

بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی محفظه احتراق بر احتراق بدون شعله

مجید سبزویشانی
دانشیار دانشکده مکانیک - دانشگاه کاشان
Spooshan@kashanu.ac.ir

سعید حیدری ده چشمه
دانشجوی دکتری مکانیک - دانشگاه کاشان
Saeed.heydari.d@gmail.com

چکیده

شکل جدیدی از احتراق با عنوان احتراق بدون شعله یا اکسیداسیون بدون شعله راه حل بسیار نویدبخشی در مسیر صرفه جویی در مصرف انرژی و نیز کاهش تولید NOx است. در این روش احتراق، با پیش گرم کردن هوای ورودی و بازچرخش محصولات احتراق در محفظه، ناحیه واکنش از یک جبهه محدود به مانند احتراق های معمولی، به یک ناحیه وسیع تر با دمای اوج کم تر، گسترش یافته و اکسیدهای نیتروژن کم تری تولید می شود. یکی از مهمترین معیارها در ایجاد احتراق بدون شعله نرخ بازچرخش محصولات احتراق به درون محفظه است. بنابراین هندسه محفظه احتراق می بایست به گونه ای طراحی شود که محصولات احتراق با نرخ و دبی بیشتری واکنش دهنده ها را تحت تأثیر قرار دهند. در این مطالعه عددی تأثیر دو پارامتر هندسی محفظه احتراق بر احتراق بدون شعله با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت مورد بررسی قرار گرفته است. این دو پارامتر شامل شکل محفظه احتراق در سه حالت همگرا، پایه و واگرا و نیز فاصله نازل های ورودی سوخت و اکسیدکننده می باشند. نتایج نشان می دهد با واگرا کردن محفظه شرایط برای ایجاد احتراق بدون شعله بسیار مناسب تر از دیگر حالت ها است. هم چنین با افزایش فاصله نازل سوخت از نازل اکسیدکننده دمای احتراق و میزان تولید NOx گرمایی کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: احتراق بدون شعله - نرخ بازچرخش محصولات احتراق، پارامترهای هندسی

مقدمه

احتراق بدون شعله^۱ یکی از فن آوری های مهم در زمینه احتراق است که در جهت افزایش راندمان احتراق و نیز کاهش آلاینده هایی چون مونوکسید-کربن گام مؤثری برداشته است. نام گذاری بدون شعله بدین دلیل است که شعله حاصل از احتراق بدون شعله در مقایسه با شعله های معمولی مشخصه دیداری و درخشندگی واضحی ندارد و شعله فقط تحت شرایط خاص قابل مشاهده است. این نوع احتراق با نام های دیگری چون احتراق بی رنگ^۲، احتراق آرام^۳ و احتراق با هوای دما بالا^۴ نیز شناخته می شود [۱]. مکانیزم NO گرمایی مهمترین مکانیزمی است که تاکنون برای تشکیل NOx در احتراق سوخته های گازی ارائه شده است. این مکانیزم برای اولین بار توسط زلدوویچ [۲] مطرح شد. دما و غلظت بالای اکسیژن از عوامل

مهم در این مکانیزم بوده و تقریباً در اکثر فرآیندهای احتراقی دخیل می-باشند. این مکانیزم توسط سه واکنش اساسی زیر، با عنوان مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته بیان می گردد:



این واکنش ها بعنوان واکنش های تشکیل NO حرارتی نیز نامیده می-شوند. تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مولکول نیتروژن نیازمند شکسته شدن پیوند قوی بین اتم های نیتروژن است و همین امر موجب وابستگی شدید این مکانیزم به درجه حرارت می گردد.، زیرا واکنش (۱) بعلت پیوند سه گانه قوی در مولکول N₂ دارای انرژی فعال سازی بسیار بالایی بوده و لذا فقط در دماهای بالا واکنش سریع انجام می گیرد. لذا واکنش اول، محدودکننده تشکیل NO حرارتی است.

