

## تأثیر زاویه پاشش سوخت بر انتشار NO<sub>x</sub> در محفظه احتراق سوخت مایع، شبیه سازی و اندازه گیری

یاسمین خضرای<sup>۱</sup>، کاظم بشیرنژاد<sup>۲</sup>، حمید ممهدی هروی<sup>۳</sup>، ایمان ابریشم چی<sup>۴</sup>

دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

yasaminkhazraii@yahoo.com

### چکیده

در این مقاله تولید و انتشار آلاینده های احتراق در یک کوره استوانه ای سوخت مایع، برای زوایا و الگوهای مختلف پاشش سوخت به روش اندازه گیری آزمایشگاهی و محاسبات عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. اندازه گیری آلاینده ها برای زوایای پاشش سوخت ۴۵ و ۶۰ و ۸۰ درجه، دو الگوی پاشش مخروط میان تهی و مخروط توپر و برای نسبت هم ارزی ۰/۶۶ انجام شده است. شبیه سازی عددی جریان دوفازی و مدل سازی احتراق و تشکیل آلاینده ها با استفاده از نرم افزار Fluent6.32 انجام شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی توافق خوبی دارند. نتایج نشان می دهند که افزایش زاویه پاشش موجب کاهش انتشار مونواکسید کربن و افزایش انتشار NO<sub>x</sub> می گردد. با افزایش زاویه پاشش سوخت قطر ذرات سوخت خروجی از نازل کاهش می یابد که باعث افزایش سطح تماس بین سوخت و هوا شده و اختلاط بین سوخت و هوا را افزایش می دهد. بنابراین با افزایش زاویه پاشش احتراق کاملتری انجام گرفته است و بیشینه دمای شعله افزایش می یابد و غلظت NO<sub>x</sub> که شدیداً متأثر از بیشینه دما است افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: آلاینده - NO<sub>x</sub> - احتراق سوخت مایع - زاویه پاشش سوخت.

### ۱- مقدمه

بخش قابل توجهی از آلاینده های مهم هوا از احتراق سوخت مایع تولید و به هوا انتشار پیدا می کند. سوخت مایع به طور گسترده ای در بویلرها، کوره های صنعتی و محفظه های احتراق توربین های گازی مورد استفاده قرار می گیرد. اکسیدهای گوگرد، مونواکسید کربن، دوده و اکسیدهای نیتروژن مهمترین آلاینده های انتشار یافته از شعله های پخشی سوخت های مایع در کوره ها می باشد. آلودگی های ناشی از اکسیدهای نیتروژن، اثرات زیان باری بر سلامت انسان و محیط زیست برجای می گذارند و همچنین نقش مهمی در تشکیل باران های اسیدی، مه دود شیمیایی و سوراخ شدن لایه ازن دارند. میزان تولید سالیانه این گازها از سال ۱۹۵۰ تا کنون ۶ برابر شده است. به مجموعه NO، NO<sub>2</sub> و NO<sub>x</sub> گفته می شود که طی فرایندهای احتراقی با واکنش شیمیایی نیتروژن هوای ورودی و یا نیتروژن موجود در سوخت تشکیل می شود. گونه های آلاینده تشکیل شده به طور اهم وابسته به دما و نسبت سوخت به هوا در ناحیه احتراق هستند. تقریباً ۹۰ تا ۹۵ درصد NO<sub>x</sub> تشکیل شده در پروسه احتراق، NO و مابقی NO<sub>2</sub> است. البته با توجه به نوع شعله و سایر عوامل وابسته سهم هر یک از این گونه ها در یک فرایند احتراقی می تواند تغییر کند [1].

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

۴- دانشجوی کارشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

اثرات سوء و مخرب آلاینده ها بر روی محیط زیست سبب شده است که طراحی دستگاههای احتراق تمیز از اهداف اصلی پژوهشگران مهندسی احتراق باشد. در این ارتباط علاوه بر روشهای آزمایشگاهی، تکنیکهای عددی همراه با مدلسازی های ریاضی به عنوان ابزاری کارآمد مورد استفاده طراحان قرار می گیرد. کاربرد روشهای محاسباتی برای شبیه سازی احتراق دوفازی سوخت مایع از پیچیدگی های زیادی برخوردار است زیرا علاوه بر محاسبه تبادل جرم و انرژی بین دو فاز گاز و مایع، مدلسازی ریاضی تشکیل آلاینده ها نیز نیاز به دقت دارد [2].

احتراق سوخت مایع به وسیله پارامترهای شناخته شده ای مثل اتومیزه کردن جت سوخت مایع، تبخیر قطرات، اختلاط سوخت و اکسید کننده کنترل می شود [3]. کنترل سرعت، زاویه پاشش و الگوی پاشش سوخت توسط نازل مشعل انجام می پذیرد. تحقیقات بسیار گسترده ای در زمینه تاثیر طراحی نازل، شرایط کاری و خواص سوخت بر روی مشخصه های احتراق و پاشش سوخت های هیدروکربنی انجام شده است [4-6]. اغلب تحقیقات انجام شده، بر روی نازل های به کار رفته در محفظه های احتراق توربین های گازی و بویلرها متمرکز شده اند. آنچه که در احتراق توربین های گازی اهمیت دارد، بازدهی بالای گرمایی و انتشار بسیار ناچیز آلاینده ها است. با افزایش دمای ورودی توربین می توان به راندمان بالاتری رسید و کاهش آلاینده های احتراق، نیازمند طراحی بهینه محفظه احتراق است. تحقیقات بسیار گسترده ای در زمینه رفتار قطره و مشخصه های پاشش، در توربین ها تحت فشار بالا صورت گرفته است [7]. آلودگی ناشی از بویلرها با سوخت مایع، که در وسایل گرمایی خانگی استفاده می شوند، یکی از مسائل مهم مرتبط به آنهاست. انتشار آلاینده ها در بویلرها با سوخت مایع، وابسته به هندسه مشعل و محفظه احتراق است [8].

در گذشته، اغلب تحقیقات بر پایه تکنیک ها و روش هایی، برای بهبود راندمان احتراق و کیفیت اتومیزه کردن بنیان گذاری شده بود. بهبود راندمان مشعل مستلزم مطالعه مشخصه های پاشش نازل است. اخیراً، اکثر تحقیقات به بررسی و مطالعه مشخصه های پاشش مانند طول انفکاک، زاویه پاشش و اندازه و توزیع قطرات در نازل های تجاری مشعل در مقیاس کوچک پرداخته اند [9].

