

## ایجاد ساختار متغیر در سری حرارتی مشعل گازسوز، جهت افزایش نسبت تبدیل تا ۱:۱۰

وحید عزیزی<sup>۱</sup>، زهرا نوری<sup>۲</sup>، امیر اخوت<sup>۳\*</sup>، قربانعلی میرزاده<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد مکانیک، مدیریت کارخانه طراحی و تولید مشعل، شرکت پاکمن، اصفهان، vah.azizi@gmail.com

۲- کارشناس ارشد مکانیک، کارشناس واحد تحقیق و توسعه کارخانه طراحی و تولید مشعل، شرکت پاکمن، اصفهان، znu.fluidmech@gmail.com

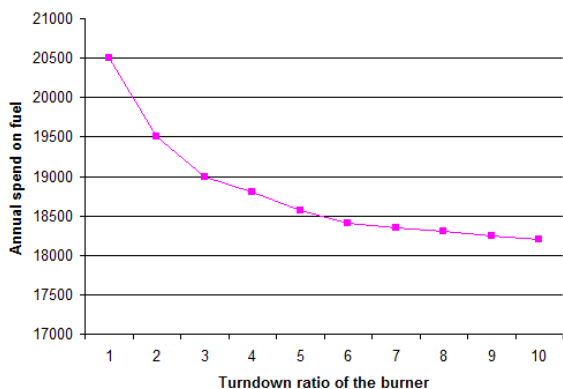
۳- کارشناس ارشد مکانیک، مدیریت واحد تحقیق و توسعه کارخانه طراحی و تولید مشعل، شرکت پاکمن، اصفهان، amir.okhovat@gmail.com

۴- کارشناس ارشد مکانیک، ریاست شرکت پاکمن، اصفهان، mirzazadeh\_gh@yahoo.com

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

انرژی در بویلر به همراه مشعل با نسبت تبدیل یک بسیار بالا است. با افزایش نسبت تبدیل مشعل و افزایش نقاطی که مشعل می‌تواند در آن‌ها به صورت استاندارد کار کند، تعداد دفعات سیکل خاموش روشن شدن مشعل کاهش یافته و مشعل می‌تواند با توجه به مصرف بویلر، به صورت هوشمند شعله خود را تنظیم کرده و بنابراین مصرف سوخت کاهش چشمگیری خواهد یافت.



شکل ۱: میزان مصرف سوخت سالیانه بر حسب نسبت تبدیل مشعل [۱]

یکی از پارامترهای مهم در احتراق مشعل‌های صنعتی، به خصوص در مشعل‌های مادولار، نسبت تبدیل یا گستره تنظیم است. نسبت تبدیل، حاصل کسری ظرفیت بیشینه‌ی قابل دسترس به ظرفیت کمینه قابل دسترس، در شرایط استاندارد است. افزایش نسبت تبدیل، موجب بهبود قابلیت مانورپذیری در تنظیم مشعل بر مبنای طیف وسیع‌تری از نیاز حرارتی می‌شود. این موضوع، موجب کاهش خاموشی‌های متوالی و به تبع آن، کاهش ضررات ناشی از تنش‌های حرارتی و افزایش عمر بخش‌های الکترونیکی می‌شود. در صورتی که بتوان نسبت تبدیل بالا را بر روی مشعل مادولار ایجاد کرد، ترکیب این دو با یکدیگر، موجب افزایش راندمان (ناشی از کاهش اتلافات چیلری در سیکل خاموشی)، بهبود عمر ادوات، کاهش نیروی بازرسی، کاهش برق مصرفی و ... خواهد شد. در این مقاله با در دست داشتن دانش طراحی مشعل ۵ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۵ و مشعل ۱۰ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۳، به طراحی مشعل ۱۰ مگاوات مادولار که با استفاده از یک مکانیزم رباتیک، می‌تواند نسبت تبدیل ۱:۱۰ را ایجاد نماید، پرداخته شده است. ابتدا شبیه‌سازی هندسه طراحی شده اولیه در بازه ظرفیت‌های کاری مشعل در نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است، نتایج این شبیه‌سازی‌ها، دستیابی به میزان آلاینده‌های تولیدی در کلاس مجاز، مطابق استاندارد ملی ۷۵۹۵ و مطابق با داده‌های تجربی است.

**کلمات کلیدی:** مشعل گازسوز، نسبت تبدیل، خاصیت مادولار، اتلافات چیلری، ساختار متغیر

### مقدمه

وظیفه اصلی مشعل ایجاد گرمایش است و در انواع دیگ‌ها از جمله دیگ آبگرم، دیگ بخار و دیگ ذوب مواد با توجه به ظرفیت کاری آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از موارد پرکاربرد مشعل در سیستم‌های گرمایشی به عنوان موتور احتراق بویلرها است.

مشعل‌ها براساس طراحی مکانیکی صورت گرفته در آن‌ها، ظرفیت مشخصی دارند. پارامتر ظرفیت در کنار نسبت تبدیل از مهم‌ترین مشخصه‌های یک مشعل به شمار می‌رود. نسبت تبدیل در مشعل، به صورت نسبت کمینه ظرفیت به بیشینه ظرفیت مشعل تعریف می‌شود، به طوری که مشعل می‌تواند در هر نقطه از بازه ظرفیتی بین کمینه و بیشینه ظرفیت، شعله‌ای پایدار و از نظر انتشار آلاینده‌های کربن مونوکسید و ناکس در بازه مجاز استاندارد قرار گیرد. در شکل ۱ نمودار میزان مصرف سوخت سالیانه به‌ازای نسبت تبدیل‌های مختلف در مشعل‌ها آورده شده است. همانگونه که مشخص است در نسبت تبدیل ۱ مشعل دائماً در ماکزیمم ظرفیت خود کار می‌کند و بنابراین تعداد دفعات خاموش، روشن شدن مشعل و همچنین مراحل پیش پالایش و پس پالایش بسیار زیاد است. ازین رو هدر رفت

در مشعل‌های با هندسه مکانیکی ثابت بیشترین نسبت تبدیل می‌تواند تا نسبت ۱:۵ باشد [۲]. برای بدست آوردن نسبت تبدیل بالاتر از نسبت ۱:۵ نیاز است ساختارهای متغیر در هندسه مشعل ایجاد نمود که این ساختار با تنظیم هوای بخش‌های مختلف مشعل می‌تواند آلاینده‌گی در حد مجاز استاندارد منتشر کند.

