

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 آلودگی‌های نظیر مونواکسیدکربن و اکسید گوگرد را به همراه دارد. کار تجزیی دیگری در سال 2014 توسط لامبرگ و همکارانش [14] انجام شد که در آن، اثر مرحله‌ای کردن هوا در گرمکن‌های مورد استفاده در صراف 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 الودگی مونواکسیدکربن و اکسیدنیتروژن از آن پرداختند و مشاهده نمودند که در نظرگیری اغتشاش سبب تطابق بهتر نتایج عددی با مشاهدات تجزیی می‌گردد. در همان سال، پورحسینی و مقیمان [16] در یک مطالعه‌ای 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 زرگ‌آبادی [17] در سال 2014 حاکی از تاثیر قابل توجه نسبت هم‌ارزی و میزان هماده‌ی بر میزان تولید اکسیدنیتروژن در محفظه احتراق توربین گاز است. پورحسینی و مقیمان [18] در سال 2014 در فعالیت تجزیی دیگری از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون گاز طبیعی توائستند به مقادیر بالاتر انتقال حرارت تابشی و در نتیجه راندمان حرارتی بالاتر مشعل‌های گازوسوز 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 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.

مروز 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 شعله گاز طبیعی می‌پردازد. با توجه به اطلاعات نویسنده‌گان، بررسی تاثیر مرحله‌ای کردن احتراق به طور همزمان روی پارامترهای مختلف در فعالیت‌های پیشین صورت نپذیرفته است. در جهت تحقیق اهداف حاضر، یک مطالعه‌ی موردي شامل دو مرحله تزریق هوا و یک مرحله تزریق سوخت (گاز طبیعی) به محفظه احتراق مورد توجه قرار گرفته و مدلسازی به ارزی حلالات مختلف توزیع هوا بین مراحل اول و دوم و فواصل مختلف طولی و عرضی وروودی‌های هوای اول و دوم (در مجموع 192 حالت) انجام می‌پذیرد. در بخش ارائه و تحلیل نتایج، علاوه بر بررسی جدگانه تاثیر مرحله‌ای نمودن هوا روی هر یک از توابع هدف ذکر شده، با درنظرگیری همزمان تمامی توابع هدف و به کمک مفهوم جبهه‌ی

از نخستین مطالعات این زمینه می‌توان به مطالعه‌ی تجزیی 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 تجزیی، در بیوپلهایی با سوخت چوب، از مرحله‌ای کردن هوا به کاهش قابل توجهی در میزان تولید اکسیدنیتروژن دست یافتند؛ اما از طرفی آن‌ها در یافتن مرحله‌ای کردن هوا موجب درجه حرارت در کوره و بنابراین افزایش تولید گازهای نظیر مونواکسیدکربن می‌شود. ایلپاس و همکارانش [4] در همان سال، به بررسی تاثیر ترکیب سوخت (نسبت‌های 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 می‌پذیرد. پس از آن در سال 2007 در یک مطالعه‌ی تجزیی توسط بالاستر و همکارانش [5]، تاثیر قابل توجه گاز طبیعی و انتشار اکسیدهای نیتروژن آن مشاهده شد. در سال 2009، تان و همکارانش [6] به صورت تجزیی 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 در 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 مافق موقوف صوت را در یک محفظه احتراق به صورت سه‌بعدی 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 کامل تری استفاده شده است. در سال 2012، لی و همکارانش [9] در یک بررسی تجزیی، 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 توانی 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 مرحله 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 معمولاً افزایش کردن 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 اکسیدنیتروژن 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 Soot

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

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

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

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

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

σ_ϵ و $C_{\epsilon 2}$ ثوابت معادلات می‌باشند. همچنین در رابطه (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:

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

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

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

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

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

در رابطه (19)، T_{ref} برابر با 298.15 کلوین می‌باشد. در رابطه (20) آنتالپی تشکیل گونه‌ی k ، R_k نرخ تولید یا نابودی گونه‌ی k و وزن مولکولی گونه‌ی k می‌باشد. R_k با توجه به رابطه (21) تعریف می‌شود [21]

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

در رابطه (21)، $R_{k,r}$ نرخ تولید یا نابودی گونه‌ی k در واکنش r می‌باشد. برای یک سیستم شیمیایی مشکل از N گونه می‌توان واکنش را به صورت رابطه (22) نشان داد. در رابطه (22)، $M_{k,r}$ نشان‌دهنده‌ی گونه‌ی k ، v_k ضریب استوکیومتریک گونه‌ی k در سمت واکنش‌دهنده و $v_{k,r}$ ضریب استوکیومتریک گونه‌ی k در سمت فرآورده است. در کار حاضر، متوسط نرخ واکنش در جریان آشفته بر اساس مدل انتلاف گرداب‌ای¹⁰ محاسبه می‌شود. در

¹⁰ Eddy dissipation

پارتو¹ طرح‌های بهینه از میان تمامی طرح‌های مورد بررسی گزینش و معرفی می‌گردد.