از مهمترین ویژگی های احتراق بدون شعله توزیع دمای یکنواخت با حداقل گرادیان دما است و از آنجا که دمای اوج احتراق در مقایسه با شعله های معمولی پایین تر است، میزان تولید آلاینده ها به طور محسوس کاهش می-یابد. هم چنین ناحیه واکنش به طور گسترده تمامی فضای محفظه احتراق را در بر می گیرد.

یکی از مهمترین پارامترها در ایجاد احتراق بدون شعله نرخ بازچرخش داخلی محصولات احتراق^۵ درون محفظه است که در توزیع یکنواخت ناحیه واکنش و نیز کاهش دمای اوج احتراق بسیار مؤثر است. بازچرخش محصولات از یک سو باعث افزایش دمای واکنش دهنده ها به دمای بالاتر از دمای خوداشتعالی می شود و از سوی دیگر مخلوط واکنش دهنده را قبل از ورود به ناحیه واکنش رقیق می کند. بنابراین میدان جریان درون محفظه احتراق و نیز طراحی هندسه مناسب برای کنترل نرخ بازچرخش محصولات از مهمترین عوامل در شکل گیری احتراق بدون شعله است.

در سال های اخیر پژوهشگران مطالعات زیادی در زمینه نقش پارامترهای هندسی محفظه در رژیم احتراقی بدون شعله انجام داده اند. جی می و همکارانش [۳] دریافته اند که تغییر پارامترهایی چون قطر خروجی و زاویه نازل های پاشش هوا و سوخت تأثیر قابل ملاحظه ای بر فاصله نفوذ جریان سوخت و نیز نرخ بازچرخش محصولات (دو ویژگی مهم در احتراق بدون شعله) دارند. پنگفی و همکارانش [۴] با مطالعه بر روی پارامترهای مؤثر در رینولدز چون نازل ورودی سوخت و هوا نشان دادند که احتراق بدون شعله در حالت پیش مخلوط در محفظه احتراق مورد مطالعه فقط در حالتی که

¹ Flameless Combustion

² Colorless Combustion

³ MILD Combustion

⁴ HiTAC

⁵ Internal Recirculation Rate

معادلات حاکم شامل بقای جرم، مومنتوم، اجزاء شیمیایی و انرژی بر اساس روش حجم محدود حل شده است. به منظور دستیابی به حل مستقل از شبکه بندی، تعداد سلول های محاسباتی در دو حالت بررسی شده اند. نتایج حاصل از ۱۸۰۰۰ شبکه مربعی سازمان یافته رضایت بخش بوده است تغییر محسوسی نسبت به حالت دیگر نشان نمی دهد. شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت ۱۸ انجام شده است. جریان آشفته با مدل k-epsilon و شرایط تابع دیواره استاندارد حل شده است. برای حل مدل تشعشی و نیز جذب بین مولکول های گاز و دیواره از مدل P1 و ضریب جذب WSGGM-domain-based استفاده شده است. هم چنین حالت SIMPLE برای کوپلینگ فشار-سرعت مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین مسئله در شبیه سازی احتراق بدون شعله، انتخاب مدل احتراقی مناسب است. رینولدز و همکارانش [۸] با استفاده از مدل های متفاوت احتراقی دریافتند به علت این که نرخ واکنش در رژیم احتراقی بدون شعله آهسته تر و آرام تر از احتراق معمولی است و خصوصیات مقیاس زمانی^۱ مربوط به واکنش شیمیایی قابل مقایسه با مقیاس زمانی برای اختلاط آشفته است، لذا مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه ای پیش بینی بهتری برای احتراق بدون شعله ارائه می دهد. هم چنین در محاسبات از مکانیزم واکنش ۵ مرحله ای درج شده در جدول (۲) استفاده شده است.

جدول (۲) مکانیزم واکنش بکاررفته

واکنش	واکنش
$CH_4 + 0.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	۱ واکنش
$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	۲ واکنش
$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	۳ واکنش
$C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	۴ واکنش
$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	۵ واکنش

معیار همگرایی برای معادله پیوستگی خطای نسبی 10^{-5} و برای سایر معادلات بقا 10^{-6} تعریف شده است.