مشعل‌ها از نظر عملکرد، می‌توانند کارکرد یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و مادولار<sup>۳</sup> داشته باشند. مشعل تک مرحله به مشعلی اطلاق می‌شود که تنها در یک نقطه تنظیم می‌شوند و فقط می‌توانند در حالت روشنی در این نقطه کار کنند یا خاموش باشند. مشعل‌های دو مرحله‌ای، مشعل‌هایی هستند که در دو ظرفیت (اصطلاحاً ظرفیت کمینه و بیشینه) تنظیم می‌شوند. مفهوم پایه‌ای مادولار در مقابل مفهوم تک و دو مرحله‌ای به کار می‌رود. در واقع مشعل مادولار به مشعل‌هایی اطلاق می‌شود که می‌توانند بین کمترین ظرفیت تا بیشترین ظرفیت خود به صورت پیوسته تنظیم شوند. این تنظیم به صورت خودکار و متناسب با نیاز حرارتی یا تولید بخار صورت می‌گیرد.

از مزایای استفاده از مشعل‌های مادولار با نسبت تبدیل بالا می‌توان به کاهش سیکل خاموشی و پرت انرژی از سیستم، کاهش تنش‌های حرارتی به دلیل وجود طیف دمایی پیوسته، استهلاک کمتر ادوات مشعل به دلیل

<sup>3</sup> Modular Burner

<sup>1</sup> One Stage Burner

<sup>2</sup> Two Stage Burner

شده است. همچنین مدل سازی اغتشاشات با استفاده از روش  $k-\omega$  و مدل سازی تشعشع با استفاده از روش DO انجام شده است [۴].

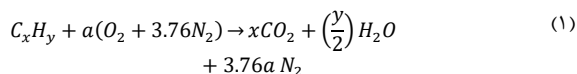
چاکون و همکاران با استفاده از روش های عددی در نرم افزار Ansys Fluent یک مشعل مونوبلاک لوناکس مورد استفاده در سوپرهیتر بویلر بخار با ظرفیت ۲ مگاوات شبیه سازی کرده اند و براساس نتایج شبیه سازی مدل اولیه مشعل ساخته شده است. در این شبیه سازی، مدل مورد استفاده برای مدل سازی اغتشاشات روش  $k-\epsilon$  و مدل تشعشعی P1 انتخاب شده است. شبیه سازی احتراق به روش Flamelet است که در این روش کرنش شعله نیز در نظر گرفته می شود [۵].

اسپانگلو و همکاران تغییرات هندسه یک مشعل با ظرفیت ۲۰ کیلووات روی میزان انتشار ناکس و فشار سوخت ورودی را بررسی کردند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی روی این مشعل صورت پذیرفته است. مطالعات عددی این مشعل به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است. مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  و مدل های احتراقی Eddy Dissipation، PDF تعادلی و مدل PDF Flamelet بررسی شده است. در این بررسی مدل احتراقی PDF Flamelet مدل مناسب تری برای مدل سازی احتراق است. همچنین میزان انتشار ناکس در ۳٪ اکسیژن برای سوخت های متان و پروپان به ترتیب ۲۵ و ۴۵ پی پی ام حجمی است. مشعل بهینه شده با استفاده از معیارهای مقیاس سرعت ثابت که معمولاً برای مشعل های صنعتی استفاده می شود، با موفقیت به ۲۰۰ کیلو وات و ۳۷۰ کیلو وات مقیاس بندی شده است [۶].

خانافر و همکاران تاثیر سرعت پیچشی و دمای دیواره مشعل را روی میزان تولید ناکس در یک مشعل صنعتی بررسی کرده اند. در این بررسی میزان پیچش جریان، میزان اختلاط سوخت و هوا را بهبود بخشیده و باعث کاهش انتشار آلایندگی در خروجی دودکش شده است. میزان انتشار کربن مونوکسید و هیدروکربن های نسوخته، با افزایش سرعت پیچشی در این مشعل ۳ تا ۵ برابر کاهش یافته است. علاوه بر این، در این بررسی کاهش تولید ناکس با افزایش میزان پیچش جریان مشاهده نشده است [۷].

#### معادلات احتراق

فرآیند احتراق استوکیومتری مطابق با معادله (۱) انجام می گردد.

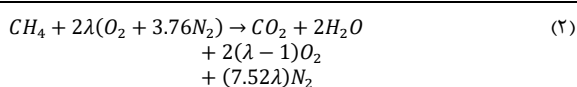


$$a = x + \frac{y}{4}$$

آنالیز گاز شهری مورد استفاده در تست مشعل در جدول ۱ آورده شده است که ارزش حرارتی پایین این گاز برابر  $8197 \text{ Kcal/m}^3$  می باشد. معادلات احتراق گاز شهری با احتساب هوای اضافی  $\lambda$  در معادلات (۲) تا (۵) آورده شده است. در مشعل های مخلوط سرنازل، مقدار بهینه هوای اضافی جهت کنترل آلایندگی ها ۲۰ درصد است.

جدول ۱: آنالیز گاز شهری  $[\lambda]$

ترکیب	درصد حجمی
CH <sub>4</sub>	0.883
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.05
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.012
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.005
CO <sub>2</sub>	0.005
N <sub>2</sub>	0.045

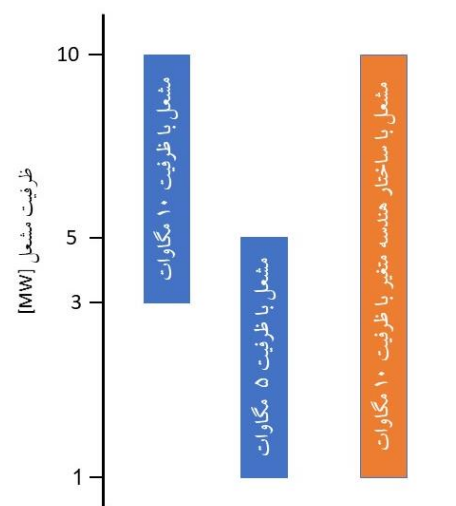


کاهش سیکل خاموش-روشن شدن مشعل، کاهش تفاوت سطح صدایی به دلیل کارکرد پیوسته مشعل و کاهش مصرف برق ناشی از کارکرد پیوسته با سیستم کنترل دور موتور یا اینورتر اشاره کرد [۳].

مشعل های مادولار در انواع مختلفی از نظر قابلیت و سطوح هوشمندسازی به بازار عرضه می شوند. مرسوم ترین حالت مادولار در سه دسته، مشعل های تدریجی مکانیکی یا سطح یک، مشعل های تدریجی پنوماتیکی یا سطح دو و مشعل های تدریجی الکترونیکی یا سطح سه قرار داده می شوند.

