

## تولید و نشر آلاینده‌ها در کوره‌های تونلی سوخت مایع: آزمایش و تئوری\*

محمد مقیمان<sup>(۱)</sup>

**چکیده** در این مقاله تولید و نشر آلاینده‌های منواکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و دوده در یک کوره استوانه‌ای سوخت مایع با توان ۲MW و طول قابل تغییر به روشهای اندازه‌گیری آزمایشگاهی و محاسبات عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در روش آزمایشگاهی CO با استفاده از تکنیک infra-red، NO با استفاده از متد chemiluminescent و دوده با استفاده از روش تقلی اندازه‌گیری شده است. تغییرات شعاعی دما و آلاینده‌ها در مجاورت مشعل و در مکانی دور از مشعل و همچنین اثر طول کوره تونلی بر نشر آلاینده‌ها به دو روش آزمایشگاهی و تئوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد افزایش طول کوره موجب کاهش انتشار منواکسیدکربن و دوده و افزایش انتشار گاز NO تا یک ماکزیمم می‌شود. همچنین محاسبات نشان می‌دهد توزیع هر یک از آلاینده‌های منواکسیدکربن، دوده و منواکسیدازت در روی محور مرکزی کوره دارای یک ماکزیمم است که مکان ماکزیممهای منواکسیدکربن و دوده بر هم منطبق اما NO در فاصله دورتری از مشعل به مقدار بیشینه خود می‌رسد. **واژه‌های کلیدی** آلاینده‌های CO، NO و دوده، کوره تونلی، احتراق سوخت مایع.

## Production and Emmission of Pollutants in Liquid Fuel Fired Tunnel Furnaces

M. Moghiman

**Abstract** This papaer presents and analyses production and emission of pollutants CO, NO<sub>x</sub> and soot from experimental and CFD work undertaken on a 2 MW cylindrical furnace with changeable length. The experimental measurements are carried out using chemiluminescence and infra-red techniques to measure NO<sub>x</sub> and CO respectively. Soot mass fraction is measured gravimetrically. The predicted radial variations of temperature and pollutants at two axial cross sections and the effect of furnace length on pollutant emissions compare well with the experimental measurements. The results show that an increase in length of furnace decreases CO and soot mass fractions, but increases NO concentration up to a maximum and then decreases slowly. The results also show that the centerline profiles of pollutant concentrations reach a maximum. The location of the maximum centerline CO coincides with the maximum soot location, while the location of NO peak is at more axial distance from the nozzle.

**Key Words** Pollutants CO, NO and Soot, Tunnel Furnace, Combustion of Liquid Fuel.

\* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۷/۱۷ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۰/۱۰/۱۷ به دفتر نشریه رسیده است.

۱ - دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی "مشهد"

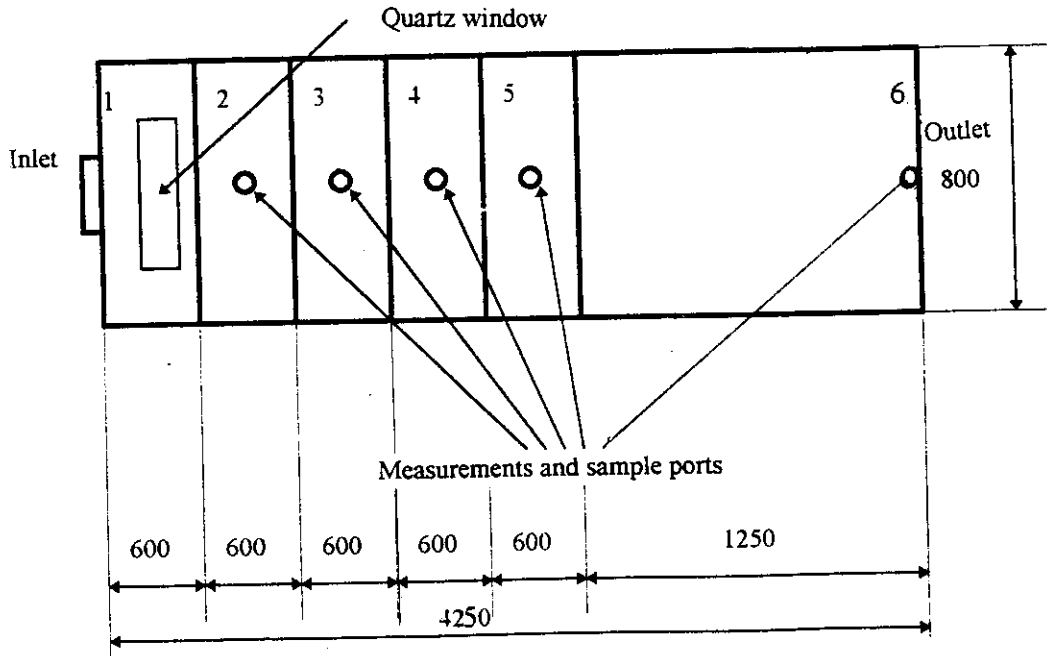
## مقدمه

بخش قابل توجهی از آلاینده‌های مهم هوا از احتراق سوخت مایع در توربینهای گاز، کوره‌های صنعتی و موتورهای دیزل تولید و به هوا انتشار پیدا می‌کنند. کوره‌های تونلی که در ظرفیتهای بالا در بسیاری از صنایع از جمله کارخانه‌های سیمان مورد استفاده قرار گرفته و حجم بالایی از آلاینده‌ها را به هوا انتشار می‌دهند، نقش قابل توجهی در آلودگی محیط‌زیست دارند. اکسیدهای ازت، دوده، منواکسید کربن و اکسیدهای گوگرد مهمترین آلاینده‌های منتشره از شعله‌های پختی سوختهای مایع در کوره‌ها می‌باشند [1,2,3]. گاز سمی منواکسید کربن که از احتراق ناقص سوختهای کربن‌دار به دست می‌آید در انتقال اکسیژن توسط خون اختلال ایجاد می‌کند. اکسیدهای نیتروژن و گوگرد مؤلفه‌های ناخواسته دیگر محصولات احتراق می‌باشند که بارانهای اسیدی را موجب شده اثر سوء بر سلامت انسان و رشد گیاهان دارند [4]. دوده با انتقال بخشی از انرژی حرارتی داخل محفظه احتراق به خارج موجب اتلاف انرژی شده و به صورت ذرات جامد آلاینده در هوا منتشر می‌شود [5]. اثرات سوء و مخرب آلاینده‌ها بر محیط‌زیست سبب شده است که طراحی دستگاههای "احتراق تمیز" از اهداف اصلی پژوهشگران مهندسی احتراق باشد [6,7]. در این ارتباط علاوه بر روشهای آزمایشگاهی، تکنیکهای عددی همراه با مدلسازی‌های ریاضی به عنوان ابزاری مؤثر و کارآمد مورد استفاده طراحان قرار می‌گیرد [8]. کاربرد روشهای محاسباتی برای شبیه‌سازی فرآیندهای تشکیل و نشر آلاینده‌ها در سیستمهای احتراق دوفازی سوخت مایع از پیچیدگی زیادی برخوردار است زیرا علاوه بر محاسبه تبادل جرم و انرژی بین دوفاز گاز و مایع، مدلسازی ریاضی تشکیل آلاینده‌ها نیز به دقت نیاز دارد [9,10].

