

## بررسی عددی و دوبعدی تاثیرات چرخش سوخت روی ساختار و ویژگی‌های زیست‌محیطی یک شعله نفوذی گازی

سینا جمالزاد فلاح<sup>۱</sup> و جواد محمودی مهر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، sina.jamalzad@gmail.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، mahmoudimehr@guilan.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۱۲/۱۱، پذیرش: ۹۷/۱/۴)

**چکیده:** تاثیر مثبت چرخش واکنشگرهای ورودی به محفظه احتراق بر نرخ اختلاط سوخت و هوا در تحقیقات پیشین به صورت گسترده‌ای مورد بحث قرار گرفته است. اما، این تحقیقات اغلب بر چرخش هوا متمرکز بوده‌اند. کار حاضر به صورت عددی به بررسی تاثیر چرخش سوخت بر ساختار شعله و نشر آلاینده‌های یک شعله نفوذی می‌پردازد، در حالی که میزان چرخش هوا ثابت نگه داشته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش چرخش سوخت منجر به افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا، افزایش پهنای شعله، افزایش دمای بیشینه شعله، کاهش نشر مونوکسیدکربن و کاهش طول شعله می‌شود. اما، منحنی تغییرات میزان نشر اکسیدنیترژن با چرخش سوخت دارای یک حداقل در چرخش‌های میانی است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که چرخش هم‌جهت سوخت و هوا، در مقایسه با چرخش خلاف جهت آن‌ها، منجر به نرخ اختلاط سریع‌تر، دمای بیشینه بالاتر، نشر اکسیدنیترژن بیشتر، و در عین حال موجب نشر مونوکسیدکربن کمتر می‌شود. در کار حاضر، مشاهده می‌شود که چرخش بهینه سوخت برابر با چرخش هوا و هم‌جهت با آن است. در این حالت، میزان نشر اکسیدنیترژن و مونوکسیدکربن، در مقایسه با طرح مرجع (که در آن سوخت بدون چرخش در نظر گرفته می‌شود)، به ترتیب، در حدود ۱۵/۲ درصد و ۹۲/۷ درصد کاهش می‌یابد.

**کلیدواژگان:** شعله نفوذی، چرخش، انتشار آلاینده‌ها، مدلسازی عددی، بهینه‌سازی

### مقدمه

در دهه‌های اخیر، احتراق بنیان پیشرفت‌های صنعتی در تمام جهان بوده است و امروزه بیش از ۹۰ درصد از نیازهای انرژی جهان از طریق آن فراهم می‌شود [۱]. در کنار اهمیت احتراق و کاربردهای فراوان آن، در سال‌های اخیر، انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از فرایند احتراق مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در نتیجه، امروزه تلاش می‌شود که علاوه بر افزایش بازده احتراق در تجهیزات مختلف، تولید و انتشار آلاینده‌های محیطی ناشی از آن به حداقل برسد [۲].

هدف اصلی در طراحی محفظه‌های احتراق دستیابی به یک شعله موثر و پایدار با بازده احتراقی بالاتر است. افزایش بازده احتراقی امکان صرفه‌جویی بیشتر انرژی و کاهش تولید آلاینده‌های محیطی را فراهم می‌کند. از طرف دیگر، پایداری شعله سبب عملکرد مطمئن و ایمن شعله در محدوده وسیعی از نسبت هم‌ارزی می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد که بازده احتراق و پایداری شعله، بر اثر اختلاط مناسب میان سوخت و هوا، افزایش می‌یابد. ایجاد چرخش<sup>۱</sup> در واکنشگرهای ورودی سبب ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که تاثیر بسزایی در نحوه و میزان اختلاط، تثبیت و پایداری شعله، طول شعله، قطر شعله و سایر مشخصات

1. Swirl

مربوط به آن دارد [۳]. ایجاد چرخش در واکنشگرها به عنوان یکی از روش‌های موثر در بهبود فرایند اختلاط سوخت و هوا و به تبع آن بهبود فرایند احتراق به کار گرفته شده است.

در سال ۱۹۸۶ یوآسا [۴] به صورت تجربی به بررسی تاثیر چرخش سوخت بر ویژگی‌های یک شعله نفوذی با هوای چرخشی پرداخت. در این مطالعه، دو نوع سوخت متان و هیدروژن به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که چرخش سوخت، حتی اگر شدت چرخش هوا زیاد باشد، تاثیر مثبتی بر پایداری شعله دارد و این تاثیر به ازای سوخت متان در مقایسه با سوخت هیدروژن محسوس تر است. در سال ۲۰۰۸، چن و همکاران [۵] به صورت تجربی به بررسی ویژگی‌های میدان جریان دوفاز حاصل از یک مشعل احتراق ذغال سنگ چرخشی با سوخت مرکزی غنی پرداختند. براساس مشاهدات، ذرات از مرکز مشعل به ناحیه چرخشی مرکزی نفوذ کرده و سپس به صورت شعاعی حرکت می‌کنند. همچنین، در مرکز ناحیه چرخشی، سرعت‌های شعاعی و مماسی کم بوده و یک ناحیه با شار حجمی بالای ذرات تشکیل می‌شود. کاهش خوردگی ناشی از دماهای بالا، و همچنین کاهش تولید اکسیدنیترژن از ویژگی‌های مثبت این نوع مشعل برشمرده شده است. در سال ۲۰۱۰، ژن و همکاران [۶] به صورت تجربی به بررسی رفتار حرارتی و آلاینده‌گی شعله‌ی نفوذی معکوس<sup>۱</sup> آشفته، که تحت چرخش قرار دارد، پرداختند. نتایج نشان داد که در حالت چرخشی، در شعله، ناحیه مرکزی و چرخشی بزرگ‌تری ایجاد می‌شود که این منطقه نقش زیادی در پایداری شعله، کوتاهی طول شعله و پهن‌تر شدن آن دارد. از طرفی، اندازه‌گیری دما و غلظت گونه‌ها نشان داد که در حالت چرخشی، توزیع یکنواخت‌تری در ناحیه مرکزی واکنش وجود دارد و همچنین هرچقدر میزان چرخش هوای ورودی قوی‌تر باشد، میزان تولید اکسید نیترژن کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۰، شرف و همکاران [۷] به بررسی تجربی اثرات متقابل فواره<sup>۲</sup> سوخت حلقوی احاطه‌شده توسط دو فواره هوای داخلی و خارجی با چرخش دوگانه پرداختند. نتایج نشان داد که پایداری شعله در شرایط چرخش خلاف جهت دو فواره هوا در مقایسه چرخش هم‌جهت آن‌ها بیشتر است. همچنین، تاثیر چرخش هوای داخلی در مقایسه با چرخش هوای خارجی روی دما و ارتفاع شعله محسوس‌تر بوده و شکل شعله اغلب به عدد چرخش هوای داخلی وابسته بوده است. در سال ۲۰۱۱، خانافر و آیتال [۸] با استفاده از روش‌های عددی به بررسی تاثیر سرعت چرخش و دمای دیواره‌ی مشعل در میزان انتشار اکسیدنیترژن و مونوکسیدکربن پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که در احتراق غیرپیش‌آمیخته، چرخش تاثیر بسزایی دارد و افزایش چرخش سبب کاهش تولید مونوکسیدکربن و سایر هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. در سال ۲۰۱۲، آشوک و آچاریا [۹]، در یک مطالعه عددی، به بررسی تاثیر چرخش در یک شعله پیش‌آمیخته غنی از هیدروژن پرداختند. نتایج به دست آمده بیانگر این بود که مهم‌ترین تاثیر استفاده از چرخش در شعله، افزایش آشفستگی و در نتیجه اختلاط بهتر سوخت و هواست که این اختلاط بهتر سبب انجام واکنش بهتر می‌شود. همچنین، مشاهده شد که با افزایش نرخ واکنش، دمای شعله در نواحی مرکزی واکنش افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۳، بار دیگر ژن و همکاران [۱۰] به صورت تجربی به بررسی رفتار حرارتی شعله نفوذی معکوس، که تحت چرخش قرار دارد، پرداختند. آن‌ها در این مطالعه، به مقایسه شعله در دو حالت چرخشی و غیرچرخشی پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که طول شعله در حالت چرخشی کوتاه‌تر بوده و ناحیه مرکزی واکنش در شعله چرخشی نزدیک‌تر به سر مشعل است. در اواخر سال ۲۰۱۴، وانگ و همکاران [۱۱]، با استفاده از روش عددی، به بررسی تاثیر چرخش بر خصوصیات شعله و پایداری آن در شعله پیش‌آمیخته پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که تحت اثر چرخش، آشفستگی جریان بیشتر می‌شود و هر چقدر این آشفستگی بیشتر باشد، اختلاط میان سوخت و هوا بهتر صورت می‌گیرد. همچنین، مشاهده شد که چرخش نقشی تعیین‌کننده در توسعه و گسترش شعله در جهت شعاعی دارد و سبب کوتاه‌شدن طول شعله می‌شود. در همان سال، زینگ و لی [۱۲] به دو روش عددی و تجربی به بررسی تاثیر چرخش هوای گرم بر روی مشخصات احتراق و میزان تولید اکسیدنیترژن پرداختند. در این

