

# بررسی تحلیلی اثر تغییر شدت چرخش جریان هوای ورودی بر رفتار دینامیکی جریان، دما و شار گرمایی تابشی مشعل هارول

امیر جواد احمدیان حسینی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سیدهادی پورحسینی\*

استادیار، دانشکده مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

محمد مقیمان

استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمدرضا مه پیکر

استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

## چکیده

در پژوهش حاضر اثر تغییر شدت چرخش جریان هوای ورودی به محفظه احتراق استاندارد هارول، بر الگوی جریان، توزیع دما، شار گرمایی تابشی و همچنین آلاینده NO مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به تاثیر چرخش بر رفتار دینامیکی جریان از رابطه جدیدی که مبتنی بر مولفه‌های مماسی و محوری سرعت جریان است برای تعیین و تحلیل عدد چرخش استفاده شده است. همچنین محاسبات واکنش‌های شیمیایی احتراق با استفاده از Eddy Dissipation Model و محاسبات جریان سیال و انتقال گرمای تابشی با استفاده از مدل‌های  $k-\epsilon$  و P-1 صورت گرفته است. مقایسه نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر با نتایج تجربی موجود، بیانگر تطابق بسیار بهتر حل حاضر نسبت به تحقیقات مشابه است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد چرخش هوای ورودی از ۰/۰ تا ۰/۶ با ایجاد و تقویت ناحیه گردابه داخلی در هسته مرکزی کوره باعث مکش محصولات احتراق به درون این ناحیه و ترکیب آنها با مخلوط سوخت و هوا و در نتیجه بهبود راندمان احتراق و حذف نقاط متمرکز دما بالا به عنوان منبع اصلی تشکیل آلاینده NO می‌گردد. همچنین افزایش عدد چرخش به دلیل پخش جریان در راستای شعاعی و افزایش سطح تبادل حرارتی شعله، به رغم کاهش دمای حداکثر شعله، شار گرمایی تابشی متوسط شعله را به میزان ۳۱/۳٪ افزایش و آلاینده NO را به میزان ۵۸/۶٪ کاهش می‌دهد. **واژه‌های کلیدی:** عدد چرخش، مشعل هارول، دما، انتقال گرمای تابشی.

## Parametric Assessment of Changing Inlet Air Swirl Intensity on flow Dynamic Behavior, Temperature and Radiation Heat Flux of Harwell Furnace

**A. J. Ahmadian Hosseini** Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

**S. H. Pourhoseini** Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

**M. Moghiman** Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

**M. R. Mahpeykar** Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

In this study, changing of inlet air swirl intensity of standard Harwell combustion chamber on dynamic flow, temperature, radiation heat flux and NO pollutant has been assessed. Due to the effect of swirling on dynamic behavior, a new equation has been utilized based on tangential and axial velocity component in order to achieve the swirl number. Furthermore, chemical reactions computation has been done using Eddy Dissipation model and flow computation and radiation heat flux were performed using standard  $k-\epsilon$  and P-1 models. The results show that increasing swirl number from 0.0 to 0.6 with amplification of internal recirculation zone of furnace will cause the combustion products into this area and mix air and fuel and accordingly, increase the combustion efficiency by eliminating the high temperature points as a main cause of NO generation. Moreover, increasing the swirl number in radial order and increasing the heat exchange area regardless of the maximum flame temperature reduction, will increase the flux radiation efficiency by 31.3% and reduce the NO pollutant by 58.6%.

**Keywords:** Swirl number, Harwell furnace, temperature, radiation heat transfer.

افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا در شعله‌های غیر پیش آمیخته است. در این شعله‌ها افزایش عدد چرخش باعث افزایش زمان ماند گونه‌های احتراقی در درون شعله می‌گردد که می‌تواند بر توزیع دمای شعله، آهنگ انتقال گرما از شعله و تشکیل آلاینده‌ها اثر گذار باشد [۳، ۴]. پورحسینی و همکاران [۵] در تحقیقی به بررسی اثر افزایش عدد چرخش جریان هوای ورودی در مشعل‌های سوخت مایع پرداختند. این محققین دریافتند که افزایش عدد چرخش موجب کاهش انتشار آلاینده اکسید نیتروژن و کاهش دمای خروجی از محفظه احتراق خواهد شد.