2- معادلات حاکم و مدل‌سازی

در کار حاضر واکنش احتراق متان طبق روابط (1) و (2) به صورت دومرحله‌ای 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 ممنوع:

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

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

در کار حاضر، به منظور مدل‌سازی آشفتگی از مدل تنش رینولدز² استفاده می‌شود. این مدل در رابطه (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 $D_{T,ij}$ ، $D_{L,ij}$ ، P_{ij} و φ_{ij} به ترتیب بخش جایه‌جایی³، نفوذ آشفتگی⁴، نفوذ مولکولی⁵، عبارت تولید تنش⁶، کرنش فشاری⁷ و بخش انتلافی⁸ می‌باشند. جملات رابطه (5) به صورت روابط (6) الی (11) تعریف می‌شوند.

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

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

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

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

$$\varphi_{ij} = -C_1 \rho \frac{\epsilon}{k} \left[\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \quad (10)$$

$$-\frac{2}{3} \rho \epsilon \delta_{ij} \quad (11)$$

در رابطه (9)، μ گرانروی آشفته است که از رابطه (12) به دست می‌آید.

همچنین عبارات P و C در رابطه (10) به ترتیب از روابط (13) و (14) به دست می‌آیند. لازم به ذکر است σ_k ، C_1 و C_2 ثوابت معادلات می‌باشند.

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

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

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

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

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.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} = 0 \quad (31)$$

در رابطه‌ی (31)، S_{NO} عبارت چشمی می‌باشد که با توجه به مکانیزم تولید اکسیدنیتروژن تعریف می‌شود. به طور عمده، تولید اکسیدنیتروژن از دو مکانیزم حرارتی³ (زلدوویج) و سریع⁴ صورت می‌پذیرد [26,20]. نخ تولید اکسیدنیتروژن از مکانیزم زلدوبویج در دماهای بالا اهمیت می‌باید و از رابطه‌ی (32) قابل محاسبه می‌باشد [21].

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

در رابطه‌ی (32) ثوابت واکنش تکاتمی، در مرجع [21] ارائه شده است. مربوط به غلظت اکسیژن تکاتمی، در مرجع [21] ارائه شده است. تولید اکسیدنیتروژن از مکانیزم سریع در شرایط غنی اهمیت می‌باید و این مکانیزم توسط فنی‌مور ارائه شده است [26]. در مکانیزم سریع، نخ تولید اکسیدنیتروژن از رابطه‌ی (33) قابل محاسبه است [21].

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

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 $303474.125 \text{ J/gmol}$ و a برابر با 303474.125 محسوبه می‌گردد. این مدل، طبق 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].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

در روابط (23) و (24)، A و B پارامترهای 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 گستته¹ استفاده می‌شود که در رابطه‌ی (26) نشان داده شده است. این روش برای چندین جهت گستته، بسته به دقت موردنظر حل می‌شود [21].

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

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، φ زاویه‌ی فضایی و φ تابع فاز است که در حالت تابش یکتاخت برابر با ۱ در نظر 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 غلظت‌های اکسیدنکردن و بخار آب، و همچنین فشار و دما در نظر می‌گیرد. همچنین در صورت وجود دوده، این ضرایب بر اساس رابطه‌ی (28) اصلاح می‌گردند. در روابط (27) و (28)، k_k و a_k به ترتیب ضرایب وزنی تابع دما برای هر گونه و ضریب جذب هر گونه (براساس اطلاعات مراجع [24,23]) 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 ۰.۱۱ در نظر گرفته شد [25].

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

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

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

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

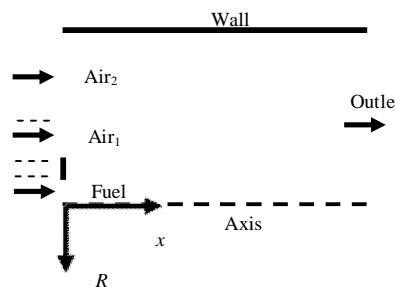
term چشمی تابشی معادله‌ی انرژی برای هر سلول به صورت رابطه‌ی (30)

³ Thermal

⁴ Prompt

¹ Discrete Ordinates (DO)

² WSGGM



شکل ۱ نمای شماتیک محفظه احتراق

جدول ۱ اطلاعات هندسی مطالعه‌ی موردی [25]

Table 1 Geometrical data of case study [25]