نتایج

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد یکی از مهمترین معیارهای ایجاد احتراق بدون شعله بازچرخش بالای محصولات واکنش درون محفظه احتراق است. نرخ بازچرخش اولین بار توسط وونینگ [۹] به صورت معادله (۴) تعریف شده است:

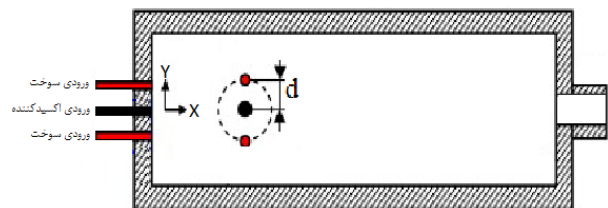
$$K_v = \frac{m_e}{(m_a + m_f)} \quad (4)$$

این ضریب به صورت نسبت دبی جریان بازگشتی محصولات احتراق (m_e) به مجموع دبی های ورودی سوخت و اکسیدکننده ($m_a + m_f$) می باشد. در شکل (۲) بردارهای سرعت محوری در سه حالت محفظه همگرا، واگرا و پایه نشان داده شده است. بردارهای سرعت در مرکز در جهت محور مرکزی محفظه و در دیواره های جانبی به صورت برگشتی و در خلاف جهت محور مرکزی می باشند. خطوط قرمز جریان محوری را از جریان برگشتی جدا می کنند و بیانگر سرعت محوری صفر هستند. همانگونه که در شکل مشخص است جریان برگشتی در محفظه واگرا نسبت به محفظه همگرا در

عدد رینولدز از یک مقدار بحرانی فراتر رود ایجاد می شود. جی بان چون و همکارانش [۵] نیز تأثیر نرخ مومنتوم جت سوخت و هوا را با تغییر خصوصیات هندسی نازل های ورودی بر احتراق بدون شعله بررسی کردند و دریافتند که در حالتی که نرخ مومنتوم از یک مقدار بحرانی بالاتر باشد، رژیم احتراقی به احتراق بدون شعله تبدیل می شود. هم چنین لیوبو و همکارانش [۶] در یک مطالعه عددی به بررسی تأثیر قطر نازل هوا، تعداد نازل سوخت و هوا و نیز دمای پیش گرم بر عملکرد محفظه احتراق پرداختند. آنها دریافتند که با کاهش قطر نازل، مومنتوم جت هوا افزایش یافته و نیز با افزایش تعداد نازل پاشش هوا راندمان احتراق افزایش می یابد. در این مطالعه با استفاده از محفظه احتراق IFRF [۷] به بررسی عددی پارامترهای فاصله نازل های سوخت و اکسیدکننده و شکل محفظه در احتراق بدون شعله پرداخته شده است. اثرات تغییر فاصله نازل های پاشش سوخت (d) در سه فاصله ۱۰۰، ۲۸۰ و ۴۶۰ میلی متر و هم چنین شکل محفظه احتراق در حالات همگرا، پایه و واگرا بر میدان جریان و گردادیان دمای محفظه بررسی شده است.

شبیه سازی عددی

در این مطالعه از محفظه احتراق نیمه صنعتی IFRF با مقطع مربعی ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ میلی متر و طول ۶۲۵۰ میلی متر استفاده شده است. این محفظه شامل یک نازل اکسید کننده در مرکز با قطر داخلی ۱۲۴ میلی متر و دو نازل سوخت در فاصله ۲۸۰ میلی متری نازل مرکزی با قطر ۱۰ میلی متر می باشد.