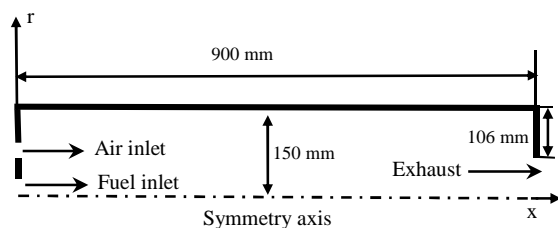
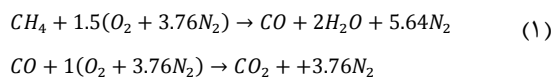
### ۱- مقدمه

راندمان گرمایی بالا و تولید و انتشار آلاینده‌ها کم یکی از ضروری‌ترین نکات در پژوهش بر روی سیستم‌های احتراقی است. در این راستا توجه به پدیده‌های فیزیکی حاکم بر احتراق از جمله میزان اختلاط سوخت و هوا به عنوان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تشکیل شعله توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود اختصاص داده است [۱، ۲]. ایجاد چرخش در جریان هوای ورودی به محفظه احتراق یکی از راه‌های

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hadipoorhoseini@gmail.com

استفاده شده است (شکل ۱). در این کوره جریان سوخت و هوا در حالت دو بعدی، پایا و مغشوش به ترتیب با سرعت‌های ۱۵/۰ و ۱۲/۸ متر بر ثانیه و دمای ۲۹۵ کلوین از مسیرهای جداگانه وارد محفظه احتراق می‌شوند. جدول ۱ شرایط عملکردی کوره را نشان می‌دهد.

برای حل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی، معادلات اغتشاش جریان، تابش و بقای گونه‌ها از روش حجم محدود بهره گرفته شده و جهت تلفیق معادلات فشار و سرعت از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. تمامی معادلات در حالت مرتبه دوم حل شده و حد همگرایی هنگامی فرض شده که مقادیر باقی‌مانده‌ها کمتر از  $10^{-6}$  باشد. همچنین برای احتراق متان، از واکنش دو مرحله‌ای ذیل استفاده شده است:



شکل ۱- هندسه محفظه احتراق

جدول ۱ شرایط عملکردی محفظه احتراق

کمیت	واحد	سوخت [۱۳]	هوا [۱۳]
شعاع ناحیه ورودی	(mm)	۰-۶	۲۷/۵-
سرعت محوری	(m/s)	۱۵/۰	۱۲/۸
سرعت شعاعی	(m/s)	۰/۰	۰/۰
عدد چرخش	-	۰/۰	۰/۴
انرژی سینتیک توربولنس <sup>۳</sup>	(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	۲/۲۶	۱/۶۳
نرخ اتلاف گردابه‌ای <sup>۴</sup>	(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	۱۱۳۱/۸	۶۹۲/۰
دما	(K)	۲۹۵	۲۹۵
کسر جرمی اکسیژن	-	۰/۰	۰/۲۳۱۵
کسر جرمی نیتروژن	-	۰/۰	۰/۷۶۸۵
کسر جرمی متان	-	۱/۰	۰/۰

وجود چرخش در جریان باعث می‌شود تا جریان علاوه بر مولفه سرعت محوری در راستای مماسی نیز حرکت کند که این امر نرخ اختلاط سوخت و هوا و رفتار شعله را به شدت دچار تغییر خواهد کرد. بر این اساس شبیه‌سازی صحیح چرخش جریان از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به نقش چرخش در ایجاد مولفه‌های سرعت محوری و مماسی در جریان در تحقیق حاضر برای بررسی اثر چرخش جریان هوای ورودی به محفظه احتراق بر مشخصه‌های شعله، از پارامتر بدون بعد عدد چرخش<sup>۵</sup> (S) به صورت معادله (۲) استفاده شده است. این رابطه تاثیر همزمان مولفه‌های سرعت محوری و مماسی جریان چرخشی را لحاظ

ژئو و همکاران [۶] تاثیر عدد چرخش را بر میزان آلاینده اکسید نیتروژن مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش عدد چرخش، میانگین دمای شعله به آهستگی افزایش یافته و دمای خروجی آگزوز و غلظت آلاینده اکسید نیتروژن خروجی کاهش می‌یابد. چنگ [۷] در مطالعه خود بر روی مشعل‌های پیش‌آمیخته کم‌پیچش، با قراردادن یک چرخاننده<sup>۱</sup> در هسته مرکزی جریان دریافت که ایجاد چرخش در جریان با استفاده از این شیوه باعث افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا قبل از ورود به محفظه احتراق، افزایش ناحیه گردابه مرکزی و کاهش نقاط تمرکز دمایی بالا در درون شعله شده و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده اکسید نیتروژن را به دنبال دارد. بشیرنژاد و همکاران [۸] تاثیر عدد چرخش را بر دمای شعله و نرخ تشکیل دوده مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که افزایش عدد چرخش موجب بالا رفتن دمای حداکثری شعله و نزدیک شدن آن به ورودی مشعل می‌گردد. آنها همچنین دریافتند که با افزایش عدد چرخش میزان دوده خروجی از محفظه احتراق نیز کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر بناتسا و همکاران [۹] تاثیر عدد چرخش را بر غلظت دوده خروجی از آگزوز مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که با افزایش میزان عدد چرخش تا حدود ۲، غلظت دوده خروجی از آگزوز کاهش می‌یابد ولی با افزایش عدد چرخش به مقادیر بزرگتر از ۲ غلظت دوده خروجی از آگزوز به تدریج افزایش می‌یابد. فیض و همکاران [۱۰] تاثیر عدد چرخش را بر عملکرد یک مشعل کم‌پیچش پیش‌آمیخته در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش عدد چرخش موجب افزایش پایداری شعله و افزایش میزان اتصال آن به مشعل خواهد شد. هوآنگ و یانگ [۱۱] نیز در پژوهشی مشابه دریافتند که افزایش عدد چرخش افزایش حد پایداری شعله را به دنبال دارد. باید توجه داشت که افزایش عدد چرخش بیش از حد بهینه ای باعث کاهش طول شعله، برگشت آن به دهانه ورودی مشعل و تضعیف خصوصیات احتراقی شعله خواهد شد.

