر نقطه روی جبهه‌ی پارتو، j زیرنویس هریک از اهداف، m تعداد نقاط روی جبهه‌ی پارتو و منظور از بالانویس n حالت بی‌بعدشده‌ی آن هدف می‌باشد. حال به منظور محاسبه فاصله‌ی هرنقطه روی جبهه‌ی پارتو از نقطه‌ی آرمانی (d)، از رابطه‌ی (41) استفاده می‌شود [29].

$$d_i = \sqrt{\sum_{i=1}^{x}(F_{ij}^{n} - F_{\text{ideal},j}^{n})^2} \tag{41}$$

در رابطه‌ی (41) منظور از زیرنویس ideal مقدار تابع هدف بی‌بعدشده‌ی نقطه‌ی آرمانی و منظور از x تعداد توابع هدف است که در این بخش برابر با 3 می‌باشد. نقطه‌ای که منجر به کمترین میزان d شود، به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‌گردد. طرح گزینش شده در این قسمت در جدول 6 معرفی شده و مقادیر توابع هدف آن با مقادیر توابع هدف طرح مرجع (طرح معرفی شده در بخش3) مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود طرح گزینش شده از نظر تمامی توابع هدف از طرح مرجع بهتر است؛ به‌طوری‌که میزان تابش طرح بهینه از تابش حالت مرجع 7 درصد بیشتر و میزان تولید آلودگی‌های آن شامل اکسیدنیتروژن، دوده و مونواکسیدکربن نسبت به حالت مرجع به ترتیب 34، 81 و 64 درصد کمتر است. البته لازم به ذکر است که در این بخش تابش جزء توابع هدف نبوده و بهتر بودن آن به صورت اتفاقی صورت پذیرفته است.

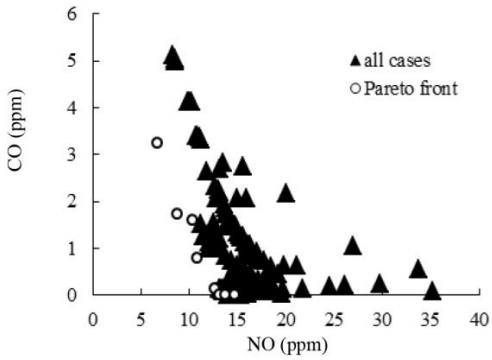

Fig. 10 Projection of Pareto front on CO-NO plane when environmental objectives are considered simultaneously

شکل 10 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی CO-NO زمانی‌که توابع هدف آلودگی به صورت همزمان درنظر گرفته شوند

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

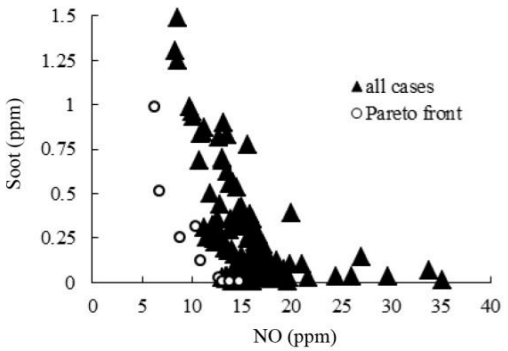

Fig. 11 Projection of Pareto front on Soot-NO plane when environmental objectives are considered simultaneously

شکل 11 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی Soot-NO زمانی‌که توابع هدف آلودگی به صورت همزمان درنظر گرفته شوند

4-4- معرفی بهترین طرح از نقطه‌نظر تابش از شعله و تولیدات آلودگی(درنظرگیری تابع هدف تابشی و توابع هدف آلودگی به صورت همزمان)

در این بخش همه‌ی توابع هدف (تابش از شعله و نشر آلودگی‌های اکسیدنیتروژن، دوده و مونواکسیدکربن) به صورت همزمان مورد توجه قرار می‌گیرد.

