

بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر زاویه چرخش هوای ورودی بر تشکیل آلاینده‌های CO، NOx و دوده

سید هادی پورحسینی¹، علی سعیدی²، قدرت قصابی³، محمد مقیمان⁴

¹ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - hadipoorhoseini@gmail.com

² دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - Ali.saeedi@stu-mail.um.ac.ir

³ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - gh.ghassabi@gmail.com

⁴ استاد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - mmoghiman@yahoo.com

چکیده

حالی که مشعل‌های با هوای چند مرحله‌ای NO خروجی کمتری در مقایسه با مشعل‌های با هوای یک مرحله دارند. محققین دیگری نیز از جنبه‌های متفاوت فرآیند احتراق را مورد توجه قرار داده و سعی در بهینه‌سازی آن نموده‌اند [4, 5].

فرآیند احتراق سوخت مایع به وسیله پارامترهای شناخته شده‌ای مانند اتمیزه کردن جت سوخت مایع، تبخیر قطرات و اختلاط بین سوخت و اکسید کننده کنترل می‌شود [6]. برای اختلاط بهتر سوخت و هوا، نازل‌های مختلفی طراحی شده‌اند که سوخت را به صورت مخروطی و در زوایا و الگوهای پاشش مختلف به داخل محفظه احتراق تزریق می‌کنند. تحقیقات مختلفی در زمینه تأثیر طراحی نازل، شرایط کاری و خواص سوخت بر روی مشخصه‌های احتراق و پاشش سوخت‌های هیدروکربنی انجام شده است [7]. اثر زاویه چرخش هوای ورودی به عنوان عامل مهم دیگر تعیین کننده نرخ اختلاط سوخت و هوا و در نتیجه اثر آن بر راندمان احتراق و تشکیل آلاینده‌ها می‌تواند مورد توجه باشد.

در این مقاله اثر تغییر زاویه چرخش هوای ورودی بر تشکیل آلاینده‌های مونوکسیدکربن و مونوکسیدنیتروژن در یک کوره آزمایشگاهی سوخت مایع به روش‌های آزمایشگاهی و عددی و انتشار دوده به صورت عددی بررسی شده است.

2. تجهیزات آزمایشگاهی

همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، کوره آزمایشگاهی مورد مطالعه به طول 2000 میلی‌متر و قطر داخلی 360 میلی‌متر می‌باشد. بدنه کوره از فولاد AISI316 جهت مقاومت در دماهای بالا ساخته و اطراف آن توسط عایق حرارتی دما بالا با ضخامت مناسب پوشیده شده است. جنس عایق حرارتی پشم سنگ 1260 و ضخامت آن 40 mm می‌باشد. چگالی کم گازهای احتراق سبب تمایل حرکت آنها به سمت بالا می‌شود، لذا برای مکش بهتر و کاهش افت فشار از یک دودکش عمودی با ارتفاع 3 متر استفاده شده است.

مشعل آزمایش، مشعل گازوئیلی با ظرفیت حرارتی ماکزیمم 100000 هزار کیلو کالری بر ساعت بوده و برای اندازه‌گیری آلاینده‌ها در راستای محور مرکزی کوره، بر روی آن سوراخ‌هایی تعبیه شده است. برای اندازه‌گیری آلاینده‌های NO و CO در راستای محور مرکزی کوره از دستگاه گازآنالیزر Testo350XL استفاده شده

