

## بررسی عددی و آزمایشگاهی احتراق مشعل گازسوز، جهت کاهش طول شعله و جلوگیری از آسیب به انتهای بویلر

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

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

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

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

۴- کارشناس ارشد مکانیک، مدیر عامل شرکت پاکمن، mirzazadeh\_gh@yahoo.com

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

از مشکلات موجود در استفاده از مشعل‌های صنعتی، عدم هماهنگی ابعاد شعله با محفظه احتراق است. طول و قطر شعله از پارامترهای کلیدی طراحی مشعل هستند. به طوری که لازم است، طول شعله حداکثر برابر هشتاد درصد طول محفظه احتراق باشد. نزدیک بودن سر شعله به انتهای محفظه احتراق موجب افزایش درجه حرارت انتهای بویلر، آسیب رسیدن و کاهش عمر مفید آن می‌گردد. در این مقاله سعی بر آن است که با تنظیم ابعاد شعله مشعل، طول محفظه احتراق یک بویلر بخار که توان ورودی ۱۲ مگاوات دارد، کاهش یابد، به نحوی که برای جانمایی بویلر در کاربرد مورد نظر مناسب گردد. قابل ذکر است بویلری با این ظرفیت مطابق استاندارد ملی ۷۵۹۵، دارای حداقل طول ۷/۶ متر و حداقل قطر ۱/۲ متر است. در برخی از کاربردها نیاز است تا با افزایش قطر و کاهش طول بویلر همزمان با ثابت نگه داشتن ظرفیت، جانمایی بویلر، متناسب با ابعاد موتورخانه تنظیم گردد. بنابراین جهت ایجاد شعله‌ی مناسب، لازم است با تعبیه پره‌های چرخاننده جریان و نیز تغییر در زاویه خروج گاز از نازل‌های سوخت در مشعل، قطر شعله افزایش و طول آن کاهش داده شود، به گونه‌ای که ظرفیت بویلر ثابت مانده و میزان آلاینده‌گی‌ها در کلاس مجاز بیان شده در استاندارد ملی ۷۵۹۵، قرار گیرند. بررسی طول شعله در بررسی‌های تجربی و عددی، نشان دهنده آن است که با جایگزین کردن چرخاننده هوا به جای استفاده از دیفیوزر، که موجب افزایش سرعت‌های شعاعی و مما سی مخلوط هوا و سوخت خواهد شد، می‌توان شعله‌ای با طول کوتاه‌تر و قطر بیشتر ایجاد نمود.

**کلمات کلیدی:** مشعل گازسوز، پره‌های چرخاننده، آلاینده‌گی‌های احتراق، بویلر، محفظه‌ی احتراق

### مقدمه

مشعل<sup>۱</sup> وسیله‌ای است که با اختلاط مقدار معین سوخت و هوا (متناسب با ظرفیت مورد نیاز) و با تامین انرژی اولیه مورد نیاز احتراق، انرژی سوخت را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند [۱]. در نهایت انرژی تولید شده توسط مشعل به دو روش تشعشعی و جابه‌جایی به سیستم گرمایش انتقال داده می‌شود. ابعاد هندسی شعله، نقش به‌سزایی در تعیین طول و ابعاد بویلرها دارد. با کاهش طول شعله، طول محفظه احتراق بویلر، کاهش خواهد یافت. همچنین در بویلرهای واتر تیوب، نیاز به یک مشعل با شعله کوتاه و قطر بزرگ است. لذا در برخی از صنایع، مشعل‌هایی که شعله‌ای کوتاه و قطر بزرگ دارند، مورد توجه قرار می‌گیرند. در این مقاله به طراحی یک مشعل با شعله کوتاه و قطر بزرگ، همراه با انتشار آلاینده‌گی پایین پرداخته شده است.

