



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

مینا رسولی¹، جواد محمودی‌مهر^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، 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

بهبودسازی 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 (یا فرض ثابت ماندن نرخ جرمی کل هوای ورودی)، و فاصله‌ی میان ورودی‌های هوا به عنوان متغیرهای طراحی مساله در نظر گرفته شده‌اند. در تحقیقات پیشین، تکنولوژی مرحله‌ای نمودن هوا اساساً در جهت کاهش گسیل اکسیدنیترژن به کار گرفته شده است. اما در مطالعه‌ی حاضر، علاوه بر گسیل اکسیدنیترژن، 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 نمودن (یا افزایش نسبت هم‌ارزی هوای اول) اثرات متضادی بر توابع هدف دارد. بطوریکه، به عنوان اثرات مثبت، موجب افزایش انتقال گرمای تابشی از شعله و کاهش گسیل اکسید نیترژن، و به عنوان اثرات منفی، موجب افزایش گسیل مونواکسیدکربن و دوده می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد زمانی که 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.

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 نیترژن شود که وابستگی بسیار زیادی به دمای احتراق دارند [1].

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

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آزمایشگاهی، اثر مرحله‌ای کردن تزریق هوا را در احتراق نوعی زغال‌سنگ، روی انتشار اکسیدنیترژن، مونواکسیدکربن و اکسید گوگرد بررسی کردند؛ در این تحقیق مشاهده شد که تزریق مرحله‌ای هوا میزان اکسیدنیترژن 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 نیمیوری 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 اکسیدنیترژن از آن پرداختند و مشاهده نمودند که در نظرگیری 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 هم‌آرزی و میزان هوادهی بر میزان تولید اکسیدنیترژن 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 اکسیدنیترژن به روش انتخابی غیرکاتالیستی² 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 اکسیدنیترژن است. مقاله‌ی حاضر علاوه بر آلودگی اکسیدنیترژن، به بررسی تاثیر مرحله‌ای نمودن هوا بر سایر آلودگی‌ها (مونواکسیدکربن و دوده³) و همچنین بر میزان انتقال حرارت تابشی از شعله‌ی گاز طبیعی می‌پردازد. با توجه به اطلاعات نویسنندگان، 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 در نظرگیری همزمان تمامی توابع هدف و به کمک مفهوم جبهه‌ی

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 اکسیدنیترژن حاصل از احتراق زیاله‌های 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 تولید اکسیدنیترژن 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 نیترژن و مونواکسیدکربن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که زمانی که سوخت مورد استفاده هیدروژن خالص است، علاوه بر عدم تولید مونواکسیدکربن، تولید اکسیدنیترژن تنها از مکانیزم حرارتی صورت می‌پذیرد. 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 نیترژن آن مشاهده شد. در سال 2009، تان و همکارانش [6] به صورت تجربی به بررسی تاثیر مرحله‌ای کردن هوا بر میزان تولید اکسید نیترژن و کربن نسوخته در یک کوره با سوخت زغال‌سنگ پرداختند. نتایج نشان داد که اگرچه مرحله‌ای کردن هوا به طور موثر کاهش نشر اکسیدنیترژن 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 اکسیدنیترژن 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 اکسیدنیترژن است. همچنین مشاهده شد نسبت استوکیومتریک تا حد زیادی بر میزان اکسیدنیترژن 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 اکسیدنیترژن 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 توازن مناسبی میان میزان تولید مونواکسیدکربن و اکسیدنیترژن 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 اکسیدنیترژن در یک کوره بررسی شد. مشاهده شد که با کاهش نرخ هوا در مرحله‌ی نخست، هم دمای گاز در خروجی کوره و هم تولید اکسیدنیترژن به شکل چشم‌گیری کاهش می‌یابد و معمولا افزایش کربن موجود در خاکستر¹ 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 اکسیدنیترژن حاصل از احتراق سوخت زغال‌سنگ را نشان دادند. در سال 2014 دیز و همکارانش [13] در یک مطالعه‌ی

² Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)³ Soot¹ Fly ash

$$P = \frac{1}{2} P_{kk} \quad (13)$$

$$C = \frac{1}{2} C_{kk} \quad (14)$$

لازم به ذکر است در ورودی با فرض ایزوتروپ بودن آشفتگی، شرایط $\overline{u_i' u_j'} = 0$ و $\overline{u_i'^2} = (2/3)k$ دیواره، شرایط $\overline{(u_i'^2)/k} = 0.247$ ، $\overline{(u_i'^2)/k} = 1.098$ ، $\overline{(u_i' u_j')/k} = 0.255$ و 0.655 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].