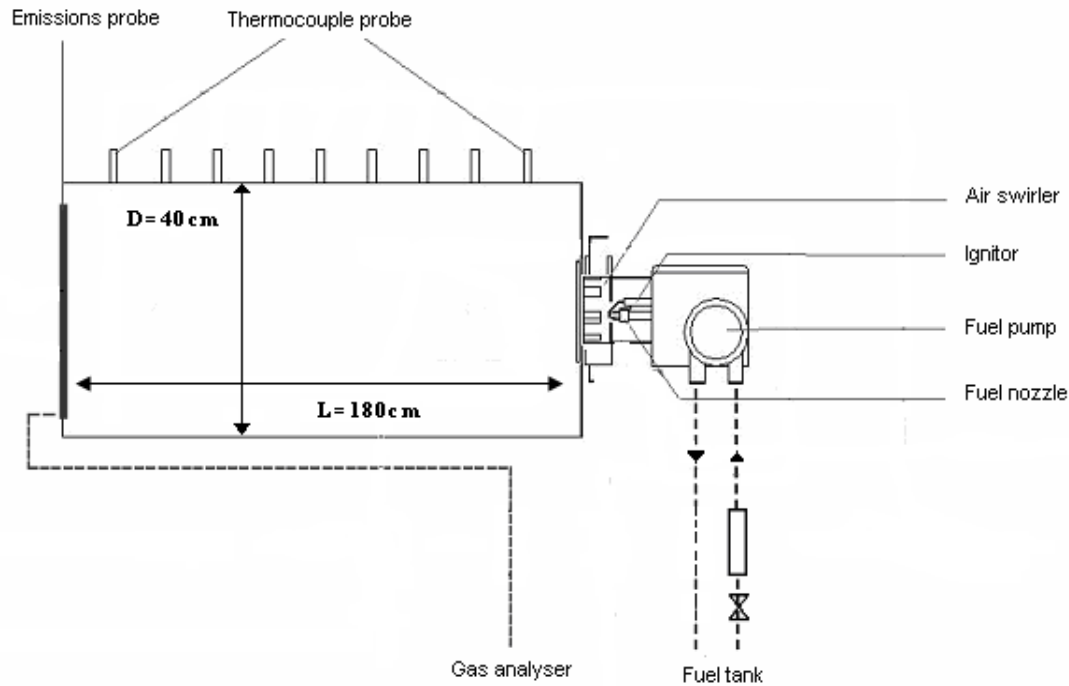
هدف از این پژوهش مطالعه تولید و نشر آلاینده های هوا از کوره سوخت مایع و بررسی اثر زاویه پاشش سوخت بر انتشار آلاینده ها با استفاده از دو روش اندازه گیری آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی می باشد. به منظور محاسبه  $NO_x$  از دو مکانیزم  $NO$  حرارتی و  $NO$  سوختی استفاده می شود و نتایج دو روش مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

## ۲- روش آزمایشگاهی

کوره آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش شامل یک استوانه افقی با طول ۱۸۰ و قطر ۴۰ سانتی متر است. شماتیک سیستم آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. جهت جلوگیری از انتقال حرارت و کنترل دمای بدنه کوره، اطراف آن با پشم سنگ ۱۲۶۰ (معروف به پتوی هندی که تحمل دما تا ۱۲۶۰ درجه سانتی گراد را دارد) با ضخامت ۵۰ میلیمتر پوشانیده شده است. سه نازل تجاری با زوایای پاشش ۴۵، ۶۰، ۸۰ درجه و با دو الگوی پاشش میان تهی و توپر برای آزمایشات انتخاب شدند. مشعل کوره با توان ماکزیمم ۲۴۰ وات، از نوع فشاری، با فشار سوخت ورودی به نازل  $1/5$  MPa می باشد. 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 چرخشی هوای ورودی فراهم می شود. سوخت ورودی از طریق نازل به داخل کوره تزریق می شود. آزمایشات برای سوخت گازوییل که در دمای ورودی ۴۰ درجه سلیسیوس دارای گرانشی ۵/۵-۱/۵ سانتی استوک است، انجام می شود. سایر مشخصات سوخت در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

کوره آزمایشگاهی به گونه ای طراحی شده است که به راحتی می توان نازل پاشش سوخت را تعویض کرد. با توجه به اینکه زبری سطح قطعات داخل نازل بر روی اتومیزه کردن ذرات سوخت موثر است. از نازلهایی که مدارک کالیبراسیون و تایید عملکرد آنها در دسترس بوده است، استفاده شده است. کلیه اندازه گیری ها بعد از رسیدن دمای کوره به حالت پایدار انجام

می‌شود به لحاظ اینکه تغییر دمای سوخت باعث تغییر غلظت و لزجت سوخت گردیده و این عوامل تاثیر موثری بر روی اندازه قطرات سوخت می‌گذارند. در حین آزمایشات دمای هوا و سوخت ورودی تحت کنترل بوده و ثابت نگه داشته شده است. یک وسیله نمونه برداری در خروجی کوره، در دودکش به منظور آنالیز گازهای خروجی قرار گرفته است. غلظت گازهای حاصل از احتراق مانند  $CO$ ,  $CO_2$  و  $NO_x$  و راندمان احتراق با استفاده از یک دستگاه گاز آنالیزر (Testo350XL) در هر ۵ دقیقه اندازه گیری شده است.



شکل ۱- شماتیک کوره آزمایشگاهی سوخت مایع

جدول (۱): خواص گازوئیل در دمای ۲۹۵ K

Density[kgm <sup>3</sup> ]	۸۲۰
[J/kg K] $C_p$	۲۰۰۵
Vaporization Temperature[K]	۳۷۳
Boiling Point[K]	۴۶۲
[% $N_2$ ]	۰/۰۹

### ۳- معادلات حاکم

نقطه شروع محاسبات در جریان های بدون احتراق حل معادلات ناوراستوکس است. برای جریان های همراه با انتقال حرارت معادله انرژی اضافه می شود. تکمیل کننده این دسته از معادلات بقاء، معادله حالت و مشخصات خواص سیال می باشند. جریان های احتراقی شامل آزاد شدن انرژی حرارتی در اثر تبدیل گونه های شیمیایی به یکدیگر می باشند. این خصوصیات جریان های احتراقی نیاز به مدل سازی فرایند احتراق و اضافه نمودن آن به معادلات ناوراستوکس را دارند.