پایداری شعله در بسیاری از فرآیندهای احتراقی از طریق ایجاد چرخش در جریان حاصل می‌گردد. الباز و همکاران در مقاله‌ای به بررسی اثر پارامتر شدت چرخش جریان بر پایداری شعله پرداخته‌اند. پایداری شعله به دو ناحیه ریشه شعله و ناحیه مخروطی آن بستگی دارد. ریشه شعله نزدیک به مشعل قرار دارد و ناحیه مخروطی بین جریان جت و ناحیه چرخش داخلی

قرار گرفته است. ریشه شعله به علت وجود جریان مخالف بین گاز داغ سوخته و واکنش دهنده‌های تازه تثبیت می‌شود. در صورتی که چرخش جریان کم باشد، ریشه شعله توسط مومنتوم بالای جت مرکزی خاموش شده و شعله به سمت جلو پرتاب می‌شود [۲].

سارلج و همکاران یک مشعل دو مرحله‌ای لوناکس با ظرفیت حرارتی بین ۰/۵ تا یک مگاوات را شبیه سازی کرده‌اند. در این شبیه سازی احتراق، از مکانیزم دو مرحله‌ای متان و هوا، با روش Eddy Dissipation استفاده شده است. همچنین مدل سازی اغتشاشات با استفاده از روش  $k-\omega$  و مدل سازی تشعشع با استفاده از روش DO انجام شده است [۳].

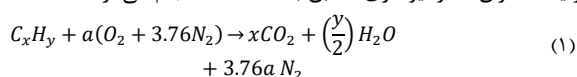
چاکون و همکاران با استفاده از روش‌های عددی در نرم‌افزار Ansys Fluent یک مشعل مونوبلاک لوناکس مورد استفاده در سوپرهیتر بویلر بخار با ظرفیت ۲ مگاوات شبیه سازی کرده‌اند و براساس نتایج شبیه سازی مدل اولیه مشعل ساخته شده است. در این شبیه سازی، مدل مورد استفاده برای مدل سازی اغتشاشات روش  $k-\epsilon$  و مدل تشعشعی P1 انتخاب شده است. شبیه سازی احتراق به روش Flamelet است که در این روش کرنش شعله نیز در نظر گرفته می‌شود [۴].

پاشنکو و همکاران، دما، ساختار شعله و میزان انتشار ناکس را در یک شعله چرخشی سوخت غنی شده با هیدروژن با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. در بررسی عددی با استفاده از کانتور OH ساختار شعله مورد بررسی قرار گرفته است که با نتایج تجربی تطابق زیادی دارد. در این بررسی مدل سازی احتراق با استفاده از روش Composition انجام شده است که دماهای اندازه‌گیری شده از نتایج تجربی با نتایج عددی ۳٪ خطا و میزان ناکس اندازه‌گیری شده ۷٪ خطا اعلام شده است. [۵]

می و همکاران معیارهای متفاوتی را برای اندازه‌گیری طول شیمیایی شعله بررسی کرده‌اند. معیارهای معرفی شده بر اساس مقدار کسر مولی کربن مونواکسید کربن و کسر جرمی دی اکسید کربن است. همچنین پدیده Lift off در شعله با بررسی کانتور رادیکال OH صورت پذیرفته است و به عنوان یکی از معیارهای اندازه‌گیری طول شعله معرفی شده است. [۶] مدول و همکاران با اندازه‌گیری دما و غلظت رادیکال OH و  $H_2CO$  به کمک روش ترکیبی تشخیصی با لیزر ساختار شعله را بررسی کردند. در این بررسی رادیکال OH به عنوان نشانگر شعله مورد توجه قرار گرفت. [۷]

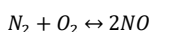
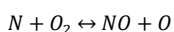
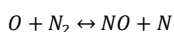
### معادلات و آلاینده‌گی‌های احتراق

فرآیند احتراق استوکیومتری مطابق با معادله (۱) انجام می‌گردد.