سه نما از جبهه‌ی پارتو مربوطه در شکل‌های 12 الی 14 نشان داده شده است (به منظور خلاصه‌سازی سه نما از شش نمای ممکن نشان داده شده است). در این قسمت، از میان 192 طرح مورد بررسی، 73 طرح در جبهه‌ی پارتو واقع شده‌اند که 15 طرح برتر از این 73 طرح به همراه جزئیات مربوط به آن‌ها در جدول 7 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این حالت هیچ‌یک از طرح‌های موجود در جبهه‌ی پارتو بر همدیگر غالب نیستند؛ اما به منظور انتخاب یک طرح بهینه، براساس روابط (40) و (41)، همان‌طور که در جدول 6 نشان داده شده است، طرح با اطلاعات $(1/\varphi) = 0.2$، L_1=45 mm و L_2=300mm معرفی می‌شود (در رابطه‌ی (41)، x برابر با 4 می‌باشد). همچنین مقادیر توابع هدف مربوط به این طرح در جدول 6 و کانتور دمای آن در شکل 15 نشان داده شده است.

با توجه به جدول 6 مشاهده می‌شود در طرح گزینش‌شده با در نظر گیری تمامی توابع هدف، میزان تابش به مقدار قابل توجهی از میزان تابش مربوط به حالت مرجع بیشتر است (138%) و همچنین اکسیدنیتروژن طرح بهینه به مقدار محسوسی از اکسیدنیتروژن مربوط به حالت مرجع کمتر است (64%). اما در مقابل افزایش آلودگی‌های دوده و مونواکسیدکربن نسبت به حالت مرجع مشاهده می‌شود.

همچنین جدول 6 نشان می‌دهد طرح بهینه با درنظرگیری تمامی توابع هدف در مقایسه با طرح بهینه از نقطه‌نظر تولیدات آلودگی از نظر میزان تابش از شعله و میزان تولیدات اکسیدنیتروژن بهتر، ولی از نظر نشر دوده و مونواکسیدکربن بدتر عمل می‌نماید.

جدول 5 اطلاعات مربوط به جبهه‌ی پارتو زمانی‌که توابع هدف آلودگی به صورت همزمان درنظر گرفته شوند

Table 5 Information of Pareto front when environmental objectives are considered simultaneously

ردیف	$\frac{1}{\varphi}$	L_1 (mm)	L_2 (mm)	تابش (W)	اکسیدنیتروژن (ppm)	دوده (ppm)	مونواکسیدکربن (ppm)
1	1.2	15	200	2925.95	12.2	0.023	0.145
2	0.8	15	300	2794.22	13.1	0.002	0.016
3	1.1	15	200	2952.17	12.7	0.024	0.144
4	1	15	200	3106.54	12.9	0.024	0.132
5	0.9	15	300	2558.93	13.8	0.002	0.018
6	1	15	300	2334.62	14.7	0.002	0.015
7	1.2	15	300	1980.27	16	0.002	0.016
8	0.2	45	200	5837.58	10.9	0.123	0.786
9	1.2	0	300	780.35	27.7	0.00002	0.0004
10	1.1	0	300	864.38	30	0.00002	0.0003
11	0.1	45	200	6153.44	8.81	0.255	1.74
12	0.2	15	100	5691.68	10.4	0.313	1.59
13	0.6	45	200	5194.36	17.3	0.057	0.301
14	0.7	30	200	4809.25	14	0.065	0.352
15	0.4	15	200	4793.27	15.5	0.036	0.218
16	0.3	30	200	5520.39	21.1	0.103	0.642

جدول 6 مقادیر متغیرهای طراحی حالات بهینه و مرجع و مقایسه‌ی توابع هدف آن‌ها

Table 6 Values of design variables for optimal and reference cases and comparison of them objective functions

حالت	$\frac{1}{\varphi}$	L_1 (mm)	L_2 (mm)	تابش (W)	اکسیدنیتروژن (ppm)	دوده (ppm)	مونواکسیدکربن (ppm)
طرح بهینه با توجه به توابع هدف آلودگی	1.2	15	200	2925.95	12.2	0.023	0.145
طرح بهینه با توجه به توابع هدف آلودگی و تابش	0.2	45	300	6479.31	6.72	0.515	3.23
طرح مرجع	1.1	0	0	2724.62	18.7	0.122	0.398

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

جدول 7 اطلاعات مربوط به جبهه‌ی پارتو زمانی‌که توابع هدف زیست‌محیطی و تابش به صورت همزمان درنظر گرفته می‌شوند