1. Inverse Diffusion Flame

2. Jet

کار، سعی شد تا مراحل آزمایش در دو حالت چرخشی و غیرچرخشی مورد بررسی قرار گیرد و سپس نتایج آن‌ها با هم مقایسه شود. نتایج به دست آمده از این مقایسه نشان داد که دما در حالت چرخشی به طور یکنواخت‌تری در محفظه احتراق و نزدیکی دیواره‌ها توزیع شده است. همچنین، مشاهده شد که میزان تولید اکسیدنیترژن در حالت چرخشی به مراتب کمتر از حالت غیرچرخشی است. در سال ۲۰۱۴، سینگ و چاندر [۱۳] به مطالعه تجربی ویژگی‌های انتقال حرارت شعله گاز طبیعی متراکم و هوا با چرخش دوگانه (شعله داخلی غیرچرخشی و شعله خارجی چرخشی) در اثر برخورد به یک سطح مسطح پرداختند. تاثیر پارامترهای متفاوتی از جمله زاویه پره‌های چرخنده خارجی و داخلی، عدد رینولدز شعله چرخشی خارجی، عدد رینولدز شعله غیرچرخشی داخلی، فاصله جدایش بی‌بعد و نسبت هم‌ارزی شعله چرخشی خارجی بر ویژگی‌های انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت. از جمله مشاهدات این تحقیق می‌توان به انطباق نقاط فشار حداکثر و شار گرمای حداکثر روی سطح برخوردی، کاهش تاثیر حضور شعله داخلی روی ویژگی‌های انتقال گرما به ازای فواصل جدایش بیشتر، کاهش ارتفاع هسته شعله داخلی غیرچرخشی با افزایش عدد رینولدز جریان خارجی، انحراف شیب شعله چرخشی خارجی به سمت خارج از مرکز در اثر حضور شعله داخلی، و افزایش متوسط انتقال گرما به سطح با کاهش فاصله جدایش و افزایش رینولدز خارجی اشاره کرد. در سال ۲۰۱۵، سینگ و چاندر [۱۴]، در کار مشابهی، به مطالعه تجربی ویژگی‌های انتقال حرارت از شعله گاز طبیعی متراکم و هوا با چرخش دوگانه در برخورد به یک سطح مسطح پرداختند، با این تفاوت که هر دو شعله داخلی و خارجی دارای چرخش (هم‌جهت) بودند. در این تحقیق، تاثیر پارامترهای متفاوتی از جمله زاویه پره‌های چرخنده خارجی و داخلی، عدد رینولدز شعله چرخشی خارجی و فاصله جدایش بی‌بعد بر ویژگی‌های انتقال حرارت بررسی شد. تفاوت بسیار محسوسی در شکل شعله و خواص انتقال گرمای ناحیه سکون در اثر تغییر پارامترهای یادشده مشاهده شد. همچنین، مشاهده شد که چرخش داخلی شعله منجر به توزیع یکنواخت‌تر شار حرارتی می‌شود. همچنین، مقادیر بهینه‌ای برای پارامترهای مورد بررسی با هدف یکنواختی و میزان شار گرمایی متوسط بیشتر روی سطح هدف ارائه شد. در سال ۲۰۱۵، روحانی و تابع‌جماعت [۱۵] با انجام مطالعات و تحقیقات تجربی به بررسی تاثیر چرخش در محدوده پایداری شعله غیرپیش‌آمیخته در زیست‌گاز<sup>۱</sup> پرداختند. در این کار، با استفاده از پره‌های ثابت در زوایای مختلف، مقادیر چرخش با قدرت‌های مختلف تولید شد و مشاهده شد که استفاده از چرخش محدوده پایداری شعله را ۴ تا ۵ برابر بیشتر از حالت غیرچرخشی می‌کند. در همان سال، سانتوس و همکاران [۱۶] به روش عددی به بررسی تاثیر چرخش جریان بر خصوصیات شعله پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که در جریان‌های چرخشی، واکنش‌ها در ناحیه مرکزی شعله صورت می‌پذیرد که در نتیجه سبب بالا رفتن دمای شعله در آن ناحیه می‌شود. همچنین، در کنار افزایش پایداری شعله، مشاهده شد که شکل شعله نیز به صورت تابعی از عدد چرخش است. در سال ۲۰۱۶، ایلباش و همکاران [۱۷]، با استفاده از روش عددی، به بررسی تاثیر عدد چرخش بر ویژگی و خصوصیات احتراقی سوخت‌های دارای هیدروژن و میزان انتشار اکسیدنیترژن پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که انتشار اکسیدنیترژن تا حد زیادی به عدد چرخش وابسته است، به طوری که در اعداد چرخش پایین تولید آن افزایش می‌یابد و به تدریج با افزایش میزان چرخش در عددهای چرخش بالا این میزان کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۶، کُتب و سَعد [۱۸] به بررسی تجربی تاثیر چرخش موازی و معکوس سوخت و هوا بر عملکرد شعله نفوذی معکوس با سوخت مایع پرداختند. نتایج نشان داد که مشعل با چرخش موازی کوتاه‌تر و پایدارتر، و همچنین دارای دماهای بالاتر در خط محوری است. در سال ۲۰۱۶، سانگ و چوی [۱۹] به بررسی تجربی غیرمداخله‌ای یک مشعل پودر ذغال‌سنگ با چرخش دوگانه (با دو چرخنده داخلی و خارجی) پرداختند. نتایج نشان داد که ناحیه چرخشی داخلی در شرایط شدت چرخش بالا وسیع‌تر است. همچنین، در این کار، مشاهده شد که ناحیه چرخشی داخلی، در شرایط چرخش خلاف جهت دو چرخنده، در مقایسه با چرخش هم‌جهت، طولی‌تر است. در حالت کلی، در شعله با

1. Biogas

چرخش خلاف جهت، شدت واکنش بیشتری از ذرات پودر ذغال سنگ مشاهده شد. در سال ۲۰۱۷، چنگ و همکاران [۲۰] در یک بررسی تجربی و عددی بر روی یک شعله نفوذی آشفته چرخشی هیدروژن در هوای ساکن نشان دادند که استفاده از مدل شعله ریز آرام<sup>۱</sup> منجر به خطاهای محسوسی در پیش بینی مقادیر دما و کسر مولی گونه های آب و اکسید هیدروژن می شود. با بررسی مطالعات صورت گرفته در ادبیات فن، مشاهده می شود که ایجاد چرخش در واکنشگرها تاثیر بسزایی در خصوصیات رفتاری و ویژگی های حرارتی شعله خواهد داشت که به تبع آن سبب بهبود کیفیت شعله، بازده احتراق و همچنین کاهش آلاینده های ناشی از پدیده احتراق خواهد شد. از طرفی، بیشتر فعالیت ها و مطالعات یاد شده اثر چرخش را بر روی یکی از واکنشگرها (اغلب هوا) مورد بررسی قرار داده اند. از این رو، در این مقاله، سعی شده، علاوه بر بررسی تاثیر چرخش همزمان سوخت و هوا بر خصوصیات و ویژگی های حرارتی و رفتاری شعله غیرپیش آمیخته، اثر چرخش هم جهت (موازی) و خلاف جهت (معکوس) سوخت و هوا در یک محفظه احتراق بررسی شود. همچنین، با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی و آلاینده های ناشی از احتراق، در انتخاب میزان چرخش بهینه سوخت، میزان نشر اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده اند.

### معادلات حاکم

در کار حاضر، واکنش احتراق متان طبق روابط (۱) و (۲) به صورت دومرحله ای در نظر گرفته می شود.



معادلات حاکم بر جریان های واکنشی احتراقی شامل معادلات جریان، آشفتنگی، تشعشع و آلودگی است. در این قسمت، به معرفی این معادلات پرداخته می شود.

### معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\rho$  چگالی و  $u_i$  سرعت متوسط جریان در جهت  $i$  است.

### معادله بقای تکانه

$$\frac{Du_j}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,j} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $P$  فشار استاتیکی<sup>۲</sup>،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $N$  تعداد گونه های شیمیایی،  $f_{k,j}$  نیروی حجمی وارد بر گونه  $k$ ام در جهت  $j$  و  $Y_k$  کسر جرمی گونه  $k$ ام است [۲۲، ۲۱].

### معادله انرژی

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = W_T' + \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \left( \rho \sum_{k=1}^N C_{p,k} Y_k V_{k,i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,i} V_{k,i} \quad (5)$$

1. Laminar Flamelet  
2. Static Pressure

در رابطه (۵)،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت،  $\dot{W}'_T$  حرارت آزاد شده از واکنش شیمیایی،  $\lambda$  ضریب هدایت،  $V_{k,i}$  سرعت نفوذ گونه  $k$ ام در جهت  $i$  و  $\dot{Q}$  جمله مربوط به منبع حرارتی است [۲۳].

### معادله انتقال جرم گونه‌ها

$$\rho \frac{DY_k}{Dt} = -\vec{\nabla} \cdot [\rho(-D_k \nabla Y_k)] + \dot{W}_k \quad (۶)$$

عبارت  $\dot{W}_k$  در رابطه (۶) بیان‌کننده نرخ جرمی تولید یا مصرف گونه  $k$ ام یا نرخ جرمی واکنش گونه  $k$ ام است. عبارت  $D_k$  بیان‌کننده ضریب نفوذ گونه  $k$ ام است که براساس قانون فیک<sup>۱</sup> به‌عنوان یک رابطه جانشین برای برآورد مقدار سرعت نفوذ گونه‌ها استفاده می‌شود [۲۳].

### مدلسازی انتقال گونه‌های شیمیایی

انتقال و عمل اختلاط گونه‌های شیمیایی با حل معادلات حالت بقا، که بیان‌کننده جابه‌جایی، نفوذ و منابع واکنشی برای هر گونه است، مدلسازی می‌شود. برای حل معادله انتقال (جابه‌جایی و نفوذ) گونه  $k$ ام از معادله بقا به‌صورت رابطه (۷) استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}_{k,i} Y_k) = -\nabla \cdot \vec{J}_k + R_k + S_k \quad (۷)$$

در رابطه (۷)  $Y_k$  کسر جرمی،  $R_k$  نرخ کلی تولید گونه  $k$ ام به‌وسیله واکنش شیمیایی و  $S_k$  نرخ تولید گونه  $k$ ام به‌وسیله فازهای پراکنده یا سایر منابع است. در رابطه (۷)،  $\vec{J}_k$  شار نفوذی گونه  $k$ ام است که در اثر گرادیان غلظت ایجاد می‌شود. در کار حاضر، از مدل اتلاف گردابه‌ای<sup>۲</sup> برای محاسبه نرخ کلی تولید گونه شیمیایی  $k$ ام یا همان  $R_k$  استفاده شده است. اکثر سوخت‌ها به‌سرعت می‌سوزند و در نتیجه نرخ کلی واکنش به‌وسیله آشفستگی‌ها کنترل می‌شود. در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته، آشفستگی، به‌آرامی، سوخت و اکسیدکننده را با هم مخلوط و وارد ناحیه واکنش می‌کند که در آن به‌سرعت می‌سوزند. در این مدل نرخ کلی تولید گونه  $k$  در واکنش<sup>۳</sup> توسط کمترین مقدار  $R_{k,r}$  در دو رابطه (۸) و (۹) تعریف می‌شود.

$$R_{k,r} = v'_{k,r} W_k A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{v_{R,r} W_R}\right) \quad (۸)$$

$$R_{k,r} = v'_{k,r} W_k A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} W_j} \quad (۹)$$

در روابط (۸) و (۹)،  $W_k$  وزن مولکولی گونه  $k$ ام،  $Y_p$  کسر جرمی مربوط به هر فرآورده،  $Y_R$  کسر جرمی مربوط به هر واکنش‌دهنده،  $k$  انرژی جنبشی آشفستگی،  $\varepsilon$  نرخ اتلاف انرژی جنبشی و ضرایب تجربی  $A$  و  $B$  به‌ترتیب برابر ۴ و ۰/۵ هستند [۲۴].