با توجه به نقش مهم چرخش بر نرخ اختلاط سوخت و هوا و در نتیجه رفتار دینامیکی و احتراقی شعله، بکارگیری رابطه ای مناسب و فیزیکی برای تعیین عدد چرخش در مدل‌سازی جریان‌های احتراقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تحقیق حاضر برای تعیین عدد چرخش جریان از یک رابطه فیزیکی جدید و بر اساس نسبت مولفه‌های سرعت مماسی به محوری جریان استفاده شده است و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی موجود و نیز نتایج تحقیقات مشابه مقایسه شده است. همچنین از آنجا که در تحقیقات منتشر شده قبلی اثر تغییر شدت چرخش جریان هوای ورودی بر شار گرمایی تابشی شعله (به عنوان مکانیزم اصلی انتقال حرارت از شعله) به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است، تاثیر عدد چرخش جریان بر دما و آهنگ انتقال گرمای تابشی شعله نیز مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- تشریح مسئله و مدل‌سازی عددی

به منظور بررسی تاثیر چرخش جریان هوا (تغییر عدد چرخش) بر مشخصات احتراقی شعله متان-هوا از کوره استاندارد هارول<sup>۲</sup> [۱۲]

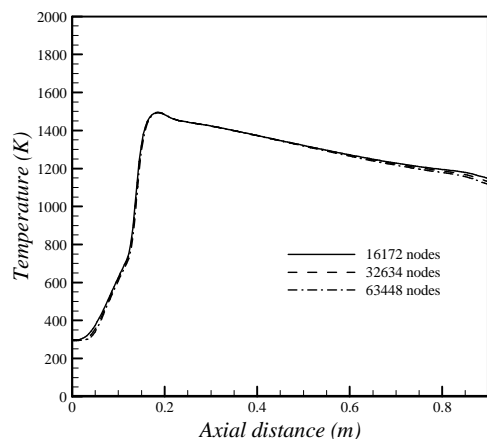
<sup>۳</sup> Turbulent kinetic energy

<sup>۴</sup> Dissipation rate of turbulence

<sup>۵</sup> Swirl number

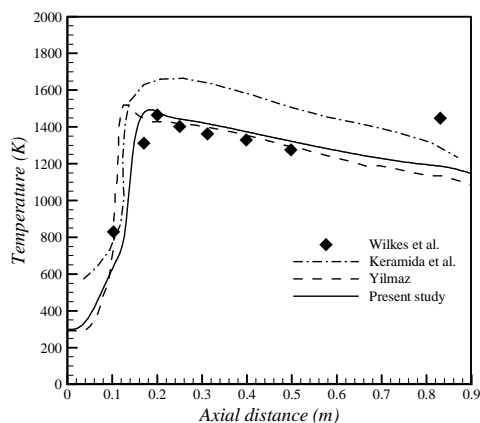
<sup>۱</sup> Swirler

<sup>۲</sup> Harwell



شکل ۲ - مقایسه استقلال از شبکه محاسبات

در شکل ۴ تاثیر افزایش عدد چرخش، بر رفتار جریان نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در حالتی که جریان ورودی بدون چرخش است (عدد چرخش ۰/۱۰)، یک ناحیه گردابه‌ای خارجی در نزدیکی دهانه ورودی محفظه احتراق شکل می‌گیرد. با افزایش عدد چرخش علاوه بر ناحیه مذکور، گردابه خارجی دیگری نیز در مجاورت آن وجود می‌آید که جهت چرخشی مخالف با گردابه قبلی دارد. افزایش بیشتر عدد چرخش موجب رشد بیشتر گردابه دوم گردیده، بطوریکه در عدد چرخش ۰/۳ گردابه خارجی دوم در حداکثر اندازه خود می‌باشد. همچنین در این حالت علاوه بر دو گردابه خارجی ذکر شده، یک ناحیه گردابه داخلی نیز در میانه کوره شروع به شکل‌گیری می‌کند. وجود گردابه مرکزی باعث اختلاط بهتر سوخت و اکسیدکننده می‌شود. به طوری که هوای اطراف شعله را به داخل شعله کشیده و اختلاط بهتری را شکل می‌دهد. با افزایش عدد چرخش به مقادیر بزرگتر از ۰/۳، دو گردابه خارجی با یکدیگر ترکیب و گردابه خارجی واحدی را تشکیل می‌دهد. با افزایش عدد چرخش به دلیل بزرگ شدن مولفه سرعت مماسی جریان، انحراف جریان از محور مرکزی کوره و ایجاد ناحیه کم فشار در این منطقه اندازه گردابه داخلی بزرگتر شده ضمن آنکه اندازه گردابه خارجی کوچکتر خواهد شد. بزرگتر شدن ناحیه گردابه داخلی باعث می‌شود که مخلوط سوخت و هوا از فاصله‌های دورتر از دهانه ورودی به مشعل به درون شعله کشیده شده و سبب اختلاط بهتر مخلوط سوخت و هوا گردد.



