

# تحلیل حرارتی و بررسی کارکرد فرآیند احتراق بدون شعله در مشعل و کوره صنعتی دما بالا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

سجاد جباری نیک و محمدرضا جعفری نصر\*

دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۳

## چکیده

کوره‌های عملیات حرارتی همواره در سیستم‌های پالایشگاهی و پتروشیمیایی از اهمیت بسزایی برخوردار بوده است. صدور حجم عظیمی از آلاینده‌های زیست محیطی مانند اکسیدهای نیتروژن و کربن دی‌اکسید در کنار هزینه‌های مربوط به تعمیرات و بازدهی‌های ادواری، موجب توجه بیشتر به مقوله بهینه‌سازی در کوره‌ها شده است. احتراق بدون شعله به عنوان فرآیندی نوظهور، با داشتن ویژگی‌هایی از قبیل کاهش صدور گازهای آلاینده، توزیع یکنواخت دما در کنار کاهش تنش‌های گرمایی و آلودگی‌های صوتی در مشعل، نویدبخش ایجاد تغییر در سیستم‌های احتراقی معمولی و حرکت آنها به سمت کاهش آلاینده‌گی و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری شده است. در این مطالعه مشعل ساخته شده توسط شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در شرایط هوای پیش گرم و غلظت اکسیژن ۳ و ۶٪ مورد بررسی و ظرفیت‌سنجی در شرایط بدون شعله قرار گرفت. مشخصه‌های احتراق بدون شعله در مشعل حاصل شد و در مقایسه با احتراق معمولی، نقاط بیشینه دمایی کاهش یافت و نیم رخ دمایی کوره یکنواخت‌تر گردید. همچنین در حالت ۶٪ میزان جزء جرمی ترکیبات اکسیدهای نیتروژن و کربن دی‌اکسید به ترتیب حدود ۴۰۰ و ۳۰۰۰ مرتبه با کاهش مشاهده شد، در حالت ۳٪ نیم رخ دمایی یکنواخت‌تر و جزء جرمی اکسیدهای نیتروژن کمتر حاصل گردید.

**کلمات کلیدی:** احتراق بدون شعله - کاهش اکسیدهای نیتروژن - دینامیک سیالات محاسباتی - مدل مفهوم توزیع گردانه (EDC)، کوره صنعتی دما بالا

## مقدمه

سیستم‌های مختلف انجام گرفته است. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های این تحقیقات می‌تواند به تلاش‌های مربوط به بازیافت انرژی در صنعت اشاره کرد. در این میان با وجود استانداردهای زیست محیطی تقویت شده در جهت حرکت به سوی کره زمین پاک‌تر، تنها بهینه‌سازی انرژی نمی‌تواند راهگشا باشد؛ بلکه باید با رویکردی مناسب، به هر

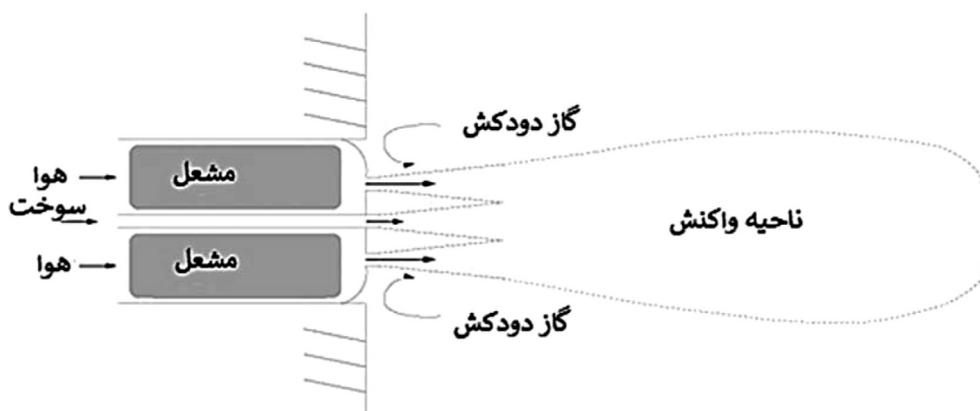
امروزه اهمیت بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی در جهان بر کسی پوشیده نیست. تحقیقات بسیاری در داخل و خارج از کشور در راستای بهبود عملکرد

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی: nasrmrj@ripi.ir  
شناسه دیجیتال (DOI: 10.22078/pr.2018.2967.2384)

آلاینده‌ها تلقی می‌شود. بر خلاف تزریق هوا و سوخت به شکل معمول با مومنتوم کم، احتراق بدون شعله از طریق تزریق سوخت و جت‌های هوا با مومنتوم بالا مستقیماً به منطقه داغ در دمای بالای دمای خود اشتعالی سوخت صورت می‌پذیرد. مطابق شکل ۱ مومنتوم بالای جت‌ها موجب جذب یا کشش گازهای داغ دودکش می‌شود [۱].

تزریق‌های جت‌های مومنتوم بالا منجر به کشیده شدن ناحیه واکنش و متعاقباً شعله خاموش خواهد شد. اگرچه در دماهای بالای دمای خود اشتعالی، مخلوط طی گستره وسیعی از شرایط، به خودی خود مشتعل می‌شود ولی محدوده واکنش و حجم در نتیجه این احتراق در مقایسه با احتراق معمولی بزرگ‌تر خواهد بود. برحسب این افزایش منطقه واکنش، جرم بیشتری نسبت به مقدار مشابه انرژی واکنش احتراق، باید گرما دریافت کند. در نتیجه بیشینه‌های پایین‌تر دمایی و توزیع یکنواخت دمایی در فضایی محدود را حاصل خواهد شد. جنبه مهم دیگر احتراق بدون شعله، بازیابی انرژی از گازهای دودکش داغ است. طی فاز احیاکننده مشعل، گازهای خروجی دودکش دوباره به کوره وارد می‌شوند و نقش مهمی را ایفا می‌کنند [۳].

دو مساله پرداخت. با توجه به مشکلات اقتصادی جهانی، در این بین همواره باید کوشید تا نتایج به‌دست آمده به‌طور مشخصی موجب کاهش هزینه‌های اولیه یا عملیاتی صنایع گردد. اختلاف دمایی شدید حاصل از شعله در اجزای کوره مانند لوله‌ها، کوپل‌ها، مشعل و دیواره‌ها، موجب کاهش استحکام فلزات، تغییر شکل و در نهایت نشت مواد می‌شود. این مشکل در کوره‌های حرارتی به علت شرایط دمایی بالا و تماس با سوخت‌های مختلف موجب وقوع حوادثی خواهد شد که هزینه‌های مالی و انسانی جبران‌ناپذیری را به فرآیند تحمیل می‌کند. به منظور جلوگیری از این گونه مشکلات، بازدهی‌های ادواری با فواصل زمانی کوتاه در این تجهیزات باید انجام شود که این امر نیز موجب توقف فرآیند و زیان‌های مالی می‌شود. هدف استفاده از این روش نوآورانه در احتراق، در کنار کاهش چشمگیر میزان آلاینده‌ها، به دلیل یکنواخت شدن الگوی توزیع دما، موجب بالا رفتن عمر مفید تجهیزات می‌شود و به اقتصاد فرآیند کمک شایانی می‌نماید. احتراق بدون شعله به عنوان روشی نوین و مؤثر به جهت افزایش بازده انرژی کوره‌های هیدروکربن سوز در کنار کاهش چشم‌گیر انتشار

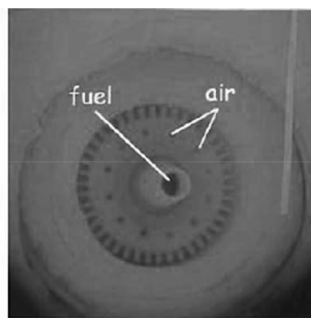
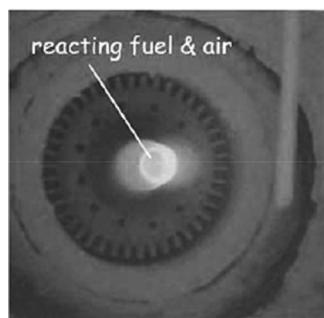


شکل ۱ جذب گازهای دودکش، که منطقه نزدیک سوزاننده را در هنگام شروع احتراق و ورود جریان‌ات در منطقه واکنش شکل می‌دهد [۲]

۶۵۰°C، سوخت بدون مشاهده شعله به طور کامل مصرف شد. فرآیند احتراقی پایدار و ملایم همراه با مقدار ناچیزی تولید کربن منواکسید (کمتر از ۱ ppm) و انتشار NOx نزدیک به صفر در دودکش مشاهده شد (شکل ۲) [۴].