### مدلسازی آشفستگی

در کار حاضر، برای مدلسازی آشفستگی از مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد استفاده شده است که در این مدل انرژی جنبشی آشفستگی (k) و نرخ اتلاف آن ( $\varepsilon$ ) از معادلات (۱۰) و (۱۱) به‌دست می‌آید [۲۵، ۲۴].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} P_{ii} - \rho \varepsilon \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_{ii} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۱)$$

1. Fick's Law  
2. Eddy Dissipation

در روابط (۱۰) و (۱۱)،  $\mu_t$  لزجت آشفته،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\epsilon$  عدد پراوتل آشفته،  $C_{1\epsilon}$ ،  $C_{2\epsilon}$  ثوابت اند [۲۵، ۲۴].  
براساس رابطه (۱۲)، شدت آشفته به صورت نسبت میان ریشه متوسط مربع نوسانات سرعت به سرعت متوسط جریان تعریف می‌شود. در این رابطه،  $U$  سرعت متوسط جریان و  $u'_i$  مولفه نوسانی سرعت است [۲۴].

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} u'_i \cdot u'_i}}{U} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} k}}{U} \quad (12)$$

### مدلسازی تشعشع

فرایندهای احتراقی اغلب دماهای بالایی را ایجاد می‌کنند و در دماهای بالا نقش تشعشع یا تابش در مکانیزم انتقال حرارت و انرژی پررنگ‌تر می‌شود. در نتیجه می‌بایست تشعشع حرارتی، که در رابطه (۵) با نماد  $\dot{Q}$  بیان شده است، لحاظ شود. در کار حاضر، به منظور مدلسازی تشعشع از روش جهت گسسته<sup>۱</sup> استفاده شده است. این روش اثرات پخشی و جذبی محیط واسط را در نظر می‌گیرد و برای هر سلول، در چند جهت گسسته، رابطه (۱۳) را حل می‌کند.

$$\nabla \cdot [I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}] + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $\vec{r}$  بردار مکان،  $\vec{s}$  بردار جهت،  $\vec{s}'$  بردار جهت بازتاب‌شده،  $s$  طول مسیر،  $\alpha$  ضریب جذب،  $n$  ضریب شکست،  $\sigma_s$  ضریب پخش،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $I$  شدت تابش،  $\Omega'$  زاویه فضایی و  $\phi$  تابع فاز است [۲۴، ۲۲].

### مدلسازی نشر اکسیدنیترژن

از آنجایی که فرایند احتراق در دماهای بالا اتفاق می‌افتد، دو مکانیزم غالب در نشر و تولید اکسیدنیترژن، مکانیزم‌های حرارتی<sup>۳</sup> و آنی<sup>۴</sup> هستند. رابطه (۱۴) نشان دهنده معادله انتقال اکسیدنیترژن است [۲۴، ۲۲].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $S_{NO}$  عبارت چشمه است که با توجه به مکانیزم تولید اکسیدنیترژن تعریف می‌شود. نرخ تولید اکسیدنیترژن در مکانیزم حرارتی از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2] \frac{(1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[NO]^2}{k_{f,1}[N_2]k_{f,2}[O_2]})}{(1 + \frac{k_{r,1}[NO]}{k_{f,2}[O_2]k_{f,3}[OH]})} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) ثوابت نرخ واکنش  $k_{r,1}$ ،  $k_{r,2}$ ،  $k_{f,1}$ ،  $k_{f,2}$ ،  $k_{f,3}$  و رابطه مربوط به غلظت اکسیژن تک‌اتمی، در مرجع [۲۴]، ارائه شده است. در مکانیزم آنی، نرخ تولید اکسیدنیترژن از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\frac{d[NO]}{dt} = f_1 k'_{pr} [O_2]^a [N_2] [fuel] e^{\frac{-E'_d}{RT}} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)،  $f_1$ ،  $k'_{pr}$ ،  $E'_d$  و  $a$  به صورت تابعی از دما، فشار و شرایط شعله در مرجع [۲۴] ارائه شده است.

1. Discrete Ordinates (DO)  
2. Stefan-Boltzmann  
3. Thermal (Zeldovich)  
4. Prompt

## معرفی مطالعه موردی

مطالعه موردی در کار حاضر از مرجع [۲۶] اخذ شده است. در این مطالعه، متان به عنوان سوخت و هوا به عنوان اکسیدکننده به صورت غیرپیش آمیخته در یک محفظه استوانه‌ای واکنش می‌دهند و محفظه احتراق دارای تقارن محوری است. در شکل ۱ طرحواره محفظه مورد نظر نشان داده شده است. به این ترتیب، در مختصات استوانه‌ای، با حذف  $\theta$ ، با دو بعد  $r$  (فاصله شعاعی) و  $x$  (فاصله محوری) مواجه هستیم. همچنین، اطلاعات هندسی محفظه احتراق در جدول ۱ ارائه شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای ورودی سوخت و هوا، شرط مرزی سرعت و همچنین برای خروجی شرط مرزی فشار و برابر با یک اتمسفر است. دیواره‌های محفظه احتراق دارای شرط مرزی دما ثابت با دمای ۴۰۰ کلوین و ضریب گسیل ۰/۸ در نظر گرفته شده است. سایر شرایط مرزی در جدول ۲ ارائه شده است.

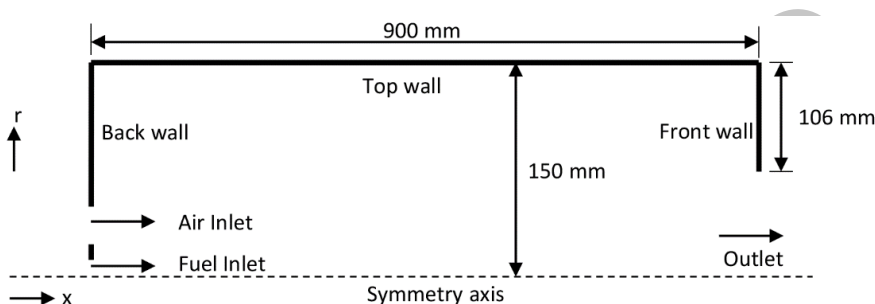


Figure 1- Schematic view of combustion chamber

شکل ۱- طرحواره محفظه احتراق

جدول ۱- اطلاعات هندسی محفظه احتراق

Table 1- Geometrical data of combustion chamber

Fuel inlet zone (mm)	$r=0.0-6.0$
Air inlet zone (mm)	$r=16.5-27.5$
Furnace diameter (mm)	150.0
Furnace length (mm)	900.0

در جدول ۲، عدد چرخش، مطابق با رابطه (۱۷)، به صورت نسبت نرخ تکانه جانبی به تکانه محوری تعریف شده است. در این رابطه،  $R_1$  و  $R_2$  شعاع داخلی و خارجی سطح ورودی جریان چرخشی (برای سوخت یا هوا)،  $V$  سرعت محوری و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای جریان است [۳].

$$S = \frac{\int_{R_1}^{R_2} r \omega dr}{V (R_2 - R_1)} \quad (17)$$

جدول ۲- شرایط مرزی ورودی

Table 2- Inlet boundary conditions

Parameters	Fuel	Air
Axial velocity (m/s)	15.0	12.8
Radial velocity (m/s)	0.0	0.0
Turbulent kinetic energy ( $m^2/s^2$ )	2.26	1.63
Dissipation rate of turbulence ( $m^2/s^3$ )	1131.8	692.0
Temperature (K)	295	295
Swirl number	0.0	0.4
Mass fraction of $O_2$	0.0	0.2315
Mass fraction of $N_2$	0.0	0.7685
Mass fraction of $CH_4$	1.0	0.0

## روند شبیه‌سازی و اعتبارسنجی

در مدل‌سازی حاضر، برای شبکه‌بندی میدان حل از نرم‌افزار گمبیت<sup>۱</sup> استفاده شده است که به دلیل تقارن محوری هندسه مسئله، شبکه‌بندی به صورت دوبعدی، مطابق شکل ۲، انجام شده است. شبیه‌سازی جریان واکنشی به روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار فلونت<sup>۲</sup> انجام شده است. گسسته‌سازی معادلات به روش بالادست جریان مرتبه دوم<sup>۳</sup> انجام شده و برای اصلاح سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل<sup>۴</sup> استفاده شده است.

برای بررسی استقلال حل از شبکه، سه شبکه متفاوت هر کدام با تعداد سلول‌های ۲۲۶۰، ۱۰۲۶۰ و ۱۳۰۰۰ در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۳، که نمایانگر دما روی خط مرکزی است، پاسخ به دست‌آمده از شبکه ۱۰۲۶۰، به اندازه کافی، مستقل از شبکه است و در ادامه از این شبکه استفاده خواهد شد.

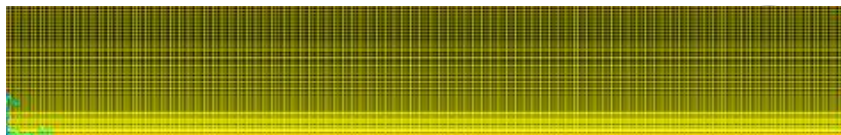


Figure 2- A view of mesh grid of computational domain

شکل ۲- نمایی از شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی

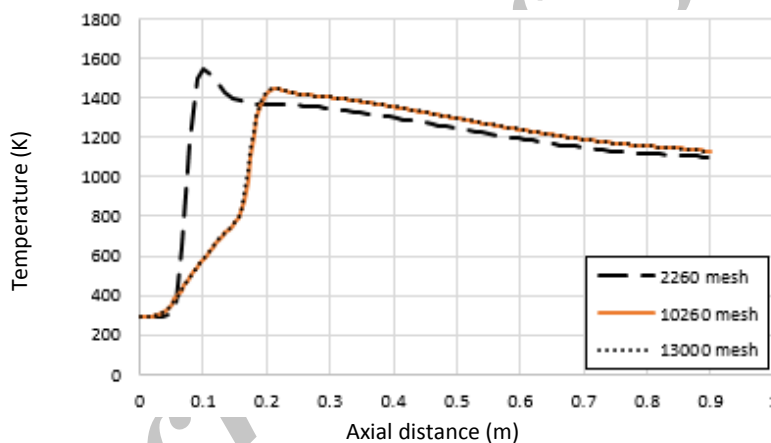


Figure 3- Mesh dependency analysis, temperature on centerline

شکل ۳- بررسی استقلال از شبکه، دما روی خط مرکزی

به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی و مدل‌سازی، در شکل ۴، نمودار دما روی خط مرکزی با نتایج تجربی موجود در مرجع [۲۶] مقایسه شده است. متوسط تفاوت نتایج داده‌های آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی عددی برای دما روی خط مرکزی برابر ۷ درصد است. در شکل ۵، کانتور دمای حاصل از نتایج عددی مطابق با اطلاعات موجود در مرجع [۲۶] نشان داده شده است. ذکر این نکته لازم است که اطلاعات تجربی موجود در مرجع [۲۶] محدود به مقادیر دما می‌شود. به همین دلیل و به منظور سنجش اعتبار مدل‌سازی حاضر در پیش‌بینی مقادیر گونه‌های شیمیایی، اعتبارسنجی دیگری نیز انجام شده است. این اعتبارسنجی از طریق مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی موجود در مرجع [۲۷] مربوط به یک مشعل نفوذی متقارن محوری با سوخت متان به‌ازای هندسه و شرایط مرزی مشابه صورت پذیرفته است. شکل‌های ۶ تا ۹ نشانگر تطابق مناسبی بین نتایج