شکل ۳ - اعتبارسنجی حل

کرده و در نتیجه پیش‌بینی صحیح‌تری را از رفتار جریان چرخشی ارائه خواهد داد [۱۴].

$$S = \frac{2}{3} \frac{v_t}{v_a} \times \left[ \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^3}{1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2} \right] \quad (2)$$

در رابطه فوق  $\frac{v_t}{v_a}$ ، نسبت سرعت مماسی به سرعت محوری جریان و  $r_i$  و  $r_o$  به ترتیب بیانگر شعاع داخلی و خارجی پره ایجادکننده چرخش است.

برای مدل سازی فرآیند احتراق از مدل شکست گردابه‌ای مگنسن<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱۵]. این مدل به دلیل سادگی و دقت فراوان در بیشتر پژوهش‌های احتراقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای شبیه‌سازی اغتشاشات جریان از مدل استاندارد  $k - \epsilon$  بهره گرفته شده است [۱۶].

بدلیل وجود دماهای بالا در شعله، انتقال گرمای تابشی یکی از مکانیزم‌های مهم انتقال گرما بوده و در نتیجه شبیه‌سازی صحیح آن از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۷]. بر این اساس در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی انتقال گرمای تابشی شعله از مدل تابشی پی وان<sup>۲</sup> استفاده شده است. این مدل یک مدل مناسب به منظور شبیه‌سازی میزان تابش احتراق بوده که به دلیل دقت بالا و همچنین توانایی در نظر گرفتن تبادل تابش بین گونه‌های گازی و ذرات دوده موجود در محیط شعله در شبیه‌سازی فرآیندهای احتراقی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶]. برای حصول اطمینان از درستی نتایج، دامنه حل توسط شبکه‌بندی‌هایی با تعداد گره‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا نتایج توزیع دمای محوری برای شبکه‌هایی با تعداد گره ۱۶۱۷۲، ۳۲۶۳۴، ۶۳۴۴۸ با یکدیگر مقایسه و با توجه به انطباق توزیع دما برای هر سه شبکه فوق، شبکه حل با تعداد ۱۶۱۷۲ گره به عنوان شبکه اصلی انتخاب گردید (شکل ۲).

### ۳- ارائه و بررسی نتایج

به منظور اعتبارسنجی حل صورت گرفته، نتایج حل توزیع دما در طول کوره با داده‌های تجربی وایلکس و همکاران<sup>۳</sup> [۱۲] و نتایج مدل سازی‌های موجود [۱۳، ۱۸] در شکل ۳ مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که استفاده از عدد چرخش بر مبنای مولفه سرعت های محوری و مماسی مطابق کار حاضر باعث افزایش دقت حل و نزدیکی بسیار مناسب نتایج حاصله به نتایج آزمایشگاهی می‌شود.