رژیم احتراق بدون شعله محصول احتراق سوخت و اکسنده بسیار رقیق (از نقطه نظر غلظت اکسیژن در اکسیدکننده و ناحیه واکنش) و پیش گرم شده تا دمای خود اشتعالی مخلوط است. کوالیر به منظور ارائه تعریفی از احتراق بدون شعله، علاوه بر آنچه یاد شد، بایستی افزایش دما در اثر احتراق به درجه حرارت‌هایی کمتر از دمای خود اشتعالی اشاره نمود [۵]. در این حالت از احتراق، شعله وجود دارد ولی پخش شدن و حجیم شدن ناحیه واکنش، موجب جلوگیری از شکل‌گیری مناطقی با گرادیان بالا می‌شود. بنابراین نظر به پایین بودن دمای ناحیه احتراقی در رژیم بدون شعله، انرژی لازم برای برانگیختگی گونه‌های شیمیایی به وجود نخواهد آمد و در نتیجه قادر به ساطع کردن نوری از خود نخواهد شد [۵]. در ابتدا افرادی از ژاپن و سپس ایالات متحده [۸]، از پیشگامان انجام تحقیقات بر روی احتراق بدون شعله بوده‌اند. در سال ۱۹۹۰، موسسه IFRI در قالب آزمایش‌های نیمه صنعتی، با بیان نتایج تحقیقات خود اعلام کرد که این فرآیند، علاوه بر مشعل‌های مایع سوز و گازسوز، برای سوخت جامد نیز مناسب است [۹].

بازچرخش گازهای دودکش سرد شده و افزایش آشفستگی در حوالی منطقه واکنش، راه‌های مناسبی برای جلوگیری از شکل‌گیری شعله آشکار است؛ همچنین استفاده از سوخت‌هایی با زمان تاخیر شعله ور شدن طولانی<sup>۱</sup> (مدت زمانی که راه‌اندازی شعله به طول می‌انجامد) مانند متان، به ایجاد احتراق بدون شعله کمک می‌نماید [۴]. این نوع از احتراق به طور کلی تحت شرایط پیش گرم جریان اکسنده تا دمای بالا و رقیق‌سازی هوا جهت کاهش درصد O<sub>2</sub> موجود، در منطقه واکنش صورت می‌پذیرد. بنیان این روش بر پایه تئوری‌های وینبرگ<sup>۲</sup> تحت عنوان احتراق با آنتالپی اضافی که در سال ۱۹۷۱ مطرح شده، برمی‌گردد [۵ و ۶]. در این تئوری، ارتقای توان بازیابی انرژی از سوخت‌هایی با ارزش حرارتی پایین هدف اصلی به شمار می‌رود. مواد واکنش دهنده در این روش، قبل از واکنش گرم می‌شوند؛ در نتیجه محدوده اشتعال‌پذیری آنها افزوده خواهد شد. بنابراین مخلوط‌های رقیق و سوخت‌های دارای ارزش حرارتی کم، قابلیت سوختن پیدا خواهد کرد. به منظور تامین انرژی اولیه گرم کردن مواد اولیه، نیاز به استفاده از منابع کمکی<sup>۳</sup> رفع می‌شود؛ چرا که این انرژی با استفاده از گازهای حاصل از احتراق به طور مستقیم یا غیرمستقیم قابل بازیابی است [۷]. در سال ۱۹۸۹، احتراق بدون شعله آشکار طی آزمایشاتی بر روی یک مشعل احیاکننده مشاهده شد. در شرایط دمای ۱۰۰۰°C و هوای پیش گرم



شکل ۲ احتراق بدون شعله (راست) احتراق معمولی (چپ) [۴]

1. Long Ignition-delay Time  
2. Weinberg  
3. Utility

با دمای خود اشتعالی سوخت ( $T_{ign}$ ) و محور افقی دمای ورودی واکنش دهنده‌ها ( $T_r$ ) با دمای خود اشتعالی بر حسب کلویین است. این افزایش کمتر دما موجب آن می‌شود که شعله نامرئی و احتراقی یکنواخت به وجود آید. همچنین در این شرایط نسبت به احتراق معمولی سرعت واکنش‌ها کاهش می‌یابد. ناحیه‌ای با گرادیان بسیار تند (شعله) در مشعل‌های معمول وجود دارد که واکنش‌های زنجیره‌ای رادیکالی در آن ناحیه فعال هستند. اما در مشعل‌های بدون شعله این ناحیه (گرادیان تند) حذف شده چراکه با تزریق سوخت و اکسند رقیق و پیش‌گرم شده با گازهای حاصل از احتراق واکنش‌های احتراقی، واکنش احتراق به تمام محفظه پخش می‌شود [۱۰]. کوالیر و دجونان در مطالعات خود اعلام می‌دارند که ناحیه نازک واکنش به صورت تصویربرداری مستقیم، در احتراق بدون شعله قابل رویت نیست [۱۱]. از این رو این روش احتراقی "بدون شعله" نامیده شده است. رویت احتراق در این شرایط توسط چشم غیر مسلح "بدون شعله" بوده و این مشاهدات از احتراق بدون شعله منبع اصلی اطلاع از شرایط یکنواخت و توزیع شده در نواحی واکنشی در این نوع از احتراق است [۱۲].

هندسسه محفظه احتراق و نحوه پاشش مواد واکنش‌دهنده به داخل محفظه احتراق بایستی به گونه‌ای باشد که بازچرخش‌های شدیدی در داخل محفظه احتراق به وجود آورد. به منظور ایجاد احتراقی پایدار، درجه حرارت ورودی به کوره بایستی تقریباً  $800^{\circ}\text{C}$  یا بالاتر (کمی بالاتر از دمای خود اشتعالی) باشد. در این شرایط شعله‌ای وجود نخواهد داشت و احتراق به کل محفظه پخش می‌شود. سوخت و هوا به داخل یک ناحیه بازچرخشی با نسبت ابعاد بزرگ تزریق شده و هنگام طی مسیر در داخل این ناحیه، باهم واکنش می‌دهند. این چرخش با باقی ماندن مقداری از گازهای حاصل از احتراق، در داخل محفظه ایجاد می‌شود [۸ و ۱۰]. نمودار شرایط حالات مختلف احتراقی که در شکل ۳ آمده است، برای تشخیص احتراق بدون شعله از احتراق پیش آمیخته معمولی، شعله همراه<sup>۱</sup> و احتراق با هوای دما بالا (HiTAC) استفاده می‌شود [۱۱]. A1، A2 و B1 مواردی هستند که توسط یوکی میناموتو در حالت بدون شعله و مورد C در حالت معمولی شبیه‌سازی شده است [۱۲].

مطابق با شکل ۳، نمودار تاکید بر افزایش کمتر دما در احتراق بدون شعله نسبت احتراق معمولی را دارد. محور عمودی بیانگر اختلاف دما در سیستم



شکل ۳ نمودار شرایط انواع احتراق [۱۱]

دمای شعله در حالت بدون شعله در مقایسه با احتراق معمولی با هوای ورودی ۲۱ درصد اکسیژن شده است. با افزایش درجه حرارت و زمان اقامت، تولید NOx به ترتیب به شکل توانی و خطی افزایش پیدا می‌کند. NOx حرارتی در دمای بالای ۱۵۰۰-۱۸۰۰°C شکل می‌گیرد و در حدود ۹۵٪ محصولات واکنش NO و باقیمانده به صورت N<sub>2</sub>O و NO<sub>2</sub> است [۳]. بنابراین، احتراق بدون شعله با کاهش بیشینه‌های دمایی موجب کاهش تشکیل NOx حرارتی می‌شود.