### ۱-۳- مدل سازی جریان دو فازی

در بسیاری از فرایندهای احتراق عملی، سوخت حالت جامد یا مایع دارد که در جریان احتراق ابتدا به فاز گاز تبدیل شده و سپس به وسیله اکسیدکننده گازی می سوزد. طبیعتاً، توجه اضافی به تغییر فاز و مرز فاز، منتهی به این نوع فرایندهای احتراق می شود که از آنها نسبت به فرایند احتراق در فاز گاز شناخت کمتری موجود است. احتراق سوخت مایع معمولاً به وسیله تزریق سوخت مایع از یک روزنه به داخل محیط احتراق فاز گاز انجام می شود. اغتشاش داخل جریان مایع، که از برش زیاد داخل تزریق کننده ایجاد می شود، موجب می شود که جریان مایع بیرون شونده از نازل به رشته های مایع درهم پیچیده، خرد شده و سپس به صورت ابر متراکمی از قطرات ظاهر شود که به حالت پرتابی از میان گاز به منطقه شعله نفوذ می کند. انتقال گرما به قطره، فشار بخار و بنابراین تبخیر سوخت به داخل گاز را افزایش می دهد، تا افروزش فاز گاز شروع شود. یک شعله غیرپیش آمیخته، قطره یا گروه قطرات را احاطه می کند و سرانجام بخار سوخت می سوزد. مجموعه این فرایندها، احتراق افشانه (Spray) نامیده می شود [10]. با فرض اینکه ذرات کروی سوخت مایع، در فاز گاز پراکنده شده و برخورد آنها به علت تبخیر سریع آنها قابل اغماض است، در سیستم لاگرانژی، معادلات پیوستگی و بقای انرژی حاکم بر ذرات را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dd_p}{dt} = -\frac{C_b}{2d_p} (1 + 0.23 \text{Re}^{1/2}) \quad (1)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{6k(2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3})(T_\infty - T_p)}{(\rho_p d_p^2 C_{p,p})} \quad (2)$$

در رابطه (۱)  $d_p$  قطر قطره و  $C_b$  ثابت تبخیر است که تابع خواص فیزیکی محیط و سوخت است که به صورت زیر تعیین می شود:

$$C_b = \frac{8k}{\rho_l C_p} \ln[1 + C_p / L(T_\infty - T_p)] \quad (3)$$

که در این رابطه  $k$  و  $C_p$  به ترتیب ضرایب هدایت حرارتی و گرمای ویژه فشار ثابت مخلوط گازی بوده و  $T_\infty$ ،  $T_p$  و  $L$  به ترتیب دمای محیط گازی، دمای قطره و گرمای نهان تبخیر سوخت می باشند. با استفاده از رابطه (۱) تغییر قطر ذرات نسبت به زمان پس از رسیدن به دمای جوش، و از رابطه (۲) نرخ تغییر دمای ذرات سوخت قابل محاسبه اند [11].

### ۲-۳- مدل سازی احتراق

در این پژوهش فرمول شیمیایی گازوئیل معادل  $C_{16}H_{29}$  فرض شده و برای احتراق آن از مدل یک مرحله ای مگنسن - هرتاگر [12] با فرض اتلاف ادی استفاده شده است. در این شبیه سازی ابتدا سوخت مایع به حالت گازی تبدیل شده و سپس احتراق صورت می گیرد. تبخیر ذرات سوخت، پس از رسیدن دمای ذرات به دمای جوش، آغاز شده و تا پایان یافتن جرم آنها، ادامه می یابد. احتراق بخار سوخت، در یک گام انجام می شود که با توجه به انتخاب مدل احتراقی مگنسن - هرتاگر، عامل موثر در نرخ واکنش، دینامیک جریان در نظر گرفته شده است. واکنش گازوئیل با اکسیژن به صورت زیر نوشته می شود:



### ۳-۳- مدل سازی اکسید نیتروژن

برای تخمین NO نیاز به حل معادله انتقال کسر جرمی آن ( $Y_{NO}$ ) می باشد. این معادله به صورت پس پردازش و پس از تعیین میدان اصلی جریان و گونه های اصلی، حل می شود. معادله انتقال جرم برای NO به صورت زیر نوشته می شود، که شامل عبارت های جابجایی نفوذی، تولید و مصرف NO است.

$$\rho \frac{\partial Y_{NO}}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO} \quad (5)$$

که در آن جمله چشمه  $S_{NO}$  با توجه به سه مکانیزم تشکیل NO: NO حرارتی، NO سریع و NO سوختی، محاسبه می شود. با توجه به اینکه در احتراق سوخته های مایع مقدار NO سریع در مقایسه با دو نوع دیگر قابل صرف نظر کردن می باشد در این تحقیق NO حرارتی و سوختی محاسبه می شوند. NO حرارتی که به وسیله اکسیداسیون نیتروژن موجود در هوای احتراق در دماهای بالا تشکیل می شود، با استفاده از مکانیزم زلدووویچ توسعه یافته [13] بیان می گردد.



که  $k_{\pm}$  ثابتها رو به جلو و رو به عقب واکنش است.