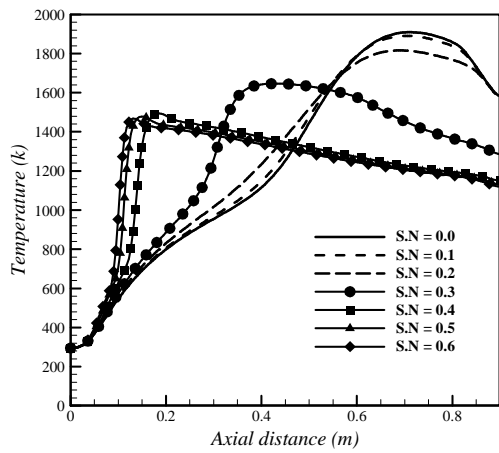
<sup>۱</sup> Magnussen Eddy Dissipation

<sup>۲</sup> P-1

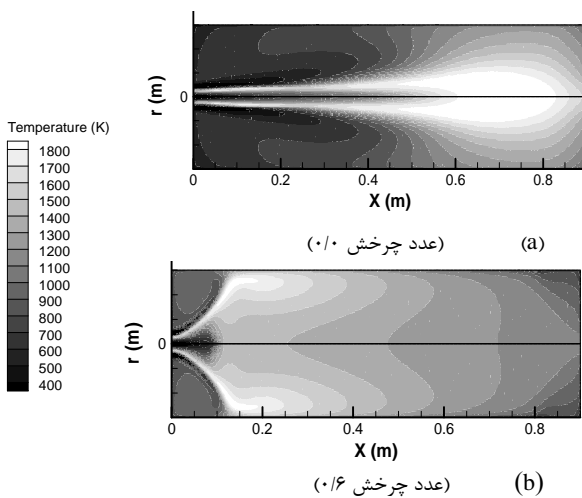
<sup>۳</sup> Wilkes et al

این در حالی است که عدد چرخش ۰/۳ حالت گذاری بین اعداد چرخش پایین‌تر و بالاتر از خودش را ارائه می‌کند که علت این موضوع تغییر الگوی جریان و تغییر الگوی گردابه‌های تشکیل شده در شعله مطابق توضیح شکل ۴ است.

شکل ۶ توزیع دما در محفظه احتراق را در حالت بدون چرخش (عدد چرخش ۰/۰) و عدد چرخش ۰/۶ به تصویر کشیده است. با توجه به ارتباط مستقیم عدد چرخش با مولفه‌های محوری و مماسی سرعت جریان می‌توان بیان کرد که با افزایش عدد چرخش جریان به دلیل کوچک شدن مولفه محوری سرعت و افزایش مولفه مماسی آن جریان از حالت متمرکز بر روی محور مرکزی کوره خارج شده و در راستای شعاعی پخش خواهد شد و این امر باعث ایجاد توزیع دمایی یکنواخت در راستای شعاعی محفظه احتراق خواهد گردید. این توزیع یکنواخت در کاربردهایی نظیر کوره‌های پخت تونلی بسیار مهم و ضروری بوده و سبب بهبود کیفیت محصولات تولیدی خواهد شد.



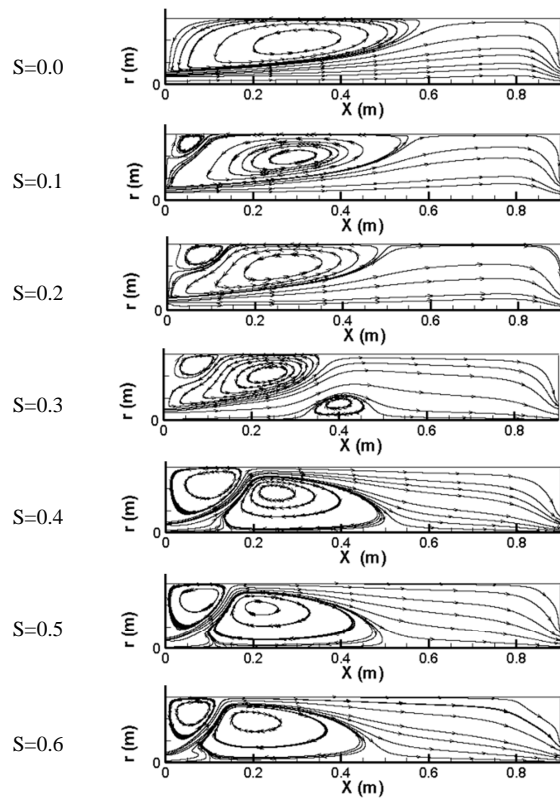
شکل ۵ - توزیع دما در امتداد محور مرکزی کوره برای اعداد چرخش متفاوت



شکل ۶ - توزیع دما در محفظه احتراق در حالت بدون چرخش (عدد چرخش ۰) و عدد چرخش ۰/۶

با افزایش عدد چرخش به دلیل بزرگ شدن مولفه سرعت مماسی جریان، انحراف جریان از محور مرکزی کوره و ایجاد ناحیه کم فشار در این منطقه اندازه گردابه داخلی بزرگتر شده ضمن آنکه اندازه گردابه خارجی کوچکتر خواهد شد. بزرگتر شدن ناحیه گردابه داخلی باعث می‌شود که مخلوط سوخت و هوا از فاصله‌های دورتر از دهانه ورودی به درون شعله کشیده شده و سبب اختلاط بهتر سوخت و هوا گردد.

در شکل ۵ توزیع دمای شعله برای اعداد چرخش متفاوت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد چرخش به دلیل کاهش مولفه محوری سرعت جریان، محل شکل‌گیری شعله و ماکزیمم دمای شعله به ورودی کوره نزدیک می‌شود. این امر سبب می‌شود تا محصولات احتراقی زمان ماند بیشتری را در درون محفظه احتراق داشته و آهنگ انتقال گرما از شعله بهبود یابد.

