

## بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر زاویه چرخش هوای ورودی بر دما و تشکیل آلاینده‌های CO و NO در یک کوره سوخت مایع

سید هادی پورحسینی<sup>۱\*</sup>، دانشجوی دکتری، علی سعیدی<sup>۲</sup>، دانشجوی دکتری، محمد مقیمان<sup>۳</sup>، استاد

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - ایران

hadipoorhoseini@gmail.com

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - ایران

ali\_sgn@yahoo.com

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - ایران

mmoghiman@yahoo.com

ارسال مقاله: ۹۰/۵/۵ اصلاحیه: ۹۰/۶/۲۸

پذیرش مقاله: ۹۱/۱/۳۰

**چکیده:** در مقاله حاضر، مطالعه عددی و آزمایشگاهی یک کوره سوخت مایع، جهت بررسی اثر زاویه چرخش هوای ورودی (زاویه هوای ورودی با محور مرکزی کوره) بر دما و تشکیل آلاینده‌های CO و NO انجام شده است. غلظت آلاینده‌های CO و NO در امتداد محور مرکزی کوره، توسط دستگاه گازآنالیزر اندازه‌گیری گردیده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی مسئله با نتایج آزمایشگاهی، توافق قابل قبولی را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اثر زاویه هوای ورودی بر دما و غلظت آلاینده‌های داخل کوره بسیار قابل توجه است و وجود مقدار بهینه‌ای از چرخش در جریان می‌تواند با بهبود عمل اختلاط سوخت و هوا، موجب افزایش راندمان حرارتی و کاهش آلاینده‌ها گردد. افزایش زاویه چرخش هوای ورودی از صفر تا ۷۵ درجه موجب افزایش دمای شعله و تولید NO تا یک مقدار ماکزیمم و سپس کاهش آنها می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که زوایای چرخش بزرگ هوای ورودی مانند ۷۵ درجه، باعث کاهش راندمان حرارتی و افزایش غلظت آلاینده CO در خروجی کوره می‌شود. این در حالی است که زوایای چرخش کوچک نیز کاهش راندمان حرارتی و افزایش غلظت آلاینده CO را در خروجی کوره به دنبال دارد. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، می‌توان زاویه پره‌های هوای ورودی در مشعل را به گونه‌ای طراحی کرد که تولید آلاینده‌ها و عملکرد کوره در شرایط مطلوبی باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کوره، سوخت مایع، زاویه هوای ورودی، آلاینده.

## ۱. مقدمه

احتراق سوخت‌های فسیلی، مهم‌ترین منبع آلودگی هواست. آلودگی هوا منشأ بسیاری از آثار مخرب زیست محیطی می‌باشد [۱] و [۲]. نیاز فزاینده جهان به انرژی در کنار این آثار مخرب، باعث تحقیق و پژوهش روزافزون در زمینه بهبود فرآیند احتراق جهت بالا بردن راندمان و کاهش ایجاد آلاینده‌های آن شده است.

فرآیند احتراق سوخت مایع به وسیله پارامترهای شناخته شده‌ای مانند اتمیزه کردن جت سوخت مایع، تبخیر قطرات و اختلاط بین سوخت و اکسیدکننده کنترل می‌شود [۳]. 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 مشخصه‌های احتراق و پاشش سوخت‌های هیدروکربنی انجام شده است [۴]. زاویه چرخش هوای ورودی، دیگر عامل مهم و تأثیر گذار بر نرخ اختلاط سوخت و هوا و در نتیجه راندمان احتراق و تشکیل آلاینده‌هاست.

روش‌های تولید چرخش در جریان به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: استفاده از ورودی‌های مماسی، استفاده از پره‌های راهنما و استفاده از وسایل مکانیکی دارای حرکت چرخشی مانند استوانه‌های دوار [۵]. بیشتر مشعل‌های سوخت مایع از پره‌های راهنما در مسیر جریان برای ایجاد جریان چرخشی استفاده می‌کنند [۶].