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

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

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:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_k h_k \left(\rho D_k + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (17)$$

در رابطه‌ی (17)، k ضریب هدایت، c_p ظرفیت گرمایی در فشار ثابت، Pr_t عدد پراوتل آشفته، T دما، Y_k کسر جرمی گونه‌ی k ام، D_k ضریب نفوذ گونه‌ی k ام، 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 ($S_{h, reaction}$) و تابش ($S_{h, radiation}$) است. $S_{h, reaction}$ به توجه به رابطه‌ی (20) تعریف می‌شود.

$$h = \sum_k h_k Y_k \quad (18)$$

$$h_k = \int_{T_{ref}}^T c_{p,k} dT \quad (19)$$

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

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

$$R_k = M_{w,k} \sum_r R_{k,r} \quad (21)$$

در رابطه‌ی (21)، $R_{k,r}$ نرخ تولید یا نابودی گونه‌ی k ام در واکنش r ام 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 k ام، v_k' ضریب استوکیومتریکی گونه‌ی k ام در سمت واکنش‌دهنده و v_k'' ضریب استوکیومتریکی گونه‌ی k ام در سمت فرآورده است. در کار حاضر، متوسط نرخ واکنش در جریان آشفته بر اساس مدل اتلاف گردابه‌ای¹⁰ محاسبه می‌شود. در

پارتو¹ 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 دومرحله-ای در نظر گرفته می‌شود [20].



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

معادله‌ی پیوستگی:

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

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

معادله‌ی بقای مومنوم:

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

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

در کار حاضر، به منظور مدل‌سازی آشفتگی از مدل تنش رینولدز² استفاده می‌شود. این مدل در رابطه‌ی (5) نشان داده شده است [21].

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

در رابطه (5)، عبارات C_{ij} ، $D_{T,ij}$ ، $D_{L,ij}$ ، P_{ij} ، φ_{ij} و ϵ_{ij} به ترتیب بخش جابه-جایی³، نفوذ آشفتگی⁴، نفوذ مولکولی⁵، عبارت تولید تنش⁶، کرنش فشاری⁷ و بخش اتلافی⁸ می‌باشند. جملات رابطه‌ی (5) به صورت روابط (6) الی (11) تعریف می‌شوند.

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

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

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

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

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

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \quad (11)$$

در رابطه‌ی (9)، μ_t گرانیوی آشفته⁹ 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.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

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

است که در این رابطه، A کل سطوح سلول را شامل می‌شود.

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

مدلسازی نشر اکسیدنیترژن:

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

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

در رابطه‌ی (31)، S_{NO} عبارت چشمه می‌باشد که با توجه به مکانیزم تولید اکسیدنیترژن تعریف می‌شود. به طور عمده، تولید اکسیدنیترژن از دو مکانیزم حرارتی³ (زدوویچ) و سریع⁴ صورت می‌پذیرد [26,20]. نرخ تولید اکسیدنیترژن از مکانیزم زدوویچ در دماهای بالا اهمیت می‌یابد و از رابطه‌ی (32) قابل محاسبه می‌باشد [21].

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

در رابطه‌ی (32) ثوابت واکنش $k_{r,1}$ ، $k_{r,2}$ ، $k_{r,3}$ ، $k_{f,1}$ ، $k_{f,2}$ ، $k_{f,3}$ و رابطه‌ی مربوط به غلظت اکسیژن تک‌اتمی، در مرجع [21] ارائه شده است. تولید اکسیدنیترژن از مکانیزم سریع در شرایط غنی اهمیت می‌یابد و این مکانیزم توسط فنی‌مور ارائه شده است [26]. در مکانیزم سریع، نرخ تولید اکسیدنیترژن از رابطه‌ی (33) قابل محاسبه است [21].