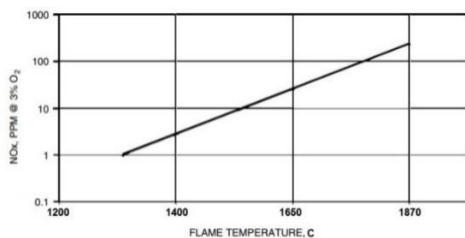


$$a = x + \frac{y}{4}$$

از علل اصلی انتشار کربن مونواکسید در مشعل‌ها، عدم اختلاط مناسب سوخت و هوا می‌باشد. نتیجه این اختلاط نامطلوب، دستیابی به نسبت هم‌ارزی کوچکتر از یک یا به بیان دیگر مخلوط غنی از سوخت می‌باشد. بنابراین می‌توان با افزایش میزان هوای اضافی، به ترکیب مناسب سوخت و هوا دست یافت و از این طریق، انتشار کربن مونواکسید را محدود کرد. در فرآیند احتراق غالب‌ترین روش تولید ناکس، ناکس حرارتی است. در این روش به دلیل بالا بودن دمای بیشینه شعله، مولکول  $N_2$  به اتم‌های نیتروژن شکسته می‌شود. سپس اتم‌های نیتروژن با اکسیژن موجود در هوای احتراق واکنش می‌دهند، در نتیجه این واکنش، ناکس حرارتی تولید خواهد شد. زنجیره واکنش دو مرحله‌ای تولید نیتریک‌اکسید در معادلات (۶) تا (۸) آورده شده است [۹].

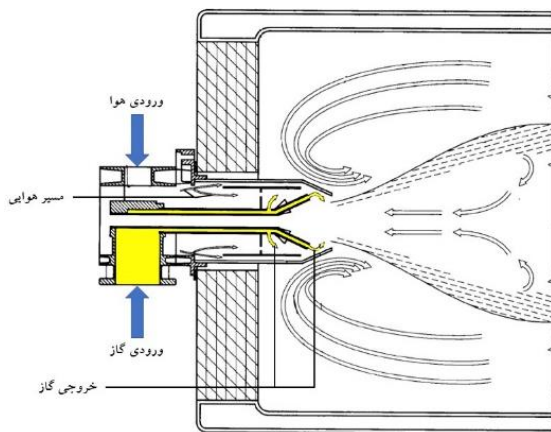


در شکل ۲ نمودار تغییرات تولید ناکس حرارتی با افزایش دمای شعله آورده می‌شود. همانطور که مشخص است با افزایش دما، انتشار آلاینده ناکس افزایش می‌یابد.



شکل ۲: نمودار اثر دمای شعله روی مقدار ناکس حرارتی [۹]

مشعل‌ها براساس نحوه اختلاط سوخت و هوا در دو طبقه‌ی مشعل‌های مخلوط سرنازل و مشعل‌های پیش‌مخلوط، طبقه‌بندی می‌شوند [۱۱]. در مشعل‌های پیش‌مخلوط، سوخت و هوا قبل از سری احتراقی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. این درحالی است که در مشعل‌های مخلوط سرنازل، سوخت و هوا در سری احتراقی با یکدیگر ترکیب شده و آماده احتراق می‌گردند. در شکل ۴ و شکل ۴ به ترتیب شکل ۱ ماتیک مشعل مخلوط سرنازل و مخلوط پیش‌مخلوط نشان داده شده است.



شکل ۳: شماتیک مشعل مخلوط سرنازل [۱۰]

حداقل مقدار هوایی که اکسیژن مورد نیاز برای احتراق کامل کربن، هیدروژن و یا هر عنصر دیگر در سوخت را تامین می‌کند، مقدار هوای نظری گفته می‌شود. با این وجود در عمل، احتراق کامل هنگامی رخ می‌دهد که مقدار هوای تامین شده تا حدودی بیشتر از مقدار هوای نظری باشد. بنابراین به منظور تعیین میزان هوای اضافی مورد نیاز جهت احتراق، دو پارامتر  $\lambda$  و  $AF$  تعریف می‌شود. نسبت هوا به سوخت ( $AF$ )، مطابق معادله (۲) و معادله (۳) به ترتیب بر مبنای جرمی و مولی تعریف می‌شود.