اطلاعات(اندازه)	مکان مورد نظر
$R=0\text{-}3$	محوده‌ی شعاعی ورودی سوخت (mm)
$R=7.5\text{-}22.5$	محوده‌ی شعاعی ورودی هوا اولیه (mm)
$R=22.5\text{-}293$	محوده‌ی شعاعی ورودی هوا ثانویه (mm)
586	قطر محفظه احتراق (mm)
990	طول محفظه احتراق (mm)

جدول ۲ شرایط مرزی مطالعه‌ی موردی [25]

Table 2 Boundary conditions of case study [25]

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

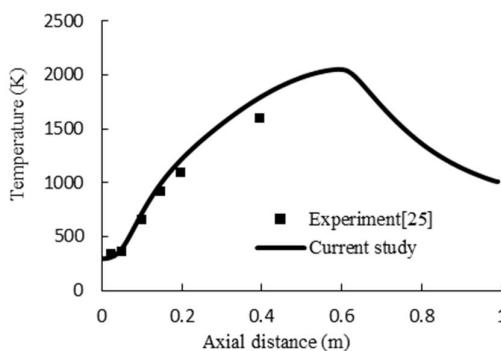


Fig.2 Comparison of present modeling and experiment: temperature on centerline

شکل ۲ مقایسه مدل‌سازی حاضر و نتایج تجربی: دما روی خط مرکزی

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

$$\varphi = \frac{\frac{(\text{حجم سوخت})}{(\text{حجم هوا اول})}}{\frac{(\text{حجم سوخت})}{(\text{حجم هوا اول})} + \frac{(\text{حجم هوا اول})}{(\text{تثویر})}} \quad (39)$$

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

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

در روابط (37) و (38)، Y_{ox} و v_{fuel} به ترتیب کسر جرمی اکسنده و سوخت، و A 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 آشفتگی در سلول‌های مجاور دیواره استفاده شده است.

۳- اعتبارسنجی حل عددی حاضر

قبل از بحث بر روی نتایج، ابتدا مدل‌سازی حاضر از طریق مقایسه با نتایج تجربی مرجع [25] صحبت‌سنجی می‌شود. نمای شماتیک مطالعه‌ی موردی که به صورت محوری متقان است در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد سوخت گازی متن 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 ۱ و ۲ نشان داده شده است؛ همچنین برای خروجی، شرط مرزی فشار و برابر با یک انسفر در نظر گرفته شده است. دیوار جانبی محفظه احتراق به صورت دما ثابت و برابر با 300 کلوین و دیوار میان ورودی سوخت و هوا 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 و اکنشی 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 مرتبه 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 لاحظ گردید. شکل‌های ۲ و ۳ مقایسه‌ی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی را به ترتیب برای نمودارهای دما و سرعت روی خط مرکزی (محور) و همچنین شکل‌های ۴ و ۵ این مقایسه را به ترتیب برای نمودارهای دما و سرعت روی خط عرضی $x=150\text{mm}$ نشان می‌دهند. تفاوت داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی برای نمودارهای ۲ الی ۵ به ترتیب برابر با ۹، ۱۰، ۱۶، ۱۰ و ۱۴ درصد می‌باشد.

۴- بحث و نتایج

در کار حاضر، از طریق تغییر نحوی توزیع هوا بین دو ورودی هوا و همچنین تغییر فواصل عرضی و طولی میان ورودی‌های هوا که در شکل ۶ 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 انقال 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 هوا ورودی (مجموع هوا اول و دوم) ثابت در نظر گرفته می‌شود.

¹ Standard wall functions² simple³ First Order Upwind Method

بنابراین در ادامه مظور از φ همان نسبت هم‌ارزی مربوط به هوای اول است که $(1/\varphi)$ بیشتر از 1 به معنای رقیق بودن سوخت و $(\varphi/1)$ 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 مرتع فرض می‌شود (شکل 1) و تنها از طریق تغییر $(1/\varphi)$ (از 0.1 تا 1.2 با گام 0.1) به بررسی تاثیر نحوه توزیع هوا بین دو ورویدی هوا پرداخته می‌شود. در این بخش هر یک از تابع هدف (میزان تابش از شعله و میزان نشر هر یک از آلایینده‌های اکسیدینیتروژن، دوده و مونوآکسیدکربن) به صورت جداگانه مورد توجه قرار می‌گیرد و به ازای هر تابع هدف، بهترین نحوه توزیع هوا بین دو ورویدی 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 تاثیر این تغییر همزمان بر هر یک از تابع هدف، به صورت جداگانه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که مقادیر درنظر گرفته شده برای شبکه و حل عددی انجام می‌پذیرد. تا اینجا در دو بخش اول و دوم، تابع هدف به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. در بخش سوم، تابع هدف آلوودگی شامل نشر اکسیدینیتروژن، نشر دوده و نشر مونوآکسیدکربن به صورت همزمان مورد توجه واقع می‌شود و بهترین طرح از میان 192 طرح از نقطه نظر تولیدات آلایینده‌ها معروفی می‌گردد. در این بخش، طرح بهینه با استفاده از مفهوم جبهه‌ی پارتون 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 آلایینده‌ها به صورت همزمان مورد توجه قرار می‌گیرد و بر این اساس بهترین طرح معرفی می‌شود.