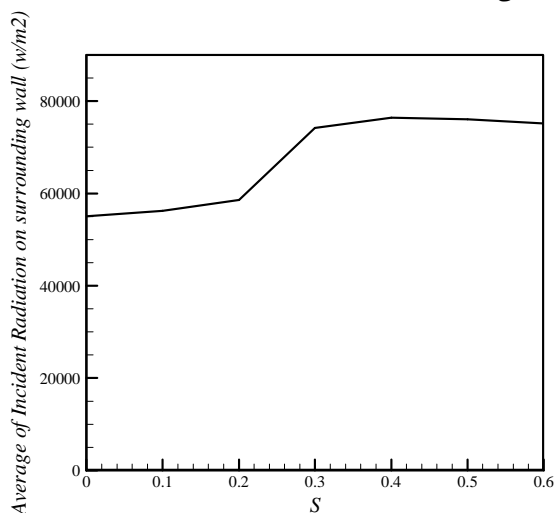


شکل ۴ - نمای خطوط جریان برای اعداد چرخش متفاوت

همچنین در این حالت به دلیل توزیع مخلوط سوخت و هوا در راستای شعاعی و عدم تمرکز جرمی مخلوط سوخت و هوا در راستای محور مرکزی کوره، پیک دمایی شعله نیز کاهش یافته و توزیع دمایی یکنواخت در طول کوره ایجاد می‌گردد. این امر سبب می‌گردد تا با حذف نقاط تمرکز دما بالا در درون شعله نرخ تشکیل آلاینده NOx حرارتی نیز کاهش یابد. همچنین مطابق شکل ۵ توزیع دما در عدد چرخش ۰/۳ نسبت به اعداد چرخش کوچکتر و اعداد چرخش بزرگتر از آن متفاوت است؛ به طوری‌که برای اعداد چرخش ۰/۰، ۰/۱ و ۰/۲ توزیع دما مشابه یکدیگر و محل حداکثر آن به پایین دست کوره متمایل است و برای اعداد چرخش ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ نیز توزیع دما مشابه و محل حداکثر دمای شعله به ورودی (بالادست) کوره نزدیکتر خواهد بود.

در شکل ۹ متوسط شار گرمایی تابشی دریافتی توسط دیواره کوره در اعداد چرخش مختلف نشان داده شده است. افزایش عدد چرخش جریان تا حدود ۰/۲، تاثیر چندانی بر شار تابشی فرودی بر روی دیواره کوره ندارد. اما با افزایش عدد چرخش بین ۰/۲ تا ۰/۳ این شار به طور خطی افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که تا عدد چرخش ۰/۲ به دلیل پایین بودن میزان چرخش، تغییر قابل توجهی در رفتار شعله مشاهده نمی‌شود؛ ولی پس از آن به تدریج با افزایش سرعت مماسی و پخش شعله در راستای شعاعی، به دلیل افزایش سطح تبادل گرمایی شعله و ایجاد توزیع دمایی یکنواخت در طول کوره، شار گرمایی تابشی و متعاقب آن شار فرودی بر روی دیواره کوره افزایش می‌یابد. با افزایش عدد چرخش از ۰/۳ به ۰/۴، شار تابیده به دیواره به آهستگی افزایش یافته و در عدد چرخش ۰/۴ به دلیل رسیدن ناحیه گردابه داخلی به حداکثر اندازه خود (شکل ۴)، افزایش حداکثری اختلاط سوخت و هوا و نیز افزایش زمان ماند گازهای داغ احتراقی در درون این سلول بسته، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این در حالی است که برای اعداد چرخش بزرگتر از ۰/۴ به دلیل ثابت ماندن اندازه گردابه مذکور، میزان شار تابشی تقریباً ثابت می‌ماند.

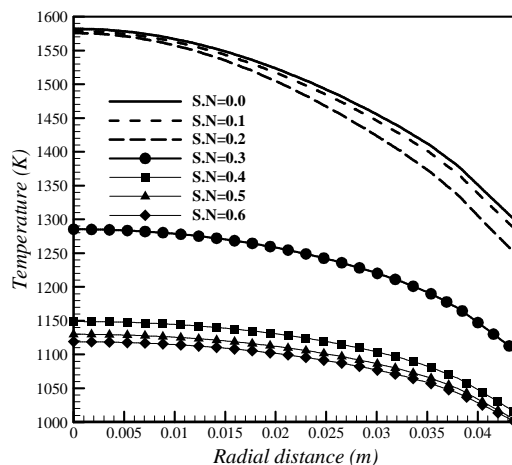
در شکل ۱۰ متوسط توزیع آلاینده اکسید نیتروژن در طول محور کوره برای اعداد چرخش متفاوت نشان داده شده است. آلاینده مذکور یک آلاینده وابسته به دما می‌باشد. محل تشکیل این آلاینده در ناحیه دما بالای شعله بوده و با افزایش دما میزان این آلاینده افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، با افزایش عدد چرخش، بیشینه مقدار این آلاینده، از قسمت انتهایی کوره به سمت ابتدای کوره حرکت می‌کند. دلیل این امر جابجا شدن بیشینه دمایی شعله به سمت ابتدای کوره است که با افزایش عدد چرخش رخ می‌دهد. همچنین از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار آلاینده اکسید نیتروژن برای اعداد چرخش ۰/۱۰ الی ۰/۲، خیلی بیشتر از مقدار آن برای اعداد چرخش ۰/۳ الی ۰/۶ است.