$$[۸]$$

$$AF_{mass} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (۲)$$

$$AF_{mole} = \frac{n_{air}}{n_{fuel}} \quad (۳)$$

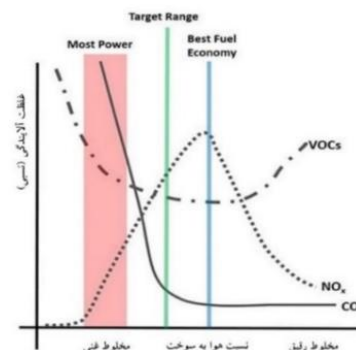
نسبت هم‌ارزی مطابق با معادله (۴) به صورت نسبت نظری هوا به سوخت تقسیم بر نسبت واقعی هوا به سوخت تعریف می‌شود.

$$\phi = \frac{AF_s}{AF_a} \quad (۴)$$

در صورتی که  $\phi < 1$  باشد مخلوط از نظر سوخت رقیق<sup>۱</sup> و در صورتی که  $\phi > 1$  مخلوط از نظر سوخت غنی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. مقدار واقعی هوای بکار رفته را می‌توان برحسب درصد هوای اضافه  $\lambda$  به صورت معادله (۵) بیان کرد.

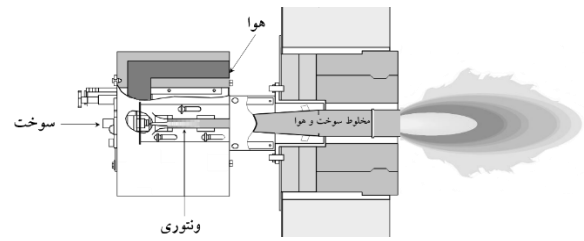
$$\lambda = \left(\frac{1}{\phi} - 1\right) \times 100 = \left(\frac{AF_a}{AF_s} - 1\right) \times 100 \quad (۵)$$

در صورت بروز احتراق ناقص، محصولات جانبی به عنوان آلاینده‌های احتراق تولید می‌گردند. از مهمترین و مورد توجه‌ترین آلاینده‌های احتراق، کربن مونواکسید و ناکس<sup>۳</sup> هستند. با تنظیم میزان هوای اضافی، می‌توان آلاینده‌های ناشی از احتراق را کنترل نمود. در شکل ۱ میزان تولید آلاینده‌های کربن مونواکسید و ناکس بر حسب نسبت هوا به سوخت در یک فرآیند احتراقی نشان داده شده است. میزان تولید ناکس در نسبت هوا به سوخت استوکیومتری در حالت بیشینه است و با کاهش نسبت هوا به سوخت، تولید آلاینده ناکس کاهش می‌یابد در این حالت، انتشار کربن مونواکسید افزایش یافته است. با افزایش هوای اضافی نسبت به هوای استوکیومتری، انتشار آلاینده‌های کربن مونواکسید و ناکس به طور همزمان، کاهش خواهد یافت، با این حال با افزایش بیش از حد این نسبت، از یک سو دمای شعله کاهش یافته و از سوی دیگر اتلافات دودکش افزایش می‌یابد. این دو در مجموع موجب کاهش راندمان احتراق می‌شوند. لذا همواره در هر فرآیند احتراقی میزان هوای اضافی بهینه‌ای باید لحاظ گردد.

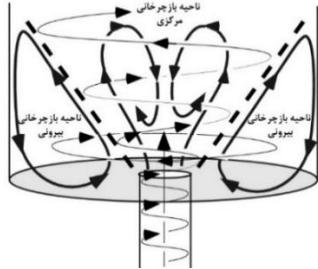


شکل ۱: نمودار میزان غلظت آلاینده‌ی بر حسب نسبت هوا به سوخت

جریان چرخشی، به تولید گرادیان فشار شعاعی و کاهش سرعت محوری منجر خواهد شد. گرادیان فشار محوری منفی که در مجاورت خط مرکزی شعله ایجاد شده، باعث تولید جریان معکوس و تشکیل دو ناحیه بازچرخانی مرکزی و بیرونی، نشان داده شده در شکل ۵، می‌شود. این مکانیزم به نوبه‌ی خود موجب افزایش میزان اختلاط سوخت و هوا می‌گردد که در نتیجه آن راندمان احتراق افزایش خواهد یافت.