شکل (۱) نمای دو بعدی محفظه احتراق IFRF [۷]

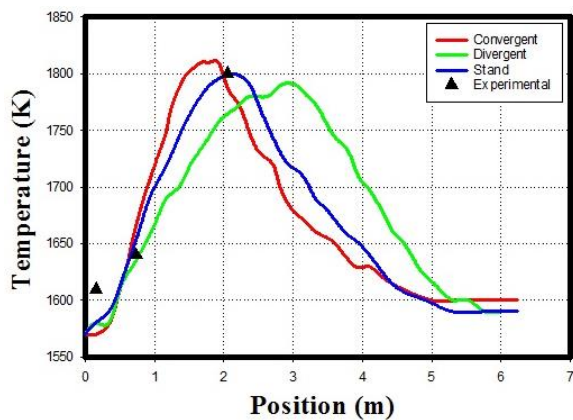
شرایط آزمایش انجام شده در حالت پایه در جدول (۱) آورده شده است. شبکه شامل ۱۸۰۰۰ سلول است که با استفاده از نرم افزار گمبیت ایجاد شده است. با توجه به متقارن بودن شکل محفظه، نیمی از آن شبکه بندی شده و خط مرکزی، محور تقارن تعریف می شود. در ورود از شرط مرزی دبی ورودی ثابت و در خروج، شرط مرزی فشار (فشار محیط) اعمال شده است. دیواره محفظه با دمای ثابت ۱۵۰۰ کلوین و ضریب تشعشع داخلی ۰/۶ در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) شرایط آزمایشگاهی [۷]

پارامتر	دبی (kg/h)	دما (K)	ترکیبات (درصد حجمی)
سوخت	۴۷	۲۹۸	$CH_4=87/8$ $C_2H_6=4/6$
اکسیدکننده	۸۳۰	۱۵۷۳	$C_3H_8=1/6$ $N_2=5/5$
گازهای خروجی	۸۷۷	۱۴۹۳	$O_2=19/5$ $N_2=59/1$ $H_2O=15$ $CO_2=6/4$
			140 ppm NOx

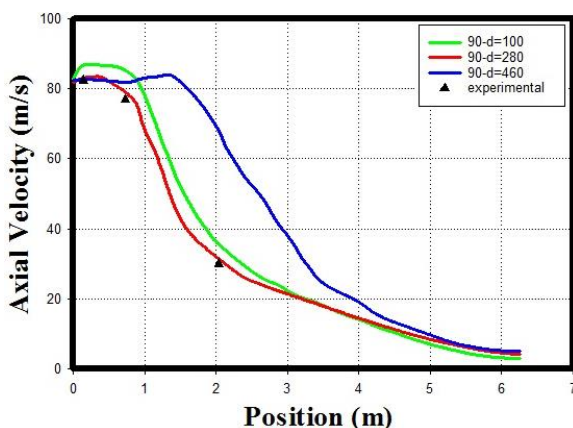
¹ Time Scale

تماس خطوط همدمای با محور طولی را نشان می‌دهند. اگر به طور مثال دمای ۱۶۰۰ کلوین را در نظر بگیرید مشخص است که این دما در محفظه واگرا در فاصله محوری بیشتری نسبت به محفظه همگرا و پایه قرار دارد و خطوط همدمای ۱۶۰۰ کلوین فضای بیشتری از محفظه را در بر می‌گیرد.



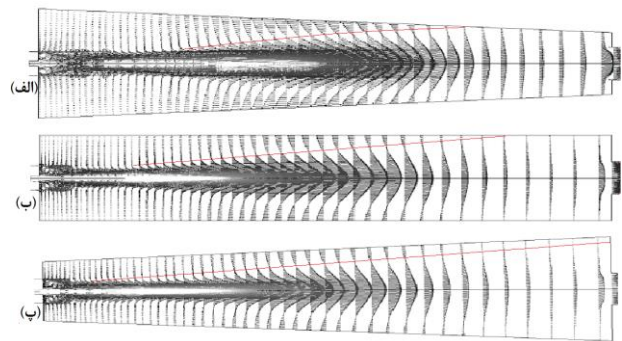
شکل (۴) تغییرات دمای احتراق در راستای محور محفظه (X) در سه حالت همگرا، پایه و واگرا