هدف این پژوهش مطالعه تولید و نشر آلاینده‌های هوا از کوره‌های تونلی سوخت مایع و بررسی اثر طول کوره و نسبت C/O ورودی بر انتشار آلاینده‌ها با استفاده از دو روش اندازه‌گیری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌باشد. برای محاسبه  $\text{NO}_x$  از دو مکانیزم NO حرارتی و NO سوختی و برای محاسبه دوده از یک مدل تجربی استفاده می‌شود و نتایج دو روش مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

## اندازه‌گیری دما و غلظت آلاینده‌ها

کوره استوانه‌ای استفاده شده در این تحقیق دارای طول ۴/۲۵ متر و قطر ۰/۸ متر می‌باشد (شکل ۱). طول کوره از پنج قطعه مجزای قابل اتصال بهم تشکیل شده است. طول هر یک از قطعات وسط ۰/۶ متر است که با حذف یا اضافه کردن آنها طول کوره تغییر می‌کند. سطح داخلی کوره از ماده آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) با دمای ماکزیمم مجاز ۱۹۵۰ K و ضخامت ۳۰ میلی‌متر پوشیده شده است. طبق شکل، در روی جداره کوره پنج حفره به فواصل ۰/۳، ۰/۹، ۱/۵، ۲/۱ و ۲/۷ متر از نازل مشعل برای اندازه‌گیری دما و نمونه برداری از گازهای احتراقی در نظر گرفته شده است. مشعل کوره با توان ماکزیمم ۲ MW، از نوع فشاری، با فشار سوخت ورودی به نازل ۲/۵ MPa می‌باشد. نرخ جریان سوخت و هوای ورودی به محفظه احتراق بوسیله پمپ سوخت و دریچه هوای مشعل قابل تنظیم است. اختلاط سوخت و هوا به وسیله حرکت ورتکسی هوای ورودی فراهم می‌شود. سوخت ورودی به کوره توسط هیتر برقی گرم شده و از طریق نازل با زاویه ۶۰ درجه به کوره تزریق می‌شود. آزمایشات برای سوخت گازوئیل که در دمای ورودی ۴۰ درجه سلیسیوس دارای گرانتروی ۱/۵-۵/۵ سانتی استوک است، انجام می‌شود. سایر مشخصات سوخت به شرح زیر است:



شکل ۱ کوره تونلی سوخت مایع با طول قابل تغییر

(technique) استفاده شده است. مقدار دوده با فیلتر کردن حجم معینی از گازهای حاصل از احتراق تعیین می‌شود. لوله نمونه‌گیر دوده از جنس کوارتز به قطر داخلی ۴ میلی‌متر می‌باشد. برای جلوگیری از چگالیده شدن بخار آب گازهای نمونه‌برداری شده، دمای گازها در مسیر حرکت در  $280^{\circ}\text{C}$  نگهداری می‌شود. کسر جرمی دوده با توزین جرم دوده خشک روی فیلتر و نیز جرم گازهای برداشت شده از محفظه احتراق تعیین می‌شود.

### معادلات حاکم

فاز گاز. معادلات حاکم بر فاز پیوسته عبارتند از معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت، انرژی، گونه‌های شیمیایی، انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف آن که کاملاً شناخته شده می‌باشند [11,12]. علاوه بر معادلات مذکور، شش معادله برای محاسبه اثرات اغتشاش در مدل تنش رینالدز حل می‌شود [13].

دانسیتته اولیه:  $\rho_0 = 1/3 \times 10^2 \text{kgm}^{-3}$ ، دمای تبخیر:  $T = 373 \text{K}$ ، دمای جوش:  $T_{\text{boil}} = 462 \text{K}$ ، گرمای نهان تبخیر:  $\Delta H_{\text{vap}} = 3/6 \times 10^5 \text{Jkg}^{-1}$ ، گرمای ویژه:  $C_p = 2/005 \times 10^3 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ، درصد وزنی نیتروژن: ۰/۰۹.

برای اندازه‌گیری دمای گازهای داخل کوره از ترموکوپل نوع K که در برابر دماهای نسبتاً زیاد مقاوم است، استفاده می‌شود. خروجی ترموکوپل به ولتمتر متصل می‌شود که آن دما را مستقیماً برحسب درجه سلیسیوس نشان می‌دهد. با توجه به غلظت کم گوگرد در گازوییل فقط مقادیر CO، NO و دوده مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. لوله نمونه‌گیر گازهای احتراقی به قطر داخلی ۶ میلی‌متر از فولاد ضدزنگ است که با آب خنک می‌شود. برای اندازه‌گیری گاز منواکسیدکربن از تکنیک infra-red gas (infrared series) [ADC(700 analyser)]، و برای اندازه‌گیری گاز منواکسید ازت از خاصیت کمی لومینسانس (chemiluminescent)

که در آن قطر قطره (m)،  $k_{\infty}$  ضریب هدایت گاز (W/m.K)،  $R_e$  عدد رینالدز  $(R_e = \rho D_d |u_d - U|/\mu)$  و Pr عدد پرانتل فاز گاز  $(c_p \mu/k_{\infty})$  است. تبادل جرم بین دو فاز پس از آنکه دمای قطره به دمای تبخیر رسید انجام می‌شود. نرخ تبخیر سوخت تابعی از غلظت بخار در سطح قطره و همچنین غلظت بخار سوخت در فاز گاز اطراف قطره می‌باشد:

$$N_{fu} = k_c \left( \frac{P_{sat}}{RT_d} - X_{fu} \cdot \frac{P_{op}}{RT_{\infty}} \right) \quad (5)$$

که در آن  $N_{fu}$  شار مولی بخار (mol/m<sup>2</sup>-s)،  $k_c$  ضریب تبادل جرم (m/s)،  $P_{sat}$  فشار بخار اشباع سوخت در دمای قطره ( $T_d$ )،  $R$  ثابت گازها،  $X_{fu}$  کسر مولی سوخت در گازهای اطراف قطره،  $P_{op}$  و  $T_{\infty}$  به ترتیب فشار و دمای گازها می‌باشند. ضریب تبادل جرم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_c = \frac{\Gamma_{fu}}{D_d} \left( 0.72 + 0.62 R_e^{1/2} S_c^{1/3} \right) \quad (6)$$