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

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 می‌پذیرد [27].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{Soot}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_{Soot}) = \nabla \cdot \left(\frac{H_t}{Pr_{t,soot}} \nabla Y_{Soot} \right) + R_{Soot} \quad (34)$$

در رابطه‌ی (34)، Y_{Soot} کسر جرمی دوده، $Pr_{t,soot}$ 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 ($R_{Soot,form}$) و نرخ احتراق آن ($R_{Soot,comb}$) طبق رابطه‌ی (35) به دست می‌آید.

$$R_{Soot} = R_{Soot,form} - R_{Soot,comb} \quad (35)$$

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

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

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.

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

$$\sum_{k=1}^N v'_{k,r} M_k \rightarrow \sum_{k=1}^N v''_{k,r} M_k \quad (22)$$

$$R_{k,r} = v'_{k,r} M_{w,k} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{v_{R,r} M_{w,R}}\right) \quad (23)$$

$$R_{k,r} = v'_{k,r} M_{w,k} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \quad (24)$$

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.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\rho D_k + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + R_k \quad (25)$$

مدلسازی تشعشع:

در کار حاضر، برای مدلسازی تشعشع از روش جهت گسسته¹ استفاده می‌شود که در رابطه‌ی (26) نشان داده شده است. این روش برای چندین جهت گسسته، بسته به دقت موردنظر حل می‌شود [21].

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

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 خاکستری² [22] محاسبه می‌گردد. این مدل، طبق آنچه در رابطه‌ی (27) نشان داده شده است، ضرایب جذب محلی را به صورت تابعی از غلظت دی‌اکسیدکربن 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].

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

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

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.

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

ترم چشمه‌ی تابشی معادله‌ی انرژی برای هر سلول به صورت رابطه‌ی (30)

³ Thermal

⁴ Prompt

¹ Discrete Ordinates (DO)

² WSGGM

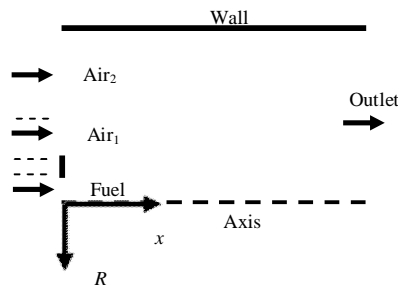


Fig. 1 Schematic view of combustion chamber

شکل 1 نمای شماتیک محفظه‌ی احتراق

جدول 1 اطلاعات هندسی مطالعه‌ی موردی [25]

Table 1 Geometrical data of case study [25]

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

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 آشفته‌گی (m ² s ⁻²)	2.2	0.28	0.004
نرخ اتلافات انرژی جنبشی (m ² s ⁻³)	500	35.5	0.0002
دما (K)	295	295	295
کسر جرمی اکسیژن	0	0.2315	0.2315
کسر جرمی نیتروژن	0.2152	0.7685	0.7685
کسر جرمی متان	0.7638	0	0
کسر جرمی دی‌اکسیدکربن	0.021	0	0

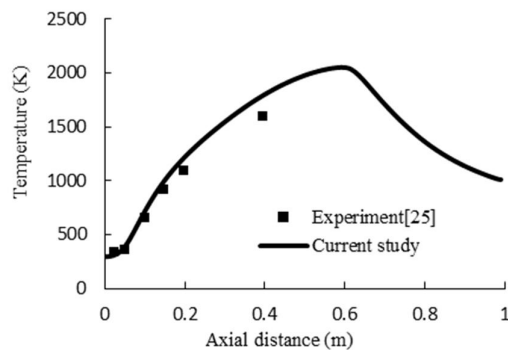


Fig.2 Comparison of present modeling and experiment: temperature on centerline

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.

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

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

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

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

لازم به ذکر است از توابع دیواره استاندارد¹ [28] برای مدل‌سازی سرعت، دما، کسر جرمی هر یک از گونه‌ها و نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفته‌گی 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 کلوبن و دیوار میان ورودی سوخت و هوای اول، عایق در نظر 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 سیمپل² و برای گسسته‌سازی معادلات از روش بالادست جریان مرتبه‌ی اول³ 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 $x=150\text{mm}$ 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