با فرض اینکه نرخ مصرف اتم های آزاد نیتروژن مساوی نرخ تولید آن است، غلظت NO از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{+1}[O][N_2] \frac{\left( 1 - \frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_{+1}[N_2]k_{+2}[O_2]} \right)}{\left( 1 + \frac{k_{-1}[NO]}{k_{+2}[O_2] + k_{+3}[OH]} \right)} \quad (9)$$

مقدار ثابتهای نرخ واکنشهای تعادلی فوق از مرجع [14] 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  $N_2$  و  $O_2$  از محاسبات احتراق تعیین می شود و غلظت رادیکال [O] و [OH] از روابط زیر بدست می آید [15]:

$$[O] = 36.64T^{1/2}[O_2]^{1/2} \exp\left(\frac{-27123}{T}\right) \quad (10)$$

$$[OH] = 212.9T^{-0.57} \exp\left(\frac{-4595}{T}\right)[O]^{1/2}[H_2O]^{1/2} \quad (11)$$

بنابراین بخشی از جمله چشمه معادله (5) از مکانیزم زلدووویچ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S_{NO,th} = M_{NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (12)$$

که در آن  $M_{NO}$  جرم مولکولی گاز NO است. تولید NO از سوخت پدیده پیچیده تری است و شدیداً به استوکیومتری شعله، مشخصه های احتراق موضعی و غلظت اولیه ترکیبات نیتروژن دار وابسته است. در اثر گرم شدن و تبخیر قطرات سوخت رادیکالهای حاوی نیتروژن مانند HCN، CN و NH، در اثر تجزیه حرارتی ترکیبات حاوی نیتروژن حاصل می شود که می توانند به NOx تبدیل شوند. با توجه به اینکه سیانید نیتروژن (HCN) رادیکال غالب است مکانیزم پذیرفته شده برای تشکیل NO سوختی، 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<sub>2</sub> می باشد [16].



نرخهای واکنش دو رابطه فوق بر اساس اندازه گیری های دی سوت [17] به صورت زیر بیان می شود:

$$R_1 = A_1 X_{HCN} X_{O_2}^a \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \quad (15)$$

$$R_2 = A_2 X_{HCN} X_{NO} \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \quad (16)$$

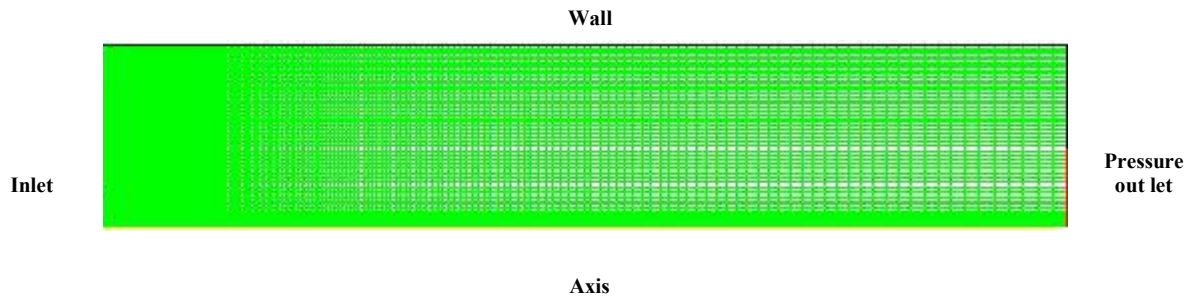
که در روابط فوق  $X$  کسر مولی،  $A_1 = 3.5 \times 10^{10} / s$ ،  $A_2 = 3 \times 10^{12}$ ،  $E_1 = 67000 cal / mol$  و  $E_2 = 60000$  می باشد. با توجه به اینکه NO در واکنش (۱۳)، تولید و در واکنش (۱۴) مصرف می شود جمله چشمه حاصل از NO سوختی برای معادله (۵) از رابطه زیر بدست می آید:

$$S_{NO} = (R_1 - R_2) \frac{M_{NO}}{RT} \quad (17)$$

#### ۴- هندسه و شرایط مرزی

ابعاد شبکه محاسباتی بر دقت نتایج محاسبات عددی و زمان انجام خیلی موثر است. گرچه با افزایش تعداد گره در هنگام شبکه بندی میدان محاسباتی، دقت نتایج افزایش می یابد اما به زمان و حافظه بیشتری نیاز می باشد. در این پژوهش ناحیه ورودی و نزدیک دیوارها که تغییرات خواص جریان بیشتر است، شبکه ظریفتر انتخاب شده است. در شکل ۲ شبکه محاسباتی محفظه احتراق نشان داده شده است. نتایج نشان داده است که بکارگیری شبکه ای ریزتر از  $400 \times 150$  سلول تغییر چندانی در جوابها ایجاد نمی کند که این موضوع مستقل بودن حل از شبکه را نشان می دهد. برای گسسته سازی عبارت های جابجایی معادلات حاکم از طرح بالادستی مرتبه اول و برای تصحیح میدان فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. برای همگرایی از ضرایب تخفیف ۰/۷ برای میدان جریان و ۰/۹ برای گونه های شیمیایی از جمله آلاینده ها استفاده شده است. معیار همگرایی

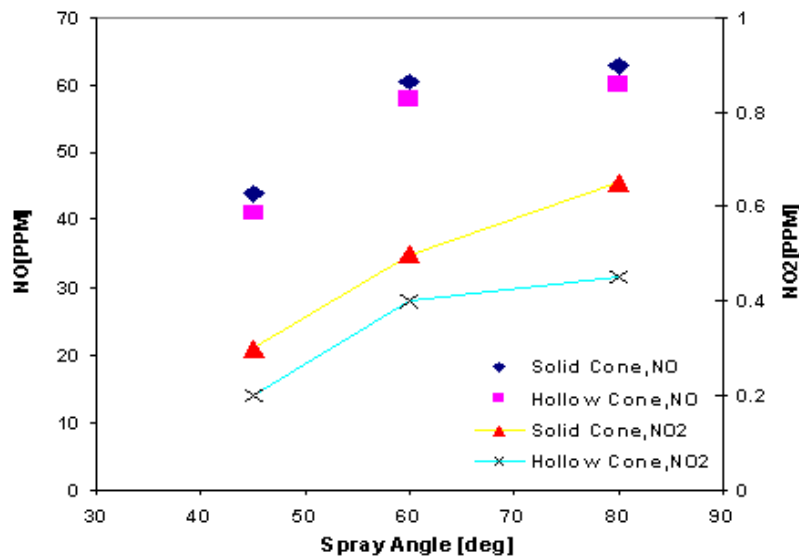
معادلات  $1 \times 10^{-6}$  است. روش حل عددی بر پایه حجم محدود و شرایط دائمی است. به علت تقارن محوری نیمی از محفظه احتراق در مختصات استوانه ای به صورت دوبعدی حل شده است. قطر نازل ورودی سوخت مایع ۱ میلیمتر و قطر قطرات سوخت ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون فرض شده است. دمای ورودی سوخت و هوا ۳۰۰ درجه کلوین و فشار ورودی یک اتمسفریک در نظر گرفته شده است. و نیز سرعت محوری ورودی هوا ۲/۵m/s و نسبت هم ارزی ۰/۶۶ می باشد. دمای جداره کوره ۷۵۰ درجه کلوین ثابت فرض شده است.