مزایای این نوع از احتراق به قرار زیر است [۱۶]:

- عملیات پایدار در نسبت‌های هم ارزی کم
- تولید غلظت‌های کمی از CO و NOx
- کاهش مشهود صدا در حین عملیات
- الگوی یکنواخت توزیع دما
- در مقایسه با احتراق معمولی، در صورت استفاده از احیاگر به منظور بازیافت حرارتی گرمای هدر رفت گازهای دودکش، بازده حرارتی بیش از ۳۰٪ و کاهش ترکیبات اکسیدهای نیتروژن بیش از ۷۰٪ به وقوع می‌پیوندد [۱۷].

### شرایط عملیاتی احتراق بدون شعله

براساس جمع‌بندی تلاش‌های انجام شده بر روی احتراق بدون شعله، جمیع شرایط عملیاتی اعلام شده، به قرار زیر است [۱۸ و ۱۹]:

- تزریق جداگانه جریان سوخت و اکسنده.
- حذف گرما به منظور حصول اطمینان از این که دمای شعله در هیچ مکانی داخل کوره به دمای آدیاباتیک شعله نرسیده است.
- پیش‌گرم کردن هوای احتراق با استفاده از بازچرخش گازهای دما بالای دودکش، و تزریق هوا و سوخت در شرایط سرعت بالا نیاز اصلی حصول احتراق بدون شعله است.

- کشش قوی گازهای دودکش دما بالا، رقیق‌سازی جت‌های سوخت و هوا، در راه‌اندازی احتراق بدون

I. Damköhler Number

مقیاس آزمایشگاهی از موضوعاتی است که در حیطه این احتراق به شکل عملی مورد استفاده و مدل‌سازی ریاضی قرار گرفته است. بیش‌تر این کوره‌ها، در حالت غیر پیش آمیخته به صورتی که جریان سرد سوخت و اکسنده داغ رقیق شده به طور جداگانه وارد کوره شده است [۱۳ و ۱۴]. مطالعات عددی انجام شده و نتایج عددی به‌دست آمده در زمینه احتراق بدون شعله، نمایانگر این است که به منظور بالابردن دقت پیش‌بینی مقادیر دما و گونه‌ها باید از مدل احتراقی مناسب‌تری (با توجه به شرایط احتراق بدون شعله، نظیر پایین بودن عدد دامکولر<sup>۱</sup>) استفاده شود. همچنین مطالعات نشان می‌دهد نوع مدل آشفستگی و ضرایب وابسته به آن در دقت جواب‌ها بسیار تاثیرگذار است. با توجه به مطالعات انجام شده، مدل احتراقی EDC در احتراق بدون شعله، نسبت به مدل‌های دیگر دارای دقت بیشتری است؛ اگرچه این مدل در نقاط دور از دهانه نازل و در مخلوط‌هایی با غلظت کم اکسیژن دارای خطا است. دالی و همکارانش با در نظر قرار دادن ضریب دیفیوژن متفاوت برای اجزا مختلف، تاثیر بسیار مثبتی بر روی نتایج را گزارش دادند [۱۵]. علاوه‌براین نشان دادند که نوع مدل آشفستگی و ضرایب مربوطه در شبیه‌سازی احتراق بدون شعله بسیار تاثیرگذار است. اثر مدل‌های آشفستگی از جمله K-ε به همراه ضریب و روش LES بر روی دقت جواب‌ها، همچنین اثر غلظت اکسیژن هوای پیش‌گرم با توجه به اثر غلظت اکسیژن در ناحیه واکنش در راه‌اندازی احتراق بدون شعله، بر روی پارامترهای بدون شعله مورد بررسی قرار گرفته است. دالی Cε1=1.6 برای احتراق بدون شعله گزارش داده است [۱۵].

### مشخصه‌های احتراق بدون شعله

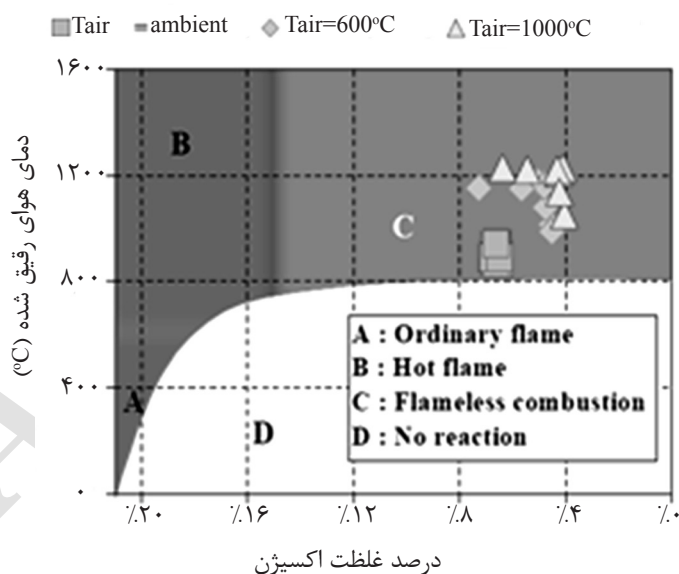
شرایط متفاوت احتراقی در آزمایشات صورت گرفته به منظور حصول احتراق بدون شعله با استفاده از هوای رقیق حاوی ۱۵٪ اکسیژن، موجب کاهش

داد. شکل ۵، شمایی از محدوده‌های پایداری شعله برای حالات مختلف احتراق را نشان می‌دهد. در حالت الف، در تمام محدوده‌های دمایی محفظه احتراق و نرخ‌های بازچرخش پایین، شعله پایدار است. در نسبت‌های بازچرخش بالاتر، شعله (ب) ناپایدار می‌شود، شعله جابه جا شده<sup>۱</sup> و سرانجام اگر دما پایین دمای خود اشتعالی باشد، شعله خاموش<sup>۲</sup> می‌شود [۱۰]. اگرچه در صورتی که دمای کوره و نرخ بازچرخش گازهای دودکش به مقدار کافی بالا باشد، (ج) به عنوان حالتی بسیار پایدار<sup>۳</sup> و یکنواخت<sup>۴</sup> امکان‌پذیر خواهد بود. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، وقوع احتراق بدون شعله در یک محفظه<sup>۵</sup> سرد امکان‌پذیر نیست. بنابراین در ابتدا بایستی محفظه احتراق با استفاده شعله گرما بگیرد سپس به حالت بدون شعله تبدیل شود [۲۰].

شعله کلیدی به شمار می‌رود. شرایط ضروری محیطی برای راه‌اندازی احتراق بدون شعله (این شرایط از طریق رقیق‌سازی زیاد واکنش دهنده‌ها با گازهای دودکش حاصل می‌شود):

- ۱- غلظت محلی اکسیژن کمتر از ۵-۱۰٪
- ۲- دمای محلی بالاتر از دمای خود اشتعالی سوخت در ناحیه واکنش.
- ۳- بازچرخش مقادیر کافی محصولات داغ به شکل داخلی یا خارجی.

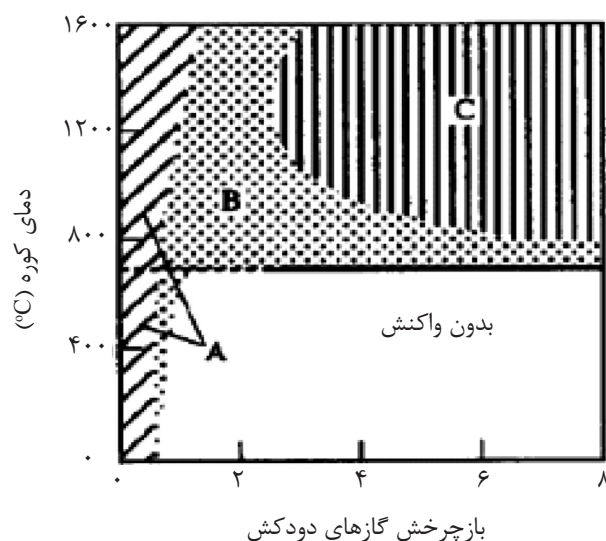
مطابق شکل ۴، احتراق بدون شعله در شرایط غلظت اکسیژن کمتر از ۱۶٪ و دمای بالای  $800^{\circ}\text{C}$  (در صورت استفاده از متان) روی می‌دهد. در غلظت‌های بیش‌تر اکسیژن، در صورت وقوع احتراق، در دماهای بالا نوع آن احتراق معمولی دما بالا و در دماهای کمتر احتراق معمولی رخ خواهد



شکل ۴ اثر درصد اکسیژن و دمای پیش گرم هوای ورودی [۸]

۱- جابه جایی شعله در سوزاننده‌های جت ای یک حالت ناخواسته است که در آن شعله و سوزاننده جدا می‌شوند. این حالت عموماً در اثر هوای اضافی احتراق به وجود می‌آید و موجب هدر رفت شعله می‌گردد.