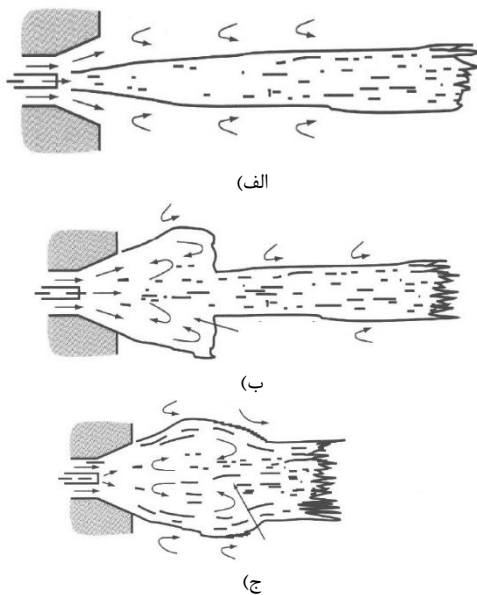


شکل ۴: شماتیک مشعل پیش مخلوط [۹]



شکل ۵: نحوه تشکیل نواحی بازچرخانی مرکزی و بیرونی

روش‌های متعددی برای ایجاد احتراق چرخشی وجود دارد که متداول‌ترین آن‌ها استفاده از پرها یا موانعی در مسیر جریان هوا است تا جریان برخوردکننده به آن‌ها حالت چرخشی پیدا کند [۱۳]. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، طول شعله با افزایش چرخش جریان و در نتیجه افزایش نواحی بازچرخانی داخلی، کاهش می‌یابد. به طوری که در حالت عدم وجود چرخش در جریان، شکل شعله همانند شکل ۶-الف خواهد بود، با تعبیه پره‌های چرخاننده جریان در مسیر عبور سیال، مطابق با شکل ۶-ج از میزان کشیدگی شعله کاسته شده و قطر آن افزایش خواهد یافت.



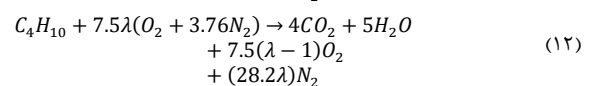
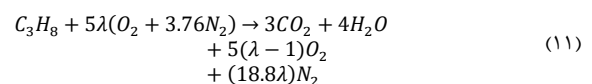
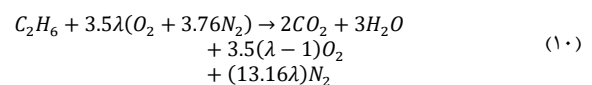
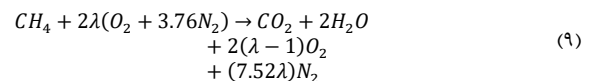
شکل ۶: تاثیر میزان چرخش جریان در شکل شعله. الف) جریان بدون چرخش. ب) جریان با چرخش متوسط. ج) جریان با چرخش بالا. [۱۴]

در مشعل‌های مخلوط سرنازل، سری احتراقی، سوخت و هوا را با یکدیگر ترکیب می‌کند. سری احتراقی شامل دیفیوزر، پره‌های چرخاننده هوا، نازل‌های گاز و شعله پوش‌های داخلی می‌باشد. دیفیوزر و چرخاننده هوا جهت ایجاد چرخش و جریان‌های گردابی در جلوی مشعل استفاده می‌شود.