۱-۴- تأثیر مرحله‌ای کردن هوا بر هر یک از توابع هدف به صورت حداگانه

جدول 3 با درنظرگیری هر تابع هدف به صورت جداگانه به معروفی بهترین و بدترین طرح پرداخته است. این جدول بر اساس حالتی است که هندسه‌ی محفظه ثابت و مشابه با حالت مرجع است و تنها نسبت هم‌ارزی هوای اول و یا به عبارتی دیگر نهودی توزیع هوای بین دو رودی هوای در آن‌ها متفاوت است. لازم به ذکر است که در این جدول، علاوه بر بهترین طرح، بدترین طرح نیز معروفی 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 ($0.1 = 1/\varphi$)؛ 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 ($1.2 = 1/\varphi$)). 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 ($0.1 = 1/\varphi$)، سطح وسیع تر شعله عاملی برای تابش بیشتر صورت پذیرفته از آن می‌باشد. به منظور تجزیه و تحلیل علت، نمودار نرخ واکنش، $\text{رو} / \text{خط عرض} = x$ ، در شکل 8 نشان داده شده است. با

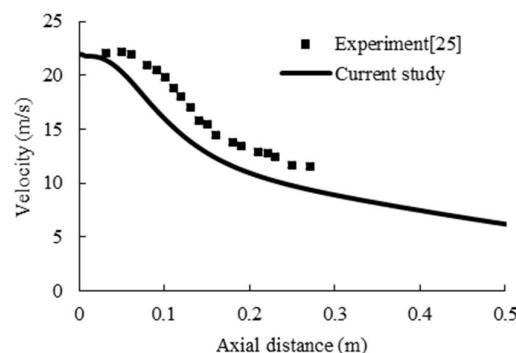


Fig. 3 Comparison of present modeling and experiment: velocity on centerline

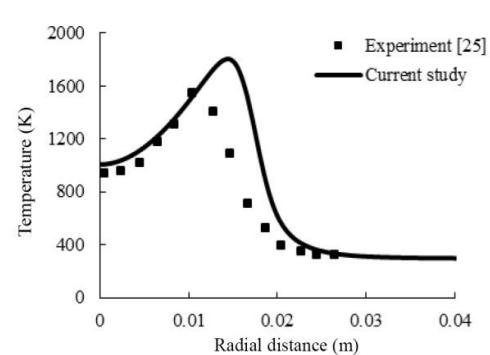


Fig.4 Comparison of present modeling and experiment: temperature on transversal line of $x=150\text{mm}$

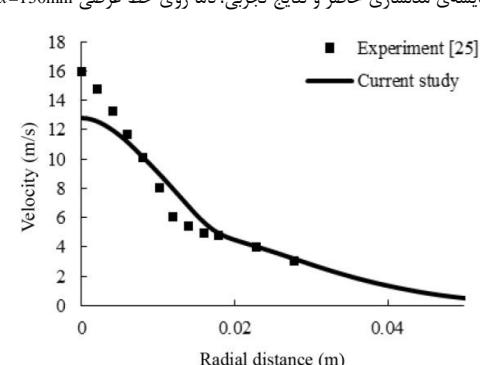
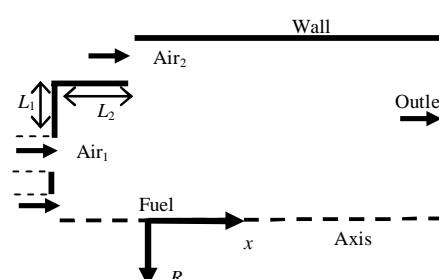


Fig.5 Comparison of present modeling and experiment: velocity on transversal line of $x=150\text{mm}$



شکل 6 نمایی شماتیک از متغیرهای هندسی
Fig. 6 Schematic view of geometrical variables