1. Gambit
2. Fluent
3. Second Order Upwind Method
4. SIMPLE



تجربی و عددی، به ترتیب در مورد کسرجرمی متان روی خط مرکزی، کسرجرمی اکسیژن در راستای شعاعی (در یک فاصله محوری مشخص)، کسرجرمی دی اکسیدکربن روی خط مرکزی و در نهایت کسرجرمی مونوکسیدکربن روی خط مرکزی است که متوسط تفاوت داده‌های تجربی با نتایج عددی در آن‌ها به ترتیب برابر ۱۸، ۱۱، ۲۱/۳ و ۹/۷ درصد است. شایان ذکر است که در ادامه مقاله، منظور از مطالعه موردی یا طرح مرجع، همان مطالعه موردی اول با اطلاعات جداول ۱ و ۲ است.

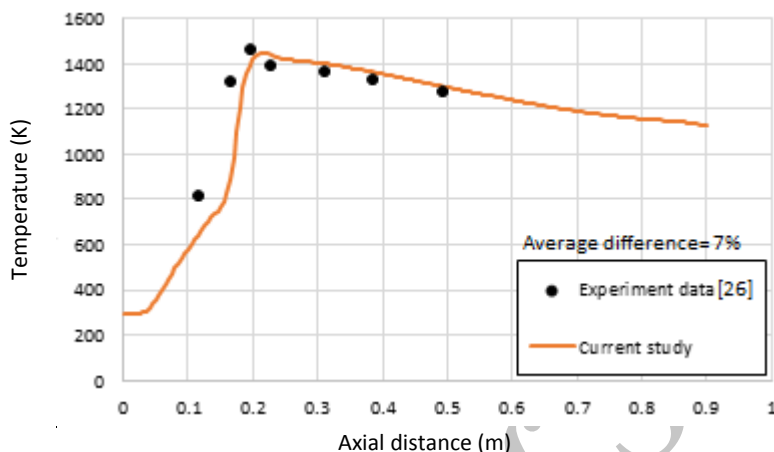


Figure 4- Comparison between present modeling and experiment data [26], temperature on centerline  
 شکل ۴- مقایسه میان مدل‌سازی حاضر و نتایج تجربی [۲۶]، دما روی خط مرکزی

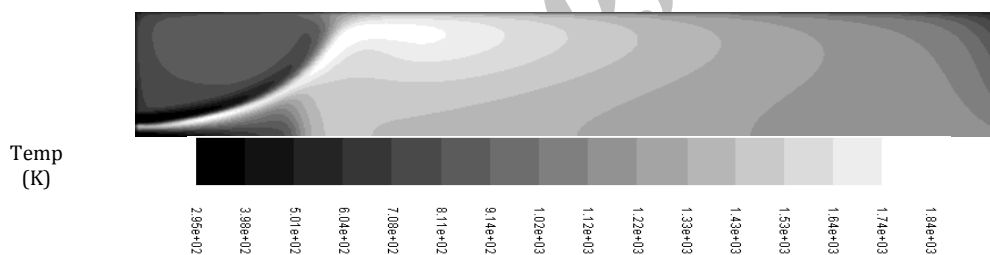


Figure 5- Contour of static temperature in combustion chamber (Air swirl=0.4, Fuel swirl=0)  
 شکل ۵- کانتور دمای استاتیک در محفظه احتراق (چرخش هوا=۰/۴، چرخش سوخت=۰)

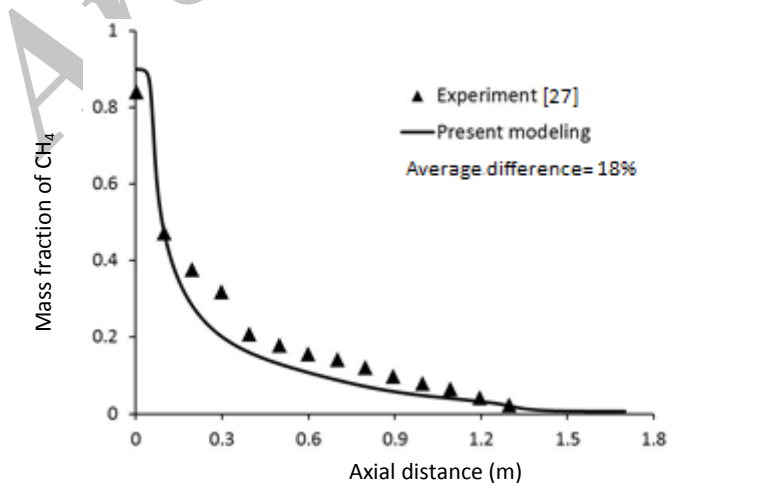


Figure 6- Comparison between modeling and experiment [27], Mass fraction of CH<sub>4</sub> on centerline  
 شکل ۶- مقایسه میان مدل‌سازی و نتایج تجربی [۲۷]، نسبت جرمی متان روی خط مرکزی

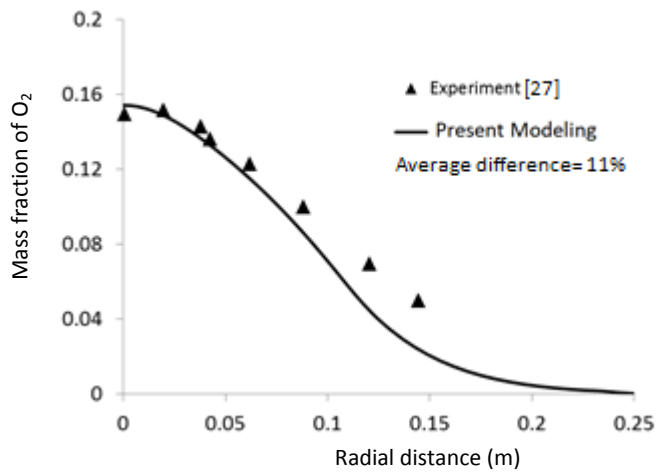


Figure 7- Comparison of modeling and experiment [27], Mass fraction of O<sub>2</sub> on transversal line of  $x=0.912m$   
 شکل ۷- مقایسه مدلسازی و نتایج تجربی [۲۷]، نسبت جرمی اکسیژن روی مقطع عرضی  $x=0.912$

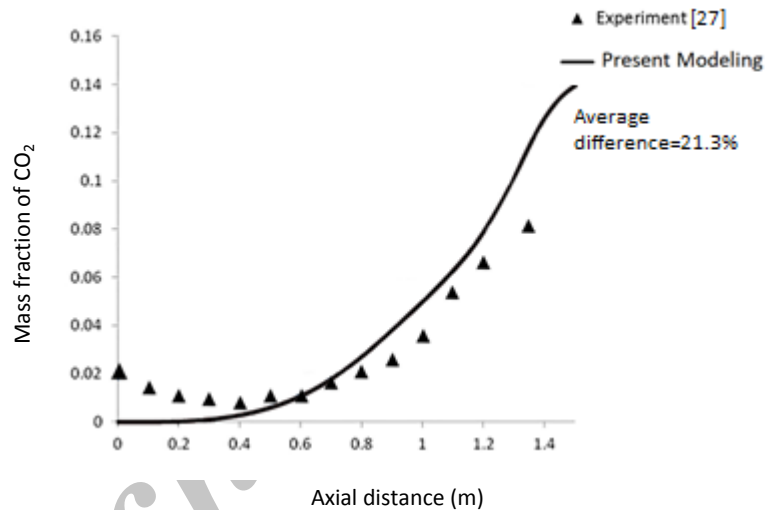


Figure 8- Comparison between modeling and experiment [27], Mass fraction of CO<sub>2</sub> on centerline  
 شکل ۸- مقایسه میان مدلسازی و نتایج تجربی [۲۷]، نسبت جرمی دی اکسیدکربن روی خط مرکزی

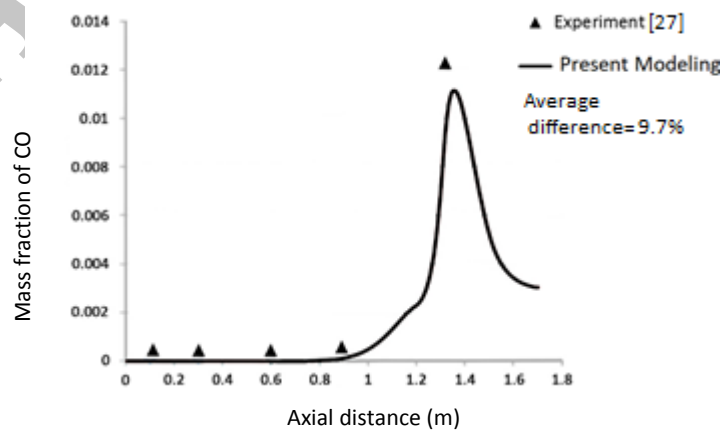


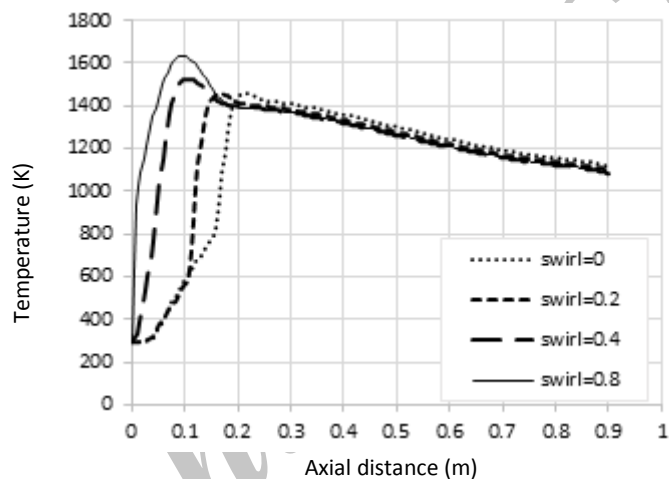
Figure 9- Comparison of modeling and experiment [27], Mass fraction of CO on centerline  
 شکل ۹- مقایسه مدلسازی و نتایج تجربی [۲۷]، نسبت جرمی مونواکسیدکربن روی خط مرکزی