شکل ۲- شبکه محاسباتی مورد نظر

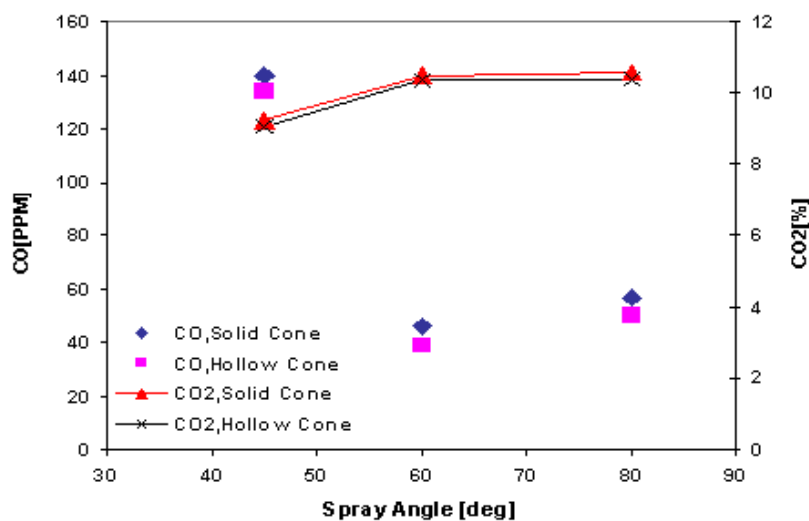
## ۵- نتایج

در شکل ۳ نتایج آزمایشگاهی تاثیر زاویه پاشش سوخت بر انتشار NO و NO<sub>2</sub> در خروجی کوره، با دو الگوی پاشش متفاوت توپر و میان تهی و نسبت سوخت به هوای ۰/۶۶ نشان داده شده است. با افزایش زاویه پاشش میزان انتشار NO نیز افزایش می یابد. افزایش غلظت NO در اثر افزایش زاویه پاشش سوخت به علت افزایش زمان اقامت سوخت در کوره و افزایش دما در اثر احتراق کامل آن، و در نتیجه ایجاد شرایط مناسب برای تشکیل NO حرارتی است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است با افزایش زاویه پاشش نازل انتشار NO<sub>2</sub> در خروجی کوره افزایش می یابد. البته غلظت NO<sub>2</sub> در مقایسه با NO بسیار ناچیز است. چراکه تقریباً ۹۰ تا ۹۵ درصد NO<sub>x</sub> تشکیل شده در پروسه احتراق، NO و مابقی NO<sub>2</sub> است. پروفیل NO<sub>x</sub> شدیداً به دمای شعله وابسته است. با افزایش زاویه پاشش، قطر ذرات سوخت خروجی از نازل کوچکتر می شود، که باعث افزایش سطح تماس بین سوخت و هوا شده و اختلاط بین سوخت و هوا را افزایش می دهد. بنابراین با افزایش زاویه پاشش احتراق کاملتری انجام گرفته و بیشینه دمای شعله افزایش می یابد [18].



شکل ۳- تاثیر زاویه پاشش بر انتشار NO و NO<sub>2</sub> در دو الگوی پاشش توپر و توخالی و نسبت هم ارزی ۰/۶۶، در خروجی کوره (آزمایشگاهی)

در شکل ۴ تاثیر زاویه پاشش بر انتشار CO و CO<sub>2</sub>، برای دو الگوی پاشش متفاوت نشان داده شده است. کاهش کسر جرمی مونواکسید کربن در اثر افزایش زاویه پاشش، به علت فراهم شدن زمان بیشتر اکسیداسیون و احتراق کامل آن می باشد. CO<sub>2</sub> با افزایش زاویه پاشش، افزایش می یابد، هر چند این افزایش چندان محسوس نیست. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی موجود توافق مناسبی دارد [19]. نتایج نشان می دهد که انتشار آلاینده ها، برای الگوی پاشش مخروط میان تهی حدوداً ۱۰٪ کمتر از مخروط توپر است. نازل ها با الگوی پاشش توخالی، برای اتومیزه کردن بهتر سوخت، به سبب توزیع شعاعی موثرتر سوخت، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. در مخروط توخالی، غلظت قطرات سوخت در لبه بیرونی پاشش بالا و هیچ سوختی یا حتی مقدار کمی سوخت، در مرکز پاشش وجود ندارد. مخروط تو خالی تحت شرایط ناسازگار، دارای ثبات بیشتری در زاویه پاشش و توزیع قطرات نسبت به مخروط توپر است. این موضوع در مورد سوخت هایی با ویسکوزیته بالا، که ممکن است منجر به کاهش زاویه موثر پاشش و افزایش اندازه قطرات گردد، قابل توجه است [20].