2. Blows Out
3. Stable
4. Steady
5. Chamber
6. www.sholehsanat.ir



شکل ۵ شمایی از محدوده پایداری شعله-الف: شعله پایدار ب: ناحیه ناپایداری ج: ناحیه بدون شعله [۲۰]

از تشکیل نقاط داغ در محفظه احتراق، جلوگیری به عمل می‌آید. این نوع ترکیب موجب احتراق بهتر سوخت و اکسندگی می‌شود.

به منظور مطالعه و مدل‌سازی فرآیند احتراق بدون شعله، از مشعل ساخته شده توسط شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت بهره گرفته شد. عملکرد این مشعل در کوره با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی و پیش‌بینی واقع گردید. بدین منظور از نرم‌افزار Ansys نسخه ۱۷/۲ و از حلگر فلوننت<sup>۱</sup> برای محاسبات عددی بهره برده شد. تصویر مشعل ساخته شده و نیز نمای داخلی و خارجی مشعل به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ آمده است.

برای ایجاد احتراق بدون شعله از دو آرایش مختلف برای ورود مواد در محفظه احتراق استفاده می‌شود: ۱- هوا به وسیله جتی قوی با اندازه حرکت زیاد و سوخت توسط جت‌هایی ضعیف که با هوا فاصله نسبتاً زیادی دارند، تزریق می‌شود [۸، ۱۰]. وجود فاصله بین جت هوا و سوخت برای رقیق کردن غلظت محلی سوخت، در داخل ناحیه بازچرخشی، در داخل محفظه احتراق است تا با هوا به خوبی واکنش می‌دهد.

۲- جت سوخت در مرکز استوانه محفظه احتراق قرار گرفته و تعدادی جت ضعیف هوا در اطراف آن قرار دارد.

در واقع با تزریق سوخت و اکسندگی در حالت مذکور، از شکل‌گیری مناطقی با سوخت زیاد و در نتیجه



شکل ۶ مشعل ساخته شده توسط شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت

### هندسه مسأله

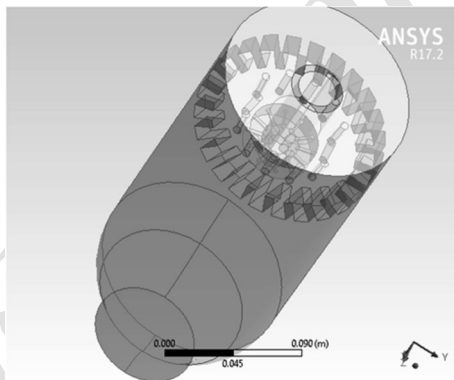
مورد استفاده قرار گرفته است. ساختار کوره مطابق شکل ۹ است.

### پیش پردازش

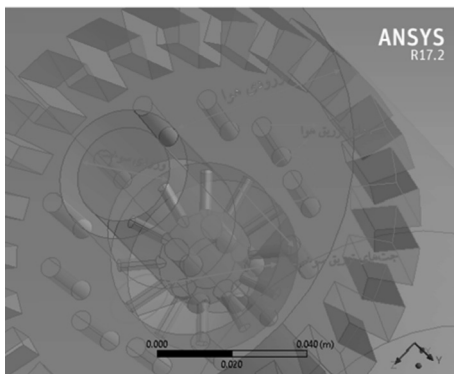
به منظور آماده‌سازی هندسه جهت تحلیل سیستم، با استفاده از نرم‌افزار مش زن انسیس سطوح مش‌زده شد. دو ضلع سمت چپ و زیرین کوره با استفاده از رویه نقشه‌برداری شده<sup>۱</sup> به شکل مثلثی ساختار یافته<sup>۲</sup> آماده مش‌زدن شد، سپس با استفاده از نرم‌افزار، مش برای تمامی سطوح و در نهایت مطابق شکل ۱۰، کل حجم با استفاده از المان‌های سه ضلعی و هرمی نامنظم و بدون ساختار<sup>۳</sup> طبق تنظیمات داده شده، رسم گردید. در هندسه مسأله تعداد ۲۰۷۶۳۲ گره، ۱۰۷۰۷۹۰ مش حاصل شده است.

احتراق در این مشعل به صورت غیرپیش آمیخته انجام می‌شود. هوا و سوخت به طور جداگانه از طریق جت‌های مومنتوم بالا، وارد مشعل می‌شود و در ناحیه واکنش، پس از جرقه اولیه، احتراق آغاز می‌گردد.

مطابق شکل ۸، ورودی‌های هوا و سوخت مشخص است، هوا و سوخت پس از ورود از قسمت‌های مشخص از طریق جت‌های مذکور، به ناحیه واکنش تزریق می‌شود. از آنجایی که بررسی وقوع احتراق بدون شعله در مشعل مستلزم وجود یک محفظه احتراق بوده است، با استفاده از این مشعل اقدام به طراحی کوره گردیده است. برای این مشعل کوره‌ای فرضی مشتمل بر محفظه احتراق و دودکش



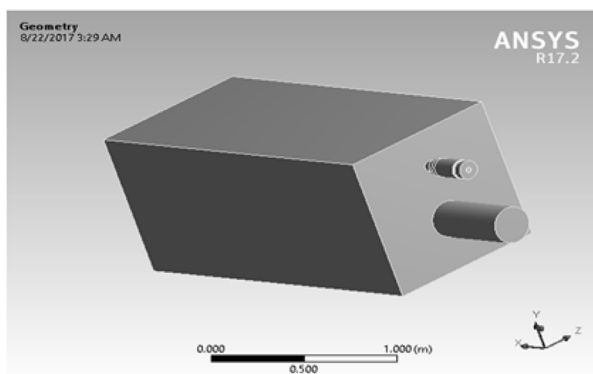
شکل ۷ نمای داخلی و خارجی مشعل



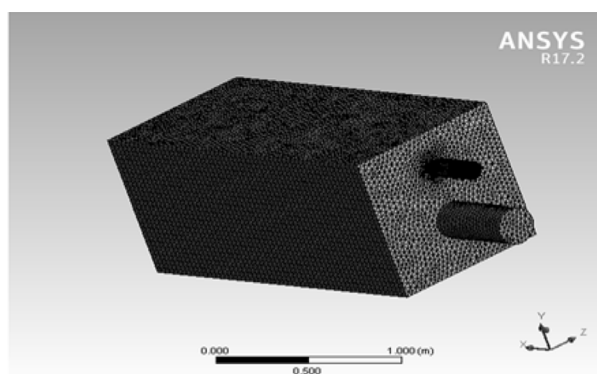
شکل ۸ موقعیت ورودی‌های شعله

1. Mapped
2. Structured
3. Unstructured





شکل ۹ نمای کوره مورد بررسی



شکل ۱۰ نمای مش کوره

از کیفیت بهتری بهره برده است. کمینه این کمیت در یک المان ۰/۴۲ و میانگین تمامی المان‌ها ۰/۸۳ گزارش شده است.