وجود چرخش در جریان، باعث کاهش سرعت جریان در امتداد محوری می‌شود. با افزایش چرخش جریان، یک ناحیه گردابی کوچک در جریان شکل می‌گیرد که مقدمه شکل‌گیری و تولید ناحیه جریان برگشتی است. این ناحیه جریان برگشتی با مکش گازهای داغ حاصل از واکنش احتراق به ناحیه داخلی شعله به عنوان یک منبع برای ذخیره گرما و گونه‌های شیمیایی فعال (رادیکال‌های آزاد) عمل می‌کند و ضمن بهبود نرخ اختلاط سوخت و هوای ورودی به محل واکنش احتراق، بر پایداری شعله نیز می‌افزاید [۷]. همچنین این عمل باعث افزایش زمان ماند گازهای داغ تابش کننده در شعله شده و افزایش راندمان حرارتی را نیز به دنبال خواهد داشت. وسایل ایجاد چرخش در جریان، ضمن ایجاد جریان‌های گردابی با تولید و تقویت اغتشاش در جریان باعث می‌شوند تا علاوه بر مکانیزم نفوذ مولکولی، انتقال جرم و حرارت از طریق گردابه‌ها نیز سهم مؤثری در بهبود فرآیند اختلاط سوخت و هوا و بهبود راندمان احتراق ایفا کنند [۸].

مستره [۹] در یک تحقیق، اثر جریان‌های چرخشی و غیر چرخشی را بر احتراق بررسی کرده و نتیجه گرفته که وجود چرخش به بهبود راندمان احتراق، کاهش آلاینده‌ها و افزایش دمای شعله کمک می‌کند. او همچنین مشاهده کرد که با حضور چرخش، یک شعله آبی کوچک تشکیل می‌شود که نشان‌دهنده اختلاط مناسب سوخت و هوا و زمان کوتاه برای رسیدن به دمای ماکزیمم است، در حالی که سیستم‌های با جریان غیر چرخشی، دارای شعله‌ای زرد رنگ و طولانی هستند. کلایپل و سایر [۱۰] اثر چرخش بر تولید NOx را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها عدد چرخش را از ۰/۶۳ تا ۳/۰۴ تغییر دادند و دریافتند که با افزایش چرخش در جریان، انتشار NOx کاهش می‌یابد، ولی این کار با کاهش راندمان احتراق همراه است. مهد جعفر [۱۱] نیز اثر استفاده از جریان‌های چرخشی با قدرت چرخشی مختلف را بررسی کرد. او در آزمایش خود از پره‌های شعاعی چرخش‌دهنده هوا با زاویه ۲۸/۹ تا ۸۴/۵ درجه استفاده کرد و دریافت که با افزایش زاویه چرخش انتشار NOx کاهش می‌یابد. رادزی [۱۲] در تحقیق مشابهی، اثر جریان‌های چرخشی با زوایای چرخش بین ۵۰ تا ۸۰ درجه را مورد مطالعه قرار داد. نتایج او نشان داد که در یک نسبت هم‌ارزی یکسان، انتشار NOx در زاویه چرخش ۶۰ درجه نسبت به زاویه چرخش ۵۰ درجه ۴۶٪ کاهش می‌یابد، این در حالی است که با افزایش زاویه چرخش به ۷۰ درجه، انتشار NOx ناگهان حدود ۴۶٪ افزایش پیدا می‌کند. رادزی از این اتفاق به عنوان یک پرش یاد می‌کند. با افزایش زاویه چرخش به ۸۰ درجه نیز میزان انتشار NOx ۳۰٪ بیشتر از زاویه چرخش ۷۰ درجه است. دریک و هوبارت [۱۳] نیز در تحقیقات خود در زمینه اثر زاویه چرخش بر احتراق، وجود زاویه چرخش بهینه را بیان کردند.

علی‌رغم استفاده فراوان از وسایل مولد چرخش به ویژه پره‌های چرخش‌دهنده هوا در مشعل‌های صنعتی، اطلاعات کمی در ارتباط با تأثیر آن بر آلاینده‌ها وجود دارد. این در حالی است که میدان جریان و تغییرات آن، تأثیر زیادی بر واکنش‌های شیمیایی فرآیند احتراق و در نتیجه، تشکیل و انتشار آلاینده‌ها دارد [۱۰].

در این مقاله، اثر تغییر زاویه چرخش هوای ورودی بر دما و تشکیل آلاینده‌های CO و NO در یک کوره آزمایشگاهی سوخت مایع به روش‌های آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است.