## بحث و نتایج

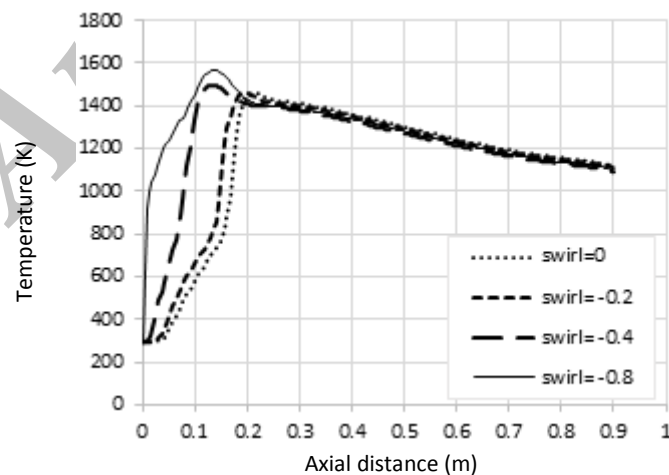
در کار حاضر، با ثابت فرض کردن عدد چرخش هوای ورودی (برابر با ۰/۴ مطابق مرجع [۲۶]) به بررسی تاثیر چرخش سوخت بر ویژگی‌های شعله و میزان نشر آلاینده‌ها پرداخته می‌شود. همچنین، تاثیر هم‌جهت‌بودن یا خلاف‌جهت‌بودن چرخش سوخت نسبت به جهت چرخش هوا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سایر شرایط مرزی ثابت و براساس آنچه در جدول ۲ ارائه شد، در نظر گرفته می‌شود. تحقیق اهداف یادشده با مدلسازی مسئله به‌ازای مقادیر مختلف عدد چرخش سوخت ورودی (۰، ±۰/۲، ±۰/۴، ±۰/۸) صورت می‌پذیرد. شایان ذکر است مقادیر مثبت عدد چرخش سوخت هم‌جهت‌بودن آن با چرخش هوای ورودی (چرخش موازی) و مقادیر منفی خلاف‌جهت‌بودن آن با جهت چرخش هوا (چرخش معکوس) را نشان می‌دهد.

### تاثیر چرخش سوخت بر نرخ واکنش و میدان دما

شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات دما در راستای خط مرکزی محفظه احتراق است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد چرخش سوخت (در هر دو حالت چرخش هم‌جهت و خلاف‌جهت)، افزایش دما در راستای محور طولی سریع‌تر اتفاق می‌افتد.



(a)



(b)

Figure 10- Temperature variation along centerline; A) Co swirl mode B) Counter swirl mode

شکل ۱۰- تغییرات دما در راستای خط مرکزی: الف) چرخش موازی سوخت، ب) چرخش معکوس سوخت

به عبارت دیگر، با افزایش چرخش سوخت، دمای محفظه احتراق، سریع تر و در فاصله نزدیکتری از ورودی محفظه افزایش یافته است. دلیل اصلی این مشاهدات را می توان در نرخ اختلاط بیشتر سوخت و هوا، در اثر افزایش چرخش سوخت ورودی، جستجو کرد. شدت آشفته‌گی از عوامل اصلی نرخ اختلاط و نرخ احتراق است [۱۱،۹]. به همین دلیل، در ادامه، به بررسی تاثیر چرخش سوخت بر شدت آشفته‌گی پرداخته می‌شود.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان‌دهنده تاثیر میزان چرخش سوخت بر شدت آشفته‌گی در راستای شعاع محفظه و در فاصله طولی معین ( $x=0.05m$ ) از ابتدای محفظه است. مشاهده می‌شود با افزایش چرخش سوخت (هم در حالت موازی و هم معکوس) شدت آشفته‌گی افزایش یافته است. این روند در فواصل طولی دیگر نیز مشاهده شده است که از تکرار آن خودداری شده است.

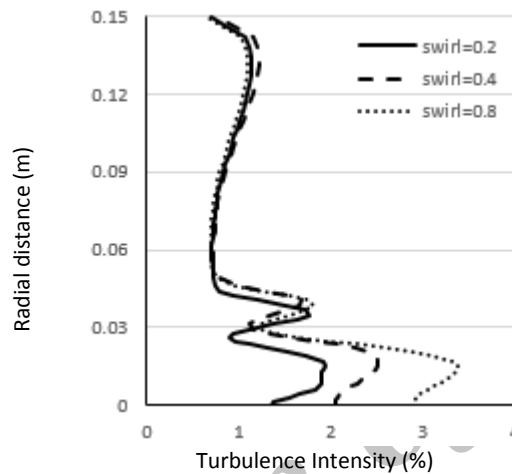


Figure 11- Turbulence intensity on transverse line of  $x=0.05$  m for different swirl numbers (Co swirl mode)  
 شکل ۱۱- شدت آشفته‌گی روی خط عرضی  $x=0.05m$  برای عددهای چرخش متفاوت (چرخش موازی سوخت و هوا)

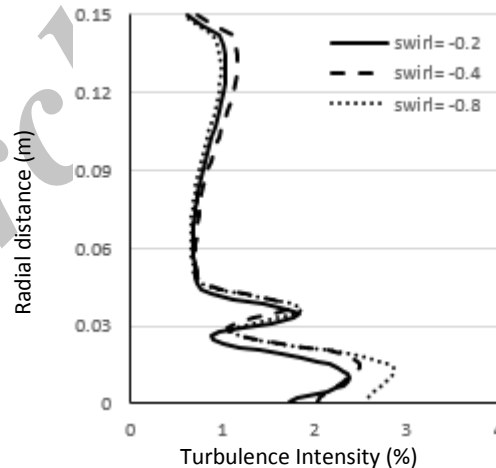


Figure 12- Turbulence intensity on transverse line of  $x=0.05$  m for different swirl numbers (Counter swirl mode)  
 شکل ۱۲- شدت آشفته‌گی روی خط عرضی  $x=0.05m$  به ازای عددهای چرخش متفاوت (چرخش معکوس سوخت و هوا)

به منظور مقایسه چرخش موازی و معکوس سوخت و هوا، شدت آشفته‌گی ناشی از چرخش موازی و معکوس سوخت و هوا در فواصل طولی مختلف و به ازای مقادیر چرخش متفاوت سوخت (به ازای عدد چرخش ثابت  $0.4$  هوا در تمامی حالات) در شکل ۱۳ رسم شده است.

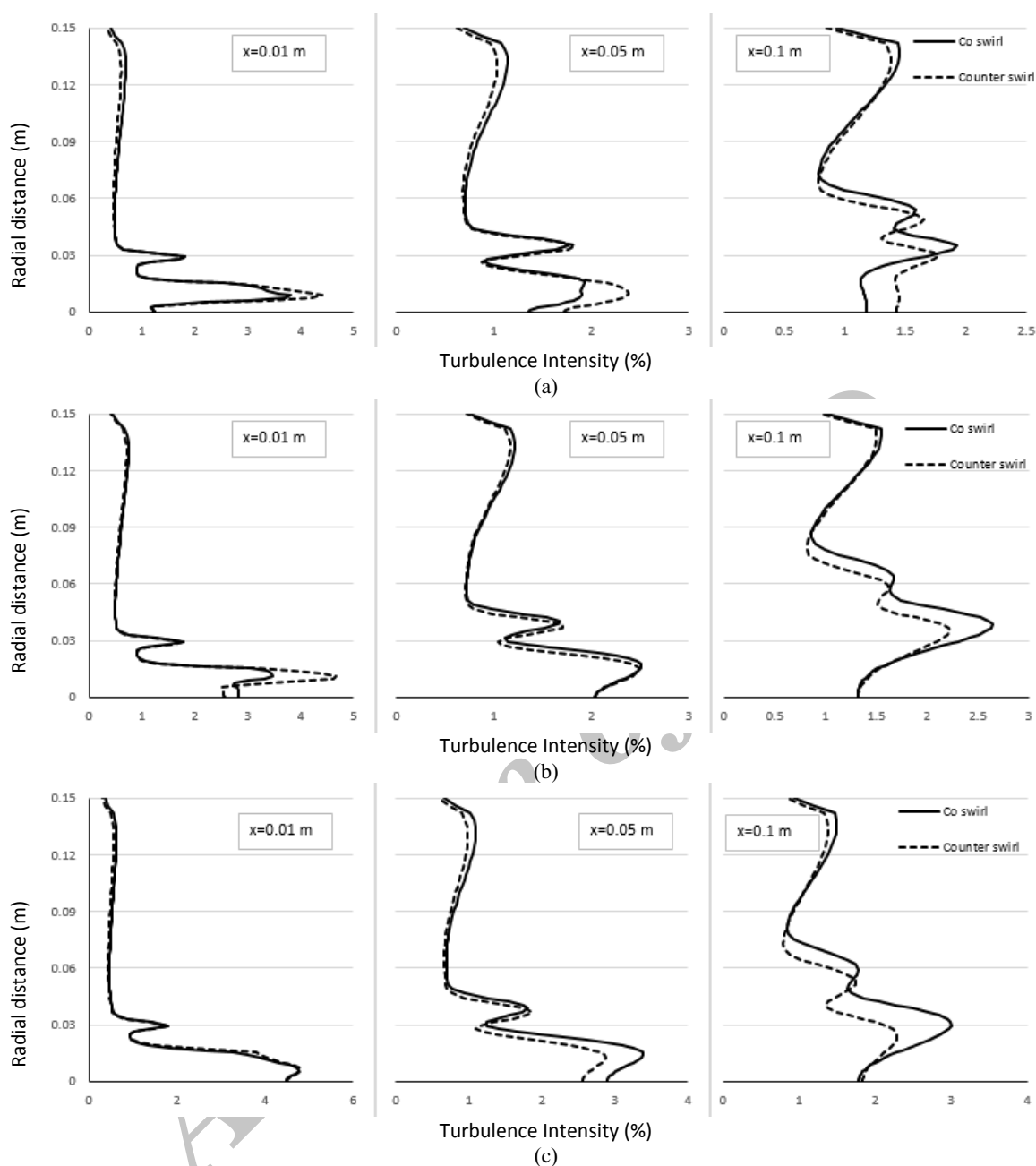


Figure 13- Turbulence intensity on transverse lines for different swirl numbers: (a) fuel swirl=0.2 (b) fuel swirl=0.4 (c) fuel swirl=0.8

شکل ۱۳- شدت آشفته‌گی در مقاطع عرضی به‌ازای عددهای چرخش متفاوت: (الف) چرخش سوخت = ۰/۲ (ب) چرخش سوخت = ۰/۴ (ج) چرخش سوخت = ۰/۸

در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که در چرخش‌های بالای سوخت (شکل ج)، چرخش موازی اغلب منجر به شدت آشفته‌گی بیشتر شده است. اما در چرخش‌های پایین سوخت (شکل‌های الف و ب)، به‌ویژه در فواصل ابتدایی، چرخش خلاف‌جهت سوخت نرخ آشفته‌گی بیشتر را منجر شده است، ولی با افزایش فاصله از ورودی محفظه، مشاهده می‌شود که اثرات آشفته‌گی در حالت چرخش موازی غالب است و اغلب شدت آشفته‌گی و اختلاط در حالت چرخش موازی سوخت بیشتر است.