### استقلال مش

مراحل محاسبات استقلال مش در حالت جریان سرد<sup>۱</sup> برای تعداد یک میلیون، یک میلیون و ششصد، دو میلیون و صد مش صورت گرفت با وجود آنکه تعداد بیشتر مش موجب کاهش تعداد تکرار محاسبات گشت، اما افزایش تعداد مش‌ها باعث افزایش زمان محاسبات گردید؛ با این حال در سه حالت نتایج تفاوت مشهودی به همراه نداشت. در نتیجه دقت کافی حاصل شده، تعداد یک میلیون مش به عنوان حالت مبنا به منظور کاهش زمان

### کیفیت مش

در زمینه سنجش کیفیت مش رسم شده، در نرم افزارهای گوناگون گهگاه مبناهای یکسان و نیز مختلفی وجود دارد. از مهم‌ترین و شاخص‌ترین این موارد می‌توان به مقیاس چولگی<sup>۱</sup> اشاره کرد که در هر المان تعریف می‌شود. بازه تغییر این متغیر از صفر تا یک است و هرچه کمتر باشد، کیفیت مش در آن سلول بالاتر است. در این هندسه، بیشینه چولگی المان ۰/۶۲ و میانگین تمام المان‌ها ۰/۲۳ توسط نرم‌افزار گزارش شده است. در کنار وجود مقیاس چولگی و سایر مقیاس‌های پرکاربرد، نرم‌افزار از مقیاسی به نام کیفیت المان<sup>۲</sup>، که در واقع تابعی از تمامی مقیاس‌های سنجش است نیز بهره می‌برد؛ این مقیاس برای تخمین شرایط مش رسم شده، بسیار مناسب است. از صفر تا یک هرچه این مقدار به یک نزدیک تر باشد، مقیاس

1. Skewness  
2. Element Quality  
3. Cold-flow

به منظور افزایش دقت در پروفایل دما، از مدل انتقال حرارت تشعشعی نیز استفاده گردید. به علت پیچیدگی ساختار هندسه کوره، مدل P1، که نسب به سایر مدل‌های تشعشعی ساختار ساده‌تری دارد، همراه با صرف‌نظر از تابش خورشید مورد استفاده واقع گردید. به منظور پیش‌بینی تولید NO<sub>x</sub>، مدل NO<sub>x</sub> نرم‌افزار به منظور مدل‌سازی تولید NO از تمامی مسیرهای تولید ممکن شامل حرارتی، آنی و سوختی، که مکانیسم‌های مربوطه به ترتیب توسط زلدوویچ [۲۲]، میلر [۲۳] و داگاوت [۲۴] بیان گردیده، مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل استفاده از فرض تاثیرات استاندارد دیواره<sup>۷</sup> محاسبات مستقل از جنس فلز استفاده شده در ساختار کوره و مشتقات آن انجام گردیده است و پیش فرض نرم‌افزار (آلومینیوم) تغییر داده نشده است. در محاسبات لزجت سیستم از قطر هیدرولیکی به عنوان روش مشخصه‌یابی برای جریان آشفتاده استفاده گردید. شرایط مرزی سیستم در احتراق معمولی مطابق جدول ۱ است. در جریان هوا در این حالت از احتراق که شرایط معمولی بر آن حاکم است از اکسیژن با درصد مولی ۲۱ و مابقی نیتروژن در نظر گرفته شده است.

مطابق با نیم‌رخ دمایی احتراق در کوره در شکل ۱۱، بالاترین میزان دما در مشعل در ناحیه واکنش، هنگامی که متان با اکسیژن موجود در هوا واکنش می‌دهد، اتفاق می‌افتد. هرچه غلظت اکسیژن بیشتر باشد، حداکثر دمای احتراق نیز بیشتر خواهد بود. در این مطالعه، پایین‌ترین دما مربوط به جریان سوخت و هوای ورودی در ۲۹°C است.

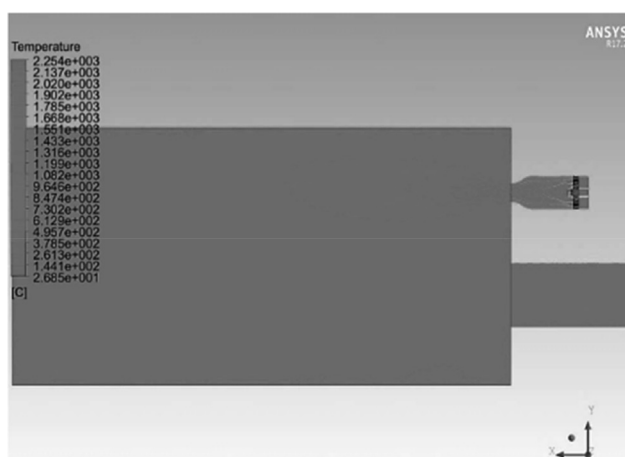
محاسبات، مورد استفاده قرار گرفت. حالت جریان سرد، روشی است که صرفاً به منظور بررسی استقلال مش استفاده می‌شود. در این روش، به منظور کاهش زمان محاسبات واکنش حجمی در نظر گرفته نمی‌شود و معادلات محصول نیز حل نمی‌گردد و فقط تشابه نتایج به‌دست آمده مبنای تصمیم‌گیری در رابطه با عدم وابستگی نتایج می‌گردد.

مدل به‌دست آمده در حالت احتراق معمولی، در حالت مستقل از زمان و با استفاده از حلگر بر پایه فشار<sup>۱</sup> محاسبه گردید. رویه PISO با وجود هزینه محاسباتی بیشتر، به علت دقت بالاتر در محاسبات استفاده گردید. مدل k-ε استاندارد برای مدل‌سازی لزجت آشفتاده و حالت توابع استاندارد<sup>۲</sup> برای رفتار در نزدیکی دیواره<sup>۳</sup> استفاده شده است؛ همچنین به علت وقوع احتراق، اثر گرمایش لزجتی<sup>۴</sup> ناچیز در نظر شده است. به منظور مدل‌سازی اختلاط از مدل EDC که فرم اصلاح شده، دقیق‌تر و با هزینه محاسباتی بالاتر نسبت به مدل EDM است و به منظور مدل‌سازی احتراق، از واکنش دو مرحله‌ای سوختن متان در حالت واکنش حجمی<sup>۵</sup> استفاده گردیده است. طی این واکنش دو مرحله‌ای، ابتدا منواکسید کربن از سوختن متان حاصل می‌شود و پس از آن با اکسیژن وارد واکنش شده و دی‌اکسید کربن را شکل می‌دهد. از آن جایی که در روش‌های عددی همواره مقداری خطا در محاسبات وجود دارد؛ رسیدن به حد دقت معادلات به تنهایی نمی‌تواند نشانه صحت مدل باشد؛ بلکه باید در پایان محاسبات عددی، موازنه جرم نیز جداگانه بررسی شود. مقداری که در مقایسه با محاسبات جرمی کم یا اضافه در جرم به‌دست می‌آید جرم موازنه نشده کل<sup>۶</sup> نامیده شده است و بایستی مقدار آن از ۰.۵٪ جریان خروجی تجاوز ننماید [۲۱]. مقدار جرم موازنه نشده در این مدل حدود ۰.۰۰۰۱٪ گزارش شده است که مقداری بسیار مطلوب به شمار می‌رود.

1. Pressure based solver
2. Standard wall functions
3. Near-wall treatment
4. Viscous heating
5. Volumetric
6. Total Mass Imbalance
7. Standard wall function

جدول ۱ شرایط مرزی احتراق معمولی

شرط مرزی	دما (K)	شرط مرزی	دما (K)
ورودی هوا	۱۳۰۰	دیوار سمت چپ	۱۰۲۷
ورودی سوخت	۳۰۰	دیوار انتهایی	۱۰۲۷
خروجی دودکش	۱۰۲۷	دیوار متصل کننده جلو	۱۰۲۷
دیوار کف	آدیاباتیک	مشعل	آدیاباتیک
دیوار سمت راست	۱۰۲۷	دودکش	۱۰۲۷



شکل ۱۱ نیم رخ دما در احتراق معمولی

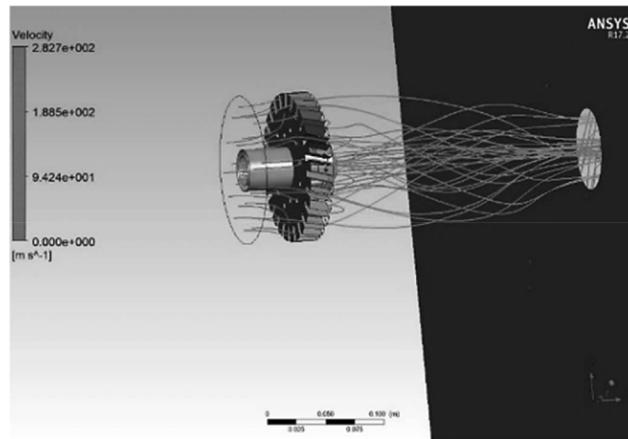
جهت احتراق استفاده شده است.