بنابراین در ادامه منظور از φ همان نسبت هم‌آزای 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 (شکل 1) و تنها از طریق تغییر $(1/\varphi)$ (از 0.1 تا 1.2 با گام 0.1) به بررسی تأثیر نحوه 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 اکسیدنیترژن، دوده و مونواکسیدکربن) به صورت جداگانه مورد توجه قرار می‌گیرد و به ازای هر تابع هدف، بهترین نحوه 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 شکل 6) و نحوه توزیع هوا (با معیار φ) به طور همزمان تغییر داده می‌شود و تأثیر این تغییر همزمان بر هر یک از توابع هدف، به صورت جداگانه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که مقادیر در نظر گرفته 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 $12 \times 4 \times 4 = 192$ 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 اکسیدنیترژن، 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- تأثیر مرحله‌ای کردن هوا بر هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه

جدول 3 با در نظرگیری هر تابع هدف به صورت جداگانه به معرفی بهترین و بدترین طرح پرداخته است. این جدول بر اساس حالاتی است که هندسه‌ی محافظه ثابت و مشابه با حالت مرجع است و تنها نسبت هم‌آزای هوای اول و یا به عبارتی دیگر نحوه 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 هر یک 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، زمانی که 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 $x=400\text{mm}$ در شکل 8 نشان داده شده است. با

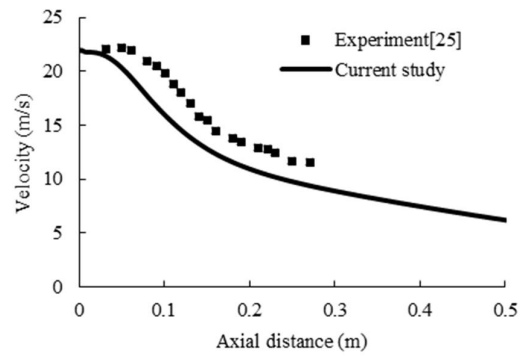


Fig. 3 Comparison of present modeling and experiment: velocity on centerline

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

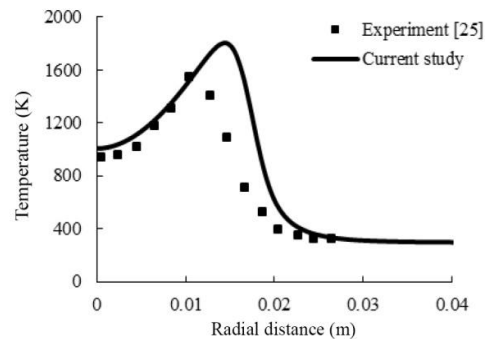


Fig. 4 Comparison of present modeling and experiment: temperature on transversal line of $x=150\text{mm}$

شکل 4 مقایسه‌ی مدل‌سازی حاضر و نتایج تجربی: دما روی خط عرضی $x=150\text{mm}$

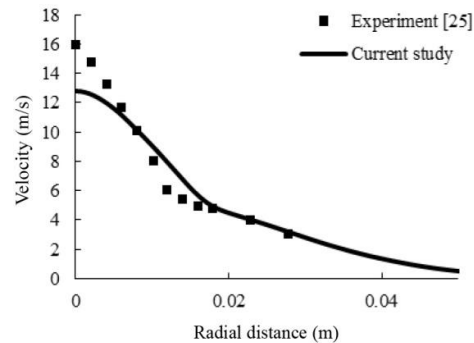


Fig. 5 Comparison of present modeling and experiment: velocity on transversal line of $x=150\text{mm}$