همان طور که در رابطه (۸) و (۹) مشاهده می‌شود، در روش اتلاف گردابه‌ای، نسبت نرخ اتلاف به انرژی جنبشی آشفته  $(\frac{\epsilon}{k})$  یکی از متغیرهای تعیین کننده نرخ واکنش است. به همین منظور، این نسبت به عنوان نمونه برای عدد چرخش ۰/۴ در دو فاصله طولی مختلف در راستای عرضی، در شکل ۱۴، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، این نسبت در فواصل طولی ابتدایی (به عنوان مثال،  $x=0.01m$ ) برای حالت چرخش خلاف جهت، و در فواصل طولی دورتر (به عنوان مثال،  $x=0.1m$ ) در شرایط چرخش هم جهت بیشتر است.

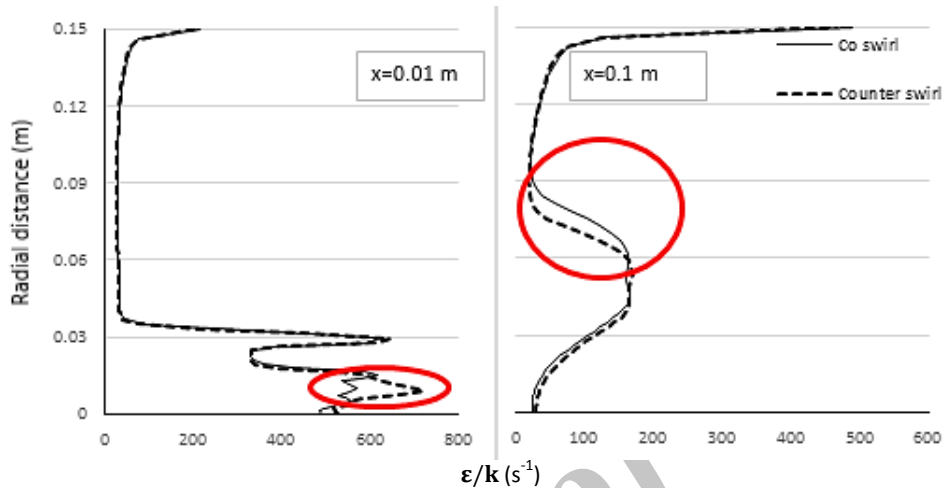


Figure 14- The ratio of dissipation rate of turbulence to turbulent kinetic energy on transverse lines for fuel swirl=0.4  
 شکل ۱۴- نسبت نرخ اتلاف انرژی جنبشی به انرژی جنبشی آشفته در مقاطع عرضی به ازای عدد چرخش سوخت=۰/۴

بیشینه دمای شعله به صورت تابعی از عدد چرخش سوخت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش میزان چرخش سوخت و کوتاه تر شدن شعله، دماهای بیشینه افزایش می‌یابد که این امر ناشی از اختلاط بهتر سوخت و هواست [۱۶، ۱۰، ۶]. همچنین، مشاهده می‌شود که به ویژه در چرخش‌های بالای سوخت، دماهای بیشینه شعله در حالت چرخش موازی سوخت نسبت به چرخش خلاف جهت بیشتر است.

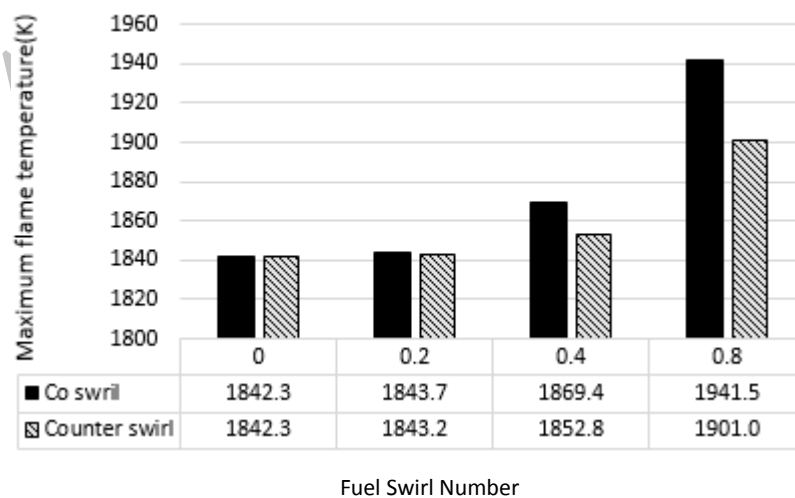


Figure 15- Maximum flame temperature  
 شکل ۱۵- بیشینه دمای شعله

## انتقال حرارت به دیواره‌ها

در شکل ۱۶، نمودار شار حرارتی تابشی به دیواره‌های محفظه احتراق (ناحیه A-B مربوط به دیواره پشتی، ناحیه B-C مربوط به دیواره جانبی یا بالایی، و ناحیه C-D مربوط به دیواره روبه‌روی)، به‌ازای چرخش موازی سوخت، نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شدت چرخش سوخت، شار حرارتی تابشی دیواره پشتی افزایش و از طرف دیگر شار تابشی دیواره‌های بالایی و روبه‌رو کاهش می‌یابد.

از آنجایی که با افزایش شدت چرخش، ناحیه اصلی واکنش به ورودی نزدیک‌تر می‌شود، لذا انتظار می‌رود که در دیواره‌های مجاور ورودی محفظه احتراق، پدیده تشعشع، با توجه به رابطه توان چهارم با دما و وابسته بودن به سطح شعله، پدیده حرارتی غالب باشد. در نتیجه، با افزایش مقدار چرخش، شار حرارتی تابشی به دیواره‌های پشتی افزوده می‌شود. از آنجا که میزان زیادی از انرژی سوخت در نزدیکی ورودی محفظه آزاد شده و انرژی حرارتی و تابشی کمتری به دیواره‌های انتهایی محفظه منتقل می‌شود، لذا با افزایش میزان چرخش سوخت، شار حرارتی تابشی به دیواره‌های بالایی و انتهایی محفظه احتراق کاهش می‌یابد. شایان ذکر است، به‌ازای چرخش معکوس سوخت، این روند مشابه است و لذا از تکرار آن خودداری شده است. همچنین، با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار چرخش سوخت، نرخ کلی انتقال حرارت (در هر دو حالت چرخش سوخت) اندکی افزایش می‌یابد.

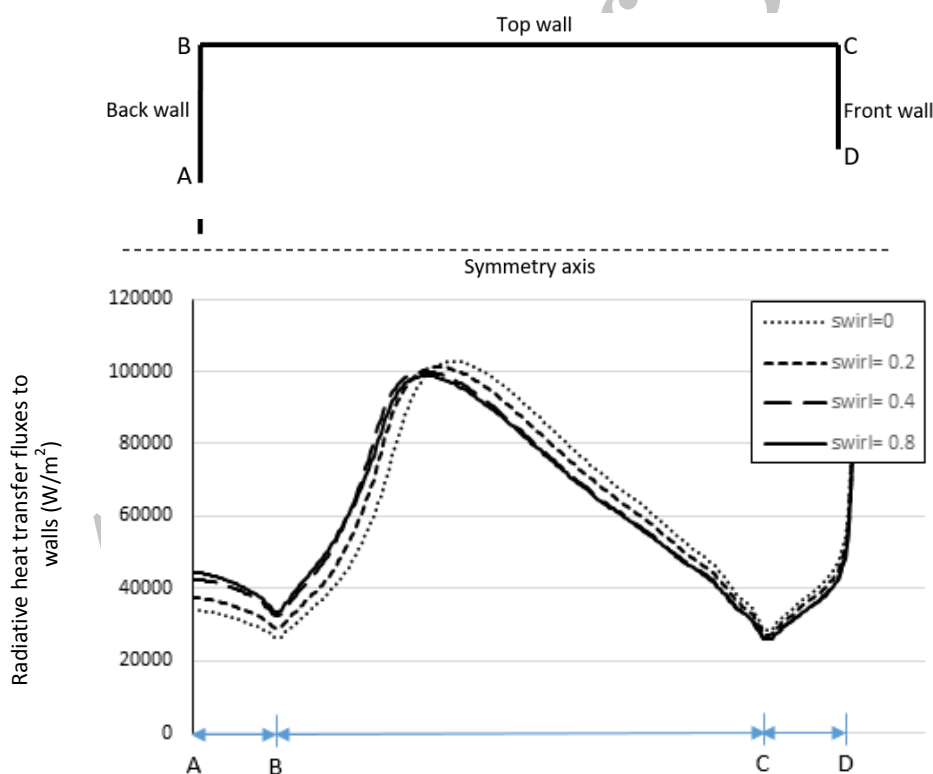


Figure 16- Radiative heat transfer fluxes to walls

شکل ۱۶- شار حرارتی تابشی به دیواره‌ها

جدول ۳- نرخ کلی انتقال حرارت به دیواره‌ها

Table 3- Total heat transfer rate to the walls (kW)

swirl	0	0.2	0.4	0.8
Co-Swirl	34.68	35.20	35.64	35.65
Counter-Swirl	34.68	34.87	35.41	35.55

## نشر آلاینده‌ها

در این بخش دو تابع هدف مهم در کار حاضر، یعنی میزان نشر اکسیدنیترژن و مونواکسیدکربن در خروجی، بررسی می‌شود.