در مقاله حاضر مطالعه عددی و آزمایشگاهی یک کوره سوخت مایع جهت بررسی اثر زاویه چرخش هوای ورودی بر دما و تشکیل آلاینده‌های CO، NO و دوده انجام شده است. اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های CO و NO در راستای محور مرکزی کوره توسط دستگاه گازآنالیزر Testo350XL انجام گردیده است. مقایسه مدل‌سازی عددی مساله با نتایج آزمایشگاهی توافق قابل قبولی را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که تاثیر زاویه چرخش هوای ورودی بر دما و غلظت آلاینده‌ها بسیار قابل توجه بوده و به عنوان عاملی تاثیرگذارتر و موثرتر از زاویه پاشش سوخت توسط نازل می‌باشد. تغییر زاویه چرخش از صفر تا 60° باعث افزایش دمای شعله و سپس کاهش آن شده در حالی که غلظت CO و دوده در خروجی افزایش یافته و NO افزایش و کاهش می‌یابد. از طرفی در زوایای کوچک، که زمان ماند مخلوط قابل احتراق در کوره کمتر است، دمای خروجی از کوره افزایش و باعث اتلافات بیشتر می‌گردد. با توجه به این نتایج می‌توان پره‌های هوای ورودی در مشعل را به نحوی انتخاب نمود که فرآیند احتراق دارای راندمان بالا و از طرفی آلاینده‌های کمی باشد.

واژه های کلیدی

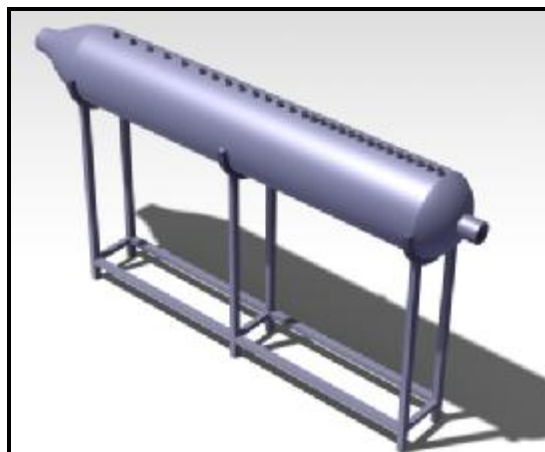
کوره، سوخت مایع، آزمایشگاهی، زاویه هوای ورودی، آلاینده

1. مقدمه

احتراق سوخت‌های فسیلی مهم‌ترین منبع آلودگی هوا است. آلودگی هوا منشا بسیاری از اثرات مخرب زیست محیطی می‌باشد [1, 2]. از طرفی نیاز فزاینده جهان به انرژی در مقابل این اثرات مخرب باعث تحقیق و پژوهش روزافزون در زمینه بهبود فرآیند احتراق جهت بالا بردن راندمان و کاهش ایجاد آلاینده‌های آن شده است.

آهن و همکاران [3] به مطالعه آزمایشگاهی، تشکیل و انتشار آلاینده‌های CO و NO در مشعل‌های با هوای مرحله‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان داد که غلظت CO خروجی در مشعل‌های با هوای یک مرحله‌ای کمتر از مشعل‌های با هوای چند مرحله‌ای بود. در

است. عدم قطعیت اندازه گیری دستگاه گاز آنالیزر $\pm 5\%$ برای NO و $\pm 10\%$ برای CO است.



شکل 1 کوره آزمایشگاهی مورد مطالعه

3. معادلات حاکم بر مساله

1.3 معادلات فاز گاز

با توجه به هندسه استوانه‌ای مساله و متقارن محوری بودن معادلات پیوستگی و مومنوم حاکم بر مساله به صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rV) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x}(rrU^2) + \frac{\partial}{\partial r}(rrUV) \right] = - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(ru'^2) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rru'v') \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x}(rrUV) + \frac{\partial}{\partial r}(rrV^2) \right] = - \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial x}(ru'v') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rrv'^2) - \frac{1}{r} \overline{rw'^2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x}(rrUW) + \frac{\partial}{\partial r}(rrVW + rVW) \right] = - \frac{\partial}{\partial x}(ru'w') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rrv'w') - \frac{1}{r} \overline{rv'w'} \quad (4)$$

جهت محاسبه ترم‌های تنش‌های رینولدز $u'^2, v'^2, w'^2, u'v', u'w', v'w'$ از مدل RNG k- استفاده شده است. معادله انرژی حاکم نیز به صورت زیر است:

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x}(rruh) + \frac{\partial}{\partial r}(rrvh) \right] = \Gamma_h \nabla^2 h - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rrv'h') - \frac{\partial}{\partial x}(ru'h') + S_h^R + S_h^G \quad (5)$$

جملات $S_h^R + S_h^G$ منابع انرژی به دلیل واکنش شیمیایی و تابش هستند.