شکل 5 مقایسه‌ی مدل‌سازی حاضر و نتایج تجربی: سرعت روی خط عرضی $x=150\text{mm}$

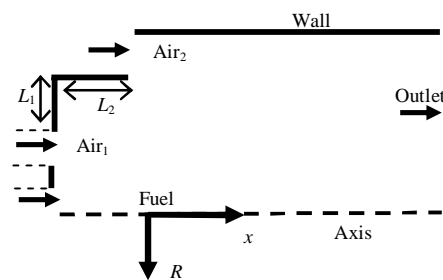


Fig. 6 Schematic view of geometrical variables

شکل 6 نمایش شماتیک از متغیرهای هندسی

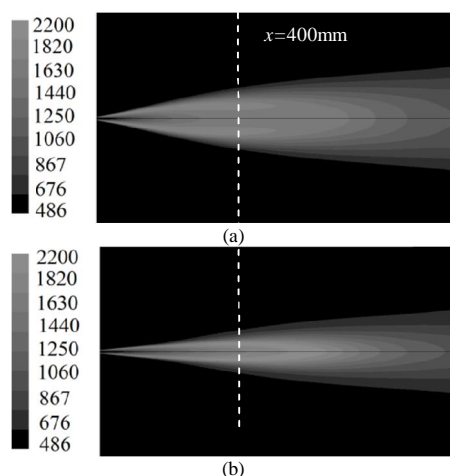


Fig. 7 Contours of temperature (K), a) maximum Radiation ($\frac{1}{\phi} = 0.1$), b) minimum Radiation ($\frac{1}{\phi} = 1.2$)
 شکل 7 کانتور دما بر حسب کلوین؛ (a) بیشترین میزان تابش ($\frac{1}{\phi} = 0.1$)، (b) کمترین میزان تابش ($\frac{1}{\phi} = 1.2$)

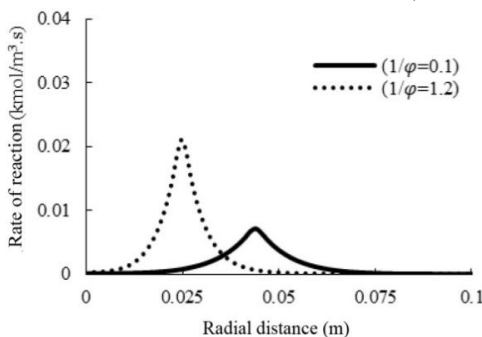


Fig. 8 Comparison of rate of reaction on transversal line of $x=400\text{mm}$ for the cases with maximum and minimum radiation
 شکل 8 مقایسه‌ی نرخ واکنش روی خط عرضی $x=400\text{mm}$ میان حالات با حداکثر و حداقل تابش

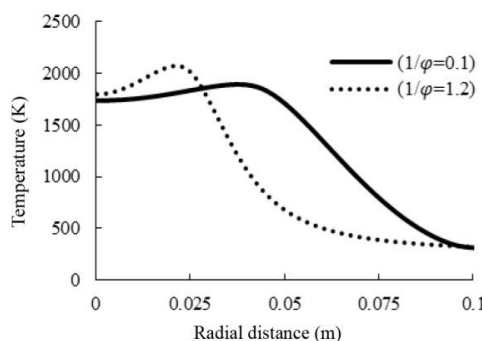


Fig. 9 Comparison of temperature on transversal line of $x=400\text{mm}$ for the cases with maximum and minimum radiation
 شکل 9 مقایسه‌ی دما روی خط عرضی $x=400\text{mm}$ میان حالات با حداکثر و حداقل تابش

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].

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	$\frac{1}{\phi}$
حداکثر میزان 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 اکسیدنیترژن در خروجی (ppm)	23.4	1.2
حداقل میزان کل اکسیدنیترژن در خروجی (ppm)	9.78	0.1
حداکثر میزان کل دوده در خروجی (ppm)	1.64	0.1
حداقل میزان کل دوده در خروجی (ppm)	0.111	1.2
حداکثر میزان کل مونواکسیدکربن در خروجی (ppm)	8.44	0.1
حداقل میزان کل مونواکسیدکربن در خروجی (ppm)	0.398	1.1

توجه به شکل 8، هنگامی که 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 $x=400\text{mm}$ در شکل 9، آزاد شدن انرژی واکنش در محدوده‌ی های وسیع‌تر برای حالت $(1/\phi) = 0.1$ ، موجب کاهش قله‌ی دما می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر دما در شعله با تابندگی حداکثر تقریباً برابر با 1986 کلوین و در شعله با تابندگی حداقل تقریباً برابر با 2096 کلوین می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه انرژی آزاد شده از فرآیند احتراق ثابت است، دمای کپه‌های 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 حالتی 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 اکسیدنیترژن در خروجی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان هوای مرحله‌ی اول تقریباً برابر میزان تئوری و کمی بیشتر از آن باشد $(1/\phi) = 1.2$)) و کمترین میزان آن زمانی اتفاق می‌افتد که میزان هوای مرحله‌ی اول بسیار کمتر از مقدار تئوری باشد $(1/\phi) = 0.1$))؛ همان‌طور که جدول 3 نشان می‌دهد طرح با حداکثر میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره و طرح با حداقل میزان کل تولید اکسیدنیترژن در خروجی، و همچنین طرح با حداقل میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره و طرح با حداکثر میزان کل تولید اکسیدنیترژن در خروجی معادل یکدیگر هستند؛ به عبارتی قسمت‌های (a) و (b) شکل 7 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی کانتورهای دمای مربوط به حداقل و حداکثر تولید اکسیدنیترژن 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 اکسیدنیترژن نیز وابستگی شدیدی به دما دارد [26,20].