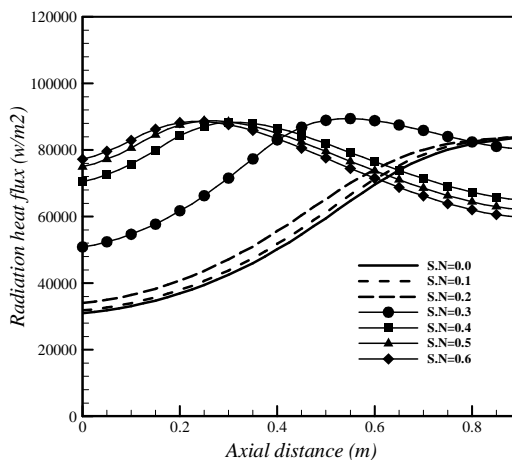
شکل ۹- میانگین شار تابشی روی دیواره کوره در اعداد چرخش مختلف

در شکل ۷ پروفیل دمای شعاعی کوره در خروجی آن رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد چرخش، دمای خروجی از محفظه احتراق و در نتیجه اتلاف گرمایی کاهش خواهد یافت. علت این امر این است که با افزایش عدد چرخش و شکل‌گیری و تقویت ناحیه گردابه داخلی، گازهای داغ حاصل از احتراق به درون این ناحیه گردابی مکیده شده و سرعت خروج آنها از محفظه احتراق کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌گردد تا محصولات احتراق فرصت بیشتری برای تبادل شار گرمایی با دیواره کوره داشته باشند و در نتیجه دمای خروجی از محفظه احتراق و اتلاف حرارتی کاهش یابد.

در شکل ۸ تغییرات شار گرمایی تابشی در راستای محوری نشان داده شده است. نکته جالب توجه این است که با افزایش عدد چرخش به رغم کاهش دمای متوسط شعله (شکل ۵)، متوسط شار گرمایی تابشی شعله افزایش و توزیعی یکنواخت برای شار گرمایی تابشی ایجاد می‌گردد. این توزیع یکنواخت شار تابشی باعث دریافت گرمای یکسان در طول کوره خواهد شد که در فرآیندهای پخت صنعتی بسیار مفید بوده و امکان استفاده از تمام فضای محفظه احتراق در کاربردهای مذکور را فراهم خواهد کرد.



شکل ۷- توزیع دمای شعاعی در خروجی محفظه احتراق

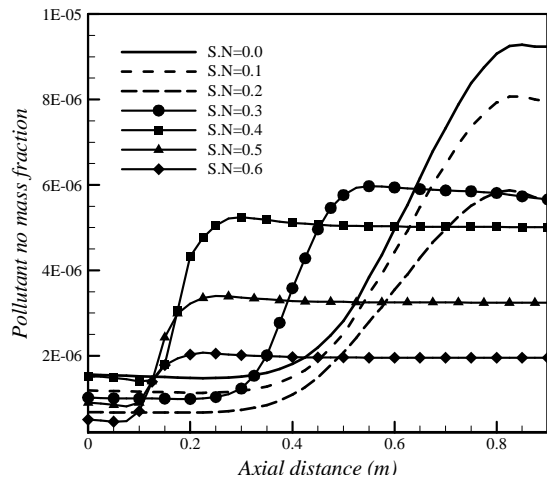


شکل ۸- شار انتقال حرارت تابشی در امتداد محور کوره

- افزایش عدد چرخش به دلیل افزایش اختلاط سوخت و اکسیدکننده و کاهش نقاط تمرکز دمایی بالا، باعث کاهش قابل توجه آلاینده اکسید نیتروژن که یک آلاینده وابسته به دما است می‌شود.
- یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند راهکاری مفید و اجرایی برای بهبود راندمان حرارتی مشعل‌ها و ایجاد شار گرمایی و توزیع دمایی یکنواخت در کوره های پخت تونلی باشد.