### مدل بدون شعله

نیم رخ دمایی یکنواخت که مشخصه اصلی احتراق بدون شعله است، مطابق شکل ۱۳، در مشعل به طور کامل حاصل شده است و در کل کوره هم تغییرات بسیار محدود است. نیم رخ دمایی پژوهش حسینی و عبدالوحید (شکل ۱۴) [۲۵ و ۲۶] را تصدیق می‌کند. مطابق با توزیع دمای به دست آمده، تغییر حالت احتراق معمولی به بدون شعله، موجب کاهش نقاط بیشینه در نیم رخ دما و کاهش گرادیان‌های دمایی در مشعل شده است که با نتایج حسینی و عبدالوحید نیز تطابق دارد. از آنجایی که نیم رخ دما در مشعل تقریباً همدمای بوده است، برای مقایسه دما بین دو حالت معمولی و بدون شعله خط فرضی محور مرکزی مشعل در راستای x، به عنوان مبدا محاسبات در نظر گرفته شده و دما در این خط در شکل ۱۵ رسم شده است.

پس از مجاورت هوای حاوی اکسیژن با متان، جرقه اولیه ایجاد شده و سوخت و هوا محترق می‌شود و در شرایط پایا<sup>۱</sup> نتایج مدل حاصل شده است که خطوط مسیر جریان در مشعل در احتراق معمولی در شکل ۱۲ آمده است. با توجه به این که شعله مورد بررسی، توسط شرکت سازنده تنها در حالت احتراق معمولی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و هنوز در شرایط بدون شعله آزمایش نشده است، اطلاعات تجربی جهت استفاده در شرایط مرزی مدل به منظور راه اندازی احتراق بدون شعله و در نهایت ارزیابی مدل، در دسترس نیست. بنابراین به منظور مطالعه ظرفیت احتراق بدون شعله در این کوره، می‌بایستی تغییراتی در ورودی‌ها و مرزهای سیستم اعمال می‌شد. بدین منظور با حفظ بعضی از شرایط سیستم، از روش کریستو و دالی<sup>۱</sup> [۱۵] استفاده گردیده است. بدین منظور از جریان هوای رقیق با غلظت اکسیژن ۳ و ۶٪، و مطابق جدول ۲ سوخت و هوا به ترتیب با دماهای ۳۰۰ K و ۱۳۰۰ K

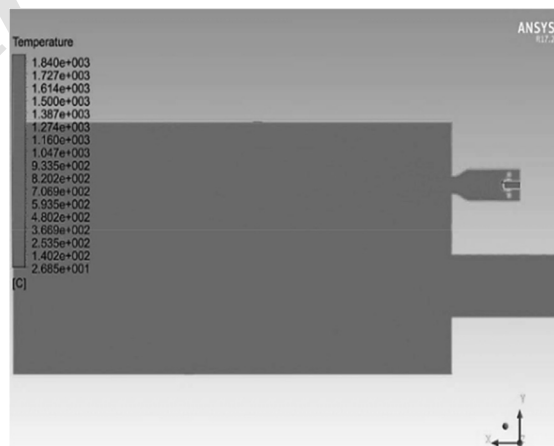
1. Steady



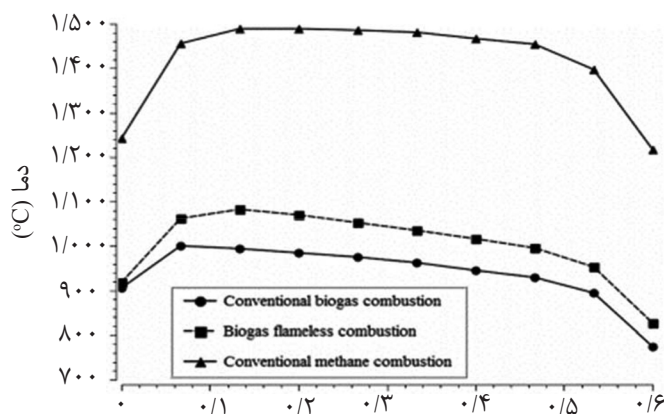
شکل ۱۲ خطوط مسیر جریان در مشعل در احتراق معمولی (تفاوت رنگ بیانگر تغییرات سرعت است)

جدول ۲ شرایط مرزی در احتراق بدون شعله

شرط مرزی	دما (K)	شرط مرزی	دما (K)
ورودی هوا	۱۳۰۰	دیوار سمت چپ	۱۰۲۷
ورودی سوخت	۳۰۰	دیوار انتهایی	۱۰۲۷
خروجی دودکش	۱۰۲۷	دیوار متصل کننده جلو	۱۰۲۷
دیوار کف	آدیاباتیک	مشعل	آدیاباتیک
دیوار سمت راست	۱۰۲۷	دودکش	۱۰۲۷

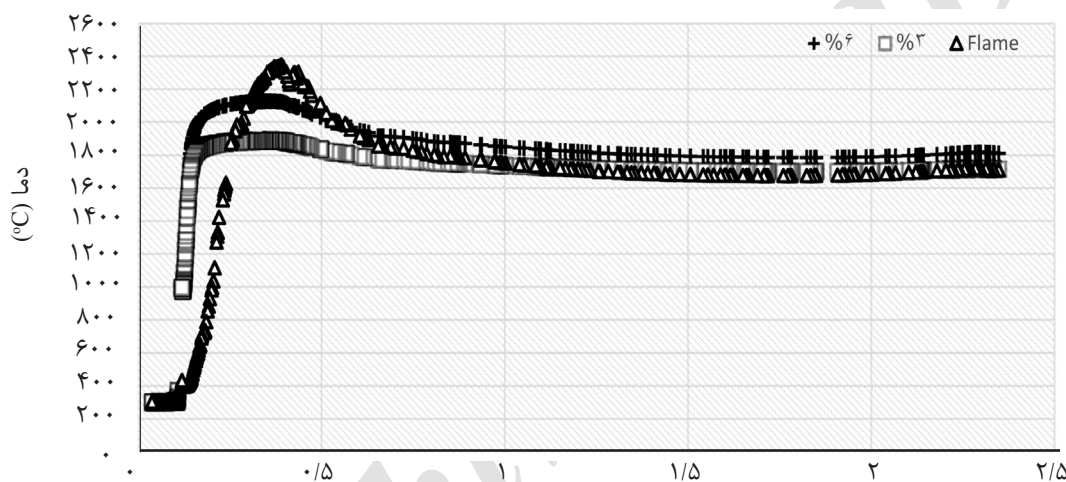


شکل ۱۳ نیم رخ سرعت در حالت بدون شعله



طول کوره (m)

شکل ۱۴ نیم رخ دمای مدل حسینی و عبدالوحید در سه حالت احتراق معمول و بدون شعله با استفاده از بیوگاز و متان [۲۶]



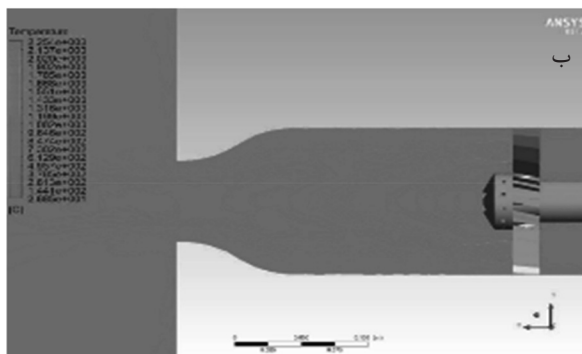
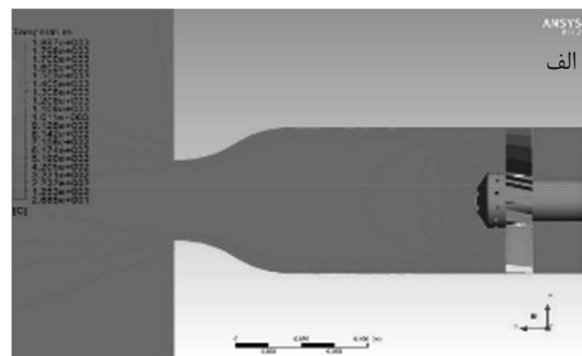
طول کوره (m)