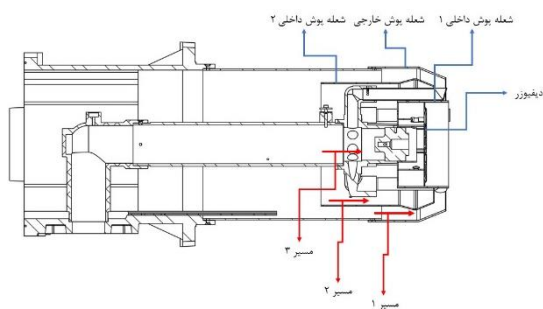
در مشعل های مادولار الکترونیکی، که جدیدترین و به روزترین نوع ساختارهای مادولار به شما می روند، با استفاده از عملگرهای مستقل نصب شده روی دمپرهای هوا و سوخت، به صورت مستقل میزان دبی هوا و سوخت تنظیم می شود.

هدف این مقاله طراحی یک مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات و نسبت تبدیل ۱:۱۰ است. به این منظور با ترکیب هندسه دو مشعل با ساختار هندسه ثابت و با نسبت تبدیل های ۱:۳ و ۱:۵، یک مشعل مادولار با ساختار هندسه متغیر و نسبت تبدیل ۱:۱۰ طراحی شده است، به طوری که بازه ظرفیتی مشعل مادولار، ظرفیت کمینه تا بیشینه دو مشعل موجود را پوشش می دهد. مشعل با ساختار هندسه متغیر طراحی شده، می تواند با استفاده از یک مکانیزم رباتیک در کل بازه ظرفیت حرارتی، به صورت مادولار، مطابق استاندارد کار کند. روند طراحی و بهینه سازی این مشعل با استفاده از روش های عددی احتراق انجام شده است. لذا بدین منظور از دو مشعل با ظرفیت ۵ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۵ و ۱۰ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۳ استفاده شده است که مطابق شکل ۲ مشعل ۵ مگاوات، ظرفیت کمینه یک مگاوات را تامین و مشعل ۱۰ مگاوات نیز بیشینه ظرفیت ۱۰ مگاوات را تامین خواهد کرد. مشعل طراحی شده با ساختار هندسه متغیر لازم است بتواند در تمامی نقاط بین ظرفیت یک تا ۱۰ مگاوات، احتراق پایدار و از نظر انتشار آلایندگی مطابق استاندارد کار کند. لذا در این مقاله برای بررسی احتراق سه نقطه کاری مشعل، ظرفیت ۱ مگاوات، ظرفیت ۵ مگاوات و ظرفیت ۱۰ مگاوات شبیه سازی عددی شده است و میزان اختلاط سوخت و هوا و میزان تولید آلایندگی در این مشعل بررسی شده است.



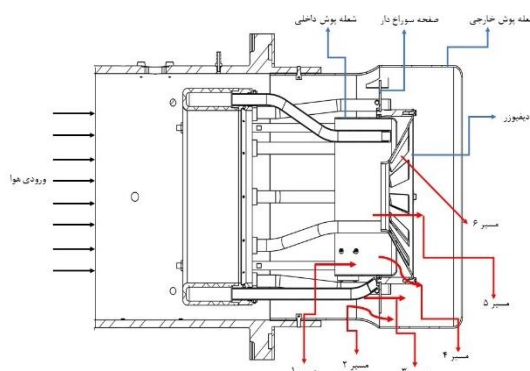
شکل ۲: بازه ظرفیتی مشعل های ۵ و ۱۰ مگاوات با ساختار هندسه ثابت و مشعل ۱۰ مگاوات با ساختار هندسه متغیر

سارلیج و همکاران یک مشعل دو مرحله ای لوناکس با ظرفیت حرارتی بین ۰/۵ تا یک مگاوات را شبیه سازی کرده اند. در این شبیه سازی احتراق، از مکانیزم دو مرحله ای متان و هوا، با روش Eddy Dissipation استفاده



شکل ۳: مشعل با ساختار هندسی ثابت و ظرفیت ۵ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۵

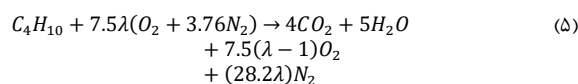
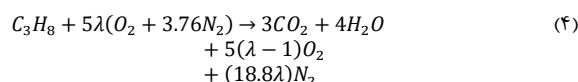
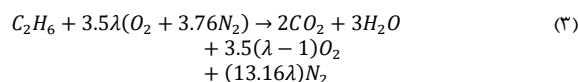
مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات دارای یک شعله پوش داخلی، یک صفحه سوراخ‌دار و یک دیفیوزور مخروطی شکل با افت فشار پایین است. در این مشعل با حرکت شعله پوش داخلی، میزان هوای عبوری از قسمت‌های مختلف مشعل تغییر خواهد کرد. در این مشعل در ظرفیت کمینه، شعله پوش داخلی به دیفیوزور چسبیده و مسیر هوایی ۴ بسته خواهد شد. لذا هوا از مسیرهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ عبور می‌کند. مسیر هوایی ۱ جریان عبوری از شعله پوش داخلی است که شامل مسیرهای هوایی ۴، ۵ و ۶ است. مسیر هوایی ۲، جریان گذرنده از ناحیه میان بدنه مشعل و صفحه سوراخ‌دار، مسیر هوایی ۳ جریان گذرنده از منافذ صفحه سوراخ‌دار است. مسیر هوایی ۴، جریان عبوری از ناحیه میان شعله پوش داخلی و دیفیوزور، مسیر هوایی ۵ جریان عبوری از مرکز دیفیوزور و مسیر هوایی ۶ جریان عبوری از پره‌های دیفیوزور است که با عبور از پره‌های دیفیوزور، جریان چرخشی پیدا خواهد کرد. این جریان چرخشی به اختلاط بیشتر و پایداری شعله در مشعل‌ها کمک خواهد کرد.



شکل ۴: مشعل با ساختار هندسی ثابت و ظرفیت ۱۰ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۳

در شکل ۵ و شکل ۶ شماتیک یک مشعل به همراه ساختار متغیر در ظرفیت کمینه و بیشینه آن آورده شده است. همانطور که مشخص است در ظرفیت کمینه جریان تنها می‌تواند از دیفیوزور و صفحه سوراخ‌دار عبور کند در صورتی که در ظرفیت بیشینه با تغییر موقعیت ساختار متغیر جریان‌های هوایی بیشتری ایجاد می‌شود و جریان می‌تواند از روی دیفیوزور و اطراف بدنه مشعل حرکت کند.