که در آن  $\Gamma_{fu}$  ضریب پخش بخار سوخت در فاز گاز ( $m^2/s$ )،  $S_c$  ضریب اسمیت  $(\mu D_d/\rho)$  است. شار بخار به دست آمده از معادله (5) بعنوان بخشی از جمله چشمه معادله ترابری گونه سوخت استفاده می‌شود و جرم قطره می‌شود:

$$m_d(t + \Delta t) = m_d(t) - N_{fu} A_d M_{fu} \Delta t \quad (7)$$

که در آن  $M_{fu}$  وزن ملکولی سوخت است. در این حالت دمای قطره از رابطه‌هایی شبیه معادله (3) محاسبه می‌شود. با این تفاوت که به طرف راست معادله (3) جمله  $(dm/dt)h_{fg}$  که در آن  $h_{fg}$  گرمای نهان سوخت (J/kg) است، اضافه می‌شود. در صورتیکه تمام جرم قطره قبل از رسیدن به دمای جوش تبخیر نشود و جرم باقیمانده آن به دمای جوش سوخت ( $T_{db}$ ) برسد، با فرض ثابت بودن دمای قطره، نرخ جوش برای آن می‌شود:

$$-\frac{dm_d}{dt} h_{fg} = h A_d (T_{\infty} - T_d) + A_d E_d \sigma (\tau_R^4 - T_d^4) \quad (8)$$

فاز مایع. چگونگی تبخیر و احتراق سوخت مایع نقش مهمی در تولید آلاینده‌ها دارد. فرض شده است فاز دوم به صورت ذرات کروی (قطرات) در فاز گاز پراکنده شده و برخورد آنها با یکدیگر به علت تبخیر سریع آنها قابل اغماض باشد. در سیستم لاگرانژی، معادلات تغییر مکان و تغییر سرعت هر گروه  $i$  از قطرات سوخت می‌شود [12]:

$$\frac{d\vec{X}_{di}}{dt} = \vec{U}_{di} \quad (1)$$

$$m \frac{d\vec{X}_{di}}{dt} = \frac{\pi}{\lambda} D_d^2 \rho_d C_d (\vec{U}_d - \vec{U}) |\vec{U}_d - \vec{U}| + m \vec{g} \\ (\rho_d - \rho)/\rho_d + \vec{F} \quad (2)$$

که در آن  $m$  جرم قطره،  $U$  سرعت گاز،  $U_d$  سرعت قطره،  $D_d$  قطر قطره،  $\rho_d$  چگالی سوخت،  $g$  شتاب ثقل،  $F$  نیروی گریز از مرکز حاصل از حرکت ورتکسی آن و  $C_D$  ضریب پسا است که از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \left[ 1 + R_e^{2/3} / 6 \right] \quad R_e < 1000$$

$$C_D = 0.44 \quad R_e > 1000$$

دمای قطر ( $T_d$ ) که با ورود به محفظه احتراق در اثر انتقال حرارت جابجایی و تابشی گرم می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m_d c_p \frac{dT_d}{dt} = h A_d (T_{\infty} - T_d) + E_d A_d \sigma (\tau_R^4 - T_d^4) \quad (3)$$

که در آن  $m_d$  جرم قطره (kg)،  $c_p$  گرمای ویژه قطره (J/kg-K)،  $A_d$  مساحت سطح قطره،  $T_{\infty}$  دمای محلی گاز،  $h$  ضریب جابجایی انتقال حرارت (W/m<sup>2</sup>-K)،  $E_d$  ضریب انتشار قطره (بی‌بعد)،  $\sigma$  ثابت بولتزمن و  $\tau_R$  دمای تابش  $[\tau_R = (I/4\sigma)^{1/4}]$  است که در آن  $I$  شدت تابش (W/m<sup>2</sup>) می‌باشد. مقدار  $h$  با توجه به کار رانز و مارشال

[14] از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_u = \frac{h D_d}{k_{\infty}} = 2/0 + 0.62 R_e^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4)$$

مکانیزم تشکیل NO محاسبه شود: NO حرارتی، NO سریع (prompt NO) و NO سوختی. با توجه به اینکه در احتراق سوختهای مایع مقدار NO سریع در مقایسه با دو نوع دیگر قابل صرفنظر کردن می باشد در این تحقیق NOهای حرارتی و سوختی محاسبه می شوند. NO حرارتی که به وسیله اکسیداسیون نیتروژن موجود در هوا در دماهای بالا تشکیل می شود، با استفاده از مکانیزم زلدوویچ بیان می شود:



و رابطه نرخ تشکیل می شود [18]:

$$\frac{d[NO]_T}{dt} = \frac{\gamma [O] \{k_{12} k_{13} [O_2] [N_2] - k_{-12} k_{-13} [NO]^2\}}{k_{13} [O_2] + k_{-12} [NO]} \quad (15)$$

(mol/m<sup>3</sup>.s)

مقدار ثابتهای نرخ واکنشهای تعادلی فوق از مرجع [19] به دست می آید. با توجه به اینکه نرخ تشکیل NO بسیار کمتر از نرخ اکسیداسیون هیدروکربن اصلی است، بیشتر NO حرارتی بعد از کامل شدن احتراق تشکیل می شود. در رابطه فوق غلظتهای O<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> از محاسبات احتراق تعیین می شود و غلظت رادیکال [O] از رابطه زیر به دست می آید [18]:

$$[O] = 36/64 T^{1/2} [O_2] \exp\left(\frac{-27123}{T}\right) \quad (16)$$

بنابراین بخشی از جمله چشمه معادله (۱۲) از مکانیزم زلدوویچ محاسبه می شود:  $S_{NO,th} = M_{NO} \frac{d[NO]}{dt}$  که در آن  $M_{NO}$  جرم ملکولی گاز NO است. تولید NO از سوخت پدیده پیچیده تری است و شدیداً به استوکیومتری شعله، مشخصه های احتراق محلی و غلظت اولیه ترکیبات نیتروژن دار بستگی دارد. در اثر گرم شدن و تبخیر قطرات سوخت رادیکالهای نیتروژن دار مانند HCN، CN و NH در اثر تجزیه حرارتی ترکیبات

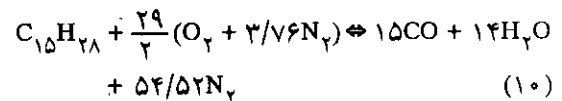
و تغییر قطر قطره در حالت جوش می شود [15]:

$$\frac{dD_d}{dt} = \frac{\gamma}{\rho_d h_{fg}} \left[ \frac{\gamma k_{\infty} (1 + \gamma \sqrt{R_{eD}})}{D_d} \right] \quad (9)$$

$$\left( T_{\infty} - T_d \right) + E_d \sigma \left( T_R^4 - T_d^4 \right)$$

انرژی لازم برای تبخیر قطره با علامت منفی در جمله چشمه معادله انرژی برای فاز گاز وارد می شود.

احتراق. فرمول شیمیایی گازوئیل معادل C<sub>15</sub>H<sub>28</sub> فرض شده و برای احتراق آن از مدل دو مرحله ای استفاده می شود.



نرخ واکنشها با استفاده از مدل مگنسن [16] محاسبه می شود.