آنالیز گاز شهری مورد استفاده در فرایند طراحی و آزمون مشعل مورد هدف این مقاله، در جدول ۱ آورده شده است. ارزش حرارتی پایین این سوخت گازی برابر  $18197 \text{ Kcal/m}^3$  است. معادلات احتراق گاز شهری با احتساب هوای اضافی  $\lambda$  در معادلات (۹) تا (۱۲) آورده شده است. در مشعل‌های مخلوط سرنازل، مقدار بهینه هوای اضافی جهت کنترل آلاینده‌ی‌ها بین ۲۰ الی ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. [۱۱]

جدول ۱: آنالیز گاز طبیعی [۱۲]

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



دبی گاز بر حسب ظرفیت مشعل مطابق با معادله (۱۲) به دست خواهد آمد.

$$\dot{m} = \frac{Q}{LHV} \quad (13)$$

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 (۱۴) دست آورد.

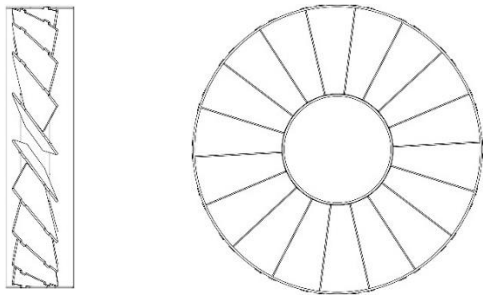
$$Q = 3.1 \frac{Q_{Air} \rho_{Air}}{\lambda} \quad (14)$$

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

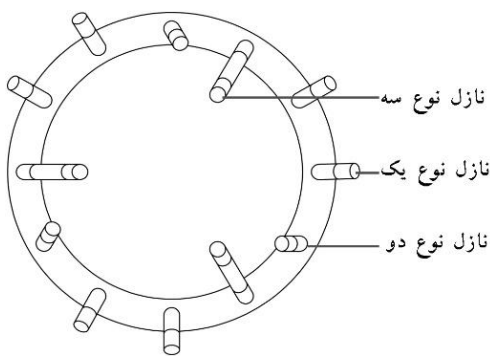
### هندسه مشعل

به منظور دستیابی به احتراق کامل، لازم است ترکیب سوخت و هوا در تمام نقاط شکل‌گیری شعله به صورت همگن و با نسبت مناسب توزیع گردد. ایجاد یک مکانیزم چرخشی، موجب جریان یافتن دوباره گرما و گونه‌های شیمیایی در ریشه شعله می‌گردد و به تثبیت و پایداری شعله، کاهش آلاینده‌ها و افزایش راندمان حرارتی منجر خواهد شد.

هدف از تغییرات بیان شده، تبدیل بخشی از سرعت محوری جریان هوا و سوخت به سرعت شعاعی-مماسی، جهت حضور ترکیب هوا و سوخت در محدوده شعاعی بزرگتر در داخل محفظه احتراق است.



شکل ۱۰: پره‌های چرخاننده‌ی هوا، مورد استفاده در هندسه مشعل طراحی شده



شکل ۱۱: شماتیک مجموعه نازل‌های گاز مورد استفاده در مشعل

### تعریف مساله

برای شبیه سازی مشعل از لوله آزمون استاندارد، مطابق استاندارد ملی ۷۵۹۵، به عنوان محفظه احتراق استفاده می‌شود. طبق این استاندارد حداقل طول محفظه احتراق از معادله (۱۵) و حداقل قطر آن با استفاده از شکل ۱۲ بدست می‌آید. که در آن  $Q$  ظرفیت مشعل برحسب  $kW$  است.