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

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. ضمناً برای آن که مقادیر توابع هدف مختلف با هم قابل قیاس باشند، از روش بی‌بعدسازی توابع هدف [29] طبق رابطه‌ی (40) استفاده می‌شود.

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

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

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

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 بخش 3) مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود طرح گزینش شده از نظر تمامی توابع هدف از طرح مرجع بهتر است؛ به طوری که میزان تابش طرح بهینه از تابش حالت مرجع 7 درصد بیشتر و میزان تولید آلودگی‌های آن شامل اکسیدنیترژن، 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.

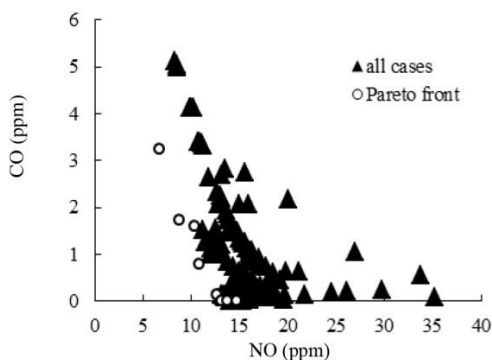


Fig. 10 Projection of Pareto front on CO-NO plane when environmental objectives are considered simultaneously

شکل 10 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی CO-NO زمانی که توابع هدف آلودگی به صورت همزمان در نظر گرفته شوند

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 اکسیدنیترژن در خروجی، در شرایطی 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 $(1/\varphi) = 1.1$ و $(1/\varphi) = 1.2$ 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 زمانی که 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 اکسیدنیترژن، 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 (در نظرگیری

سه تابع هدف آلودگی به طور همزمان)

گزینش طرح مناسب در این بخش با در نظرگیری همزمان سه تابع هدف میزان نشر اکسیدنیترژن، 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 در نظرگیری همزمان سه تابع هدف ذکر شده، 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)
حداکثر میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره (W)	7644.28	0.1	30	300
حداقل میزان کل اکسیدنیترژن در خروجی (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

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 $L_2=300$ mm 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 اکسیدنیترژن طرح بهینه به مقدار محسوسی از اکسیدنیترژن 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 در نظرگیری تمامی توابع هدف در مقایسه با طرح بهینه از نقطه‌نظر تولیدات آلودگی از نظر میزان تابش از شعله و میزان تولیدات اکسیدنیترژن بهتر، ولی از نظر نشر دوده و مونواکسیدکربن بدتر عمل می‌نماید.

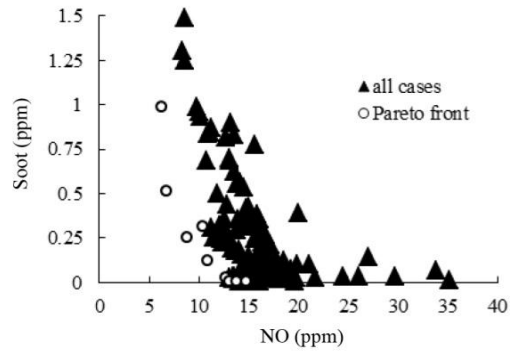


Fig. 11 Projection of Pareto front on Soot-NO plane when environmental objectives are considered simultaneously

شکل 11 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی Soot-NO زمانی که توابع هدف آلودگی به صورت همزمان در نظر گرفته شوند

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

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

جدول 5 اطلاعات مربوط به جبهه‌ی پارتو زمانی که توابع هدف آلودگی به صورت همزمان در نظر 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)	اکسیدنیترژن (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)	اکسیدنیترژن (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

جدول 7 اطلاعات مربوط به جبهه‌ی پارتو زمانی که توابع هدف زیست‌محیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند

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

ردیف	$\frac{1}{\phi}$	L_1 (mm)	L_2 (mm)	تابش (W)	اکسیدنیترژن (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