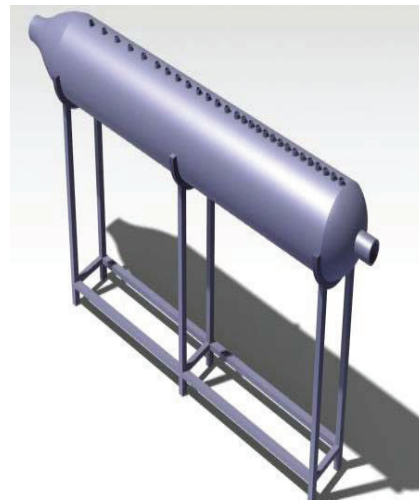
## ۲. تجهیزات آزمایشگاهی



شکل (۲): پره تولید چرخش در جریان هوای ورودی

کوره آزمایشگاهی مورد مطالعه به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۶۰ میلی‌متر می‌باشد، که نمای شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده است. بدنه کوره از فولاد AISI316 جهت مقاومت در دماهای بالا ساخته شده و اطراف آن توسط عایق حرارتی دما بالا با ضخامت مناسب پوشیده شده است. جنس عایق حرارتی پشم سنگ ۱۲۶۰ و ضخامت آن، ۴۰ میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری آلاینده‌ها در راستای محور مرکزی کوره، سوراخ‌هایی بر روی آن تعبیه شده است. 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 ۳ متر استفاده شده است.

مشعل آزمایش، مشعل گازوئیلی با ظرفیت حرارتی ماکزیمم صد هزار کیلوکالری بر ساعت است. برای اندازه‌گیری آلاینده‌های NO و CO در راستای محور مرکزی کوره از دستگاه گازآنالیزر Testo350XL استفاده شده است. این دستگاه، مجهز به سنسورهای الکتروشیمیایی است و از طریق یک پرآب، نمونه‌برداری را انجام می‌دهد. عدم قطعیت اندازه‌گیری دستگاه گازآنالیزر ۵٪± برای NO و ۱۰٪± برای CO است.



شکل (۱): کوره آزمایشگاهی مورد مطالعه

مشعل‌های سوخت مایع مورد استفاده در صنایع، عمدتاً از پره‌های راهنما در مسیر جریان برای ایجاد جریان چرخشی استفاده می‌کنند. در این پژوهش نیز، یک پره راهنما برای تولید جریان چرخشی به کار رفته است. شکل (۲) تصویری از این پره را نشان می‌دهد.

## ۳. معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی عددی مسئله مورد بررسی، معادلات زیر مورد استفاده و حل قرار گرفته‌اند.

### ۱.۳. معادلات فاز گاز

با توجه به تقارن محوری هندسه مورد مطالعه، معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر آن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\rho r u^2) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u v) \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u'^2) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u' v')$$

$$\frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\rho r u v) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v^2) - \rho w^2 \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu (\nabla^2 v + \frac{v}{r^2}) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u' v') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v'^2) - \frac{1}{r} \rho w'^2 \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\rho r u w) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v w) + \rho v w \right] = \mu (\nabla^2 w - \frac{w}{r^2}) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u' w') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v' w') - \frac{1}{r} \rho v' w' \quad (4)$$

برای محاسبه تنش‌های رینولدز  $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{u'w'}, \overline{v'w'}$

از مدل  $k-\epsilon$  استفاده شده است. معادله انرژی حاکم نیز به صورت زیر است:

$$\frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\rho r u h) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v h) + \rho v w \right] = \Gamma_h \nabla^2 h - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u' h') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v' h') + S_h + S_R \quad (5)$$

جمله  $S_h + S_R$  ترم منبع انرژی به دلیل واکنش شیمیایی و تابش است.

که در آن،  $c_{pd}$  گرمای ویژه قطره،  $A_d$  مساحت سطح قطره،  $T_\infty$  دمای محلی گاز،  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی،  $E_d$  ضریب انتشار قطره،  $\sigma$  ثابت بولتزمن و  $\tau_R$  دمای تابش است که از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۶]:

$$\tau_R = \left(\frac{I}{4\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

در این رابطه،  $I$  شدت تابش است.

ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد  $h$ ، با توجه به کار رانز و مارشال [۱۷] از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{hD_d}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad (13)$$

در رابطه فوق،  $k_\infty$  ضریب هدایت گاز و  $\text{Pr}$  عدد پراوتل فاز گاز است، که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{Pr} = \frac{c_{pd}\mu}{k_\infty} \quad (14)$$

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 است:

$$N_{fu} = k_c \left( \frac{P_{sat}}{RT_d} - X_{fu} \cdot \frac{P_{op}}{RT_\infty} \right) \quad (15)$$

که در آن،  $N_{fu}$  شار مولی بخار،  $k_c$  ضریب تبادل جرم،  $P_{sat}$  فشار بخار اشباع سوخت در دمای قطره  $(T_d)$ ،  $R$  ثابت گازها،  $X_{fu}$  کسر مولی سوخت در گازهای اطراف قطره و  $P_{op}$  و  $T_\infty$  به ترتیب، فشار و دمای گازها می‌باشند؛ و برای ضریب تبادل جرم داریم:

$$K_c = \frac{\Gamma_{fu}}{D_d} (0.2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} S_c^{1/3}) \quad (16)$$

در رابطه فوق،  $\Gamma_{fu}$  ضریب پخش بخار سوخت در فاز گاز و  $S_c$  ضریب اسمیت است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_c = \frac{\mu D_d}{\rho} \quad (17)$$

شار بخار به دست آمده از معادله (۱۵) بخشی از جمله چشمه معادله ترانسپورت گونه سوخت را تشکیل می‌دهد و جرم قطره به صورت زیر به دست می‌آید:

$$m_d(t + \Delta t) = m_d(t) - N_{fu} A_d M_{fu} \Delta t \quad (18)$$

مدل تابش مورد استفاده، مدل DO<sup>۱</sup> است [۱۴]. برای محاسبه اثر دوده بر ضریب تابش کلی، از روش WSGGM<sup>۲</sup> استفاده شده، به طوری که ضریب جذب کلی برابر مجموع ضریب جذب دوده و محصولات احتراق در نظر گرفته شده است.

### ۲.۳. معادلات فاز قطرات

چگونگی تبخیر و احتراق سوخت مایع، نقش مهمی در تولید آلاینده‌ها دارد. در مدل‌سازی فاز مایع فرض شده است که قطرات سوخت مایع به صورت ذرات کروی در فاز گاز پراکنده شده و برخورد آنها با یکدیگر به علت تبخیر سریعشان قابل اغماض باشد. معادلات تغییر مکان و تغییر سرعت هر گروه  $i$  از قطرات سوخت در سیستم لاگرانژی به صورت زیر است [۱۵]:

$$\frac{d\vec{X}_{di}}{dt} = \vec{U}_{di} \quad (6)$$

$$m_d \frac{d\vec{U}_{di}}{dt} = \frac{\pi}{8} D_d^2 \rho_d C_d (\vec{U}_d - \vec{U}) |\vec{U}_d - \vec{U}| + m_i \vec{g} (\rho_d - \rho) / \rho_d + \vec{F} \quad (7)$$

در این رابطه،  $m_d$  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 چرخشی قطره و  $C_D$  ضریب درگ است که از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} [1 + \text{Re}^{2/3}/6] \quad \text{Re} < 1000 \quad (8)$$

$$C_D = 0.44 \quad \text{Re} > 1000 \quad (9)$$

که در آن،  $\text{Re}$  عدد رینولدز بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{\rho D_d |U_d - U|}{\mu} \quad (10)$$

در این رابطه،  $\mu$  ویسکوزیته جریان است.

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

$$m_d c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = h A_d (T_\infty - T_d) + E_d A_d \sigma (\tau_R^4 - T_d^4) \quad (11)$$

1. Discrete Ordinates

2. Weighted Sum of Gray Gases Model

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 [۱۶].