مدل تابش مورد استفاده نیز مدل DO است [8]. برای محاسبه اثر دوده بر ضریب تابش کلی، از روش WSGM استفاده شده، به طوری که ضریب جذب کلی برابر مجموع ضریب جذب دوده و محصولات احتراق در نظر گرفته شده است.

2.3 مدل سازی احتراق

در این مطالعه از مدل دو مرحله‌ای احتراق استفاده شده است و تاثیر توربولانسی بر نرخ واکنش‌ها توسط مدل مگنسن - هرتاگر اعمال شده است [9].

3.3 مدل سازی NOx

مکانیزم مورد استفاده شده برای تشکیل NO حرارتی، مکانیزم معروف زلدویچ می باشد [10].



واکنش 6 یک واکنش حدی است زیرا واکنش 7 بدون کامل شدن واکنش اول صورت نمی‌گیرد. از طرفی با پذیرفتن یک فرض ساده برای تعادل O و O₂ می‌توان مدل‌سازی معادلات سینتیکی فوق را آسانتر کرد. در دماهای بالای 1800 کلوین عمل اکسیداسیون O₂ و N₂ آغاز می‌گردد. در دماهای بالا پیوند N₂ شکسته می‌شود و با اکسیژن ترکیب می‌گردد. مکانیزم زلدویچ بطور وسیعی برای پیشگویی تمرکز NO در محفظه‌های احتراق استفاده می‌شود و طبق مکانیزم فوق مقدار NO پیشگویی شده مستقیماً به درجه حرارت بستگی دارد. علاوه بر این به دلیل وجود ترکیبات نیتروژن‌دار در سوخت‌های فسیلی مایع مکانیزم تشکیل NO سوختی از رادیکال غالب HCN نیز در نظر گرفته شده است.

4.3 مدل سازی دوده

مدل دو مرحله‌ای تجربی تسنر جهت مدل‌سازی تشکیل و اکسیداسیون دوده به کار برده شده است. در مرحله اول رادیکال هسته‌ای تشکیل می‌شود و در مرحله دوم دوده از این رادیکال‌ها بدست می‌آید. برای ترم چشمه دوده داریم:

$$\dot{S}_N = \dot{S}_{N,F} - \dot{S}_{N,C} \quad (8)$$

که $\dot{S}_{N,F}$ نرخ تشکیل رادیکال و $\dot{S}_{N,C}$ نرخ احتراق رادیکال‌ها می‌باشد.

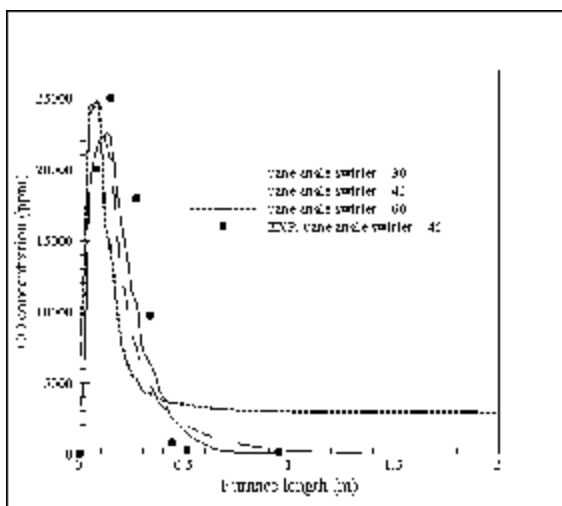
5.3 معادلات فاز قطرات

معادلات حرکت و انرژی قطرات از توازن نیرو و انرژی قطرات نوشته شده و در هر مرحله اثرات فاز قطرات به صورت جمله‌های چشمه در فاز گاز وارد می‌گردد [11].