اگر در مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات و ساختار هندسی ثابت، بتوان شرایط هوایی ظرفیت کمینه مشعل با ظرفیت ۵ مگاوات را ایجاد کرد، به طوری که جریان عبوری از مسیر هوایی ۲ صفر شود و جریان هوا تنها از مرکز مشعل عبور نماید، می‌توان به نسبت ظرفیت بالاتر در این مشعل دست یافت. بدین منظور در مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات با ساختار هندسی متغیر طراحی شده، از دو شعله پوش داخلی به عنوان ساختار هندسی متغیر همانند مشعل با ظرفیت ۵ مگاوات استفاده می‌شود و با استفاده از



دبی گاز بر حسب ظرفیت مشعل مطابق با معادله (۶) به دست خواهد آمد.

$$\dot{m} = \frac{Q}{LHV} \quad (6)$$

که در آن  $\dot{m}$  دبی سوخت،  $Q$  ظرفیت حرارتی مشعل و  $LHV$  ارزش حرارتی پایین سوخت است.

با توجه به معادلات استوکیومتری، می‌توان رابطه بین ظرفیت مشعل و دبی هوا را به صورت معادله (۷) به دست آورد.

$$Q = 3.1 \frac{Q_{Air} \rho_{Air}}{\lambda} \quad (7)$$

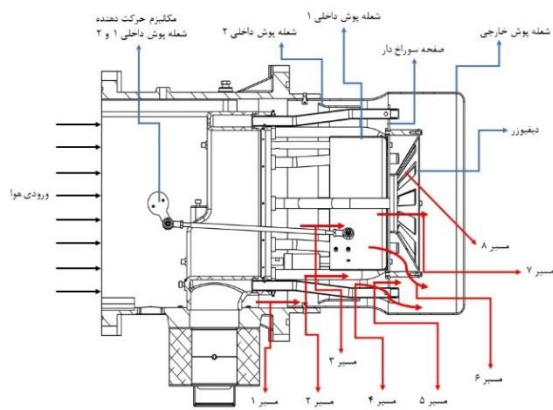
که در آن  $Q_{Air}$  دبی هوا،  $\rho_{Air}$  چگالی هوا و  $\lambda$  درصد هوای اضافی است. لذا با داشتن ظرفیت حرارتی مشعل، می‌توان دبی هوا را بدست آورد.

### هندسه مشعل

در این مقاله به در دست داشتن دانش طراحی مشعل ۵ مگاوات، با نسبت تبدیل ۱:۵ که در شکل ۳ نشان داده شده و نیز مشعل ۱۰ مگاوات، با نسبت تبدیل ۱:۳، که در شکل ۴ نشان داده شده است، سعی در طراحی مشعل ۱۰ مگاوات با ساختار هندسی متغیر مادولار و نسبت تبدیل ۱:۱۰ شده است که با توجه به ظرفیت مشعل، مکان قطعات محرک از طریق یک لینک رباتیک در حین کارکرد مشعل، تغییر خواهند کرد. قطعات متحرک، میزان هوای احتراق قسمت‌های مختلف مشعل را تنظیم می‌کند. مزیت این ساختار هندسی متحرک ایجاد شده در مشعل، افزایش نسبت تبدیل و در نتیجه دستیابی به بازه ظرفیتی مشعل در بازه ظرفیت ۱ مگاوات تا ۱۰ مگاوات است. مشعل‌های دارای ساختار هندسی ثابت با ظرفیت ۵ مگاوات و ۱۰ مگاوات به همراه اجزا و مسیرهای هوایی آن به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ آورده شده است.

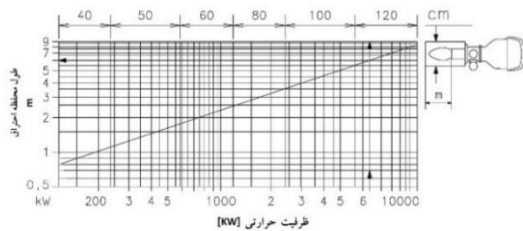
مشعل با ظرفیت ۵ مگاوات دارای دو شعله پوش داخلی است که شعله پوش داخلی ۱ ثابت و شعله پوش داخلی ۲ بسته به ظرفیت بیشینه مورد نیاز قبل از راه اندازی مشعل تنظیم می‌شود و میزان هوای عبوری از مسیرهای مختلف مشعل را تنظیم خواهد کرد. جهت تنظیم بیشینه ظرفیت این مشعل، قبل از راه‌اندازی مشعل، شعله پوش داخلی ۲ با حرکت به سمت چپ در موقعیت مناسب قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است مشعل در ظرفیت‌های پایین‌تر از نظر انتشار آلاینده‌گی در کلاس مجاز عمل خواهد کرد. در اصطلاح به این مشعل‌ها، مشعل‌های با ساختار هندسه ثابت گفته می‌شود. دیفیوزور در این مشعل نقش ایجاد چرخش در جریان، جهت پایداری شعله را دارد. در ظرفیت‌های پایین این مشعل، میزان هوای عبوری از مسیر ۱ تا مقدار نزدیک به صفر کاهش می‌یابد و در نتیجه هوای مشعل از مسیرهای ۲ و ۳ عبور می‌کند. مسیر هوایی ۱ جریان بین شعله پوش خارجی و شعله پوش داخلی شماره ۲، مسیر هوایی ۲ جریان بین شعله پوش داخلی ۱ و ۲، مسیر هوایی ۳ جریان عبوری از شعله پوش داخلی ۱ است. جریان مسیر هوایی سوم پس از عبور از پره‌های دیفیوزور دچار چرخش شده که به پایداری شعله و اختلاط مناسب سوخت و هوا کمک خواهد کرد.

$$L = 0.23 \sqrt{\frac{Q}{10}} \quad (8)$$

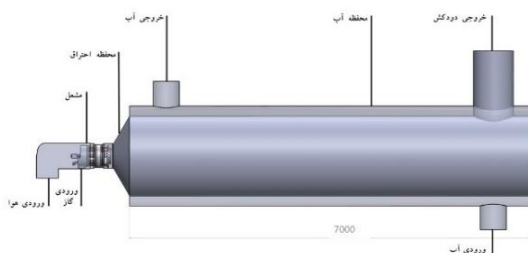


شکل ۷: مشعل مادولار با ظرفیت ۱۰ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۱۰

برای شبیه سازی مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، طول محفظه احتراق، برابر ۷/۲ متر و قطر این محفظه، ۱/۲ متر در نظر گرفته شده است. برای خنک‌سازی این لوله آزمون از چرخش آب، دورتادور محفظه احتراق استفاده می‌گردد. ابعاد محفظه احتراق مورد استفاده جهت شبیه سازی مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات در شکل ۹ آورده شده است. جریان هوا از مسیر ورودی هوا به کمک دم‌فن وارد مشعل می‌شود. جریان سوخت از ورودی گاز به سمت زانویی گاز و در ادامه به مجموعه نازل‌ها، هدایت می‌گردد. در سری احتراقی، جریان سوخت و هوا با یکدیگر ترکیب شده و با تامین انرژی اولیه احتراق توسط جرقه‌زن، شعله تشکیل می‌گردد.