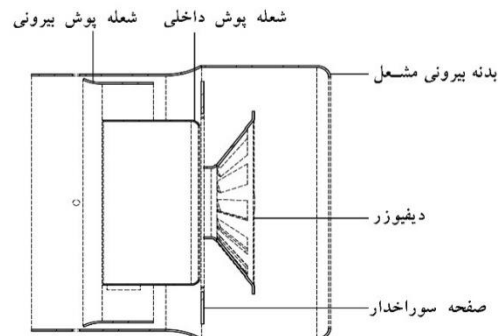
$$L = 0.23 \sqrt{\frac{Q}{10}} \quad (15)$$

برای شبیه سازی هندسه مشعل و بویلر مورد بحث، طول محفظه احتراق در هر دو مشعل موجود و مشعل طراحی شده جدید، برابر ۸ متر و قطر این محفظه برای مشعل موجود برابر، ۱/۲ متر و برای مشعل طراحی شده جدید برابر، ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. برای خنک‌سازی این لوله آزمون از چرخش آب، دورتادور محفظه‌ی احتراق استفاده شده است. ابعاد محفظه‌ی احتراق مورد استفاده جهت شبیه سازی مشعل طراحی شده جدید، در شکل ۱۳ آورده شده است.

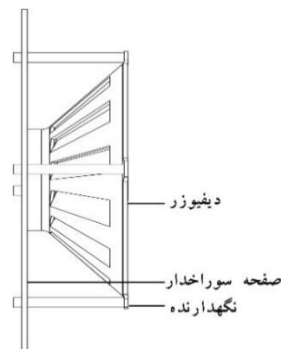
زاویه‌ی پره‌های چرخاننده جریان و نیز زاویه خروج گاز از نازل‌ها، طول و قطر شعله را مشخص می‌نماید.

در شکل ۷ نمای شماتیک مشعل یک بویلر به ظرفیت ۱۲ مگاوات نشان داده شده است. دیفیوزر مورد استفاده در این مشعل، در شکل ۸ نشان داده شده است. دیفیوزر به شکل مخروطی طراحی شده است تا ضمن افزایش درصد اختلاط سوخت و هوا، از سرعت محوری جریان کاسته نشود و شعله‌ای با ساختار کشیده تشکیل گردد.

در شکل ۹ نازل‌های گاز نشان داده شده‌اند. همانطور که مشخص است در این مشعل، سه مدل از نازل‌های گاز با زوایای پاشش سوخت گازی و قطرهای متفاوت، به منظور ایجاد نواحی همگن، از نظر نسبت سوخت و هوا وجود دارد.

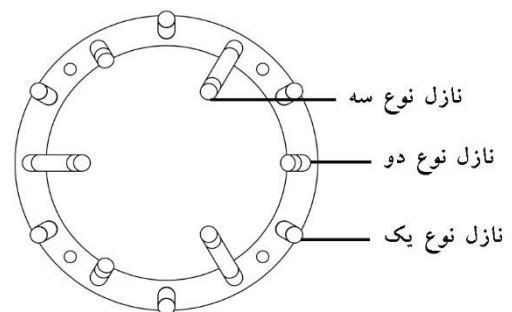


شکل ۷: شماتیک هندسه مشعل با شعله کشیده



شکل ۸: شماتیک دیفیوزر مورد استفاده در مشعل با شعله کشیده

در این مقاله به منظور کاهش طول بویلر، جهت افزایش میزان چرخش جریان، دیفیوزر مورد استفاده در هندسه مشعل موجود، با پره‌های چرخاننده هوا (شکل ۱۰) جایگزین شده است، همچنین زاویه خروج گاز از نازل‌ها با انحراف نازل‌های نوع یک به سمت شعله‌پوش (شکل ۱۱) تغییر یافته است.