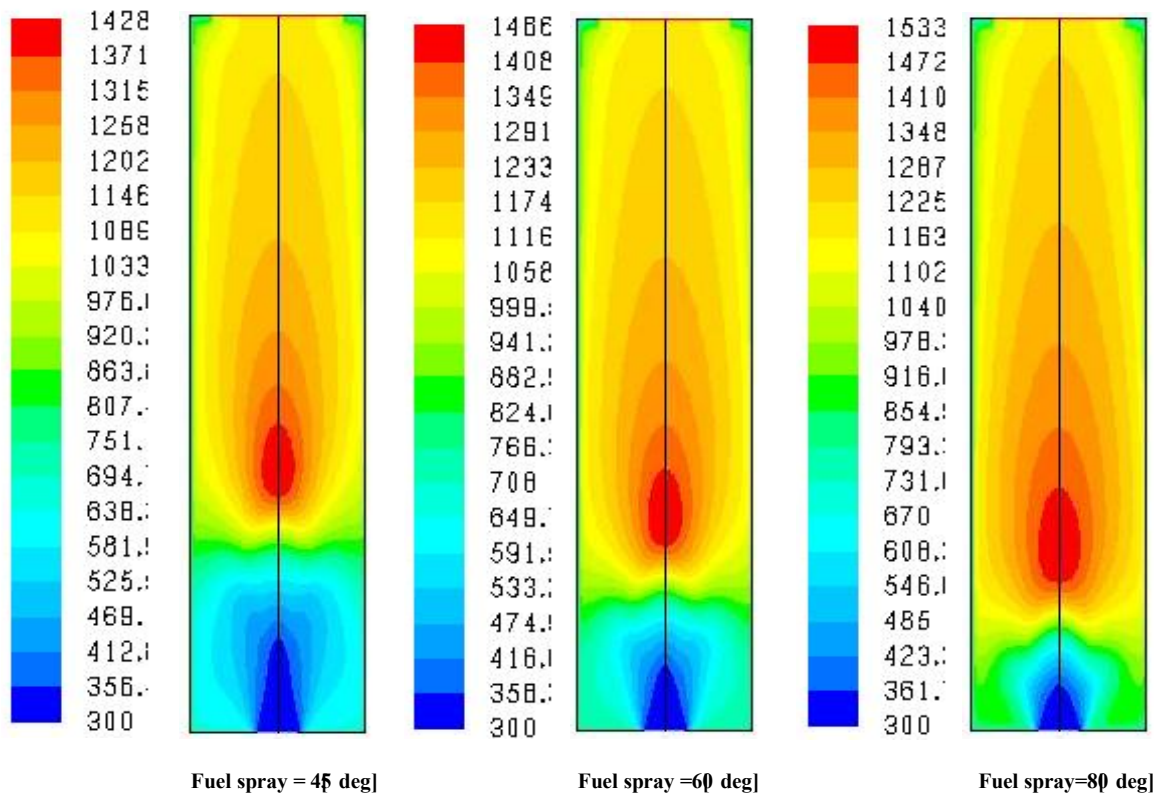




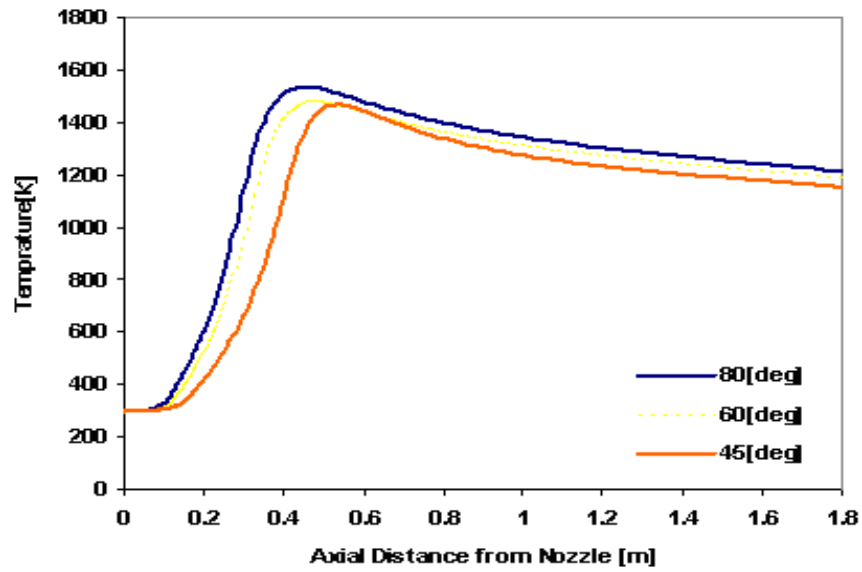
شکل ۴- تاثیر زاویه پاشش بر انتشار CO و CO<sub>2</sub> در دو الگوی پاشش توپر و توخالی و نسبت هم ارزی ۰/۶۶، در خروجی کوره (آزمایشگاهی)

در شکل ۵ کانتورهای دما در محفظه احتراق برای زوایای پاشش مختلف سوخت ۸۰، ۶۰، ۴۵ درجه نشان داده شده است. با افزایش زاویه پاشش سوخت، بیشینه دما افزایش می یابد. در زاویه پاشش ۴۵ درجه دمای بیشینه ۱۴۲۸ درجه کلوین و در زاویه پاشش ۶۰ درجه دمای بیشینه تا ۱۴۶۶ و در زاویه پاشش ۸۰ درجه دمای بیشینه تا ۱۵۳۳ درجه کلوین افزایش می یابد. در شکل ۶ اثر زاویه پاشش سوخت بر دمای محور مرکزی کوره نیز افزایش می یابد. با افزایش زاویه پاشش سوخت زمان اقامت ذرات در داخل محفظه احتراق افزایش می یابد، چرا که با افزایش زاویه پاشش به علت گسترده شدن سطح شعله، سرعت محوری ذرات کاهش می یابد و به همین دلیل محل وقوع بیشینه دمای محور مرکزی کوره با افزایش زاویه پاشش سوخت به ناحیه ورودی نزدیکتر شده است.