تولید NO<sub>x</sub>. دو اکسید اصلی ازت که در فرآیندهای احتراق تشکیل می شوند عبارتند از منواکسید ازت و دی اکسید ازت که NO<sub>x</sub> نامیده می شوند. با توجه به اینکه حدود ۹۵ درصد NO<sub>x</sub> تولید شده در بیشتر فرآیندهای احتراق را NO تشکیل می دهد [17] و همچنین NO<sub>2</sub> از NO تشکیل می شود، بنابراین در این مطالعه برای بررسی NO<sub>x</sub>، تشکیل NO مورد مطالعه قرار می گیرد. انتقال و پخش NO در داخل محفظه احتراق از معادله زیر به دست می آید:

$$\rho \frac{\partial Y_{NO}}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO} \quad (12)$$

که در آن جمله چشمه S<sub>NO</sub> می تواند با توجه به سه

تولید دوده. در شعله‌ها دوده معمولاً از اکسیداسیون ناقص و نیز تجزیه حرارتی سوخت حاصل می‌شود. در تولید دوده دو فرآیند تشکیل دوده و احتراق آن با هم رقابت می‌کنند. بنابراین در شبیه‌سازی تشکیل دوده لازم است اثر دو فرآیند مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه مدل خن و گریوس [21] که نتایج دقیقی برای محاسبه تولید دوده در احتراق سوخت‌های مایع داده است [22]، استفاده می‌شود. در این مدل نرخ تشکیل دوده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{sootf} = C_{soot} P_{fu} \phi^3 \exp(-E/RT) \quad (19)$$

که در آن  $C_{soot}$  ثابت تشکیل دوده ( $\text{kg/N.m.s}$ )،  $P_{fu}$  فشار جزئی بخار سوخت ( $P_a$ )،  $\phi$  نسبت هم‌ارزی و  $E/R$  دمای فعال‌سازی (K) است. نرخ احتراق دوده با استفاده از مدل مگنسن [16] می‌شود:

$$R_{soot,c} = \text{Min} \left\| \left| A Y_{soot} \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \right|, A \frac{Y_{O_2}}{S_{soot}} \right. \\ \left. \left| \frac{Y_{soot} S_{soot}}{S_{soot} Y_{soot} S_{soot} + Y_{fu} S_{fu}} \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \right| \right\| \quad (20)$$

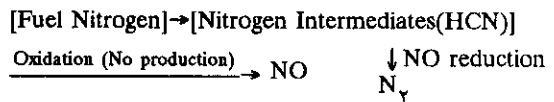
که در آن  $A$  ثابت مگنسن،  $Y$  کسر جرمی  $S_{fu}$  و  $S_{soot}$  به ترتیب جرم اکسیژن لازم برای احتراق دوده و سوخت در حالت استوکیومتری می‌باشد. مقادیر عددی استفاده شده برای این کمیتها چنین است:  $C_s = 1/5 \text{ kg/N.m.s}$ ،  $A = 4$ ،  $s_{fu} = 3/6363$ ،  $S_{soot} = 2/6667$ ،  $\phi = 3$  و  $E/R = 20000$ . در این مدل معادله انتقال و پخش دوده

به صورت زیر است:

$$\rho \frac{\partial Y_{soot}}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial Y_{soot}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_{soot}} \frac{\partial Y_{soot}}{\partial x_i} \right) + S_{soot} \quad (21)$$

که در آن  $Y_{soot}$  کسر جرمی دوده،  $\sigma_{soot}$  عدد پراشتل مغشوش برای ترابری دوده و  $R_{soot}$  نرخ خالص تولید دوده است که از رابطه  $R_{soot} = R_{sootf} - R_{sootc}$

حاوی نیتروژن حاصل می‌شود که می‌توانند به  $NO_x$  تبدیل شوند. با توجه به اینکه سیانید نیتروژن (HCN) رادیکال غالب است مکانیزم پذیرفته شده برای تشکیل NO سوختی به صورت زیر است [18]:



این مکانیزم شامل تشکیل HCN از نیتروژن سوخت و سپس انجام دو واکنش: اکسیداسیون آن به NO و ترکیب آن با بخشی از NO و تشکیل  $N_p$  می‌باشد. انتقال و پخش HCN در داخل محفظه احتراق از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial x_i} \right) + S_{HCN} \quad (17)$$

جمله چشمه معادله (17) با توجه به دو واکنش مکانیزم فوق

می‌شود:

$$S_{HCN} = \frac{S_{fu} m_{Nfu} M_{HCN}}{M_N V} - (R_1 - R_p) \frac{M_{HCN} P}{RT} \quad (18)$$

که در آن  $S_{fu}$  نرخ تبخیر سوخت ( $\text{kg/s}$ )،  $m_{Nfu}$  کسر جرمی نیتروژن در سوخت،  $T$  دما (K)،  $P$  فشار (Pa)،  $M_{HCN}$  جرم مولکولی HCN،  $V$  حجم المان شبکه و  $R_1$  و  $R_p$  نرخهای تبدیل HCN ( $1/s$ ) می‌باشند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R_p = A_p X_{HCN} X_{NO} \exp\left(\frac{-E_p}{RT}\right)$$

و

$$R_1 = A_1 X_{HCN} X_{O_2} \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right)$$

در روابط فوق  $X$  کسر مولی،  $A_1 = 3/5 \times 10^{10} 1/s$ ،  $E_1 = 67000 \text{ cal/mol}$  و  $A_p = 3 \times 10^{12} \text{ cal/mol}$ . با توجه به اینکه NO در واکنش اول تولید و در واکنش دوم مصرف می‌شود جمله چشمه حاصل از NO سوختی برای معادله (12) از رابطه  $S_{NO} = (R_1 - R_p) \frac{M_{NO}}{RT}$  به دست می‌آید.

محاسبه می‌شود.