Table 7 Information of Pareto front when maximum radiation is desired besides environmental objectives

ردیف	$\frac{1}{\varphi}$	L_1 (mm)	L_2 (mm)	تابش (W)	اکسیدنیتروژن (ppm)	دوده (ppm)	مونواکسیدکربن (ppm)
1	0.2	45	300	6479.31	6.72	0.515	3.23
2	0.1	30	200	6485.04	6.31	0.988	6.11
3	0.1	45	200	6153.44	8.81	0.255	1.74
4	0.2	45	200	5837.58	10.9	0.123	0.786
5	0.2	15	100	5691.68	10.4	0.313	1.59
6	0.2	0	100	5273.56	15.2	0.195	0.751
7	0.5	30	200	5194.47	14.6	0.089	0.455
8	0.4	30	200	5332.08	16.4	0.074	0.438
9	0.5	45	100	5097.31	14.3	0.155	0.748
10	0.6	30	200	4996.61	14.1	0.068	0.345
11	0.5	45	200	5378.37	18	0.067	0.44
12	0.3	45	200	5653.96	19.8	0.102	0.646
13	0.4	45	200	5488.99	19.2	0.076	0.44
14	0.6	45	200	5194.36	17.3	0.057	0.301
15	0.7	30	200	4809.25	14	0.065	0.352

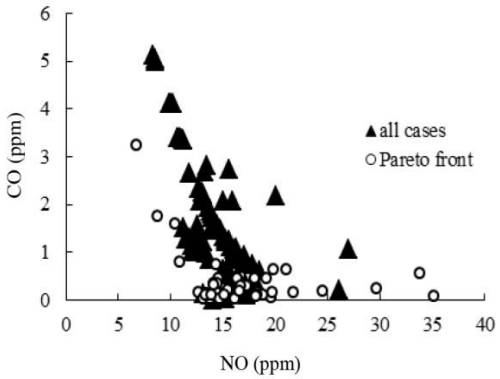

Fig. 12 Projection of Pareto front on CO-NO plane when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 12 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی CO-NO زمانی‌که توابع هدف زیست-محیطی و تابش به صورت همزمان درنظر گرفته می‌شوند

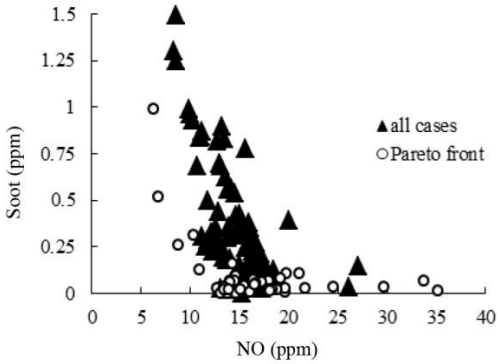

Fig. 13 Projection of Pareto front on Soot-NO plane when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 13 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی Soot-NO زمانی‌که توابع هدف زیست-محیطی و تابش به صورت همزمان درنظر گرفته می‌شوند

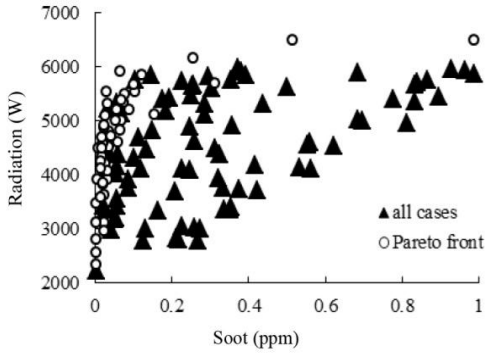

Fig. 14 Projection of Pareto front on Radiation-Soot plane when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 14 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی Radiation-Soot زمانی‌که توابع هدف زیست‌محیطی و تابش به صورت همزمان درنظر گرفته می‌شوند