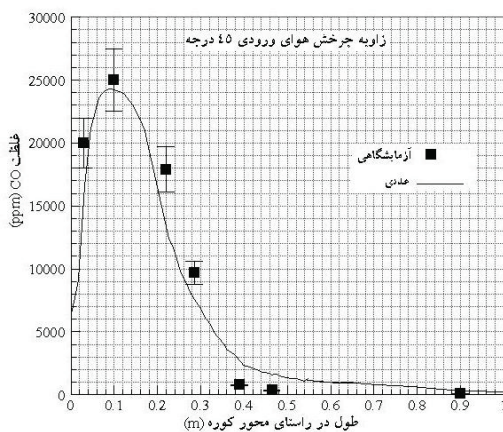
#### ۴. حل عددی معادلات و شرایط مرزی

شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی و مدل‌سازی احتراق و تشکیل آلاینده‌ها با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. برای کمک به همگرایی از ضرایب تخفیف ۰/۳ برای میدان جریان، و ۰/۴ برای گونه‌های شیمیایی از جمله آلاینده‌ها استفاده شده است. توزیع قطر قطرات با استفاده از روش رزین لاملر و در محدوده ۱ تا ۱۰۰ میکرون در نظر گرفته شده و دمای ورودی سوخت ۲۹۰ کلوین است. دمای جدار کوره در ۷۰۰ کلوین ثابت فرض شده است. بررسی تأثیر مش‌بندی بر حل به این صورت است که با تغییر در اندازه مش، تغییر پروفیل سرعت و دما بسیار ناچیز باشد. بر این اساس، تعداد بهینه سلول جهت حل مسئله، ۱۶۹۳۶ سلول انتخاب گردید.

#### ۵. نتایج

شکل (۳)، نتایج شبیه‌سازی غلظت CO بر روی محور کوره را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی توافق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

شکل (۴)، اثر سه زاویه چرخش متفاوت را بر پروفیل توزیع دما در راستای محور مرکزی کوره نشان می‌دهد. با مقایسه پروفیل دمای زاویه ۰° با ۴۵° مشاهده می‌گردد که افزایش زاویه چرخش، باعث بالا رفتن حداکثر دمای شعله می‌شود؛ اما تغییرات محوری دما در زاویه‌های بزرگ‌تر از ۴۵° تا ۷۵° کاهش دمای ماکزیمم را نشان می‌دهد.



شکل (۳): مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی غلظت CO در طول کوره در نسبت هم آرژی ۰/۷ و زاویه نازل ۶۰°

که در آن،  $M_{fu}$  وزن مولکولی سوخت است. در این حالت، دمای قطره از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$m_d c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = h A_d (T_\infty - T_d) + E_d A_d \sigma (\tau_R^4 - T_d^4) + \frac{dm}{dt} h_{fg} \quad (19)$$

که در آن،  $h_{fg}$  گرمای نهان سوخت است، در صورتی که 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:

$$-\frac{dm_d}{dt} h_{fg} = h A_d (T_\infty - T_d) + A_d E_d \sigma (\tau_R^4 - T_d^4) \quad (20)$$

در این حالت، برای تغییر قطر قطره در حالت جوش داریم [۱۸]:

$$-\frac{dD_d}{dt} = \frac{2}{\rho_d h_{fg}} \left[ \frac{2k_\infty (1 + 0.23 \sqrt{R_{ed}})}{D_d} \right] (T_\infty - T_d) + E_d \sigma (\tau_R^4 - T_d^4) \quad (21)$$

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

#### ۳.۳. مدل‌سازی احتراق

در این مقاله، از مدل دو مرحله‌ای احتراق استفاده شده است و تأثیر اغتشاش بر نرخ واکنش‌ها توسط مدل مگنسن - هرتاگر اعمال شده است [۱۹].

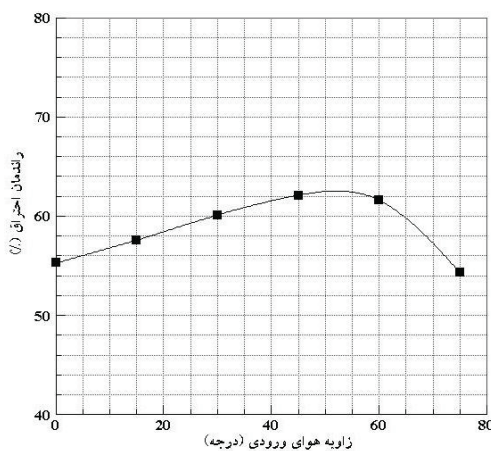
#### ۴.۳. مدل‌سازی NO<sub>x</sub>

مکانیزم مورد استفاده برای تشکیل NO حرارتی، مکانیزم معروف زلدویچ است [۲۰]:



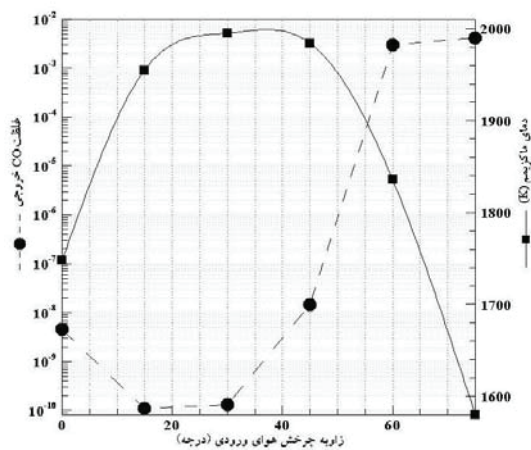
واکنش (۲۲)، گام شروع فرآیند تشکیل NO بر مبنای مکانیزم زلدویچ است و واکنش (۲۳) بدون انجام واکنش (۲۲) کامل نمی‌شود. از طرفی با پذیرفتن یک فرض ساده برای تعادل O و O<sub>2</sub> می‌توان مدل‌سازی معادلات سینتیکی فوق را آسان‌تر کرد. در دماهای بالای ۱۸۰۰ کلوین، عمل اکسیداسیون O<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> آغاز می‌گردد. در دماهای بالا، پیوند N<sub>2</sub> شکسته و رادیکال N با اکسیژن ترکیب می‌شود. مکانیزم زلدویچ به طور وسیعی برای پیشگویی تولید NO در محفظه‌های احتراق استفاده می‌شود و بر اساس آن، مقدار NO پیشگویی شده مستقیماً به درجه

افزایش زمان ماند محصولات احتراق در کوره می‌شود؛ این امر باعث افزایش تبادل حرارتی محصولات احتراق و در نتیجه کاهش دمای خروجی کوره خواهد شد. در نتیجه، تغییرات راندمان حرارتی با زاویه چرخش که هر دو پارامتر دمای ماکزیمم محوری و دمای خروجی کوره را در بر دارد، روندی سهمی‌گون خواهد داشت. این روند، نشان دهنده آن است که با افزایش زاویه چرخش، ابتدا راندمان حرارتی تا یک ماکزیمم افزایش می‌یابد، ولی افزایش بیشتر زاویه چرخش سبب کاهش راندمان حرارتی خواهد شد.



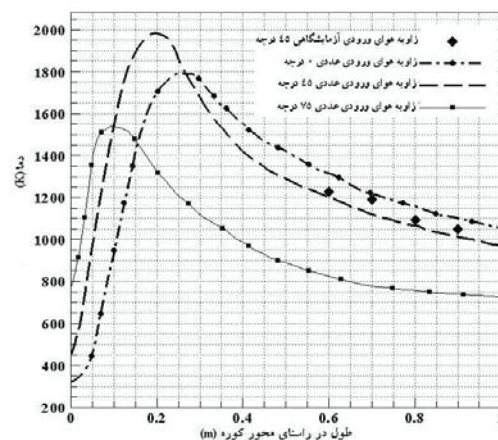
شکل (۵): نمودار راندمان احتراق بر حسب زاویه چرخش هوای ورودی

در شکل (۶)، غلظت CO در خروجی کوره با محور عمودی سمت چپ و دمای محوری ماکزیمم در محور عمودی سمت راست برای زوایای چرخش مختلف نشان داده شده است.



شکل (۶): غلظت CO و دمای ماکزیمم محوری در خروجی کوره

این رفتار، وجود یک زاویه چرخش بهینه را تأیید می‌کند. طبق نتایج دیگران [۷ و ۱۳] و مشاهدات تجربی و آزمایشگاهی حاضر، با ایجاد چرخش در جریان ناحیه گردابی شکل گرفته که مقدمه تولید ناحیه جریان برگشتی است، این ناحیه جریان برگشتی با مکش گازهای داغ حاصل از واکنش احتراق به ناحیه داخلی شعله به عنوان یک منبع ذخیره گرما و گونه‌های شیمیایی فعال (رادیکال‌های آزاد) عمل می‌کند و ضمن بهبود نرخ اختلاط سوخت و هوای ورودی به محل واکنش احتراق، بر پایداری شعله نیز می‌افزاید، اما زیاد کردن چرخش بیش از حد بهینه‌ای، باعث بزرگ شدن ناحیه جریان برگشتی و کاهش دما خواهد شد.