شکل ۱۵ نیم رخ دمای کوره در محور مرکزی مشعل در طول کوره در حالت احتراق معمولی (Δ) و احتراق بدون شعله با اکسیژن ۳٪ (□) و ۶٪ (+)

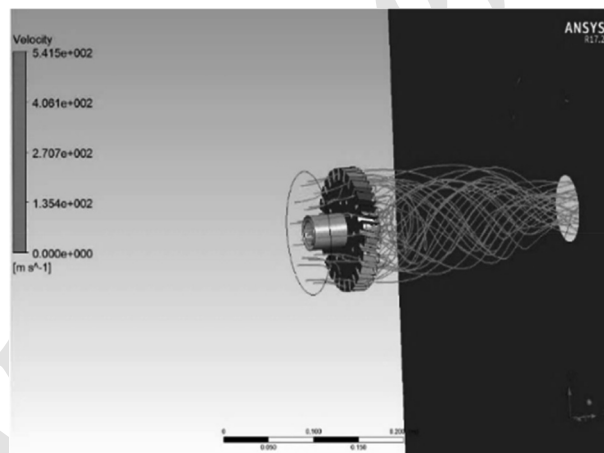
نازک دما بالا بیانگر ظهور شعله است. در حالی که در حالت بدون شعله پس از شروع واکنش، نیم رخ دما تا انتهای مشعل به صورت یکنواخت به پیش رفته است. نتایج مدل سازی در شکل ۱۶ حکایت از آن دارد که پس از اختلاط جریان رقیق هوا و متان، واکنش به سرعت شکل گرفته و در ادامه مسیر جریان توزیعی یکنواخت از دما را به دست آمده است. آنچه که به وضوح از خطوط جریان مشعل در شکل ۱۷ قابل بیان است، افزایش شدید بازچرخش آشفته جریانات گازی در این ناحیه طی احتراق بدون شعله نسبت به احتراق معمولی، که دیگر مشخصه احتراق بدون شعله است. جنبه دیگر مهم احتراق بدون شعله، کاهش ترکیبات NOx تا حدود بسیار پایین است.

برای نمونه بیشینه دمای مشعل در این خط، از حدود ۲۳۵۰ به ۱۹۰۰ K و ۲۱۰۰ K به ترتیب در احتراق بدون شعله با ۳ و ۶٪ اکسیژن کاهش یافته است دلیل تفاوت دمایی زیاد مطالعات حسینی و عبدالوحید بین دو حالت بدون شعله و احتراق معمولی آن است که میزان دما سوخت ورودی و نسبت سوخت به اکسیژن در آن پژوهش یکسان نبوده است. مزیت اصلی احتراق بدون شعله نسبت به احتراق معمولی یکنواخت شدن دما و از بین رفتن بیشینه‌های دمایی در نیم رخ دمایی است؛ که در شکل ۱۴ این تفاوت مشهود است.

مطابق با نیم رخ دمای مطالعات حسینی و عبدالوحید [۲۵] در حالت احتراق معمولی اختلاف دما نواحی



شکل ۱۶ نیم رخ دمایی احتراق بدون شعله (الف) - نیم رخ دمایی احتراق معمولی (ب)

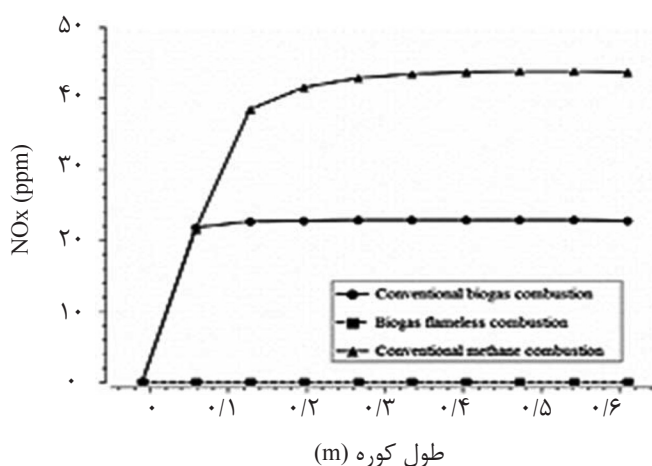


شکل ۱۷ نیم رخ خطوط جریان بر حسب سرعت

سطح NO تولیدی که توسط نرم‌افزار از طریق تمامی فرم‌های تولیدی آن به‌دست آمده است، در حالت بدون شعله با غلظت ۰.۶٪ اکسیژن حدود ۴۰۰ مرتبه و در حالت غلظت ۰.۳٪ اکسیژن ۳۰۰۰ مرتبه کمتر از حالت احتراق معمولی به‌دست آمده است. که این امر بیانگر توجیهی مبنی بر لزوم استفاده از این فرآیند در صنعت نیز است.

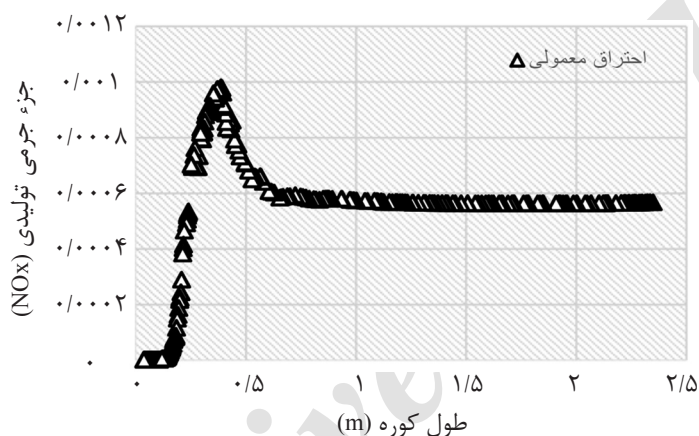
مشابه با مطالعات حسینی و عبدالوحید (شکل ۱۸)، کاهش ترکیبات NO<sub>x</sub> بسیار موثر گزارش داده شده است. جهت دستیابی به توزیعی دقیق‌تر با استفاد از خطوط جریان، منحنی آلاینده‌گی جزء جرمی NO در راستای X در کل کوره در دو حالت احتراق معمولی شکل ۱۹ و بدون شعله شکل ۲۰ رسم گردید.

همانطوری که در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمایان است،



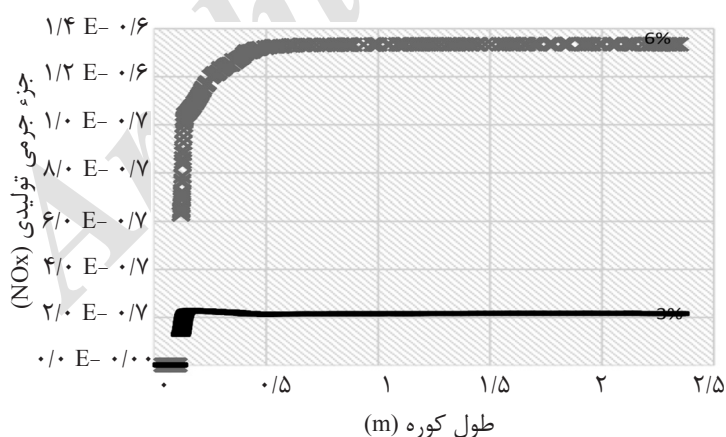
طول کوره (m)

شکل ۱۸ میزان انتشار ترکیبات NOx مطالعات حسینی و عبدالوحید [۲۶]



طول کوره (m)