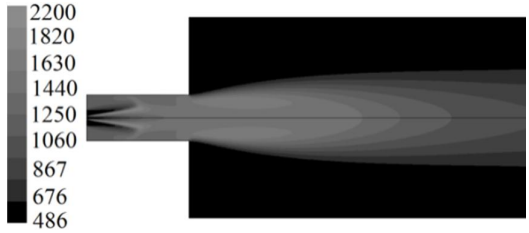

Fig. 15 Contours of temperature of best case (K) when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 15 کانتور دمای بهترین طرح بر حسب کلوین زمانی‌که توابع هدف زیست-محیطی و تابش به صورت همزمان درنظر گرفته می‌شوند

5- جمع‌بندی

مقاله‌ی حاضر با در نظرگیری چهار تابع هدف شامل میزان نشر آلودگی‌های اکسیدنیتروژن، دوده و مونواکسیدکربن، و همچنین میزان تابش از شعله‌ی گاز طبیعی، به تنظیم بهینه سیستم هوای مرحله ای یک مطالعه‌ی موردی با دو مرحله هوای ورودی و یک مرحله سوخت می‌پردازد. مدلسازی عددی به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

ازای نسبت‌های مختلف توزیع هوا بین دو مرحله، و همچنین به ازای فواصل طولی و عرضی مختلف دو ورودی هوا، مجموعا به تعداد 192 دفعه، انجام گرفته است. اهم مشاهدات عبارتند از:

- مرحله‌ای نمودن هوا به معنی تزریق ناکافی هوا در مرحله‌ی اول و جبران آن در مرحله‌ی بعد منجر به افزایش وسعت ناحیه‌ی واکنشی (بنابراین افزایش حجم شعله) و کاهش قله‌ی دمایی شعله شده است که به ترتیب افزایش تابش از شعله و کاهش نشر اکسیدنیتروژن را به دنبال دارد. در مقابل، نشر بیشتر آلودگی‌های دوده و مونواکسیدکربن از جمله نکات منفی مرحله‌ای نمودن هوا بوده است.

- علاوه بر نحوه‌ی توزیع هوا بین دو مرحله، فواصل طولی وعرضی ورودی‌های هوا نیز می‌تواند تاثیر محسوسی در مقادیر تولیدات آلودگی و میزان تابش از شعله داشته باشد.

- اگر تنها کمینه‌سازی تولیدات آلودگی مورد توجه باشد، طرح منتخب از میان طرح‌های مورد بررسی، طرحی است که در آن نرخ هوای اول نزدیک به مقدار تئوری موردنیاز باشد و البته فواصل طولی و عرضی مشخص بین ورودی‌های هوا وجود داشته باشد.

- چنانچه کمینه‌سازی تولیدات آلودگی و بیشینه‌سازی تابش از شعله به طور همزمان مورد توجه باشد، طرح منتخب طرحی است که در آن هوای اول در حدود 20 درصد هوای تئوری موردنیاز باشد و فواصل طولی و عرضی مشخصی بین ورودی‌های هوا وجود داشته باشد. در این شرایط، بهبود محسوسی در میزان تابش و تولیدات اکسیدنیتروژن، و در مقابل افزایش تولیدات دوده و مونواکسیدکربن حاصل شده است.

- لازم به ذکر است که در شرایطی که چند تابع هدف به طور همزمان مورد توجه باشد، هیچ‌یک از طرح‌های موجود در جبهه‌ی پارتو بر دیگری غالب نبوده، اگرچه در مطالعه‌ی حاضر یک طرح به عنوان طرح بهینه معرفی شده است. بنابراین طراح می‌تواند با توجه به اقتضائات موردنظر، هر یک از طرح-های جبهه‌ی پارتو را به عنوان طرح بهینه موردتوجه قرار دهد.