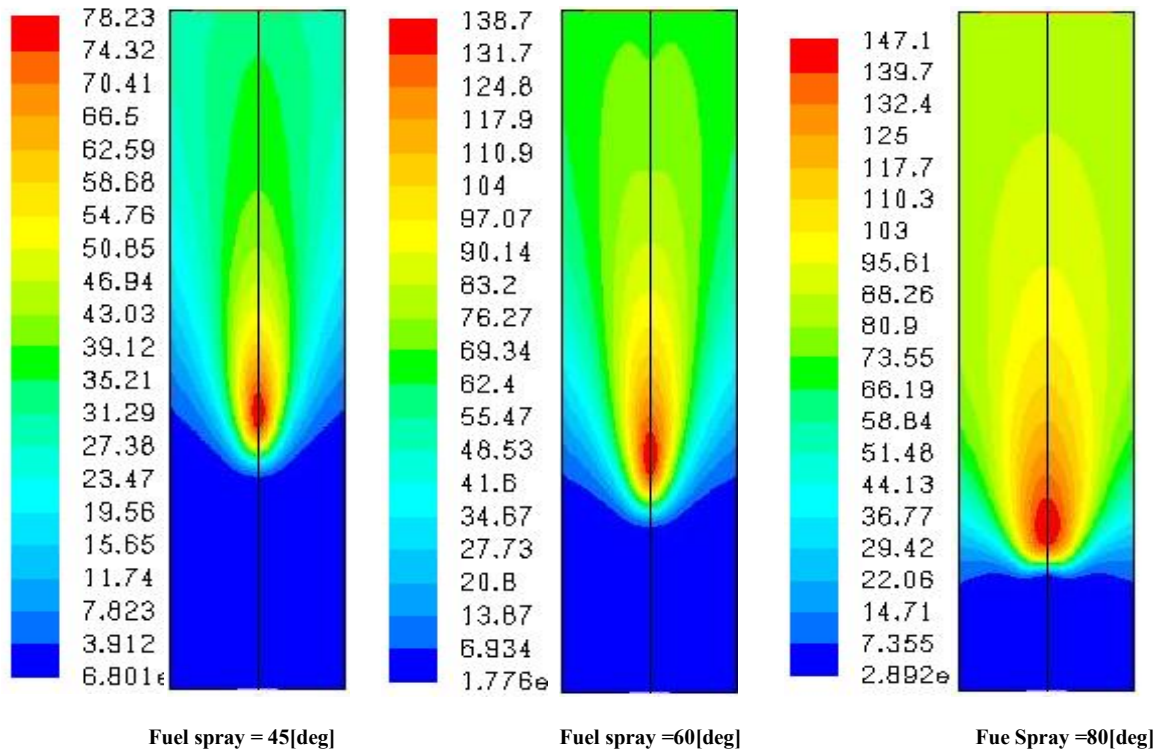
در شکل ۷ کانتور NO<sub>x</sub> بر حسب ppm برای سه زاویه پاشش سوخت ۸۰، ۶۰، ۴۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است که خروجی نرم افزار فلونت بر حسب نسبت جرمی یا مولی یا غلظت مولی است و غلظت NO<sub>x</sub> را بر حسب ppm، که در صنعت مرسوم است، نمی دهد. تابعی تجربی تعریف شده است که فلونت با استفاده از این تابع تجربی، مقدار نسبت جرمی یا مولی NO<sub>x</sub> را بر حسب ppm محاسبه کند و آن را نشان دهد.



شکل ۵- کانتورهای دما بر حسب درجه کلوین در محفظه احتراق برای زوایای مختلف سوخت

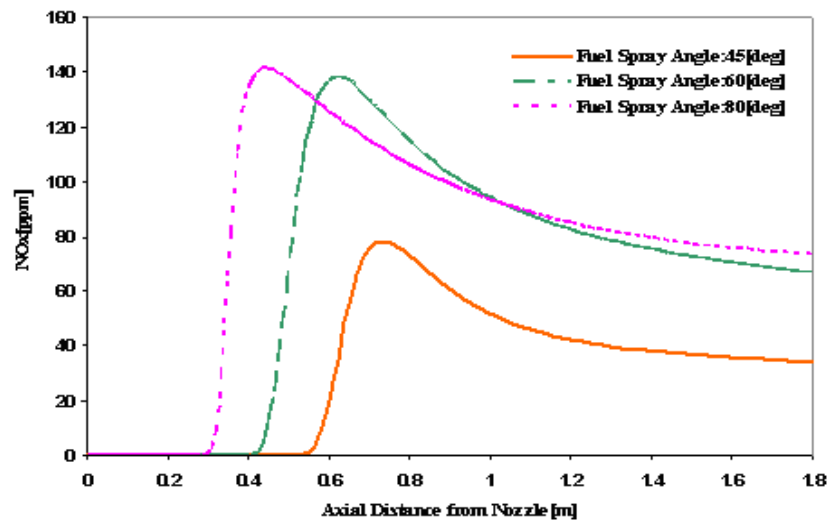


شکل ۶- تاثیر زاویه پاشش سوخت بر پروفیل دما در روی محور مرکزی کوره



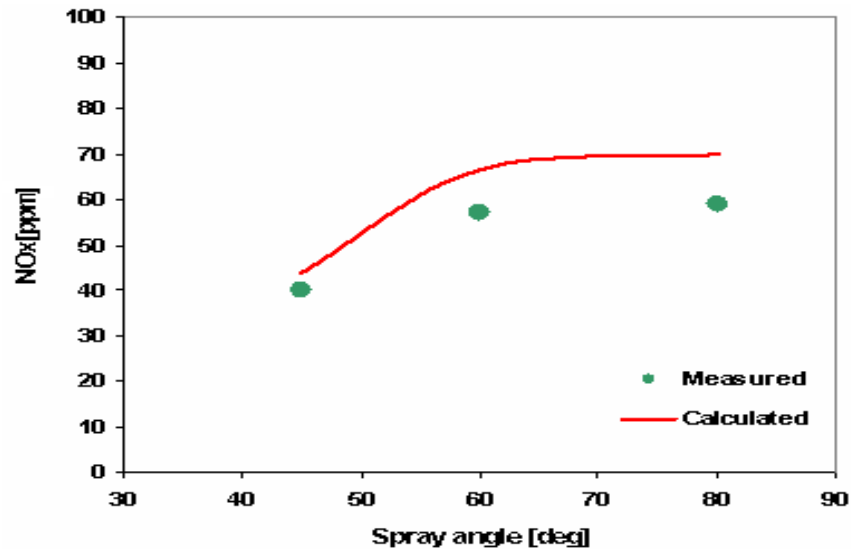
شکل ۷- کانتور NOx برحسب [ppm] در داخل محفظه احتراق برای زوایای مختلف پاشش سوخت

در شکل ۸ تاثیر زاویه پاشش بر انتشار NOx در روی محور مرکزی کوره نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که غلظت NO در امتداد محور با دور شدن از مشعل ابتدا تا یک بیشینه افزایش پیدا می کند و بعد از کمی افت تقریباً تا انتهای کوره ثابت باقی می ماند. مقایسه نتایج سه زاویه پاشش نشان می دهد که با افزایش زاویه پاشش غلظت NOx در نزدیکی نازل سوخت افزایش می یابد. تزریق سوخت در زوایای پاشش پایین باعث افزایش طول شعله می شود، به همین دلیل محل وقوع بیشینه NOx با کاهش زاویه پاشش سوخت از ناحیه ورودی کوره دورتر می شود.