نمودارهای شکل (۵) و (۶) تأثیر افزایش فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده را بر سرعت محوری و نیز دمای محفظه احتراق را نشان می‌دهند. تغییر فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده بیشتر در ناحیه بالادست محفظه احتراق تأثیرگذار است. ناحیه‌ای که سوخت و اکسیدکننده برای ورود به ناحیه واکنش با یکدیگر مخلوط می‌شوند. همانطور که در شکل مشخص است هر چه فاصله نازل‌ها افزایش یابد ناحیه واکنش در راستای محور محفظه (X) به جلوتر کشیده و جابجا می‌شود. حداکثر دمای احتراق در محفظه با $d=100$ در $X=1650$ میلی‌متر و در محفظه با $d=460$ در $X=2700$ رخ داده است. هم‌چنین با فاصله گرفتن نازل سوخت از نازل اکسید کننده دمای احتراق کاهش یافته است. این کاهش دمای احتراق بدلیل حضور مؤثرتر جریان برگشتی در ورودی سوخت می‌باشد. هر چه d افزایش یابد میزان رقیق‌تر شدن واکنش‌دهنده‌ها توسط جریان بازچرخش بهتر انجام می‌شود.



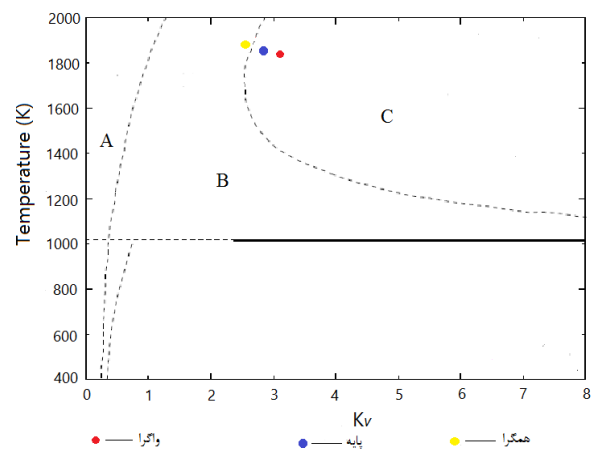
شکل (۵) تغییرات سرعت محوری در راستای محور محفظه (X) در سه فاصله مختلف نازل سوخت از اکسیدکننده

مکانی پایین دست‌تر آغاز می‌شود و سطح جانبی بیشتری را در بر می‌گیرد. بنابراین نرخ بازچرخش در محفظه واگرا بزرگ‌تر از دو حالت دیگر است.



شکل (۲) بردارهای سرعت محوری در سه حالت محفظه (الف) همگرا، (ب) پایه و (پ) واگرا

در شکل (۳) رابطه بین نرخ بازچرخش و دمای احتراق محفظه برای سوخت متان که توسط وونینگ ارائه شده، برای حالات مختلف احتراق نشان داده شده است. در این نمودار سه رژیم احتراقی شامل احتراق معمولی (A)، ناحیه شعله ناپایدار (B) و احتراق بدون شعله (C) بر حسب K_v و دمای محفظه مشخص شده‌اند. با بکاربردن نتایج شبیه‌سازی سه محفظه در این نمودار می‌توان دریافت هندسه محفظه از معیارهای مؤثر در ایجاد احتراق بدون شعله است. چرا که با همگرا شدن محفظه احتراق صورت گرفته از ناحیه احتراق بدون شعله خارج شده است. برای ایجاد احتراق بدون شعله در محفظه همگرا نیاز به تغییر شرایط اولیه است. این شرایط می‌تواند سرعت پاشش سوخت و یا پیش گرم کردن واکنش‌دهنده‌ها باشند.



شکل (۳) رابطه دمای احتراق و نرخ بازچرخش محصولات (K_v)

با توجه به شکل (۳) با واگرا کردن محفظه در یک مقطع خاص دمای کم‌تر و نرخ بازچرخش بالاتر را مهیا می‌سازد. نتایج بدست‌آمده در شکل (۳) در مقطع $X=1000$ محاسبه شده است.