6- فهرست علائم

A	ثابتی در مدل اتلاف گردابه‌ای
a	ضریب جذب
B	ثابتی در مدل اتلاف گردابه‌ای
b_1	ثابت مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری
b_2	ثابت مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری
C	عبارت جابه‌جایی در مدل آشفتگی
$C_{\varepsilon 1}$	ثابتی در مدل آشفتگی
$C_{\varepsilon 2}$	ثابتی در مدل آشفتگی
C_P	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ($kJkg^{-1}K^{-1}$)
C_s	ثابتی در مدلسازی دوده ($kgN^{-1}m^{-1}s^{-1}$)
D	ضریب نفوذ
d	فاصله‌ی هر نقطه روی جبهه‌ی پارتو از نقطه‌ی آرمانی
ϵ	ترم اتلافی در مدل آشفتگی (m^2s^{-3})
E_a'	انرژی فعال‌سازی ($Jgmol^{-1}$)
F	نماد تابع هدف در بهینه‌سازی
h	آنتالپی ($kJkg^{-1}$)
I	شدت تابش (Wm^{-2})
K	ضریب هدایت ($WK^{-1}m^{-1}$)
k	انرژی جنبشی آشفتگی (m^2s^{-2})
L_1	فاصله‌ی عمودی میان هوای اول و دوم (mm)
L_2	فاصله‌ی افقی میان هوای اول و دوم (mm)
m	تعداد نقاط روی جبهه‌ی پارتو
M	نماد گونه‌ی شیمیایی
N	تعداد گونه‌های شیمیایی
n	ضریب شکست
P	تولید تنش در مدل آشفتگی
Pr	عدد بی‌بعد پرانتل
p	فشار (Pa)
R	نرخ خالص تولید یا مصرف ($kmolm^{-3}s^{-1}$)
r	بردار مکان
s	بردار جهت
s'	بردار جهت بازتاب شده
S	عبارت چشمه ($gm^{-3}s^{-1}$)
Sc_t	عدد اشمیت آشفته
T	دمای محلی (K)
u	سرعت جریان متوسط (ms^{-1})
Y	کسر جرمی

علائم یونانی

ε	نرخ اتلافات انرژی جنبشی (m^2s^{-3})
μ	گرانروی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ν'	ضریب استوکیومتریک در سمت واکنش‌دهنده
ν''	ضریب استوکیومتریک در سمت فرآورده
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ_s	ضریب پخش
σ_k	ثابت مدل آشفتگی
σ_ε	ثابت مدل آشفتگی
φ	نسبت هم‌ارزی
Ω'	زاویه‌ی فضایی

بالانویس‌ها

n	حالت بی‌بعدشده

زیرنویس‌ها

comb	احتراقی
f	واکنش رفت
fuel	سوخت
k	گونه‌ی شیمیایی
NO	اکسیدنیتروژن
ox	اکسیدکننده
P	فرآورده
R	واکنش‌دهنده
radiation	تابشی
reaction	واکنشی
r	واکنش برگشت
soot	دوده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]

7- مراجع

[1] F. El-Mahallawy, S. El-Din Habic, *Fundamentals and Technology of Combustion*, pp. 1-72, Oxford: Elsevier, 2002.

[2] J. M. C. Sixto, C. B. Parnell, W. A. LePori, Reducing nitrogen oxide emissions by staged combustion of low calorific value gas derived from agricultural waste, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 10, No. 74, pp. 111-120, 1999.

[3] R. Berger, B. Staiger, S. Unterberger, K. R. G. Hein, development of an air staging technology to reduce NO_x emissions in grate fired boilers, *Energy*, Vol. 10, No. 30, pp. 1429–1438, 2005.

[4] M. Ilbas, I. Yilmaz, Y. Kaplan, Investigations of hydrogen and hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x emission characteristics in a model combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 9, No. 30, pp. 1139–1147, 2005.

[5] J. Ballester, A. Sanz, M. A. Gonza´lez, Investigation of the characteristics and stability of air-staged flames, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 15, No. 32, pp. 776–790, 2008.

[6] H. Tan, S. Li, T. Xu, S. Hui, Q. Zhou, Optimization of air staging in a 1 MW tangentially fired pulverized coal furnace, *Fuel Processing Technology*, Vol. 8, No. 90, pp. 99–106, 2009.

[7] Z. Lin, W. Fan, J. Kuang, Y. Li, Impact of air staging along furnace height on NO_x emissions from pulverized coal combustion, *Fuel Processing Technology*, Vol. 10, No. 91, pp. 625–634, 2010.

[8] M. Banica, H. Lingyuna, B. Weigand, Effects of staged injection on supersonic mixing and combustion, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 6, No. 24, pp. 584-589, 2011.