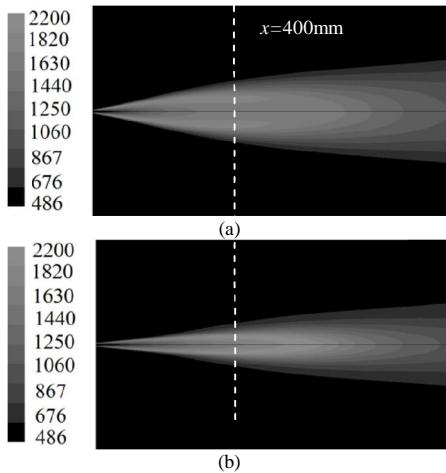


Fig. 7 Contours of temperature (K), a) maximum Radiation ($\frac{1}{\varphi} = 0.1$), b) minimum Radiation ($\frac{1}{\varphi} = 1.2$)

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

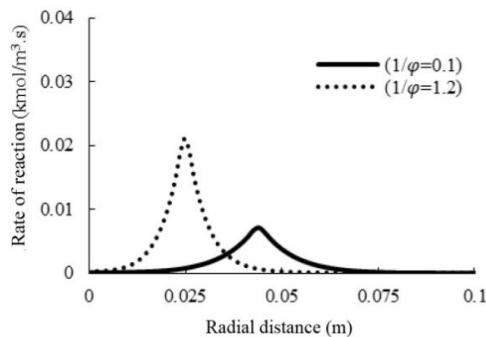


Fig. 8 Comparison of rate of reaction on transversal line of $x=400\text{mm}$ for the cases with maximum and minimum radiation

شکل 8 مقایسه نرخ واکنش روی خط عرضی $x=400\text{mm}$ میان حالات با حداکثر و حداقل تابش

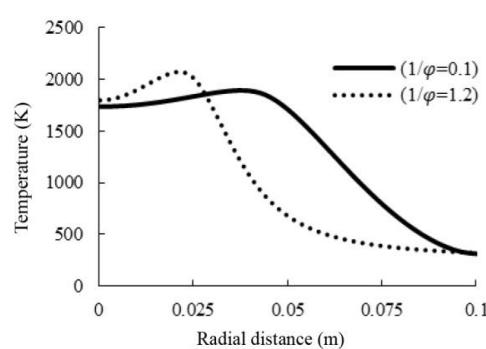


Fig. 9 Comparison of temperature on transversal line of $x=400\text{mm}$ for the cases with maximum and minimum radiation

شکل 9 مقایسه 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].

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

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

پارامتر	مقدار	1
حداکثر میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره (W)	6096.49	$\frac{1}{\varphi}$
حداقل میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره (W)	2389.66	
حداکثر میزان کل اکسیدنیتروزن در خروجی (ppm)	23.4	
حداقل میزان کل اکسیدنیتروزن در خروجی (ppm)	9.78	
حداکثر میزان کل دوده در خروجی (ppm)	1.64	
حداقل میزان کل دوده در خروجی (ppm)	0.111	
حداکثر میزان کل مونواکسیدکربن در خروجی (ppm)	8.44	
حداقل میزان کل مونواکسیدکربن در خروجی (ppm)	0.398	

توجه به شکل 8، هنگامی که هوای مرحله‌ای اول کمتر از میزان هوا نظری مورد نیاز است، امکان احتراق تمامی سوخت در ناحیه‌ای 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 مرحله‌ای 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، آزادشدن انرژی واکنش در محدوده‌های وسیع‌تر برای حالت $\frac{1}{\varphi} = 0.1$ ($= 1/\varphi$)، موجب کاهش قله‌ی دما می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر دما در شعله با تابندگی حداقل 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 کپه‌ای گازها در خروجی محفوظه احتراق که معیاری از انرژی محسوس گازهای خروجی است، با میزان تشتعش 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 اکسیدنیتروزن در خروجی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان هوای مرحله‌ای اول تقریباً برابر میزان تثوری و کمی بیشتر از آن باشد ($\frac{1}{\varphi} = 1.2$) ($= 1/\varphi$) و کمترین میزان آن زمانی اتفاق می‌افتد که میزان هوای مرحله‌ای اول بسیار کمتر از مقدار تثوری باشد ($\frac{1}{\varphi} = 0.1$)؛ همان‌طور که جدول 3 نشان می‌دهد طرح با حداکثر میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره و طرح با حداقل میزان کل تولید اکسیدنیتروزن در خروجی، و همچنین طرح با حداقل و حداکثر تابشی دریافتی توسط دیواره و طرح با حداکثر میزان کل تولید اکسیدنیتروزن در خروجی معادل یکدیگر هستند؛ به عبارتی قسمت‌های (a) و (b) شکل 7 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی کانتورهای دمای مربوط به دمای شعله جستجو نمود. همان‌طور که ذکر شد، شعله با بیشترین میزان کل انرژی تابشی دریافتی توسط دیواره با دمای حداکثر پایین‌تری همراه است و تولید اکسیدنیتروزن نیز واپس‌گردی 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 ($\frac{1}{\varphi} = 0.1$)؛ در مقابل کمترین میزان کل دوده در خروجی مربوط به حالتی است که هوای مرحله‌ای اول تقریباً برابر با میزان هوای تثوری و کمی بیشتر از آن باشد ($\frac{1}{\varphi} = 1.2$). این مشاهده با این واقعیت کلی که شعله‌های غنی منجر به