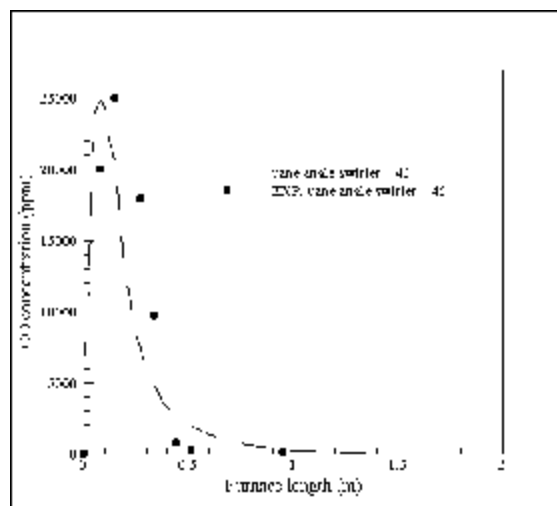
4. نتایج

شکل 2 نتایج عددی مقدار CO در طول محور کوره را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی توافق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

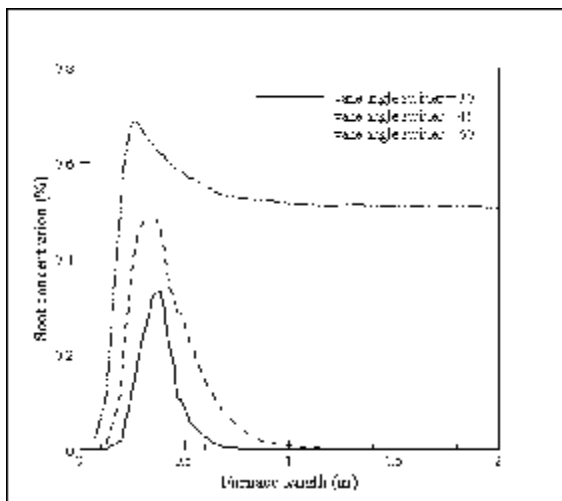
شکل 3 شبیه‌سازی اثر زاویه چرخش هوای ورودی، بر توزیع دمای محوری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با کاهش زاویه چرخش، به علت بزرگ شدن مولفه محوری سرعت، ماکزیمم دما از ورودی مشعل دورتر می‌گردد.



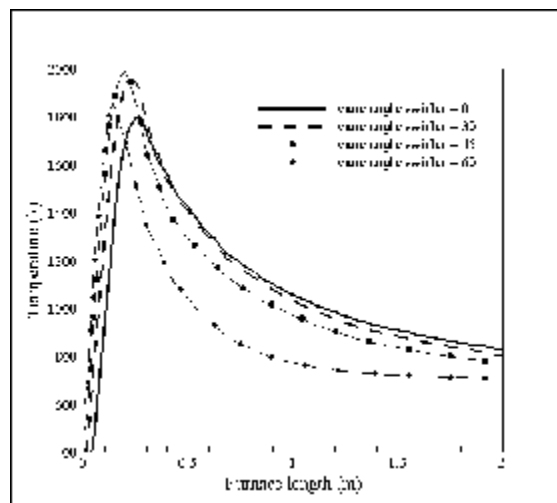
شکل 4 توزیع محوری غلظت CO در دو حالت آزمایشگاهی و عددی ($\phi=0.7$, Nozzle angle=60deg.)



شکل 2 مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی غلظت CO در طول کوره ($\phi=0.7$, Nozzle angle=60deg.)



شکل 5 اثر چرخش هوای ورودی بر غلظت دوده در محور کوره ($\phi=0.7$, Nozzle angle=60deg.)