در شکل (۴) توزیع دما در محور طولی محفظه احتراق نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است حداکثر دما در محفظه واگرا کمتر از دیگر محفظه‌هاست. با توجه به اینکه یکی از ویژگی‌های احتراق بدون شعله اوج دما و گرادیان دمای پایین است، هرچه مقطع واگرا تر باشد شرایط برای ایجاد احتراق بدون شعله مناسب‌تر است. با توجه به این که شکل (۴) دمای محور طولی محفظه را نشان می‌دهد، این نقاط محل

نتیجه‌گیری

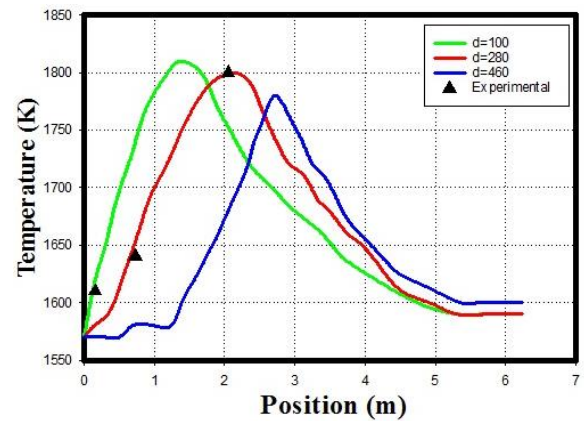
در این مطالعه عددی به تأثیر دو پارامتر هندسی در ایجاد احتراق بدون شعله در محفظه احتراق IRFR در حالت دو بعدی پرداخته شد. این دو پارامتر شامل شکل هندسی محفظه و فاصله نازل‌های سوخت و اکسیدکننده از یکدیگر بودند. نتایج پیش‌بینی‌شده در مقایسه با داده‌های تجربی که برای حالت پایه ارائه شده‌اند، تقریباً سازگاری خوبی دارند. محفظه مورد مطالعه در سه حالت هندسی همگرا، پایه و واگرا و نیز در سه فاصله نازل سوخت از نازل اکسیدکننده (۱۰۰، ۲۸۰ و ۴۶۰ میلی‌متر) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که با واگرا کردن محفظه، جریان بازچرخش قوی‌تری ایجاد شده و دمای اوج احتراق و میزان NO_x گرمایی تولیدی کاهش می‌یابند. همچنین با فاصله گرفتن نازل سوخت از نازل اکسیدکننده، واکنش‌دهنده‌ها با جریان برگشتی بیشتری تداخل داشته و باعث رقیق‌تر شدن آنها پیش از ورود به ناحیه واکنش می‌شوند. این امر موجب کاهش دمای اوج احتراق و NO_x گرمایی شد. همچنین با نزدیک کردن فاصله نازل‌ها ناحیه واکنش به بالادست محفظه کشیده شد. با توجه به شرایط ایجاد احتراق بدون شعله، در یک شرایط اولیه خاص، هرچه هندسه محفظه احتراق واگراتر باشد، دسترسی به احتراق بدون شعله سریع‌تر می‌باشد.

فهرست علائم

d	فاصله نازل سوخت و اکسیدکننده، mm
K_v	نرخ بازچرخش محصولات،
m_e	دبی جرمی جریان بازگشتی، Kg/s
m_f	دبی جرمی سوخت، Kg/s
m_a	دبی جرمی اکسیدکننده، Kg/s
V_x	سرعت محوری، m/s