همان طور 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 چافته‌اند. به عبارتی دیگر مقدار توابع هدف مختلف آن، بهترین مقدار گزارش شده در جدول 4 باشد. ضمناً برای آن که مقدار توابع هدف مختلف با هم قابل قیاس باشند، از روش بی‌بعدسازی توابع هدف [29] طبق رابطه (40) استفاده می‌شود.

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

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

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

در رابطه (41) منظور از زیرنویس $ideal$ مقدار تابع هدف بی‌بعدسازی نقطه‌ی آرمانی و منظور از x تعداد توابع هدف است که در این بخش برای با 3 می‌باشد. نقطه‌ای که منجر به کمترین میزان d شود، به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‌گردد. طرح گرینش شده در این قسمت در جدول 6 معرفی شده و مقدار توابع هدف آن با مقدار توابع هدف مرجع (طرح مرجع) شده در بخش (3) مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود طرح گرینش 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 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 جزو توابع هدف نبوده و بهتر بودن آن به صورت اتفاقی صورت پذیرفته است.

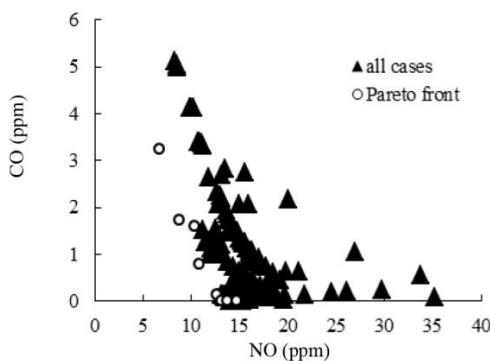


Fig. 10 Projection of Pareto front on CO-NO plane when environmental objectives are considered simultaneously

شکل 10 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه 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 روده‌ی 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 نحوه توزیع هوا بین روده‌های 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 شوری بودن هوای اول رخ می‌دهد (اگرچه در جدول 3 حداقل دوده و حداقل مونواکسیدکربن به ترتیب در شرایط $= 1/(1/\varphi)$ و $= 1.1$) و $\varphi = 1/(1/\varphi)$ رخ داده، ولی در جدول 4 حداقل دوده در $= 0.9$ و حداقل مونواکسیدکربن در $= 0.8$ (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 مقداری بهتری از توابع هدف (مقداری بیشتری از تابش از شعله و مقداری 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) گرینش طرح مناسب در این بخش با درنظر 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 نیاشد [29]. با توجه به درنظرگیری 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 مقداری متناظر مرحله‌ای کردن هوا و فواصل میان روده‌های هوای

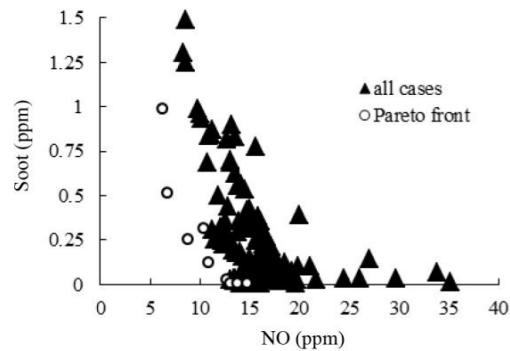
Table 4 Best value of each objective function and the corresponding level of air-staging and distances between the air inlets

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

سه نما از جبهه پارتوا 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 جبهه پارتوا 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 حالات هیچ‌یک از طرح‌های موجود در جبهه پارتوا بر همیگر 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 $L_1=45\text{ mm}$, $L_2=40\text{ mm}$, $\frac{1}{\varphi}=0.2$ و $x=4\text{ mm}$ معرفی می‌شود (در رابطه (41)، x برابر با 4 می‌باشد). همچنین مقادیر تابع 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 گزینش شده 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 مونوآکسیدکربن 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 مونوآکسیدکربن بدتر عمل می‌نماید.