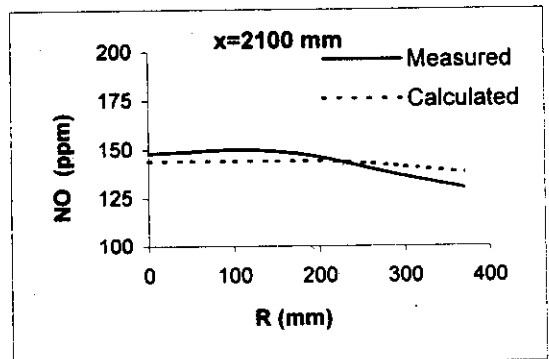
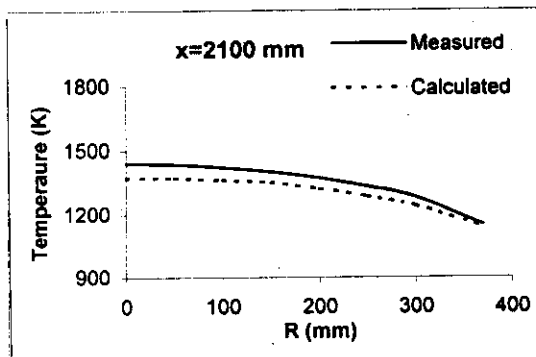
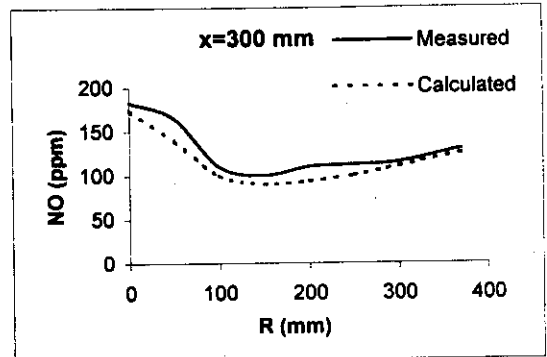
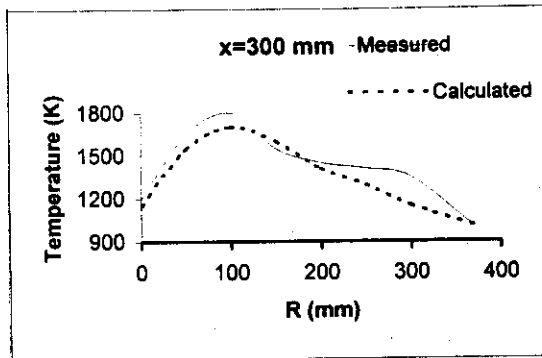
می‌شوند. در هر گام، مکان و سرعت قطرات تعیین و تبادل جرم و انرژی بین دو فاز محاسبه می‌شود. محاسبات برای قطر قطرات سوخت ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون، زاویه پاشش ۶۰ درجه، سرعت ورودی  $u_{vel} = 25 \text{ m/s}$  و  $v_{vel} = u_{vel} \tan \alpha_{inj}$  و دمای ورودی سوخت ۴۰ درجه سلیسیوس انجام شده است. دمای جدار کوره در  $1000 \text{ K}$  ثابت فرض شده است.

### نتایج

در شکل‌های (۲ و ۳) پروفیل‌های تغییرات شعاعی دما و آلاینده‌ها به دست آمده از دو روش آزمایشگاهی و محاسباتی در دو مکان محوری: نزدیک مشعل ( $x=2100 \text{ mm}$ ) و دور از مشعل ( $x=300 \text{ mm}$ ) مقایسه شده است. نتایج برای کوره به طول ۴/۲۵ متر و نسبت سوخت به هوای ۰/۸۲ به دست آمده است. در شکل (۲) مشاهده می‌شود که پروفیل‌های تغییر دما و NO در

### حل عددی معادلات و شرایط مرزی

شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی و مدل‌سازی احتراق و تشکیل آلاینده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Fluent و یک نرم‌افزار کمکی [23] انجام شده است. معادلات اولری فاز گاز با استفاده از روش حجم‌های معیار [24] گسسته شده و با متدی که ترکیبی از دو روش تکرار گوس سایدل و الگوریتم ماتریس سه‌قطری است، حل می‌شود. برای همگرایی از ضرایب تخفیف ۰/۳ برای میدان جریان و ۰/۴ برای گونه‌های شیمیایی از جمله آلاینده‌ها استفاده شده است. معیار همگرایی  $1 \times 10^{-5}$  است. بررسی همگرایی روی سرعتها، انتالپی، کسر جرمی دوده و NO انجام شده است. برای تعیین مشخصات فاز پراکنده، معادلات لاگرانژی فاز مایع با انتگرال‌گیری برای گام‌های زمانی معین حل

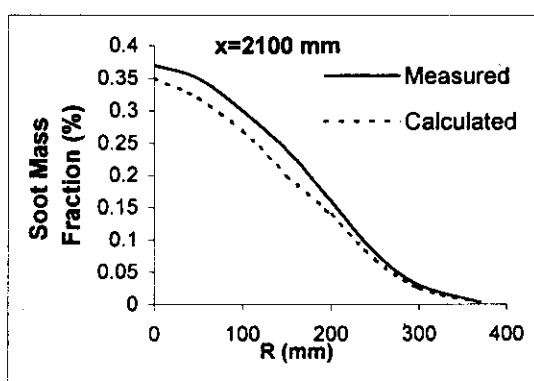
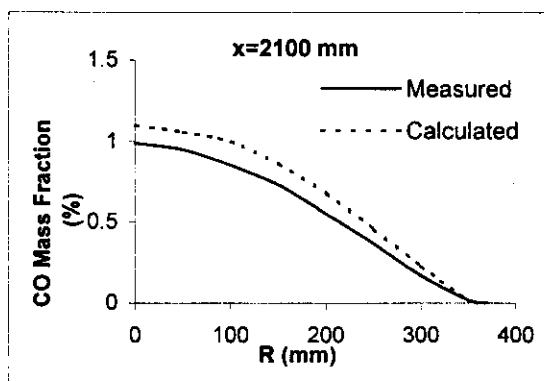
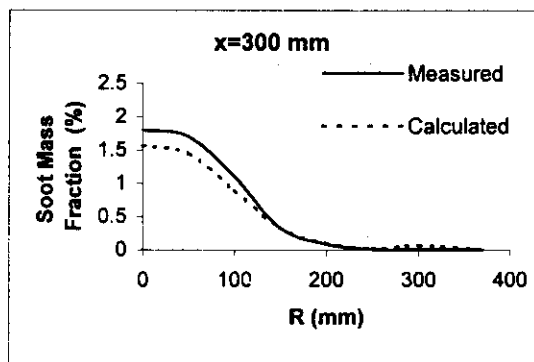
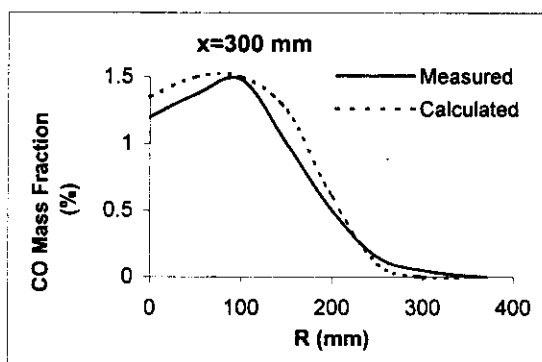


شکل ۲. تغییرات شعاعی دما و منواکسید ازت در دو مقطع محوری کوره

علت استفاده از مدل دو مرحله‌ای احتراق باشد که آزاد شدن انرژی را محدود به انجام دو واکنش می‌کند. بدیهی است که کاربرد مدل‌های احتراق با مراحل کاملتر و در نظر گرفتن اکسیداسیون گونه‌های میانی می‌تواند نتایج دقیقتری برای احتراق ارائه نماید. در شکل (۲) دیده می‌شود پائین بودن سطح دمای محاسبه شده از طریق مکانیزم حرارتی بر مقدار NO شبیه‌سازی شده اثر گذاشته و مقدار NO کمتری محاسبه شده است. محاسبات نشان داد که حدود ۱۰٪ کل NO تولیدی NO سوختی است که این می‌تواند به علت مقدار نسبتاً کم نیتروژن در سوخت (۰/۰۹۰٪) باشد.