## اکسیدنیترژن

اکسیدنیترژن از آلاینده‌های خطرناکی است که در طی احتراق تولید می‌شود و دمای بالای احتراق و غلظت اکسیدکننده در تشکیل آن نقش بسزایی دارند. در تشکیل اکسیدنیترژن، اغلب، یکی از این دو مکانیزم حرارتی و یا آبی غالب خواهد بود. براساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴، مشاهده می‌شود که مرتبه نرخ تشکیل اکسیدنیترژن توسط مکانیزم آبی بیشتر از مکانیزم حرارتی و به نرخ کلی نزدیک‌تر است.

جدول ۴- بیشینه نرخ تشکیل اکسیدنیترژن

Table 4- Maximum rate of NO formation

Swirl	Rate of NO (kgmol/m <sup>3</sup> s)	Rate of prompt NO (kgmol/m <sup>3</sup> s)	Rate of thermal NO (kgmol/m <sup>3</sup> s)
0	6.42e-6	6.20e-6	2.91e-7
0.2	2.70e-6	2.67e-6	2.91e-7
-0.2	3.31e-6	3.26e-6	2.90e-7
0.4	3.20e-6	3.02e-6	4.51e-7
-0.4	2.63e-6	2.40e-6	3.25e-7
0.8	6.51e-6	5.62e-6	1.48e-6
-0.8	5.99e-6	5.49e-6	7.87e-7

در شکل ۱۷، مقادیر غلظت اکسیدنیترژن در خروجی محفظه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان چرخش سوخت، اغلب، میزان اکسیدنیترژن در خروجی محفظه افزایش می‌یابد. علت این امر در این است که دمای احتراق که از پارامترهای اصلی در تولید اکسیدنیترژن است، با افزایش میزان چرخش سوخت، افزایش پیدا می‌کند. در مقایسه میزان اکسیدنیترژن خروجی به‌ازای جهت چرخش، مشاهده می‌شود که این مقدار اغلب در حالت چرخش موازی بیشتر است. از آنجایی که دمای شعله در حالت چرخش موازی سوخت بیشتر است، در نتیجه اکسیدنیترژن خروجی در این حالت، در مقایسه با حالت چرخش معکوس، بیشتر است.

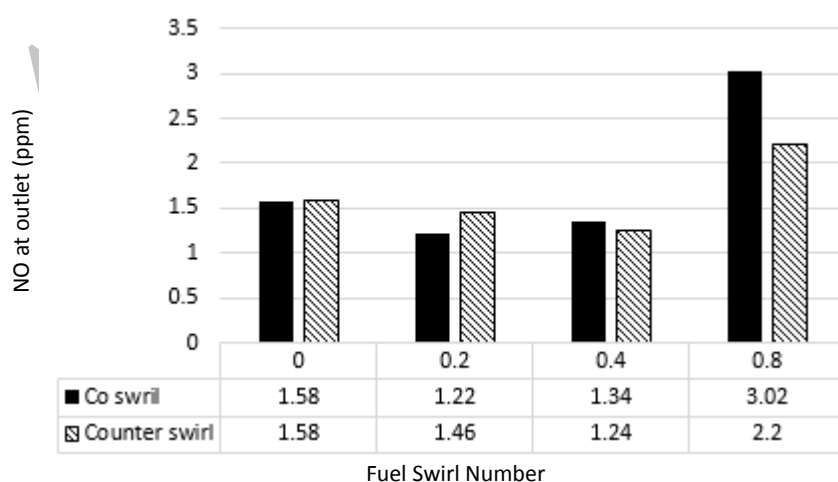


Figure 17- Amount of NO at outlet

شکل ۱۷- میزان اکسیدنیترژن در خروجی



### مونوکسیدکربن

مونوکسیدکربن اغلب در نواحی سوخت غنی، به مقدار زیادی موجود است، زیرا اکسیژن کافی برای احتراق وجود ندارد. همچنین، اختلاط ناکامل نیز می‌تواند موجب تشکیل مونوکسیدکربن شود. در شکل ۱۸، مشاهده می‌شود که اغلب، با افزایش مقدار چرخش سوخت، میزان نرخ جرمی مونوکسیدکربن در خروجی کاهش می‌یابد، زیرا، با افزایش چرخش، عمل اختلاط بهتر و احتراق کامل‌تر است. در نتیجه، میزان مونوکسیدکربن در خروجی محفظه کاهش می‌یابد. از طرفی، با توجه به اینکه در حالت چرخش موازی نسبت به معکوس، اختلاط بهتر و دماها بالاتر است، لذا مقدار مونوکسیدکربن خروجی در حالت موازی نسبت به معکوس کمتر است.

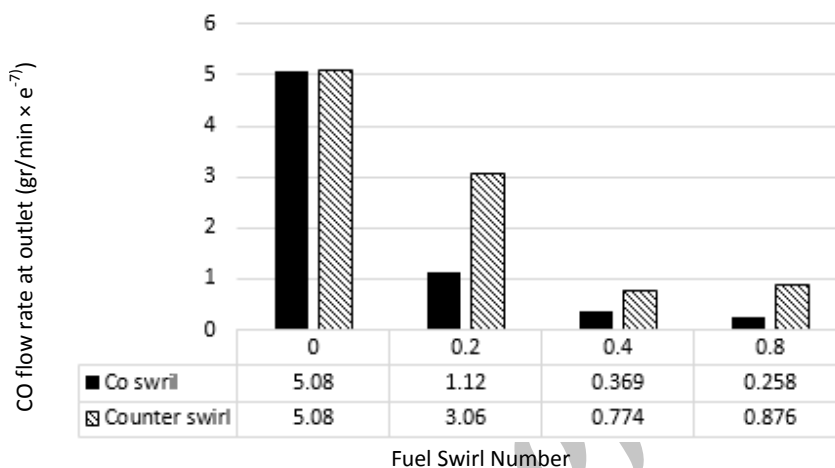


Figure 18- CO flow rate at outlet

شکل ۱۸- نرخ جرمی مونوکسیدکربن در خروجی

### گزینش طرح‌های برتر و بررسی توابع هدف

گزینش طرح مناسب در این بخش، با در نظرگیری همزمان دو تابع هدف میزان نشر اکسیدنیترژن و مونوکسیدکربن، با استفاده از مفهوم جبهه پارتو<sup>۱</sup> صورت می‌پذیرد. جبهه پارتو مجموعه‌ای از طرح‌هاست که هیچ طرح غالب نسبت به آن‌ها وجود ندارد. طرح غالب طرحی است که حداقل از نظر یک تابع هدف بهتر باشد و از نظر سایر توابع هدف بدتر نباشد [۲۲، ۲۸].

نمایش جبهه پارتو با دو تابع هدف (دو بعدی) از طریق یک نمودار دو بعدی امکان پذیر است. هر یک از طرح‌های موجود روی جبهه پارتو می‌تواند به عنوان طرح بهینه انتخاب شود. اما، به منظور پیشنهاد تنها یک طرح به عنوان طرح بهینه، از مفهوم نقطه آرمانی استفاده می‌شود. نقطه آرمانی نقطه‌ای است که مقدار هر یک از توابع هدف آن، بهترین مقداری باشد که در کل طرح‌های مورد بررسی به آن دست یافته‌اند. برای آنکه مقادیر توابع هدف مختلف با هم قابل قیاس باشند، از روش بی‌بعدسازی توابع هدف طبق رابطه (۱۸) استفاده می‌شود [۲۸].

$$F_{ij}^n = \frac{F_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (F_{ij})^2}} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)،  $F$  هر یک از اهداف،  $i$  زیرنویس هر نقطه روی جبهه پارتو،  $j$  زیرنویس هر یک از اهداف،  $m$  تعداد نقاط روی جبهه پارتو و منظور از بالانویس  $n$  حالت بی‌بعد شده آن هدف است. حال، به منظور محاسبه فاصله هر نقطه روی جبهه پارتو از نقطه آرمانی  $d$ ، از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود.

1. Pareto Front

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^x (F_{ij}^n - F_{ideal,j}^n)^2} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، منظور از زیرنویس *ideal* مقدار تابع هدف بی‌بعدشده نقطه آرمانی و منظور از  $x$  تعداد توابع هدف است. نقطه‌ای که منجر به کمترین میزان  $d$  شود، به‌عنوان پاسخ بهینه انتخاب و این پاسخ با طرح مرجع [۲۶] مقایسه می‌شود. براساس شکل ۱۹، طرح‌های موجود در کار حاضر (مجموعاً ۸ حالت) براساس مفهوم نقطه آرمانی، ابتدا بی‌بعد و سپس رسم شده‌اند. مطابق این شکل، تمامی نقاط موجود در درون خط‌چین، در جبهه پارتو قرار دارند. هر یک از طرح‌های موجود روی جبهه پارتو می‌تواند با توجه به اولویت‌های طراح و یا اهمیت توابع هدف به‌عنوان طرح بهینه انتخاب شود. از میان طرح‌های موجود بر روی جبهه پارتو، طرح بهینه براساس معیار نزدیکی به نقطه ایدئال (کمینه‌بودن میزان نشر آلاینده‌ها به‌عنوان توابع هدف) انتخاب شده است، که مربوط به عدد چرخش ۰/۴ سوخت و در حالت چرخش موازی است. از آنجایی که اعتبار کار حاضر براساس داده‌ها و نتایج مرجع [۲۶] سنجیده شده است، لذا می‌توان نتایج مربوط به طرح بهینه در کار حاضر را با این مرجع، در جدول ۴ مقایسه کرد.