## ۵- مراجع

- [۱] H. Tsuji, A. K. Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki, K. Kishimoto, and M. Morita, *High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction*: CRC press, 2002.
- [۲] J. Lewtas, "Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects," *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, vol. 636, pp. 95-133, 2007.
- [۳] X. Xu, C. Chen, H. Qi, R. He, C. You, and G. Xiang, "Development of coal combustion pollution control for SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in China," *Fuel Processing Technology*, vol. 62, pp. 153-160, 2000.
- [۴] A. Frassoldati, S. Frigerio, E. Colombo, F. Inzoli, and T. Faravelli, "Determination of NO<sub>x</sub> emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, pp. 2851-2869, 2005.
- [۵] H. Poorhoseinni, A. Saeedi, and M. Moghiman, "Experimental and numerical investigation of the inlet air swirl angle effects on temperature profile and CO, NO pollutants," *Energy Engineering Management*, vol. 2, pp. 32-39, 2012.
- [۶] L. Zhou, X. Chen, and J. Zhang, "Studies on the effect of swirl on soot formation in methane/air turbulent combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, pp. 2235-2244, 2007.
- [۷] R. K. Cheng, "Low swirl combustion," *The Gas Turbine Handbook*, pp. 241-255, 2006.
- [۸] K. Bashirnezhad, M. Moghiman, and M. Mousavi, "On the Dependence of Soot formation and Combustion on swirling combustion Furnaces: Measurement and Simulation," *JAST-TEHRAN*, vol. 3, p. 205, 2006.
- [۹] F. Bonatesta, A. La Rocca, P. Shayler, and E. Wahab, "The influence of swirl ratio on soot quantity and distribution in the cylinder of a diesel engine," in *Third European Combustion Meeting ECM*, 2007.
- [۱۰] M. E. Feyz, S. I. Pishbin, M. Ghazikhani, and S. M. Razavi, "Parametric assessment of a low-swirl burner using the exergy analysis," *Energy*, vol. 79, pp. 117-126, 2015.
- [۱۱] Y. Huang and V. Yang, "Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, pp. 293-364, 2009.
- [۱۲] N. Wilkes, P. Guilbert, C. Shepherd, S. Simcox, H. C. S. UKAEA Atomic Energy Research Establishment, S. Div., et al., *The application of HARWELL-FLOW3D to combustion problems*: UKAEA Atomic Energy Research Establishment Computer Science and Systems Division, 1989.
- [۱۳] E. Keramida, H. Liakos, M. Founti, A. Boudouvis, and N. Markatos, "Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 1801-1809, 2000.
- [۱۴] N. Syred and J. Beer, "Combustion in swirling flows: a review," *Combustion and flame*, vol. 23, pp. 143-201, 1974.
- [۱۵] B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On mathematical modeling of turbulent combustion with



شکل ۱۰- توزیع آلاینده اکسید نیتروژن در امتداد محور کوره برای اعداد چرخش متفاوت

دلیل این امر، عدم اختلاط مناسب سوخت و اکسیدکننده برای اعداد چرخش بین ۰/۰ الی ۰/۲ و تشکیل ناحیه‌های تمرکز دمایی در این اعداد چرخش است. همانطور که نمودارهای قبلی که در مورد آن‌ها بحث شد، برای مقادیر بین ۰/۳ الی ۰/۶، به دلیل وجود گردابه مرکزی یا همان گردابه داخلی، در این اعداد چرخش مقدار این آلاینده به ابتدای کوره نزدیک شده و مقدار آن نیز به شدت کاهش می‌یابد که این امر از اختلاط بسیار مناسب سوخت و اکسیدکننده در این اعداد چرخش نشأت می‌گیرد زیرا گردابه مذکور مانع ایجاد نقاط تمرکز دمایی بالا در شعله شده و از این طریق آلاینده اکسید نیتروژن را کاهش می‌دهد.

## ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر تغییر شدت چرخش جریان هوای ورودی بر رفتار دینامیکی جریان، دما و شار گرمایی تابشی مشعل هارول با استفاده از یک تعریف جدید و مبتنی بر مولفه های سرعت مماسی و محوری جریان مورد مطالعه قرار گرفته است. یافته‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

- افزایش عدد چرخش ضمن ایجاد توزیع دمایی یکنواخت در طول کوره باعث کاهش دمای حداکثر شعله و حذف نقاط دما بالا به عنوان منابع تشکیل آلاینده NO<sub>x</sub> حرارتی می‌گردد.
- افزایش عدد چرخش باعث افزایش شار گرمایی تابشی شعله و توزیع یکنواخت شار حرارتی در کوره خواهد شد.
- افزایش عدد چرخش باعث پخش شعله در راستای شعاعی و افزایش سطح تبادل حرارتی شعله با دیواره کوره می‌گردد.
- افزایش عدد چرخش ضمن ایجاد توزیع دمایی یکنواخت در راستای شعاعی باعث افزایش زمان ماند محصولات در کوره و کاهش اتلاف حرارتی در دودکش خواهد شد.
- افزایش عدد چرخش باعث تغییر الگوی جریان و ایجاد ناحیه های گردابی داخلی و خارجی در جریان می‌شود.
- نقش گردابه داخلی بر رفتار احتراقی شعله بسیار بیشتر از گردابه خارجی است.

special emphasis on soot formation and combustion," *Symposium (International) on Combustion*, vol. 16, pp. 719-729, 1977.

[۱۶] A. Fluent, "14.5, Theory Guide; ANSYS," *Inc., Canonsburg, PA*, 2012.

[۱۷] M. Ilbas, "The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen–hydrocarbon combustion modelling," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, pp. 1113-1126, 2005.

[۱۸] I. Yılmaz, "Effect of swirl number on combustion characteristics in a natural gas diffusion flame," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 135, p. 042204, 2013.