شکل ۸: ابعاد محفظه احتراق مطابق استاندارد ملی ۷۵۹۵ [۱۰]

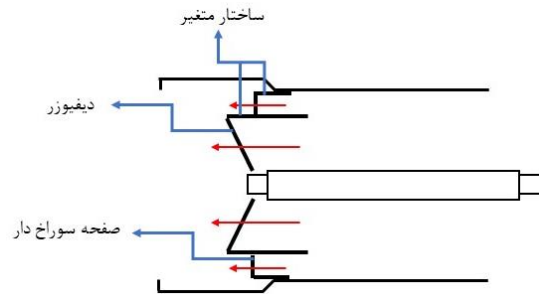


شکل ۹: ابعاد محفظه احتراق و آب، جهت شبیه سازی مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات

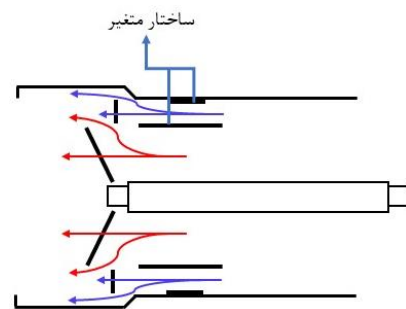
### مدل سازی

شبکه‌بندی هندسه با استفاده از روش مش موزائیک<sup>۱</sup> انجام شده است. در این روش نواحی نزدیک به دیواره به صورت پلی‌هدرال<sup>۲</sup> شبکه‌بندی می‌گردد، تا مرز سلول‌ها با دقت بالا بر مرز هندسه منطبق شود. شبکه‌بندی

دیفیوزور مخروطی مشعل ۱۰ مگاوات افت فشار هوا کنترل خواهد شد. همچنین با استفاده از یک مکانیزم رباتیک و استفاده از سروموتور، موقعیت شعله‌پوش‌های داخلی ۱ و ۲ کنترل می‌شود، تا دبی جرمی هوای عبوری از مسیره‌های مختلف به گونه‌ای تنظیم شود که علاوه بر پایداری شعله، اختلاط مناسب ایجاد گردد و میزان آلاینده‌های احتراق کاهش یابد.



شکل ۵: شکل شماتیک مشعل با ساختار متغیر در حالت ظرفیت کمینه



شکل ۶: شکل شماتیک مشعل با ساختار متغیر در حالت ظرفیت کمینه

شکل ۷ مشعل مادولار با ظرفیت ۱۰ مگاوات با ساختار هندسه متغیر به همراه اجزا و مسیرهای هوایی آن نشان داده شده است. در این مشعل شعله پوش‌های داخلی ۱ و ۲ می‌توانند به وسیله مکانیزم نشان داده شده حرکت کنند و مقدار جریان هوای عبوری از مسیرهای مختلف را تغییر دهد. با حرکت شعله پوش‌ها، مقدار هوای عبوری از مسیر ۵ و ۶ تغییر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. مسیر هوایی ۱ هوای عبوری از بین دیواره مشعل و شعله پوش داخلی ۲، مسیر هوایی ۲ هوای عبوری از میان شعله پوش داخلی ۱ و ۲ که در ادامه این مسیر خود به مسیرهای ۴ و ۵ تقسیم می‌شود. مسیر هوایی ۳ هوای عبوری از شعله پوش داخلی ۱ است که این هوا به مسیرهای ۶، ۷ و ۸ تقسیم می‌شود. با حرکت رو به جلوی شعله پوش ۱ و ۲ و قرار گرفتن در ظرفیت‌های پایین‌تر، مسیر هوایی ۵ بسته شده و شعله در مرکز تشکیل خواهد شد. همچنین جهت تشکیل شده در مرکز مشعل، باعث کشیده شدن جریان گاز اطراف به سمت مرکز شعله خواهد شد. لذا مکانیزم ذکر شده می‌تواند شعله را در مرکز مشعل متمرکز کند. در این مقاله با شبیه سازی عددی احتراق مشعل در ظرفیت‌های بیشینه، میانی و کمینه مقادیر کربن مونوکسید و ناکس محاسبه شده است که در بخش نتایج به آن‌ها پرداخته می‌شود.

### تعریف مساله

برای شبیه سازی مشعل از لوله آزمون استاندارد، مطابق استاندارد ملی ۷۵۹۵، به عنوان محفظه احتراق استفاده می‌شود. طبق این استاندارد طول محفظه احتراق از معادله (۸) و قطر آن با استفاده از شکل ۸ بدست می‌آید. که  $Q$  ظرفیت مشعل برحسب kW است [۹].

<sup>2</sup> Polyhedral

<sup>1</sup> Mosaic Meshing Method

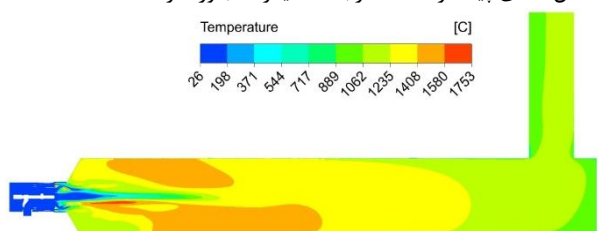
کامپیوتر با پردازنده Core i9 و فرکانس پردازشی 3.6 GHz به روش موازی با تعداد ۳۲ هسته استفاده گردیده است. برای بررسی همگرایی حل از پارامترهای فشار هوا و گاز در مقاطع ورودی و کسر مولی کربن مونوکسید در مقطع خروجی دودکش استفاده شده است. بیشینه خطای اختلاف فشار شبکه اول و دوم، ۱۲ درصد و بیشینه خطای کربن مونوکسید ۵۴ درصد است. بیشینه خطای فشار شبکه دوم و سوم ۲ درصد و خطای کربن مونوکسید ۱۳ درصد است. در نتیجه برای شبکه بندی هندسه مطابق شبکه بندی با تعداد ۱۹ میلیون سلول استفاده شده است.