شکل ۱۹ جزء جرمی آلاینده NO در احتراق معمولی

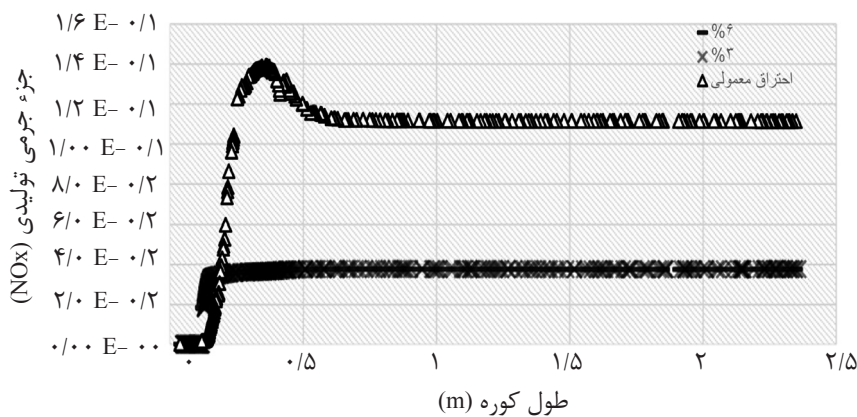


طول کوره (m)

شکل ۲۰ جزء جرمی آلاینده NO در احتراق بدون شعله در غلظت‌های ۰.۶٪ و ۳٪ اکسیژن

شعله مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق شکل ۲۱، میانگین جزء کربن دی اکسید کربن تولیدی در حالت احتراق معمولی ۰/۱۱۵ حاصل شده است، در حالی که در حالت بدون شعله، این مقدار هر دو غلظت اکسیژن تقریباً به مقداری یکسانی برابر با ۰/۳۷۵ تقلیل یافته است.

همچنین نتایج مدل حاکی از این است که در کنار کاهش چشمگیر میزان ترکیبات NO، میزان کربن دی اکسید (CO<sub>2</sub>) تولیدی نیز با کاهش رو به رو بوده است. به منظور بررسی این کمیت در طول کوره، محور مرکزی مشعل تا انتهای کوره به عنوان مقیاس سنجش، در دو حالت احتراق معمولی و بدون



شکل ۲۱ جزء جرمی کربن دی اکسید تولیدی در کوره در حالت احتراق معمولی ( $\Delta$ ) و احتراق بدون شعله با اکسیژن ۳٪ ( $\times$ ) و ۶٪ (-)

توجه به فضای بزرگ و تغییر اندازه دهانه ورودی و خروجی، به نظر می‌رسد بایستی در شرایط آزمایشگاهی، شرایط پیشنهادی در آن اعمال گردد. داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی مقایسه گردد. البته سطح کاهش یافته آلاینده‌ها در کل کوره و مدل عملکرد مشعل با شرایط اعمال شده، نوید بخش حالت بدون شعله یا بسیار نزدیک به آن در داخل محفظه احتراق است.

#### تشکر و قدردانی

از شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت بابت ارائه اطلاعات مهندسی مشعل ساخته شده در این مطالعه، کمال تشکر و قدردانی را اعلام می‌داریم.

#### نتیجه‌گیری

به‌کارگیری فناوری نوین احتراق بدون شعله در این مطالعه موجب کاهش گرادیان‌های دمایی نسبت به حالت احتراق معمولی و یکنواختی نیم‌رخ دما گردیده است. به عبارت دیگر، میزان بازه تغییر دما در احتراق معمولی از حدود ۶۰۰ درجه به ترتیب در غلظت‌های اکسیژنی ۳ و ۶٪ به ۱۵۰ و ۳۰۰ °C کاهش یافته است. میزان جزء جرمی ترکیبات NOx نسبت به احتراق معمولی با کاهشی چشم‌گیر روبه‌رو بوده است. این مقدار در غلظت ۳٪ اکسیژن با پایین‌ترین حد برابر با ۰/۲ ppm و در غلظت ۶٪، برابر با ۱/۴ ppm تخمین زده شده است. نتایج به‌دست آمده بیانگر اهمیت استفاده از احتراق بدون شعله است. در داخل این کوره با

#### مراجع

- [1]. Bradley D., Lau A. and Lawes M., "Flame stretch rate as a determinant of turbulent burning velocity," DOI: 10.1098/rsta.1992.0012, Vol. 338, issue 1650, 15 February 1992.
- [2]. Keizer S. H., "Flameless combustion in a 2x100kWth furnace," Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering-Department of Process & Energy Delft University of Technology, 2014.
- [3]. Hendrik Keizer S., "Flameless combustion in a 2x100kWth furnace: A comparison of experiments with CFD-type simulations," Netherlands: Department of Process & Energy Delft University of Technology, 2014.
- [4]. Wuenning J. G., "FLOX - flameless combustion," in : Thermprocess Symposium, 2003.
- [5]. Cavaliere A., "Mild combustion," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30: pp. 329-366, 2004.
- [6]. Weinberg F. J., "Combustion temperatures: the future?," Nature, pp. 233:239-241, DOI.1999-01-3682, 1971.
- [7]. Mardani A., "Effect of flow dynamics and chemical mechanisms on flame in HITAC," Amir Kabir Univ, 2010.



- [8]. Delacroix F., "The flameless oxidation mode," ADEME (French Agency for energy and environment management).
- [9]. Weber R. and Smart J. P., "On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30: pp. 2623-2629, 2005, .
- [10]. He Y., "Flameless combustion of natural gas in the SJ/WJ furnace," Thesis for Doctor of Philosophy Queen's University 2008.
- [11]. Cavaliere A. and De Joannon M., "Mild combustion," Prog. Energy Combustion Science, Vol. 30: pp. 329-366, 2004.
- [12]. Minamoto Y., "Physical aspects and modelling of turbulent MILD combustion," A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy at University of Cambridge, 2013.
- [13]. Dally B. B., Riesmeier E. and Peters N., "Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion," Combustion and Flame, Vol. 137, Issue 4, pp. 418-431 June 2004.
- [14]. Oldenhof E., Tummers M. J., van Veen E. H. and Roekaerts D. J. E. M., "Role of entrainment in the stabilisation of jet in hot coflow flames," Combustion Flame, 158: pp. 1553-1563, 2011.
- [15]. Christo F. C. and Dally B. B., "Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow," Combustion and Flame, Vol. 142, Issues 1-2, pp. 117-129, July 2005.
- [16]. Xing F., Kumar A., Huang Y., Chan Sh., Ruan C., Gu S. and Fan X., "Flameless combustion with liquid fuel: A review focusing on fundamentals and gas turbine application," Applied Energy, pp. 28-51, 2017.
- [17]. Tsuji H., A. K. G., Hasegawa T., Katsuki M., Kishimoto K. and Morita M., "High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction," in CRC Press. Japan, 2003.
- [18]. Li P. F., J. Ch. Mi, Dally B. B., Wang F. F., L. Wang, Liu Zh. H., Chen Sh. and Zheng Ch. G., "Progress and recent trend in MILD combustion," Sci. China. Technol. Vol. 54, pp. 255-69, 2011.
- [19]. Awosope I. O. and F Lockwood. C., "Prediction of combustion and NOx emission characteristics of flameless oxidation combustion," IFRF Combustion Journal, 2005.
- [20]. Wuenning. J. A. W. a. J. G., "Flameless oxidation to reduce thermal NO formation," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 23, Issue 1, pp. 81-94, 1997.
- [21]. Company A. Ansys Documentation, "User guide".
- [22]. Zel'dovich Y. B., "The oxidation of nitrogen in combustion to reduce thermal no-formation," Acta Physiochimica U.S.S.R., 1946.
- [23]. Miller J. A. and Bowman C. T., "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 15, Issue 4, pp. 287-338, 1989.
- [24]. Dagaut P., Glarborg P. and Alzueta M. U., "The oxidation of hydrogen cyanide and related chemistry," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 34, Issue 1, pp. 1-46, 2008, .
- [25]. Hosseini S. E. and Abdul Wahid M., "Investigation of bluff-body micro-flameless combustion," Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp. 120-128, 2014.
- [26]. Hosseini S. E., Bagheri G. and Wahid M. A., "Numerical investigation of biogas flameless combustion," Energy Conversion and Management, Vol. 81: pp. 41-50, 2014.