شکل 3 اثر زاویه چرخش هوای ورودی بر توزیع دمای محوری ($\phi=0.7$, Nozzle angle=60deg.)

در مجاور دیواره کوره به علت بزرگ بودن مولفه مماسی سرعت، باعث عدم اکسیداسیون مناسب CO شده و سبب می‌شود تا در خروجی کوره، غلظت CO نسبت به زوایای چرخش 30 و 45 درجه بیشتر باشد.

شکل 5 اثر چرخش هوای ورودی بر غلظت دوده روی محور مرکزی کوره را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، غلظت دوده ابتدا به دلیل تجزیه حرارتی سوخت در اثر دمای شعله افزایش یافته و سپس به دلیل اکسیداسیون دوده کاهش می‌یابد. در زوایای چرخش بزرگ (60 درجه) به دلیل بزرگ بودن مولفه مماسی سرعت هوای ورودی، غلظت سوخت در امتداد محور مرکزی زیاد بوده و تجزیه آن در اثر دمای حاصل از احتراق، سبب می‌شود تا غلظت دوده در زاویه چرخش 60 درجه نسبت به زوایای چرخش 30 و 45 درجه بیشتر باشد.

در شکل 6 توزیع محوری غلظت NO در دو حالت آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شده و اثر چرخش هوای ورودی بر غلظت NO در امتداد محور مرکزی کوره نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که در زوایای چرخش بزرگ (60 درجه)، حرکت دورانی هوا

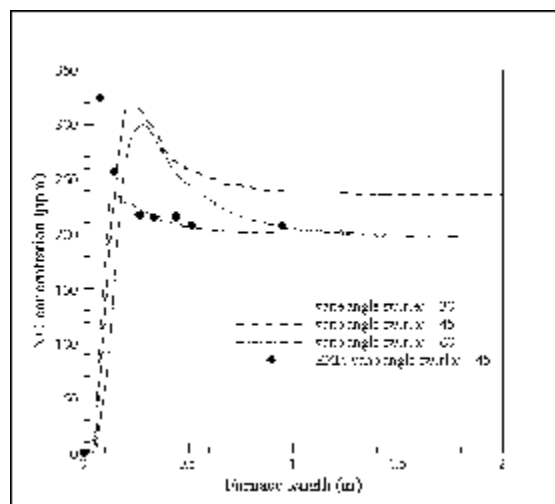
در زوایای چرخش بزرگ (60 درجه)، بزرگ بودن مولفه مماسی سرعت، باعث شده تا تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز، قطرات سوخت به سمت دیواره کوره که دارای دمای کمتری است منحرف شده و از منطقه واکنش دور شوند و در نتیجه دمای ماکزیمم کاهش می‌یابد. با کاهش زاویه چرخش به 45 درجه نرخ مخلوط شدن سوخت و هوا افزایش یافته و دما افزایش پیدا می‌کند. ولی کاهش بیشتر زاویه چرخش هوای ورودی به 30 درجه و حالت بدون چرخش (صفر درجه) باعث می‌شود تا دمای ماکزیمم کاهش یابد. علاوه بر این در این حالت افزایش مولفه محوری سرعت، کاهش زمان ماند و نیز کاهش طول تبادل حرارتی باعث می‌شود تا اتلاف حرارتی دودکش افزایش یابد.