شکل ۸- اثر زاویه پاشش سوخت بر غلظت NOx در روی محور مرکزی کوره

در شکل ۹ تاثیر زاویه پاشش بر انتشار NOx در خروجی کوره به صورت آزمایشگاهی و محاسبات عددی نشان داده شده است. مقایسه نتایج دو روش محاسباتی و آزمایشگاهی نشان می دهد که روش تئوری تغییرات NOx را از نظر روند کیفی تغییر مشابه نتایج آزمایشگاهی و از نظر کمی مقداری بیشتر از نتایج آزمایشگاهی را پیش بینی می کند. بالا بودن دمای محاسبه شده یکی از دلایل این افزایش است. بالا بودن سطح دمای محاسبه شده از طریق مکانیزم حرارتی بر مقدار NO شبیه سازی شده اثر گذاشته و مقدار NO بیشتری محاسبه شده است. این موضوع در زاویه ۸۰ درجه چشمگیرتر است چرا که دمای محاسبه شده در مقایسه با زاویه ۴۵ درجه حدوداً ۱۰۰ درجه کلویین افزایش داشته است. محاسبات نشان داده است که حدود ۱۰٪ کل NO تولیدی، NO سوختی است که به دلیل مقدار نسبتاً کم نیتروژن موجود در سوخت (۰/۰۹٪) می باشد. از دیگر دلایل کاهش مقدار NOx در خروجی کوره آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج مدل سازی عددی، کاهش دما به علت افزایش انتقال حرارت از جداره کوره، انتقال حرارت تابشی و جریان معکوس گازهای نسبتاً سرد انتهای کوره در اثر حرکت چرخشی گازهای احتراقی است.



شکل ۹- تاثیر زاویه پاشش سوخت بر غلظت NOx خروجی از کوره

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

تاثیر زاویه پاشش سوخت بر تولید و انتشار آلاینده های مهم هوا در یک کوره سوخت مایع به دو روش آزمایشگاهی و محاسباتی ارزیابی و مورد مقایسه قرار گرفته است. شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار فلونت ۶/۳۲ (Fluent6.32) انجام شده است. با توجه به وجود نیتروژن در سوخته های مایع، غلظت گاز NO با استفاده از دو روش مکانیزم NO سوختی و NO حرارتی محاسبه شده است. مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی توافق مطلوبی را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که افزایش زاویه پاشش سوخت موجب کاهش CO و افزایش NOx در خروجی کوره می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که در روی محور مرکزی کوره غلظت گاز NOx دارای بیشینه است. شناخت محل بیشینه نقاط NOx از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که با کاهش دمای این نقاط (به عنوان مثال با قراردادن لوله های آب سرد) می توان تولید و انتشار NOx را کاهش داد.

#### منابع و مراجع

- 1-Meunier M., Karvalho M.G., "The formation and destruction of NO in turbulent propane diffusion flames", Fuel, Vol. 77, pp.1705-1714, 1998.
- 2-Brooks, S., and Moss J. B., "Predictions of soot and thermal radiation properties in confined turbulent jet diffusion flames", Combustion and Flame, Vol. 116, pp.486-503, 1998.
- 3-Leroux B., Lacas F., Recourt P., and Delabroy O., "Coupling Between Atomization and Combustion in Liquid Fuel-Oxygen Flames", International Combustion Symposium, Hawaii, 2001.
- 4-Kim, J.I., No S.Y., Lee, Y.J., "Experimental Analysis of Break up Length in Pressure Swirl Atomizer", Annual Conference of ILASS Asia, Korea, 2001 .
- 5-Rhim, J.H., and No, S.Y., "Break up Length of Conical Emulsion Sheet Discharged by Pressure-Swirl Atomizer", Conference of ILASS, Japan, 2000 .
- 6-Tasi, R.F., and Lee, C.f, "Spray Unsteadiness in Swirl-Stabilized Flames", Conference of ILASS-Asi, Korea, 2001.



انجمن احتراق ایران

FCCI2010-1187

## سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی هوافضا

- 7-Ikeda Y., Yamada N., Tsuyosii N., and Mandai S., " *Spray Combustion Characteristics in a Highly Pressurized Swirl-Stabilized Combustor*", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 29, pp. 853-859, 2002.
- 8-Negendakumana, P., Winandy, E., " *Influence of the Burner Adjustment on Nitrogen Oxides Production in an Fuel Oil Boiler*", IEA Conference, Germany, 1994.
- 9-Laryea, G.N., and No, S.Y., " *Spray Angle and Break up Length of Charged Injected Electrostatic Pressure Swirl Nozzle*", Journal of Electrostatics, Vol. 60, pp. 37-47, 2004.
- ۱۰-مقیمان، م.، احتراق، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی، ۱۳۸۷.
- ۱۱-ترابی، م. ح.، "مدل سلزی یک محفظه احتراق و محاسبه تشکیل دوده"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، ۱۳۸۶.
- 12- Magnussen, B.F., Hiertager, B.H., Olsen, J.G. and Bhaduri, D., " *On the mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion*", Seventeenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, pp:1383-1391, 1978
- 13- Zeldovich, Y.B., Sadvnikov P.Y., " *Oxidation of Nitrogen in Combustion*", Science Academy of USSR, 1974.
- 14-Baulch D. L., Cobos C. J., Cox A., Hayman G., Murrels T., and Warnatz J., " *Compilation of rate data for combustion modelling*", Phys Ref Datapp. 23-847, 1994
- 15-Padmabhushana, R., " *Subgrid Scale Model Development and Validation for Thermal Nitric Oxide Prediction in Glass Furnaces*", Department of Mechanical Engineering, University of Utah, PHD Thesis, 2004.
- 16-Saario A., Rebola P.J., " *Heavy fuel combustion in a cylindrical laboratory furnace*", Fuel, Vol. 84, pp. 359-369, 2004.
- 17- De Soete, G.G., " *Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen*", 15 th Symposium (International) on Combustion, pp. 1093 – 1102 , 1975 .
- 18-Bashirnezhad, K., Moghiman, M., Amoli, M.J., and Zabetnia, S., " *Effect of Fuel Spray Angle on Soot Formation in Turbulent Spray Flames*", WASET, Vol. 31 pp 339-344, 2008.
- 19-Young No, S., Laryea, G.N., " *Spray and Combustion Characteristics of Hydrocarbon Fuel Injected from Pressure-Swirl Nozzles*", ILASS Conference, Korea, 2004.
- 20-Nasr G.G., Yule, A.J., and Bendig, L., " *Industrial Sprays and Atomization Design, Analysis and Application*, London, Springer, 2002.