جدول ۴: نتایج حاصل از مطالعات شبکه

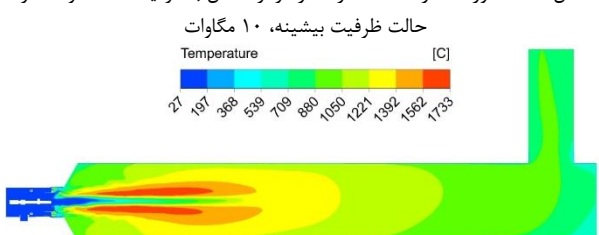
No. of Cells (Million)	Area Averaged of Pressure		CO Mole Fraction
	Gas Inlet [pa]	Air Inlet [pa]	
14	128	61.2	1.58 e-6
19	114	55.3	1.02e-6
23	116	55.1	1.16e-6

### نتایج

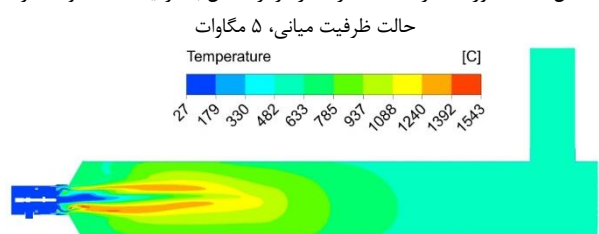
همانطور که در بخش مدل سازی اشاره شد، مشعل مادولار طراحی شده با ظرفیت ۱۰ مگاوات با نسبت تبدیل ۱۰:۱۰ در سه ظرفیت ۱، ۵ و ۱۰ مگاوات شبیه سازی شده است. کانتورهای دما در صفحه میانی هندسه مشعل و محفظه احتراق به ترتیب برای ظرفیت های بیشینه، میانی و کمینه در شکل ۱۱ تا شکل ۱۳ آورده شده است. همانگونه که مشخص است در این مشعل، توزیع دمای به صورت همگن است. همچنین در ظرفیت بیشینه، دمای پیک شعله تا ۱۷۵۳ درجه سانتی گراد رسیده است که نشان دهنده تولید ناکس حرارتی پایین است. در ظرفیت های میانی و کمینه مشعل، دمای پیک از ۱۷۳۳ درجه سانتیگراد تجاوز نکرده است.



شکل ۱۱: کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در



شکل ۱۲: کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در



شکل ۱۳: کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در

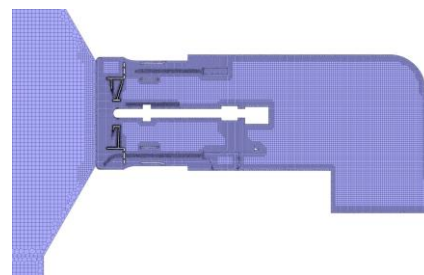
حالت ظرفیت کمینه، ۱ مگاوات

در شکل ۱۴ تا شکل ۱۶ کانتور اکسیژن در صفحه میانی مشعل و محفظه احتراق، به ترتیب در ظرفیت های بیشینه، میانی و کمینه مشعل نشان داده

نواحی دور از دیواره به صورت شش وجهی<sup>۱</sup> انجام می گردد تا علاوه بر حفظ دقت بالا، هزینه محاسباتی نیز کاهش یابد. در نقاطی از سیال که دارای گرادیان های بالا می باشد، شبکه بندی با چگالی بیشتر، اعمال شده است. از جمله این نواحی، نقاط اطراف پرهای چرخاننده جریان و نازل های گاز است. در شکل ۱۰، نمایی از شبکه بندی مورد استفاده در حل این مسئله آورده شده است.

مدل سازی احتراق در مجموعه مشعل به همراه محفظه احتراق، در نرم افزار Ansys Fluent انجام شده است. برای مدل سازی جریان مغشوش از روش k-e Realizable با تابع دیواره Standard و برای مدل سازی تشعشع از روش Discrete Ordinate (DO) استفاده شده است. برای مدل سازی احتراق از روش Non-Premixed Combustion استفاده شده است. روش حل معادلات سرعت و فشار، به روش SIMPLE بوده و دقت گسسته سازی تمامی معادلات از مرتبه ۲ در نظر گرفته شده است.

درصد مولی سوخت و هوا (اکسید کننده) به صورت جدول ۲ در نرم افزار وارد شده است. در جدول ۳ شرایط مرزی ورودی های گاز، هوا و آب در ظرفیت بیشینه، و همچنین دیواره ها آورده شده است. لازم به ذکر است که کلیه دیواره ها به صورت کدر<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده اند. شبیه سازی ها در دو حالت ظرفیت کمینه و بیشینه مشعل انجام شده است. ظرفیت بیشینه این مشعل ۱۰ مگاوات، ظرفیت میانی برابر ۵ مگاوات و ظرفیت کمینه آن ۱ مگاوات است.



شکل ۱۰: نمایی از شبکه بندی هندسه به روش مش موازی

جدول ۲: درصد مولی ترکیبات گاز شهری و هوا به عنوان اکسید کننده سوخت

Boundary	Species	Fuel	Oxid
Mole Fraction	CH <sub>4</sub>	0.883	0.0
	N <sub>2</sub>	0.045	0.78992
	O <sub>2</sub>	0.0	0.21008
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.05	0.0
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.012	0.0
	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.005	0.0
	CO <sub>2</sub>	0.005	0.0

جدول ۳: شرایط مرزی

Boundary Name	Type of Boundary	Flow Rate [kg/s]	Pressure [pa]
Air Inlet	Mass Flow Rate	3.89	-
Gas Inlet	Mass Flow Rate	0.2	-
Water Inlet	Mass Flow Rate	100	-
Water Outlet	Pressure Outlet	-	0.0
Boiler Wall	Couple	-	-
Stack Outlet	Pressure Outlet	-	0.0

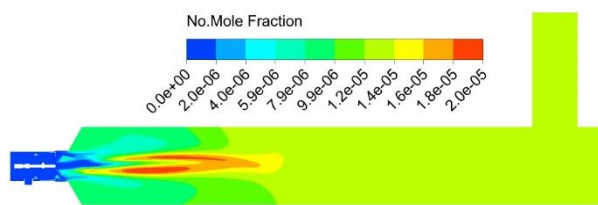
مطابق جدول ۴ برای مطالعات شبکه، سه شبکه با تعداد ۱۴ میلیون، ۱۹ میلیون و ۲۳ میلیون سلول بررسی شده است. برای حل احتراق از دو

<sup>2</sup> Opaque

<sup>1</sup> Hexcore

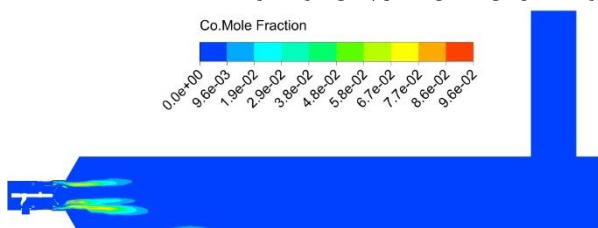


شده است. همانگونه که مشخص است در این مشعل توزیع اکسیژن به صورت متقارن بوده که نشان دهنده اختلاط مناسب سوخت و هوا در این مشعل است.