شکل (۴): اثر زاویه چرخش هوای ورودی بر توزیع دمای محوری در نسبت هم ارزی ۰/۷ و زاویه نازل ۶۰°

شکل (۵)، راندمان احتراق را بر حسب زاویه چرخش هوای ورودی نشان می‌دهد. برای محاسبه راندمان احتراق از فرمول زیر استفاده شده است:

$$\eta = 1 - \frac{T_{out}}{T_{max}}$$

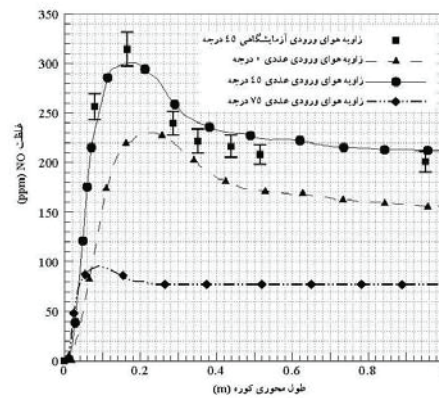
که در آن،  $T_{out}$  دمای خروجی کوره و  $T_{max}$  ماکزیمم دمای محوری است.

با این تعریف، افزایش دمای ماکزیمم محوری ( $T_{max}$ ) راندمان حرارتی را افزایش می‌دهد، درحالی که افزایش دمای خروجی کوره ( $T_{out}$ ) باعث کاهش راندمان حرارتی خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۴) دیدیم، افزایش زاویه چرخش ابتدا باعث افزایش دمای ماکزیمم محوری و سپس کاهش آن می‌شود. از طرفی، افزایش زاویه چرخش باعث کاهش مؤلفه محوری سرعت هوای ورودی و در نتیجه

## ۶. نتیجه گیری

- در یک کوره مدل، بررسی آزمایشگاهی و عددی تولید آلاینده‌های NO و CO و نیز تغییرات دما تحت اثر تغییر زاویه چرخش هوای ورودی انجام شد. بر مبنای این مطالعه، نتایج زیر حاصل گردید:
- اثر زاویه هوای ورودی بر دما و غلظت آلاینده‌های داخل کوره بسیار قابل توجه است.
- زوایای چرخش بزرگ، باعث کاهش دما و افزایش غلظت منوکسید کربن در خروجی کوره می‌شود.
- زوایای چرخش کوچک نیز راندمان حرارتی را کاهش می‌دهد و غلظت آلاینده CO را زیاد می‌کند.
- افزایش زاویه چرخش از صفر تا ۷۵° باعث افزایش دمای شعله و NO تا یک مقدار ماکزیمم و سپس کاهش آنها می‌شود، در حالی که CO در خروجی کوره، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.
- این نتایج، وجود زاویه چرخش بهینه‌ای را در طراحی مشعل‌های صنعتی برای رسیدن به راندمان حرارتی بالا و کاهش آلاینده‌های خروجی تأیید می‌کند.

همان طور که انتظار داریم، بهبود راندمان احتراق با افزایش زاویه چرخش، باعث کاهش غلظت آلاینده CO در خروجی کوره می‌گردد. همان طور که از شکل (۴) حاصل شد، افزایش زاویه چرخش تا حدی بر بهبود راندمان احتراق مؤثر می‌باشد. این نکته در شکل (۶) نیز مشهود است، به طوری که زوایای چرخش بزرگ، کاهش حداکثر دمای کوره و افزایش آلاینده CO در خروجی کوره را به دنبال دارد. شکل (۷)، مقایسه توزیع محوری غلظت NO در دو حالت آزمایشگاهی و عددی و اثر زاویه چرخش هوای ورودی بر آن را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای زاویه چرخش ۴۵° توافق قابل قبول نتایج مدل‌سازی دیده می‌شود. همچنین در زوایای چرخش بزرگ (۷۵°)، پایین بودن دما (در شکل ۴، پروفیل دمای محوری برای زاویه ۷۵° آمده است) و همچنین پایین بودن غلظت اکسیژن در امتداد محور مرکزی کوره، باعث می‌شود تا غلظت NO تشکیل شده، کمترین مقدار را داشته باشد. با کاهش زاویه چرخش به ۴۵°، به دلیل افزایش دمای ناشی از اختلاط بهتر سوخت و هوا، غلظت NO افزایش می‌یابد، اما کاهش بیشتر زاویه چرخش هوای ورودی به ۰°، بزرگ شدن مؤلفه محوری سرعت، کاهش نرخ اختلاط و در نتیجه، کاهش دما و نیز کاهش زمان ماند را به دنبال دارد و در نتیجه، غلظت آلاینده NO دوباره کاهش می‌یابد.