مقایسه تغییرات شعاعی دوده و متواکسید کربن به دست آمده از دو روش تئوری و آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان می‌دهد که مدل استفاده شده برای

مقطع مجاور مشعل ( $x=300\text{ mm}$ ) بسیار غیرخطی است اما، همانطور که انتظار می‌رود، در فاصله دور از مشعل تغییر شعاعی متغیرها یکنواخت است. دیده می‌شود که برای مقطع  $x=300\text{ mm}$ ، دمای ماکزیمم در  $r=100\text{ mm}$  یعنی در محلی که غلظت بخارات سوخت پاشش شده از نازل ۶۰ درجه زیاد است، حاصل می‌شود. نتیجه قابل توجه اینکه غلظت NO به دست آمده در این منطقه کمترین است که آن می‌تواند به دلیل مصرف بالای اکسیژن توسط سوخت و کندی تشکیل NO باشد. مقایسه نتایج دو روش محاسباتی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روش تئوری تغییرات شعاعی دما و NO را از نظر روند کیفی تغییر مشابه نتایج آزمایشگاهی و از نظر کمی مقداری کمتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌یابی می‌کند. پائین بودن سطح دمای محاسبه شده می‌تواند به



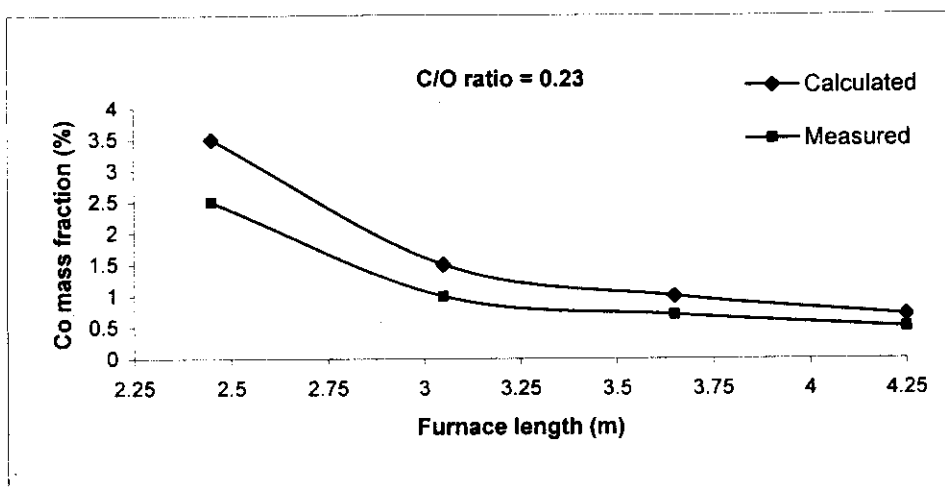
شکل ۳ تغییرات شعاعی متواکسیدکربن و دوده در دو مقطع محوری کوره



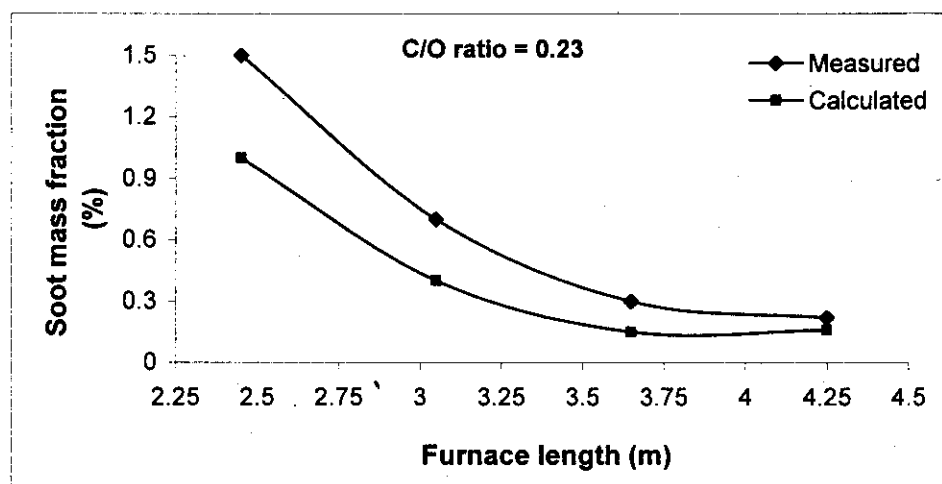
کوره موجب اتلاف انرژی موجود در سوخت می‌شود، این می‌تواند یک دلیل برای پائین محاسبه شدن دما در شکل (۲) باشد.

در شکل‌های (۴ تا ۶) اثر طول کوره بر غلظت آلاینده‌های خروجی از کوره به دو روش اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. مقایسه نتایج دو روش توافقی رضایتبخشی بویژه از نظر روند کیفی تغییرات را نشان می‌دهد.

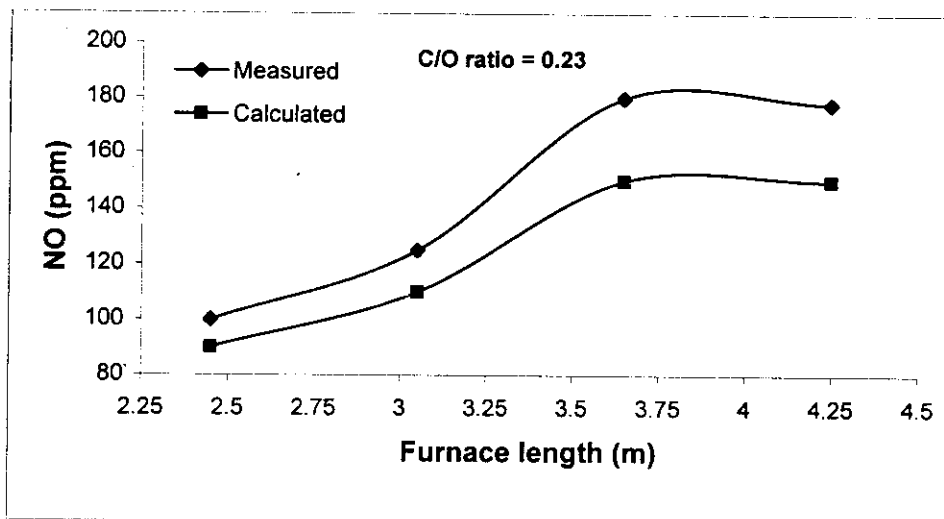
محاسبه دوده با دقت بالایی کسر جرمی دوده را در دو مقطع کوره پیش‌یابی نموده است. بیشترین تفاوت در اطراف محور مرکزی می‌باشد که آن می‌تواند به علت استفاده از ضرایب تجربی در مدل پیش‌یابی دوده باشد. از طرفی کسر جرمی CO که توسط مدل احتراق دو مرحله‌ای پیش‌یابی شده، بویژه در مناطق مرکزی کوره بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده، پیش‌یابی شده است. با توجه به اینکه بالا بودن مقدار CO خروجی از