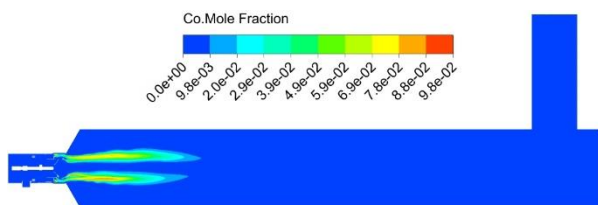


شکل ۱۹: کانتور NO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت کمینه، ۱ مگاوات

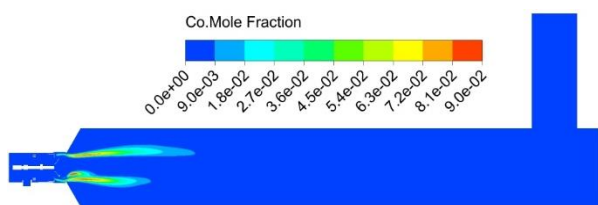
کانتورهای کربن مونوکسید در صفحه میانی مشعل در ظرفیت‌های بیشینه، میانی و کمینه به ترتیب در شکل ۲۰ تا شکل ۲۲ آورده شده است. به دلیل تقارن جریان ایجاد شده در مشعل و اختلاط مناسب سوخت و هوا، سوخت به صورت کامل با هوا واکنش می‌دهد. لذا مقدار کربن مونوکسید تولیدی در این مشعل بسیار پایین خواهد بود.



شکل ۲۰: کانتور CO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت بیشینه، ۱۰ مگاوات



شکل ۲۱: کانتور CO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت میانی، ۵ مگاوات

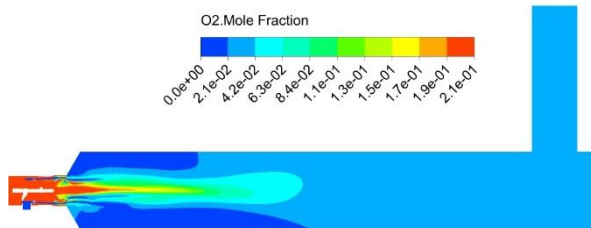


شکل ۲۲: کانتور CO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت کمینه، ۱ مگاوات

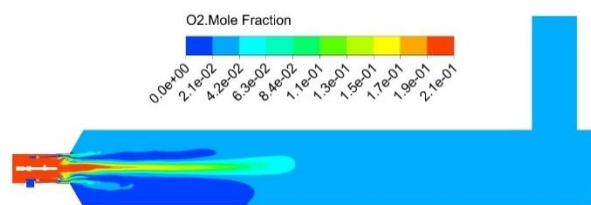
### نتایج تجربی

به علت امکان‌پذیر نبودن تست مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات بر روی بستر تست ذکر شده در استاندارد ۷۵۹۵، نتایج آنالیز گازهای حاصل از احتراق این مشعل، بر روی یک بویلر بخار، با نتایج شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدیهی است شبیه‌سازی بویلر بخار هزینه محاسباتی بسیار سنگین دارد. انتظار می‌رود غلظت کربن مونوکسید در خروجی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آنالیز گاز دودکش بویلر بخار به دلیل شبیه‌سازی دقیق واکنش میانی کربن مونوکسید، تطابق بالایی داشته باشد.

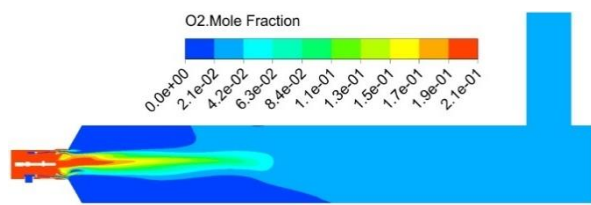
با توجه به استاندارد ملی ۷۵۹۵ در نقطه کمینه ظرفیت، مشعل با نسبت تبدیل بالاتر از ۱:۴ مجاز به استفاده تا ۵۰ درصد هوای اضافی است [۱۰]. به دلیل وجود تفاوت بین هندسه مدل‌سازی شده با ساختار بویلر بخار سه پاس و افت فشارهای موجود در پاس‌های بویلر، میزان ناکس تولیدی با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی دارای خطا است. همچنین از عوامل دیگر ایجاد خطا در محاسبه میزان ناکس بدست آمده از شبیه‌سازی، می‌توان به



شکل ۱۴: کانتور اکسیژن در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت بیشینه، ۱۰ مگاوات

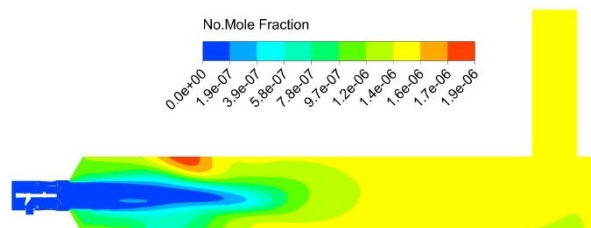


شکل ۱۵: کانتور اکسیژن در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت میانی، ۵ مگاوات

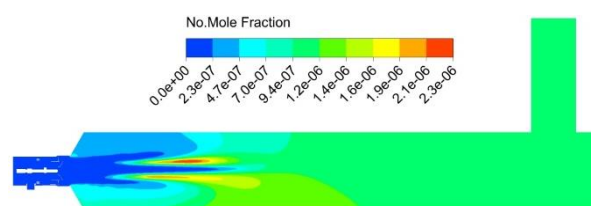


شکل ۱۶: کانتور اکسیژن در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت کمینه، ۱ مگاوات

کانتور ناکس حرارتی تولیدی در صفحه میانی مشعل در شکل ۱۷ تا شکل ۱۹ به ترتیب برای ظرفیت‌های بیشینه، میانی و کمینه آورده شده است. مقدار ناکس تولیدی در مکان‌هایی که پیک دمایی شعله رخ داده و اکسیژن کافی جهت تولید ناکس وجود دارد، بیشینه است. در مرکز شعله در حالت بیشینه ظرفیت، با وجود غلظت بالای اکسیژن، میزان تولید آلاینده ناکس پایین است. علت پایین بودن ناکس در این ناحیه، عدم وجود دمای کافی برای شکسته شدن مولکول نیتروژن برای واکنش با اکسیژن است.



شکل ۱۷: کانتور NO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت بیشینه، ۱۰ مگاوات



شکل ۱۸: کانتور NO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با ظرفیت ۱۰ مگاوات، در حالت ظرفیت متوسط، ۵ مگاوات

با ظرفیت ۱۰ مگاوات می‌تواند نسبت تبدیل ۱:۱۰ ایجاد کند. نتایج عددی شبیه‌سازی احتراق مشعل ۱۰ مگاوات طراحی شده، نشان‌دهنده احتراق متقارن و کامل در این ساختار را نشان می‌دهد. مقادیر کربن مونوکسید و ناکس در ظرفیت‌های مختلف این مشعل در جدول ۵ آورده شده است. همچنین نتایج تجربی آنالیز گاز خروجی مشعل روی بویلر بخار نشان دهنده تطابق مناسب غلظت کربن مونوکسید با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی است.