[9] J. Li, H. Liu, J. Chaney, C. Sun, Control of NO_x emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging, *Fuel*, Vol. 7, No. 103, pp. 792–798, 2013.

[10] X. Zhang, M. Kuang, Q. Zhu, Z. Li, Numerical investigation on combustion and NO_x emissions of a down-fired 350MWe utility boiler with multiple injection and multiple staging: Effect of the air stoichiometric ratio in the primary combustion zone, *Fuel Processing Technology*, Vol. 11, No. 109, pp. 32-42, 2013.

[11] Y. Feng, K. Jin, X. Zhang, M. Wang, J. Yang, X. Ma, Simulation of transport phenomena in coke oven with staging Combustion, *Thermal Engineering*, Vol. 9, No. 58, pp. 354-362, 2013.

[12] Z. Li, M. Kuang, C. Liu, Q. Zhu, Experimental study on combustion and NO_x emissions for a down-fired supercritical boiler with multiple-injection multiple-staging technology without overfire air, *Energy*, Vol. 8, No. 106, pp. 254–261, 2013.

[13] L. I. Díez, C. Lupiáñez, L. M. Romeo, Influence of gas-staging on pollutant emissions from fluidized bed oxy-firing, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 10, No. 256, pp. 380–389, 2014.

[14] H. Lamberg, K. Nuutinen, J. Jokiniemi, O. Sippula, J. Sutinen, P. Horttanainen, J. Tissari, Effect of air staging on fine particle, dust and gaseous emissions from masonry heaters, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 12, No. 67, pp. 167-178, 2014.

[15] M. E. Nimvari, M. Maerefat, M. K. El-Hoassaini, N. F. Jouybari, Numerical simulation of combustion inside a cylindrical porous burner including turbulence effects, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 12, pp. 36–47, 2013. (in Persian فارسی)

[16] S. H. Poorhoseini, M. Moghiman, Experimental study on the effect of coal injection on structure, radiation, temperature and thermal efficiency of natural gas diffusion flames, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 163–168, 2013. (in Persian فارسی)

[17] M. Zaki, M. R. Zargarabadi, Numerical analysis of effects of primary aeration on NO_x production in a model gas turbine combustion chamber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 8, No. 10, pp. 101–108, 2014. (in Persian فارسی)

[18] S. H. Poorhoseini, M. Moghiman, An experimental study on the effect of synchronous combustion of gas-gasoil on luminosity and radiative heat transfer of natural gas flame, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 15, pp. 11–16, 2014. (in Persian فارسی)

[19] M. Shafa, K. Mazaheri, A. Alipoor, Investigation of geometry effect on reduction of nitrogen oxide by Selective Non Catalytic Reduction (SNCR) method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 92–100, 2014. (in Persian فارسی)

[20] C. K. LAW, *Combustion Physics*, pp. 123-125, New York: Cambridge university press, 2006.

[21] *Fluent6-user guide*, Accessed on 2 September 2014 ;http:// www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/pdf/ug/flug.pdf.

[22] H. C. Hottel, A. F. Sarofim, *Radiative Transfer*, pp. 150-168, New York: McGraw-Hill Education – Europe, 1967.

[23] A. Coppalle, P. Vervisch, The total emissivities of high-temperature flames, *Combustion and Flame*, Vol. 8, No. 49, pp. 101-108, 1973.

[24] T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman, Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 7, No. 104, pp. 602-608, 1982.

[25] H. H. Liakos, M. A. Founti, N. C. Markatos, Modeling of stretched natural gas diffusion flames, *Mathematical Modeling*, Vol. 17, No. 24, pp. 419-435, 2000.

[26] J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble, *Combustion*, 4th Edition, pp. 259-265, Berlin: Springer, 2006.

[27] N. H. Afgan, J. M. Beer, *Heat Transfer in Flame*, pp. 358-370, Washington DC: Scripta, 1974.

[28] B. E. Launder, D. B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 269-289, 1974.

[29] F. Hajabdollahi, Z. Hajabdollahi, H. Hajabdollahi, Soft computing based multi-objective optimization of steam cycle power plant using NSGA-II and ANN, *Soft Computing*, Vol. 12, No. 11, pp. 3648-3659, 2012.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.38.3]