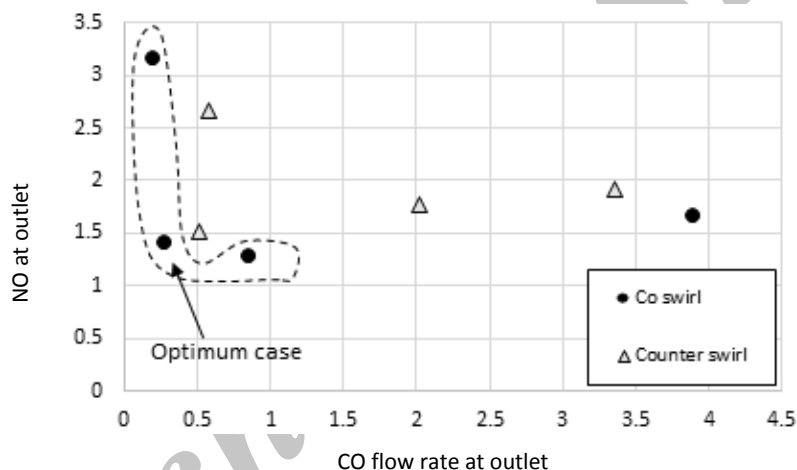


Figure 19- Comparison of different cases based on Pareto front concept

شکل ۱۹- مقایسه حالات مختلف براساس مفهوم جبهه پارتو

جدول ۴- مقایسه طرح بهینه در کار حاضر با نتایج مرجع [۲۶]

Table 4- Comparison of optimal design in current study with the reference case[26]

	NO density at outlet (ppm)	CO flow rate at outlet (gr/min×e-7)
Optimal case	1.34	0.369
Reference case [26]	1.58	5.08
Improvement percentage (%)	15.2	92.7

با توجه به هدف اصلی این مطالعه (یعنی بررسی چرخش سوخت بر ساختار شعله و آلاینده‌ها)، ناحیه محاسباتی مطالعه حاضر پس از ورود واکنشگرها به محفظه احتراق بوده است، و مکانیزم تولید چرخش را دربر نگرفته است. بررسی روش بهینه ایجاد چرخش در جریان واکنشگرها از میان روش‌های موجود (ازجمله پره‌های چرخنده، لوله‌های چرخشی و ورودی مماسی) به‌صورت تابعی از عدد چرخش و قطر هیدرولیکی جریان می‌تواند به‌صورت عددی یا تجربی در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.

## نتیجه گیری

در کار حاضر، مدلسازی دوبعدی مشعل گازسوز، به منظور بررسی اثرات چرخش همزمان واکنشگرها و جهت چرخش آن‌ها بر روی ویژگی‌های حرارتی و رفتاری شعله غیرپیش‌آمیخته ایجادشده توسط مشعل، انجام گرفته است. در حالی که عموم کارهای گذشته به بررسی تاثیر چرخش هوا بر شعله نفوذی پرداخته‌اند، کار حاضر به‌زای عدد چرخش ثابت  $0/4$  هوا، به بررسی تاثیر میزان چرخش سوخت ( $0$ ،  $\pm 0/2$ ،  $\pm 0/4$ ،  $\pm 0/8$ ) و هم‌جهت‌بودن یا خلاف‌جهت‌بودن آن نسبت به چرخش هوا پرداخته است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد چرخش سوخت، اختلاط بین سوخت و هوا بهتر و سریع‌تر انجام شده و طی آن دمای شعله، شدت آشفته‌گی، نرخ واکنش و انتقال حرارت کلی به دیواره‌ها افزایش یافته است. همچنین، با افزایش نرخ واکنش از طول شعله کاسته شده است و شعله پهن‌تر شده است. از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که عموماً چرخش موازی در مقایسه با چرخش معکوس منجر به دمای بیشتر شعله، نرخ واکنش بیشتر و انتقال حرارت کلی بیشتر به دیواره‌ها شده است. البته، در اعداد چرخش پایین سوخت ( $0/2$  و  $0/4$ )، میزان شدت آشفته‌گی، به‌ویژه در فواصل ابتدایی محفظه، در حالت چرخش معکوس در مقایسه با چرخش موازی بیشتر است.

در نهایت، با در نظرگیری میزان نشر اکسیدنیترژن و مونوکسیدکربن به‌عنوان توابع هدف و با استفاده از مفهوم جبهه پارتو، عدد چرخش  $0/4$  سوخت به‌زای جهت چرخش موازی، به‌عنوان بهترین چرخش از میان موارد بررسی‌شده انتخاب شده است. مقایسه طرح بهینه با نتایج مربوط به طرح مرجع نشان می‌دهد که میزان نشر اکسیدنیترژن و مونوکسیدکربن به‌ترتیب  $15/2$  و  $92/7$  درصد بهبود یافته است. شایان ذکر است که مقدار بهینه ذکرشده برای عدد چرخش مختص مطالعه موردی حاضر است و می‌تواند بسته به شرایط مسئله (هندسه مشعل و شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی) مقادیر متفاوتی به‌خود بگیرد.

## منابع

1. J. Warnatz, U. Mass and R. W. Dibble, *Combustion*, 4<sup>th</sup> Edition, Berlin, Germany, Springer, 2006.
2. S. R. Turns, *An Introduction to Combustion*, Second Edition, New York, McGraw Hill, 2000.
3. F. El-Mahallawy and S. El-Din Habik, *Fundamentals and Technology of Combustion*, Oxford, UK, Elsevier, 2002.
4. S. Yuasa, "Effect of swirl on the stability of jet diffusion flames," *Combustion and Flame*, 66, 1986, pp. 181-192.
5. Z. Chen, Z. Li, F. Wang, J. Jing, L. Chen and S. Wu, "Gas/particle flow characteristics of a centrally fuel rich swirl coal combustion burner," *Fuel*, 87, 2008, pp. 2102-2110.
6. H. S. Zhen, C. W. Leung and C. S. Cheung, "Thermal and emission characteristics of a turbulent swirling inverse diffusion flame," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2010, pp. 902-909.
7. O. A. Sharaf, N. N. Mikhael, T. M. Farag and A. K. Abdel-Samed, "Interaction between annulus gaseous fuel and dual swirling air jets for vertical diffusion flame," *Port-Said Engineering Research Journal*, 14, 2010, pp. 67-87.
8. K. Khanafer and S. M. Aithal, "Fluid-dynamic and NO<sub>x</sub> computation in swirl burners," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2011, pp. 5030-5038.
9. A. De and S. Acharya, "Parametric study of upstream flame propagation in hydrogen-enriched premixed combustion: effect of swirl, geometry and premixedness," *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 2012, pp. 14649-14668.
10. H. S. Zhen, C. W. Leung, C. S. Cheung and H. B. Li, "Thermal and heat transfer behaviors of an inverse diffusion flame with induced swirl," *Fuel*, 103, 2013, pp. 212-219.
11. Z. Wang, Y. Xu, Y. Lu, Z. Zhou, J. Zhou and K. Cen, "LES investigation of swirl intensity effect on unconfined turbulent swirling premixed flame," *Engineering Thermophysics*, 59, 2014, pp. 4550-4558.
12. L. Xing and J. Li, "Investigation on combustion characteristics and NO formation of methane with swirling and non-swirling high temperature air," *Journal of Thermal Science*, 23, 2014, pp. 472-479.
13. S. Singh and S. Chander, "Heat transfer characteristics of dual flame with outer swirling and inner non-swirling flame impinging on a flat surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 2014, pp. 995-1007.
14. S. Singh and S. Chander, "Heat transfer characteristics of dual swirling flame impinging on a flat surface," *International Journal of Thermal Sciences*, 89, 2015, pp. 1-12.
15. A. Rowhani and S. Tabejamaat, "Experimental study of the effects of swirl and air dilution on biogas non-premixed flame stability," *Journal of Thermal Science*, 19, 2015, pp. 2161-2169.
16. M. T. Parra-Santos, V. Mendoza-Garcia, R. Szasz, A. N. Gutkowski and F. Castro-Ruiz, "Influence of flow swirling on the aerothermodynamic behaviour of flames," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 51, 2015, pp. 424-430.

17. M. Ilbas, S. Karyeyen and I. Yilmaz, "Effect of swirl number on combustion characteristics of Hydrogen-containing fuels in a combustor," *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 2016, pp. 1-7.
18. A. Kotb and H. Saad, "A comparison of the thermal and emission characteristics of co and counter swirl inverse diffusion flame," *International Journal of Thermal Science*, 109, 2016, pp. 362-373.
19. Y. Sung and G. Choi, "Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner," *Fuel*, 174, 2016, pp. 76-88.
20. T. S. Cheng, J. -Y. Chen and R. W. Pitz, "Raman/LIPF data of temperature and species concentration in swirling Hydrogen jet diffusion flames: conditional analysis and comparison to laminar flamelets," *Combustion and Flame*, 186, 2017, pp. 311-324.
21. C. K. Law, *Combustion Physics*, Cambridge, Princeton University, 2006.
22. M. Rasouli and J. Mahmoudimehr, "Minimization of the emission of pollutants along with maximization of radiation from an air-staged natural gas flame," *Modares Mechanical Engineering*, 16, 2016, pp. 207-218. (In Persian)
23. T. Poinsot and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, Second Edition, USA, Edwards Press, 2005.
24. <http://users.ugent.be/~mvbelleg/flug-12-0.pdf>, Ansys Fluent 12.0 User's Guide, Accessed April 2009.
25. K. Annamalai and I. K. Puri, *Combustion Science and Engineering*, CRS Press, Texas A&M University, 2007.
26. E. P. Keramida, H. H. Liakos, M. A. Founti, A. G. Boudouvis and N. C. Markatos, "Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 2000, pp. 1801-1809.
27. D. Garretton, O. Simonin, "Aerodynamics of steady state combustion chambers and furnaces," *ASCF Ercoftac CFD Workshop*, Chatou, France, 1994.
28. F. Hajabdollahi, Z. Hajabdollahi and H. Hajabdollahi, "Soft computing based multi-objective optimization of steam cycle power plant using NSGA-II and ANN," *Soft Computing*, 12, 2012, pp. 3648-3659.

## English Abstract

### Numerical and two-dimensional study of the influences of the swirl of fuel on the structure and the environmental features of a gas diffusion flame

Sina Jamalzad Fallah<sup>1</sup> and Javad Mahmoudimehr<sup>2\*</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, sina.jamalzad@gmail.com

2- Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, mahmoudimehr@guilan.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2018.01.21, Received in revised form: 2018.03.02, Accepted: 2018.03.24)

The positive influence of the swirl of reactants on the air-fuel mixing has been widely discussed in previous studies. However, they have been mostly focused on the swirl of air. The present work numerically investigates the influences of the swirl of fuel on the structure and the environmental features of a diffusion flame, while the swirl of air is kept constant. The results show that the increase of fuel swirl is associated with the increase of mixing rate, flame width, and flame peak temperature, and the decrease of CO emission and flame length. However, the trend of the variation of NO with fuel swirl number has a minimum somewhere in the middle. The results also illustrate that the co-swirl injection leads to higher mixing rate, peak temperature, emission of NO, and lower emission of CO, as compared to the counter-swirl injection. In this work, the optimum swirl of fuel is observed to have the same value and to be in the same direction as the swirl of air. In this case, the emissions of NO and CO are decreased by 15.2% and 92.7% as compared to the reference design (in which the fuel has no swirl), respectively.

**Keywords:** Diffusion flame, Swirl, Emission of pollutants, Numerical modeling, Optimization