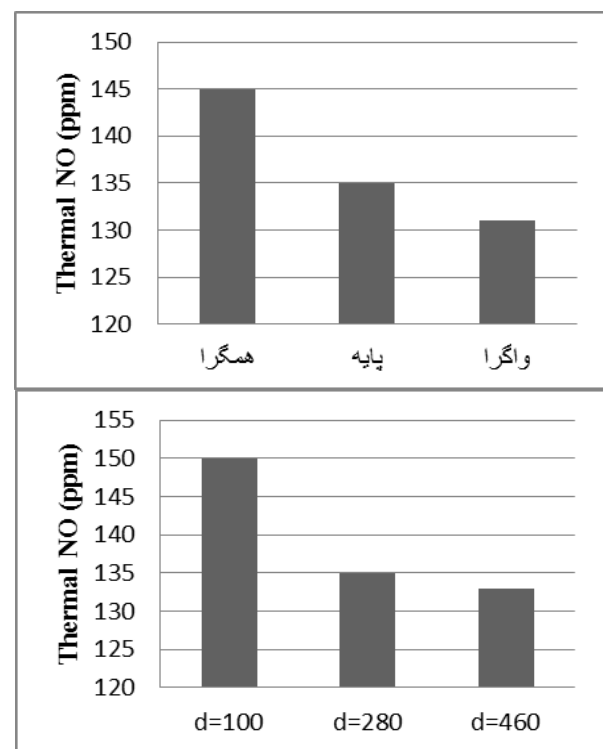
مراجع

- 1-A. Cavaliere, M.D. Joannon, 2004, "Mild combustion", Prog. Energy Combust. Sci. 30 , 329-366.
- 2- Zeldovich, Y. B., and Sadovnikov, P. Y, 1947 "Oxidation of Nitrogen in Combustion", Science Academy of USSR.
- 3- J. Mi, F.Wang , P. Li , B.B. Dally , 2012 "Modified vitiation in a moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion furnace", Energy Fuels 26, 265-277.
- 4- P. Li, J. Mi, B.B. Dally, R.A. Craig, F. Wang, 2011 "Premixed moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion from a single jet burner in a laboratory scale furnace", Energy Fuels 25, 2782e2793.
- 5- J. Mi, P. Li†, B.B. Dally , R.A. Craig, 2009, "Importance of initial momentum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion in a recuperative furnace", Energy Fuels, 23 (11), 5349–5356.
- 6- L. Bo; W. Yuanhua; X. Hong., 2016, "Numerical study of air nozzles on Mild combustion for application



شکل (۶) تغییرات دمای احتراق در راستای محور محفظه (x) در سه فاصله مختلف نازل سوخت از اکسیدکننده

در شکل (۷) میزان NO گرمایی پیش‌بینی شده برای حالات مختلف محفظه نشان داده شده است. همانطور که اشاره شد میزان تولید آلاینده NO حرارتی وابستگی شدید به دمای احتراق دارد. از آنجا که دمای احتراق با واگرا کردن محفظه کاهش یافته است، میزان NO در محفظه واگرا در کمترین میزان نسبت به دو محفظه پایه و همگرا قرار دارد.



شکل (۷) مقدار NO گرمایی با تغییر شکل محفظه (بالا) و فاصله نازل‌ها (پایین)

همچنین با افزایش فاصله نازل سوخت نسبت به نازل اکسیدکننده، به دلیل تداخل بهتر جت سوخت با جریان برگشتی، میزان رقیق شدن واکنش‌دهنده‌ها افزایش یافته و این باعث کاهش دمای احتراق می‌شود. با کاهش دمای احتراق میزان NO گرمایی نیز کاهش می‌یابد.

to forward flow furnace", China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 108-122.

7- Rebola A, Coelho P J, Costa M., 2012, "Assessment of the performance of several turbulence and combustion models in the numerical simulation of a flameless combustor" Combustion Science and Technology, 185(4), 600-626.

8- S. Orsino, M. Tamura, P. Stabat, S. Costantini, O. Prado, R. Weber, 2004, "Excess Enthalpy Combustion of Coal", Tech. Rep. F46/y/3, IFRF Research Station.

9- J.A. Wüning, J.G. Wüning, 1997, "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation", Prog. Energy Combust. Sci. 23 , 81-94.