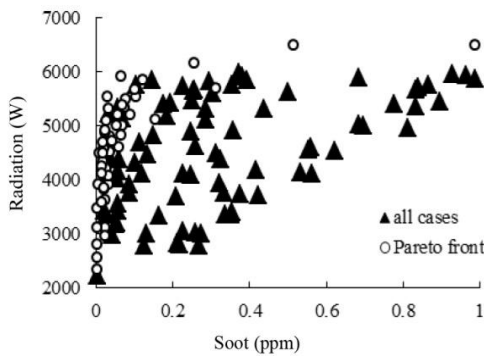


Fig. 14 Projection of Pareto front on Radiation-Soot plane when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 14 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی Radiation-Soot زمانی که توابع هدف زیست‌محیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند

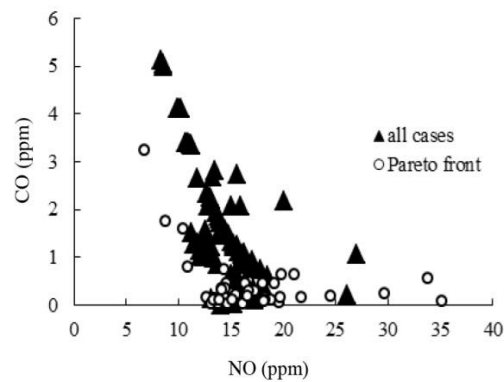


Fig. 12 Projection of Pareto front on CO-NO plane when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 12 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی CO-NO زمانی که توابع هدف زیست-محیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند

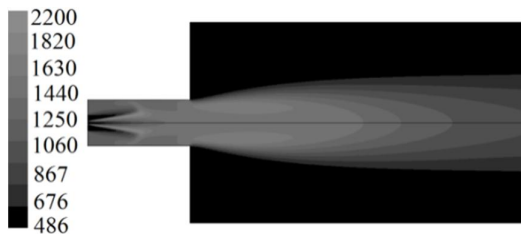


Fig. 15 Contours of temperature of best case (K) when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 15 کانتور دمای بهترین طرح بر حسب کلویین زمانی که توابع هدف زیست-محیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند

5- جمع‌بندی

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

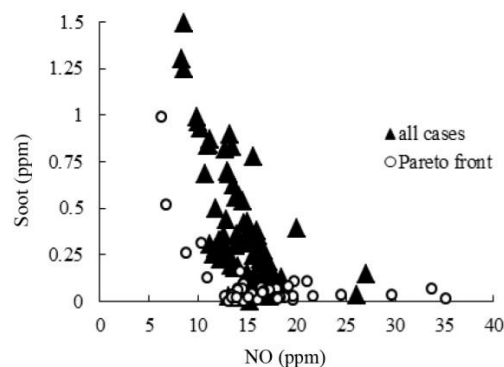


Fig. 13 Projection of Pareto front on Soot-NO plane when maximum radiation is desired besides environmental objectives

شکل 13 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی Soot-NO زمانی که توابع هدف زیست-محیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند

k	انرژی جنبشی آشفته‌گی (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 آشفته‌گی
Pr	عدد پی‌بعد پراتل
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 ($kgm^{-1}s^{-1}$)
v'	ضریب استوکیومتریکی در سمت واکنش‌دهنده
v''	ضریب استوکیومتریکی در سمت فرآورده
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ_s	ضریب پخش
σ_k	ثابت مدل آشفته‌گی
σ_ε	ثابت مدل آشفته‌گی
φ	نسبت هم‌ارزی
Ω'	زاویه‌ی فضایی

بالانویس‌ها

n	حالت پی‌بعدشده
-----	----------------

زیرنویس‌ها

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

ازای نسبت‌های مختلف توزیع هوا بین دو مرحله، و همچنین به ازای فواصل طولی و عرضی مختلف دو ورودی هوا، مجموعاً 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 اکسیدنیترژن 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 و عرضی ورودی‌های هوا نیز می‌تواند تاثیر محسوس 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 محسوس در میزان تابش و تولیدات اکسیدنیترژن، 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 طرح‌های 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 آشفته‌گی
$C_{\varepsilon 1}$	ثابتی در مدل آشفته‌گی
$C_{\varepsilon 2}$	ثابتی در مدل آشفته‌گی
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 آشفته‌گی (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 ($WK^{-1}m^{-1}$)

7- مراجع

- [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.
- [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. Gonzalez, 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.