شکل 11 تصویر جبهه پارتوا روی صفحه Soot-NO زمانی که توابع هدف آلودگی به صورت همزمان درنظر گرفته شوند

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

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

جدول 5 اطلاعات مربوط به جبهه پارتوا زمانی که تابع 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)	مونوآکسیدکربن (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 تابع هدف آن‌ها

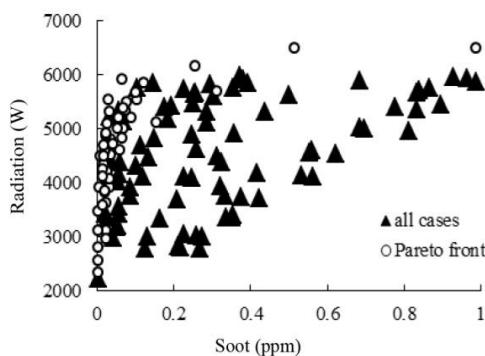
Table 6 Values of design variables for optimal and reference cases and comparison of them objective functions

حالات	$\frac{1}{\varphi}$	L_1 (mm)	L_2 (mm)	تابش (W)	اکسیدنیتروژن (ppm)	دوده (ppm)	مونوآکسیدکربن (ppm)
طرح بهینه با توجه به تابع هدف آلودگی	1.2	15	200	2925.95	12.2	0.023	0.145
طرح بهینه با توجه به تابع 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

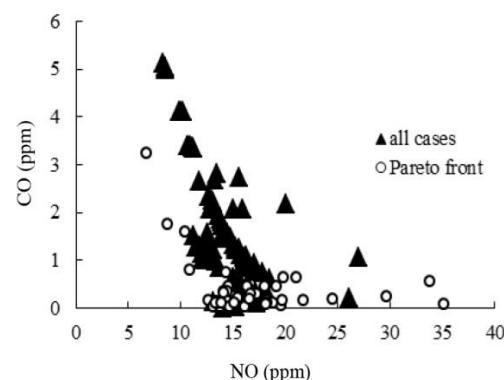
جدول 7 اطلاعات مربوط به جبهه‌ی پارتو زمانی که توابع هدف زیستمحیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند

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

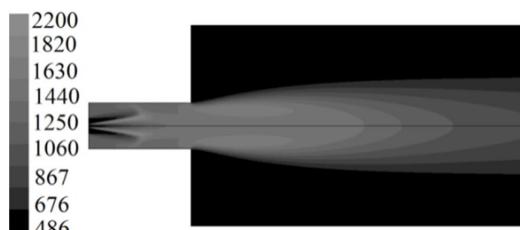
مونواکسیدکربن (ppm)	دود (ppm)	اکسیدنیتروژن (ppm)	تابش (W)	L_2 (mm)	L_1 (mm)	$\frac{1}{\varphi}$	ردیف
3.23	0.515	6.72	6479.31	300	45	0.2	1
6.11	0.988	6.31	6485.04	200	30	0.1	2
1.74	0.255	8.81	6153.44	200	45	0.1	3
0.786	0.123	10.9	5837.58	200	45	0.2	4
1.59	0.313	10.4	5691.68	100	15	0.2	5
0.751	0.195	15.2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



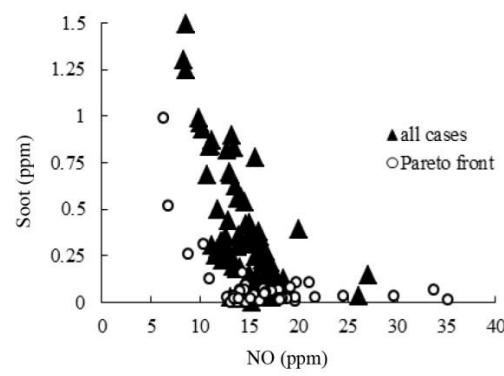
شکل 14 تصویر جبهه‌ی پارتو روی صفحه‌ی Radiation-Soot زمانی که توابع هدف زیستمحیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند



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



شکل 15 کانتور دمای بهترین طرح بر حسب کلوین زمانی که توابع هدف زیستمحیطی و تابش به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند



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

5- جمع‌بندی

مقاله‌ی حاضر با در نظر گیری چهار تابع هدف شامل میزان نشر آلودگی‌های اکسیدنیتروژن، دود 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