شکل (۷): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی غلظت NO

روی محور کوره در نسبت هم ارزی ۰/۷ و زاویه نازل ۶۰°

- [1] Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E., Pan, Y., "Adverse health effects of outdoor air pollutants", Environment International, Vol. 32, No. 6, pp. 815-830, 2006.
- [2] Ramanathan, V., Feng, Y., "Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives", Atmospheric Environment, Vol. 43, No. 1, pp. 37-50, 2009.
- [3] Leroux, B., Lacas, F., Recourt, P., Delabory, 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] Beer, J. M., Chigier, N. A., "Combustion Aerodynamics", Applied Science Publishers Ltd, 1972.
- [6] Ianneti, A., Tacina, R., Cai, J., Jeng, S. M., "Multi-Swirl Aerodynamics: CFD Predictions Atomizer", 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, USA, 2001.
- [7] Ishak, M. S. A., Mohd jaafar, M. N., Eldrainy, Y. A., "The Effect of Radial Swirl Generator on Reducing Emissions from Bio Fuel Burner System", Modern Applied Science, Vol. 3, No. 6, 2009.
- [8] Gupta, A. K., Lewis, M. J., Qi, S., "Effect of Swirl on Combustion Characteristics of Premixed Flames", J. Eng. Gas Turbine and Power, Trans, ASME, Vol. 120, pp. 488-494, 1998.
- [9] Mestre, A., "Efficiency and Pollutant Formation Studies in a Swirling Flow Combustor", Fluid Mechanics of Combustion, Edited by Dussord et al. New York: The American Society of Mech. Engineers, 1974.
- [10] Claypole, T. C., Syred, N., "The Effect of Swirl Burner Aerodynamics on NOx Formation", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 81-89, 1981.
- [11] Mohd jaafar, M. N., "Emissions Reduction From Gas Burner System Applying Swirling Flows", Malaysian Science and Technology Congress, Kuching Hilton, Malaysia, 1999.
- [12] Radzi, M., "The Effect of Swirler Vane Angle in Reducing Emissions from Liquid Fuel Burner", Proceeding 6th Asia-Pasific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Malaysia, pp. 483-488, 2000.
- [13] Drake, P. F., Hubbard, E. H., "Effect of air swirl on the completeness of combustion", J. Inst. Fuel, 36:389, 1963.
- [14] Chui, E. H., Raithby, G. D., "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, Vol. 23, No. 3, pp. 269 - 288, 1993.
- [15] Aggawal, S. K., Chitre, S., "Computations of turbulent evaporating spray", Journal Propulsion, Vol. 7, No. 2, pp. 213-220, 1991.
- [16] Moghiman, M., Saeeadi, A., Javadi, M., Etmnan, V., "Measurements and modeling of soot and CO pollutant emissions in a large oil fired furnace", The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 34, pp. 273-284, 2009.
- [17] Ranz, W. E., Marshal, W. R., "Evaporation from Drops", Part 2, Chem. Eng. Prog. 48, pp. 173-180, 1952.
- [18] Kuo, K. K. Y., "Principles of combustion", 2<sup>nd</sup> Edition, New York, John Wiley and Sons, 2005.
- [19] Magnussen, B. F., Hjertager, B. H., "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", Symposium (International) on Combustion, Vol. 16, No. 1, pp. 719-729, 1977.
- [20] Riechelmann, D., Toshiro, F., Yasunori, H., "Low NOx Combustion with Highly Preheated Air", Ishikawajima harima engineering review, Vol. 40, No. 3, pp. 114-118, 2000.