در شکل 4 توزیع محوری غلظت CO در دو حالت آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شده و اثر چرخش هوای ورودی بر غلظت CO در امتداد محور مرکزی کوره نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که در زوایای چرخش بزرگ (60 درجه)، حرکت دورانی هوا

5. نتیجه‌گیری

بر مبنای مطالب بیان شده می‌توان چنین نتیجه گرفت:

- زوایای چرخش بزرگ باعث کاهش دما و افزایش غلظت منوکسیدکربن و دوده در خروجی کوره می‌شود.
 - زوایای چرخش کوچک باعث کاهش دما و اتلاف حرارتی (افزایش دما در دودکش خروجی) می‌شود.
 - تغییر زاویه چرخش از صفر تا 60° باعث افزایش دمای شعله و سپس کاهش آن شده در حالی که غلظت CO و دوده در خروجی افزایش یافته و NO افزایش و سپس کاهش می‌یابد.
- بنابراین می‌توان زاویه چرخش بهینه‌ای را به نحوی انتخاب کرد که باعث افزایش راندمان حرارتی و کاهش آلاینده‌ها گردد.



شکل 6 مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی غلظت NO روی محور کوره ($\phi=0.7$, Nozzle angle=60deg.)

که در زوایای چرخش بزرگ (60° درجه)، پایین بودن دما و همچنین پایین بودن غلظت اکسیژن در امتداد محور مرکزی کوره ناشی از بزرگ بودن مولفه مماسی سرعت و حرکت هوا به سمت دیواره کوره سبب می‌شود تا غلظت NO تشکیل شده کمترین مقدار را داشته باشد. با کاهش زاویه چرخش به 45° درجه، به دلیل افزایش دما ناشی از اختلاط مناسب‌تر سوخت و هوا غلظت NO افزایش پیدا می‌کند. کاهش بیشتر زاویه چرخش هوای ورودی به 30° درجه، باعث بزرگ شدن مولفه محوری سرعت، کاهش نرخ اختلاط و در نتیجه دمای کم‌گردیده و نیز زمان ماند نیز کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌شود تا مقداری از نیتروژن موجود در سوخت فرصتی برای اکسیداسیون و تبدیل شدن به NO را پیدا نکند و در نتیجه غلظت NO دوباره کاهش می‌یابد.

in Liquid Fuel-Oxygen Flames", *International Combustion Symposium*, Hawaii.

6. مراجع:

[1] L. Curtis, W. Rea, P. Smith-Willis, E. Fenyves and Y. Pan, 2006. "Adverse health effects of outdoor air pollutants". *Environment International*, 32(6), pp. 815-830.

[2] V. Ramanathan and Y. Feng, 2009. "Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives". *Atmospheric Environment*, 43(1), pp. 37-50.

[3] K.-Y. Ahn, H.-S. Kim, E.-S. Cho, J.-H. Ahn and Y.-M. Kim, 1999. "An experimental study on combustion processes and no_x emission characteristics of the air-staged burner". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 13(6), pp. 477-486.

[4] A. Saario, A. Rebola, P. J. Coelho, M. Costa and O. A., 2005. "Heavy fuel combustion in a cylindrical laboratory furnace". *Fuel*, 84(pp. 359-369).

[5] T. Daho, G. Vaitilingom and O. Sanogo, 2009. "Optimization of the Combustion of Blends of Domestic Fuel Oil and Cottonseed Oil in a Non-Modified Domestic Boiler". *Fuel*, 88(pp. 1261-1268).

[6] B. Leroux, F. Lacas, P. Recourt and O. Delabory, 2001. "Coupling Between Atomization and Combustion

[7] J. I. Kim, S. Y. No and Y. J. Lee, 2001. "Experimental Analysis of Break up Length in Pressure Swirl Atomizer", *Annual Conference of ILASS Asia*, Korea.

[8] E. H. Chui and G. D. Raithby, 1993. "COMPUTATION OF RADIANT HEAT TRANSFER ON A NONORTHOGONAL MESH USING THE FINITE-VOLUME METHOD". *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals: An International Journal of Computation and Methodology*, 23(3), pp. 269 - 288.

[9] B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, 1977. "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion". *Symposium (International) on Combustion*, 16(1), pp. 719-729.

[10] J. Warnatz, U. Mass and R. W. Dibble, 2006. *Combustion, Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Springer,

[11] *Fluent Version 6 user manual*. 2004.