شکل ۴ اثر طول کوره بر کسر جرمی منواکسیدکربن خروجی از کوره



شکل ۵ اثر کوره بر کسر جرمی دوده خروجی از کوره تونلی



شکل ۶ اثر طول کوره بر غلظت منواکسید ازت خروجی از کوره

با توجه به نتایج منطقی روش محاسباتی در مقایسه با روش آزمایشگاهی، این روش همچنین برای بررسی اثر نسبت C/O ورودی به کوره بر تولید آلاینده‌ها در داخل کوره مورد استفاده قرار گرفت. شکل‌های (۷ تا ۹) اثر نسبت C/O را بر توزیع آلاینده‌های به ترتیب CO، دوده و NO در امتداد محور مرکزی کوره نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در احتراق با هوای اضافی (نسبت سوخت به هوا ۰/۸۲)، افزایش نسبت C/O ورودی موجب افزایش تولید کلیه آلاینده‌ها می‌شود. شکل‌های (۷ و ۸) نشان می‌دهد که توزیع کسر جرمی منواکسیدکربن و دوده در امتداد محور مرکزی کوره با دور شدن از مشعل ابتدا به علت احتراق ناقص و تجزیه حرارتی سوخت پاشش شده به یک ماکزیمم افزایش یافته و سپس در اثر اکسیداسیون ماکزیمم برای هر دو آلاینده با افزایش مقدار نسبت C/O افزایش پیدا می‌کند. شکل (۹) نشان می‌دهد که غلظت NO نیز در امتداد محور مرکزی کوره با دور شدن از مشعل ابتدا تا یک ماکزیمم افزایش پیدا

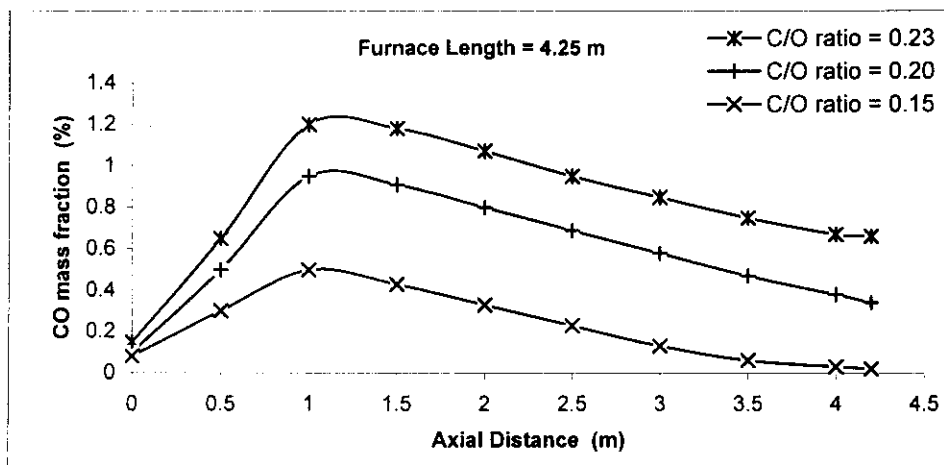
بررسی سه شکل (۴ تا ۶) نشان می‌دهد که طول کوره تونلی اثر قابل توجهی بر انتشار آلاینده‌های خروجی دارد. مشاهده می‌شود، با افزایش طول کوره کسر جرمی CO و دوده کاهش و غلظت گاز NO ابتدا بسرعت تا یک ماکزیمم افزایش یافته و سپس کمی کاهش پیدا می‌کند. کاهش کسر جرمی منواکسیدکربن و دوده در اثر افزایش طول کوره می‌تواند به علت فراهم شدن زمان بیشتر برای اکسیداسیون و احتراق کامل آنها در داخل کوره باشد. افزایش ابتدایی غلظت NO در اثر افزایش طول کوره می‌تواند به دلیل افزایش افت فشار، کاهش سرعت گازهای احتراقی، افزایش زمان اقامت سوخت در کوره و افزایش دما در اثر احتراق کامل آن، و در نتیجه ایجاد شرایط مناسب برای تشکیل NO حرارتی باشد. کاهش مقدار NO در طولهای نسبتاً زیاد کوره می‌تواند در اثر کاهش دما به علت افزایش انتقال حرارت از جدار، انتقال حرارت تابشی و جریان معکوس گازهای نسبتاً سرد انتهای کوره در اثر حرکت ورتکسی گازهای احتراقی باشد.

سوخته‌های مایع، غلظت گاز NO با استفاده از دو مکانیزم NO سوختی و NO حرارتی محاسبه شده است. مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی توافق مطلوبی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد به طور کلی افزایش طول کوره‌های تونلی موجب کاهش آلاینده‌های منواکسیدکربن و دوده می‌شود. افزایش طول کوره اثر ناچیزی بر غلظت NO دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در روی محور مرکزی نقاطی که در آنها کسرهای جرمی منواکسیدکربن و دوده بیشینه می‌شود، بر هم منطبق اما نقطه بیشینه غلظت گاز NO در فاصله محوری دورتری از مشعل قرار دارد. شناخت محل ماکزیمم نقاط NO از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا با کاهش دادن دمای این نقاط (به عنوان مثال با قراردادن لوله‌های آب سرد) می‌توان تولید و انتشار  $\text{NO}_x$  را کاهش داد.

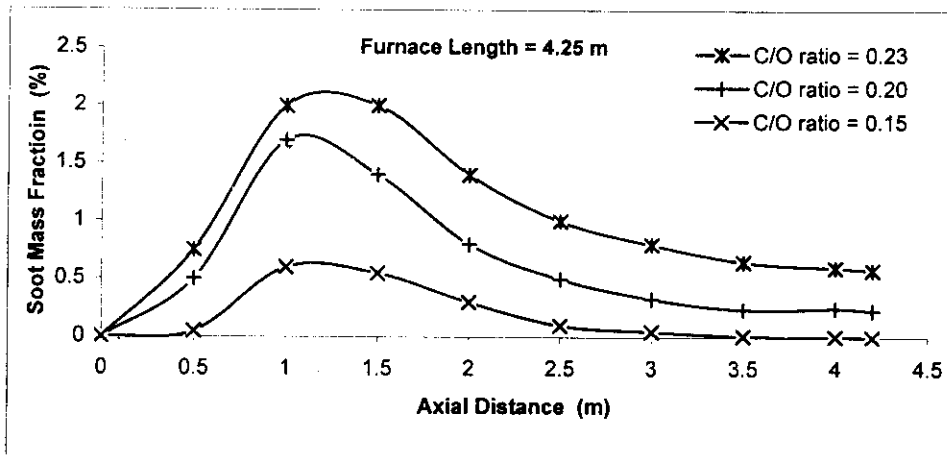
می‌کند و سپس تقریباً در این مقدار ثابت باقی می‌ماند. مقایسه شکل‌های (۹ تا ۷) نشان می‌دهد که مکانهای ماکزیمم شدن آلاینده‌های منواکسیدکربن و دوده تقریباً بر هم منطبق و نزدیک به پایه شعله یعنی در منطقه غنی از سوخت قرار دارد در حالیکه مکان ماکزیمم شدن اکسیدهای ازت در فاصله دورتری نسبت به مشعل در منطقه داغتر شعله قرار دارد.