انرژی جنبشی آشفتگی (m^2s^{-2})	k	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:
فاصله‌ی عمودی میان هوای اول و دوم (mm)	L_1	- مرحله‌ای نمودن هوا به معنی تزریق ناکافی هوا در مرحله‌ای اول و جیران آن در مرحله‌ای بعد منجر به افزایش وسعت ناحیه‌ی افکشی (بنابراین افزایش حجم شعله) و کاهش قلمی دمایی شعله شده است که به ترتیب افزایش تابش از شعله و کاهش نشر اکسیدنیتروزن را به دنبال دارد. در مقابل، نشر پیشتر آلدگی‌های دوده و مونواکسیدکربن از جمله نکات منفی مرحله‌ای نمودن هوا بوده است.
فاصله‌ی افقی میان هوای اول و دوم (mm)	L_2	- علاوه بر نحوه‌ی توزیع هوا بین دو مرحله، فواصل طولی و عرضی ورودی‌های هوای نیز می‌تواند تأثیر محسوسی در مقادیر تولیدات آلدگی و میزان تابش از شعله داشته باشد.
تعداد نقاط روی جبهه‌ی پارتولو	m	- اگر تنها کمینه‌سازی تولیدات آلدگی 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.
نماد گونه‌ی شیمیایی	M	- چنانچه کمینه‌سازی تولیدات آلدگی 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 اکسیدنیتروزن، و در مقابل افزایش تولیدات دوده و مونواکسیدکربن حاصل شده است.
تعداد گونه‌های شیمیایی	N	- لازم به ذکر است که در شرایطی که چند تابع هدف به طور همزمان مورد توجه باشد، هیچ یک از طرح‌های موجود در جبهه‌ی پارتولو بر دیگری غالب نبوده، اگرچه در مطالعه‌ی حاضر یک طرح به عنوان طرح بهینه معروفی شده است. بنابراین طراح می‌تواند با توجه به اقتضایات موردنظر، هر یک از طرح‌های جبهه‌ی پارتولو را به عنوان طرح بهینه موردنویجه قرار دهد.
ضریب شکست	n	
تولید تنفس در مدل آشفتگی	P	
عدد بی بعد پرانتل	Pr	
فشار (Pa)	p	
نرخ خالص تولید یا مصرف ($\text{kmol}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$)	R	
بردار مکان	r	
بردار جهت	s	
بردار جهت بازنگره شده	s'	
عبارت چشممه ($\text{gm}^{-3}\text{s}^{-1}$)	S	
عدد اشمیت آشفته	Sc_t	
دمای محلی (K)	T	
سرعت جریان متوسط (ms^{-1})	u	
کسر جرمی	Y	
علامت یونانی		
نرخ اتلافات انرژی جنبشی (m^3s^{-3})	ϵ	
گرانروی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ	
ضریب استوکیومتریک در سمت واکنش دهنده	ν'	
ضریب استوکیومتریک در سمت فرآورده	ν''	
چگالی (kgm^{-3})	ρ	
ضریب پخش	σ_s	
ثابت مدل آشفتگی	σ_k	
ثابت مدل آشفتگی	σ_ε	
نسبت هم‌ارزی	φ	
زاویه‌ی فضایی	Ω'	
بالانویس‌ها		
حالت بی بعدشده	n	
زیرنویس‌ها		
احتراقی	comb	
واکنش رفت	f	
سوخت	fuel	
گونه‌ی شیمیایی	k	
اکسیدنیتروزن	NO	
اکسیدکننده	ox	
فرآورده	P	
واکنش دهنده	R	
تابشی	radiation	
واکنشی	reaction	
واکنش برگشت	r	
دوده	soot	
اثباتی در مدل اتلاف گردابهای		
A	اثباتی در مدل اتلاف گردابهای	
a	ضریب جذب	
B	اثباتی در مدل اتلاف گردابهای	
b ₁	اثابت مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری	
b ₂	اثابت مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری	
C	عبارت جله‌جایی در مدل آشفتگی	
C _{ε1}	اثباتی در مدل آشفتگی	
C _{ε2}	اثباتی در مدل آشفتگی	
C _p	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	
C _s	ثابتی در مدلسازی دوده ($\text{kgN}^{-1}\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	
D	ضریب نفوذ	
d	فاصله‌ی هر نقطه روی جبهه‌ی پارتولو از نقطه‌ی آرمانی	
ε	ترم اتلافی در مدل آشفتگی (m^2s^{-3})	
E _a '	انرژی فعل سازی (Jgmol^{-1})	
F	نماد تابع هدف در بهینه‌سازی	
h	(kJkg ⁻¹)	
I	شدت تابش (Wm^{-2})	
K	ضریب هدایت ($\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$)	

7- مراجع

- [15] M. E. Nimvari, M. Maerefat, M. K. El-Hoossaini, 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.
- [30] F. El-Mahallawy, S. El-Din Habic, *Fundamentals and Technology of Combustion*, pp. 1–72, Oxford: Elsevier, 2002.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] J. Ballester, A. Sanz, M. A. González, Investigation of the characteristics and stability of air-staged flames, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 15, No. 32, pp. 776–790, 2008.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] M. Banica, H. Lingyun, B. Weigand, Effects of staged injection on supersonic mixing and combustion, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 6, No. 24, pp. 584–589, 2011.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] H. Lamberg, K. Nuutinen, J. Jokiniemi, O. Sippula, J. Sutinen, P. Honttanainen, 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.