جدول ۵: مقادیر کربن مونوکسید و ناکس حاصل از شبیه‌سازی در ظرفیت‌های مختلف مشعل ۱۰ مگاوات با نسبت تبدیل ۱:۱۰ مادولار

ظرفیت [MW]	CO [ppm]	NOx [ppm]
1	0.1	3
5	0.1	1.1
10	1.2	5

### فهرست علائم

L	طول محفظه احتراق، m
LHV	ارزش حرارتی پایین سوخت kWh/Nm <sup>3</sup>
$\dot{m}$	دبی جرمی، kg/s
Q	ظرفیت حرارتی، kW
Q <sub>Air</sub>	دبی حجمی هوا، m <sup>3</sup> /s
-	فهرست علائم یونانی
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	درصد هوای اضافه

### مراجع

- 1- D. C. Ltd., "http://www.dunphy.co.uk/," [Online].
- 2- "https://www.rielloburners.co.uk/," Riello. [Online].
- 3- Riello, Forced Draught Burner Handbook, Riello S.p.A.
- 4- M. Sarlej, P. Petr, J. Hajek and P. Stehlik, "Computational support in experimental burner design optimization," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 2727-2731, 2007.
- 5- J. Chakon, J. Sala and J. Blanco, "Investigation on the design and optimization of a low NOx-CO emission burner both experimentally and through computational fluid dynamics (CFD) simulation," *Energy and Fuel*, vol. 21, pp. 42-58, 2007.
- 6- O. Spangelo, *Experimental and numerical studies of a low NOx swirl burner*, Norway: The Norwegian University of Science and Technology, 2004.
- 7- K. Khanafer and S. Aithal, "Fluid dynamic and NOx computation in swirl burners," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 54, pp. 5030-5038, 2011.
- 8- "http://behineh-sazan.ir/," شرکت بهینه سازان صنعت تاسیسات. [Online].
- 9- Forced draught burners for gaseous fuels BS En 676:2013, BSI Standard Publication, 2013.
- ۱۰- مشعلهای گازسوز دمندهدار خودکار- ویژگیها و روشهای آزمون، تجدید نظر دوم، سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.
- 11- E. Charles and J. Baukal, *Industrial Burner Handbook*, 2003.
- 12- Z. M. · J. M. · F. W. · P. L. · J. Zhang, "Chemical Flame Length of a Methane Jet into Oxidant Stream," *Flow Turbulence and Combustion*, 2015.

عدم شبیه‌سازی مکانیزم کامل تولید ناکس اشاره کرد. برای شبیه‌سازی مکانیزم کامل تولید ناکس می‌توان از مکانیزم GRI MECH3.0 استفاده نمود که هزینه محاسباتی بالایی دارد. همچنین در واقعیت دلیل ساختار هندسی بویلر ایجاد نقاط با دمای بالا اجتناب ناپذیر است که این نقاط در شبیه‌سازی به علت ساده‌سازی هندسه در نظر گرفته نمی‌شوند. نتایج تجربی آنالیز گاز خروجی دودکش در ظرفیت‌های ۱ مگاوات، ۵ مگاوات و ۱۰ مگاوات مشعل نصب شده روی بویلر بخار نشان داده شده در شکل ۲۳، که توسط دستگاه testo 300 اندازه‌گیری شده است به ترتیب در شکل ۲۴ تا شکل ۲۶ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است غلظت کربن‌مونوکسید خروجی از دودکش در داده‌های تجربی در سه ظرفیت یک، پنج و ده مگاوات، نزدیک به صفر است که نشان‌دهنده تطابق با نتایج عددی است. تولید کربن مونوکسید به دلیل اختلاط ناقص سوخت و هوا و دمای پایین محفظه احتراق است. نتایج تجربی و عددی نشان دهنده اختلاط مناسب سوخت و هوا است. در نتیجه مشعل با نسبت تبدیل ۱:۱۰ می‌تواند در شرایط استاندارد کار کند.



شکل ۲۳- مشعل مادولار با ظرفیت ۱۰ مگاوات و نسبت تبدیل ۱:۱۰ نصب شده روی بویلر بخار، ساخت شرکت پاکمن

### Flue Gas - 08/01/2020 16:45

O <sub>2</sub>	5.2 %	Dew Pt	56.2 °C
CO	0 ppm	AT	24.8 °C
FT	156.5 °C	Effg	81.3 %
ExAir	32.6 %	Draught	3.153 mbar
NOx	27 ppm	AmbCO	— ppm
Ratio	0.0000	Pump	0.60 l/min
Effn	89.6 %		

شکل ۲۴- نتایج آنالیز گاز خروجی دودکش در ظرفیت یک مگاوات

### Flue Gas - 08/01/2020 15:53

O <sub>2</sub>	3.9 %	Dew Pt	56.1 °C
CO	0 ppm	AT	24.9 °C
FT	175.5 °C	Effg	75.1 %
ExAir	22.6 %	Draught	-0.051 mbar
NOx	34 ppm	AmbCO	— ppm
Ratio	0.0000	Pump	0.60 l/min
Effn	82.7 %		

شکل ۲۵- نتایج آنالیز گاز خروجی دودکش در ظرفیت ۵ مگاوات

### Flue Gas - 08/01/2020 16:08

O <sub>2</sub>	3.7 %	Dew Pt	57.7 °C
CO	0 ppm	AT	25.7 °C
FT	238.3 °C	Effg	71.7 %
ExAir	21.5 %	Draught	-0.130 mbar
NOx	33 ppm	AmbCO	— ppm
Ratio	0.0000	Pump	0.60 l/min
Effn	78.9 %		

شکل ۲۶- نتایج آنالیز گاز خروجی دودکش در ظرفیت ۱۰ مگاوات

### نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی ساختار مشعل‌های با ظرفیت‌های ۵ و ۱۰ مگاوات، مشعلی با ساختار جدید با قابلیت مادولار طراحی شده است. این ساختار با وجود دو شعله پوش و ایجاد ساختار مشعل با ظرفیت ۵ مگاوات در مشعل

- 13- P. Medwel, *Laser diagnostics in MILD combustion*, Ph.D. Thesis. University of Adelaide, Australia, 2007.
- 14- D. Pashchenko, "Hydrogen-rich fuel combustion in a swirling flame: CFD-modeling with experimental verification," *Int. Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 38, pp. 19996-20003, 2020.
- 15- B. V. W. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*, Sixth Edition, WILEY.
- 16- <https://www.dungs.com/>. [Online].