### نتیجه‌گیری

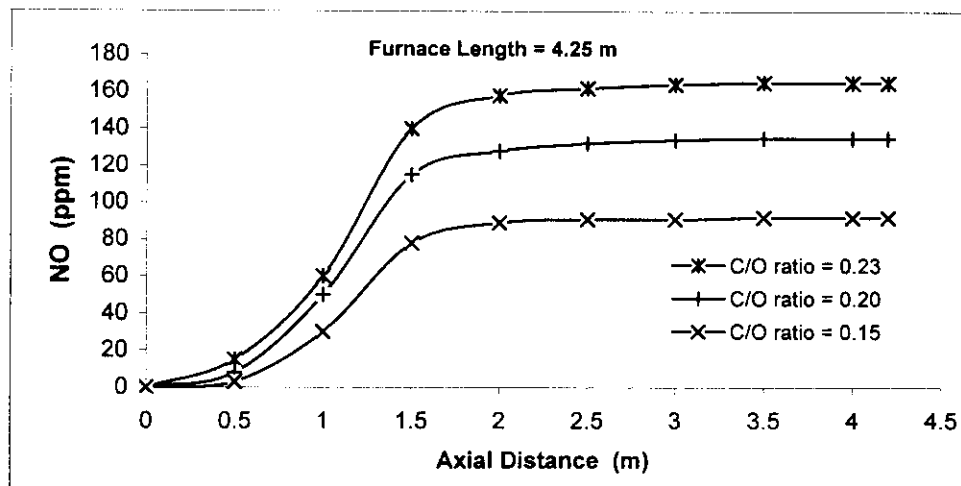
تولید و نشر آلاینده‌های مهم هوا در یک کوره تونلی سوخت مایع با توان ماکزیمم ۲MW به دو روش آزمایشگاهی و محاسباتی ارزیابی و مورد مقایسه قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Fluent و نرم‌افزار کمکی برای محاسبه NO انجام شده است. با توجه به وجود نیتروژن در



شکل ۷ اثر نسبت C/O ورودی بر تغییرات کسر جرمی منواکسیدکربن در روی محور مرکزی کوره



شکل ۸ اثر نسبت C/O ورودی بر تغییرات کسر جرمی دوده در روی محور مرکزی کوره تونلی



شکل ۹ اثر نسبت C/O ورودی بر تغییرات غلظت منواکسیدازت در روی محور مرکزی کوره

مراجع

1. Barbieri, L., Sesana, L., Tebaldi, G., Valentini, M., Bacci, P., "Urban pollution", *International Conference on Air Pollution*, pp. 705-716, (1997).
2. Solomon, A. S. P., "A theoretical and experimental investigation of turbulent sprays", Ph. D. Thesis The Pennsylvania State University, (1984).

3. Pikman, B., Sousa, F. and Carvalho, J., "Diagnostics of pollution emissions from the steam generations at a power station", *5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Port-Portugal*, (2000).
4. Wellburn, A., "Air pollution and acid rain", Longman Group, (1988).
5. Haynes, B. S. and Wagner, H. G., "Soot formation", *Prog. Energy Combust. Sci*, Vol. 7, pp. 229-273, (1981).
6. Kim, H. S., Beak S. W. and Yu, M. J., "Formation of nitric oxide in a multi-staged air PLG flame", 18th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Seattle, Washington, (2001).
7. Varga, Z., Novak, P. and Butala, V., "Development of hot water fire-tube boiler with reduced  $\text{NO}_x$  and increased thermal efficiency", *5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Port-Portugal*, (2000)
8. Pirouzpanah, V. and Omid Kashani, B., "Development of a mathematical model for prediction of pollutants emission in D.I. diesel engines", *International Journal of Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 37-42, (1998).
9. Ishii, I., Zhang, C. and Sugiyama, S., "Numerical simulations of highly preheated air combustion in an industrial furnace", *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 120, No. 4, pp. 276-284, (1998).
10. Brooks, S. J. and Moss, J. B., "Predictions of soot and thermal radiation properties in confined turbulent jet diffusion flames", *Combustion and Flame*, 116:486-503, (1998).
11. Wild, P. N., Boysan, F. and Swithenbank, J., "Spray combustor modeling", *Journal of the Institute of Energy*, V. 61, No. 446, pp. 27-32, (1988).
12. Aggarwal, S. K. and Chitre, S., "Computations of turbulent evaporating sprays", *J. PROPULSION*, Vol. 7, No. 2, (1991).
13. Xia, J. L., Yadigaroglu, G., Liu, Y. S., Schmidli, J. Smith, B. L., "Numerical and experimental study of swirling flow in a model combustor", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 11, pp. 1485-1497, (1998).
14. Ranz, W. E. and Marshal, W. R., Jr. *Evaporation from Drops, Part II, Chem. Eng. Prog.* 48, (4): 173-180, (1952).
15. Kuo, K. K. Y., "Principles of combustion", John Wiley and Sons, New York, (1996).
16. Magnussen, B. F. and Hjertager, M. H., "On mathematical modeling of turbulent combustion, with a special emphasis on soot formation and combustion", 16th Symp. (Int.), on Combustion, The Combustion

- Institute, pp. 716-729, (1977).
17. Hanson, R. K. and Salimian, S., "Survey of rate constants in H/N/O system", Combustion Chemistry (Ed. W. C. Gardiner), (1984).
  18. Drake, M. C., Correa, S. M., Pitz, R. W., Shyy, W. and Fenimore, C. P., "Super equilibrium and thermal nitric oxide formation in turbulent diffusion flames", Combustion and Flame", 69:347-365, (1987).
  19. De Soete, G. G., "Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen", In 15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1093-1102, (1975).
  20. De Soete, G. G., "Fundamental chemistry of NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> formation and destruction", Lecture 6, Third Flame Research Course, IFRF, The Netherlands, (1990).
  21. Khan, I. M. and Greeves, G., "A method for calculating the formation and combustion of soot in diesel engines", In N. H. Afgan and J. M. Beer. Editors, Heat Transfer in Flames, Chapter 25, Scripta, Washington DC, (1974).
  22. Kennedy, Ian M., "Models of soot formation and oxidation", Progress in Energy and Comb. Science, Vol. 23, pp. 95-123, (1997).
  23. Nox post-processor user manual, Version 4.3, Fluent Europe, UK, (1994).
  24. Versteeg, H. K. and Malalaseke, W., "An introduction to computational fluid dynamics-The finite volume method", 2th Edition, Longman Group, (1996).