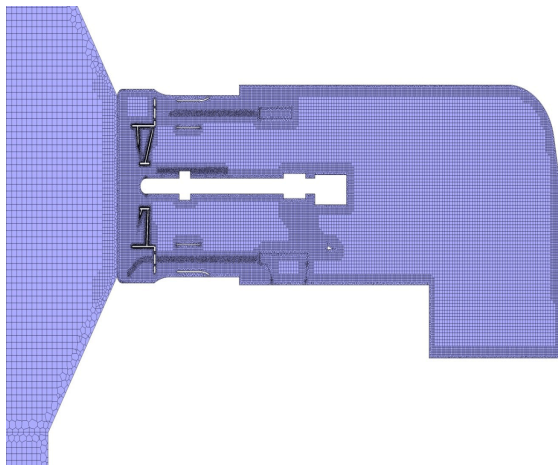


شکل ۹: شماتیک مجموعه نازل‌های گاز مورد استفاده در مشعل با شعله کشیده

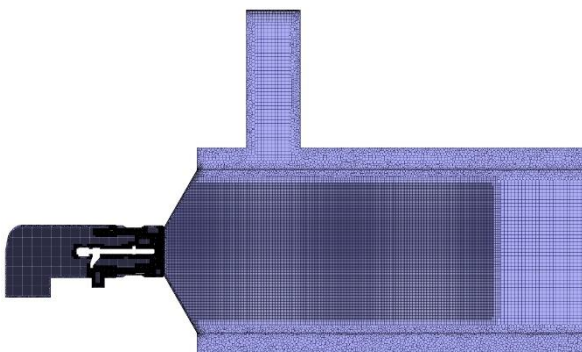
داده شده است. در شبکه‌بندی سوم با افزایش تعداد سلول‌های اطراف چرخاننده جریان، نازل‌های گاز و ناحیه تشکیل شعله، تعداد ۲۶ میلیون سلول ایجاد شده است.

جدول ۲: شبکه‌های مورد بررسی در مطالعات شبکه

ردیف	تعداد سلول	حافظه Gb	زمان تقریبی حل [hr]
۱	۱۶۱۸۲۷۴۸	۲×۵۴	۲۲۰
۲	۲۰۳۶۱۹۲۴	۲×۷۰	۲۴۰
۳	۲۶۲۷۴۲۵۸	۲×۱۲۸	۳۰۰

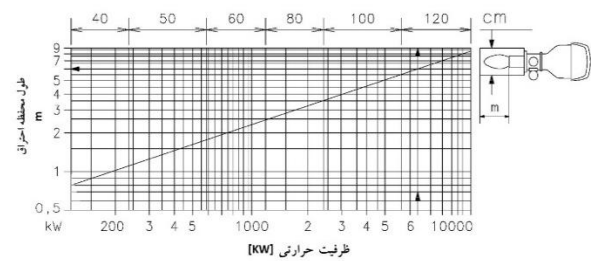


شکل ۱۴: نمایی از شبکه بندی هندسه به روش مش موزائیک

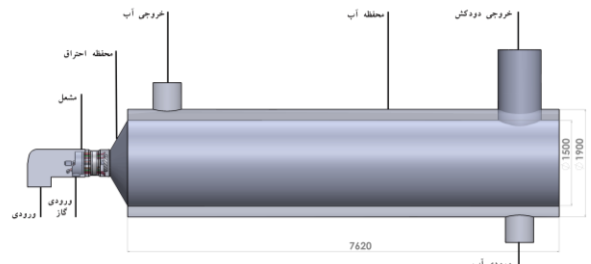


شکل ۱۵: نمایی از شبکه‌بندی هندسه در وجود BOI

مدل سازی احتراق در مجموعه مشعل به همراه محفظه احتراق، در نرم‌افزار Ansys Fluent انجام شده است. برای مدل سازی جریان مغشوش از روش k-e Realizable 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 می‌باشد و دقت گسسته‌سازی تمامی معادلات از مرتبه ۲ در نظر گرفته شده است. در صد مولی سوخت و هوا (اکسید کننده) به صورت جدول ۳ در نرم افزار وارد شده است. در



شکل ۱۲: ابعاد محفظه احتراق مطابق استاندارد ملی ۷۵۹۵ [۱]



شکل ۱۳: ابعاد محفظه احتراق و محفظه آب جهت شبیه سازی احتراق مشعل

جریان هوا از مسیر ورودی هوا به کمک دمش فن 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 اولیه‌ی احتراق توسط جرقه‌زن، شعله تشکیل می‌گردد.

#### 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 نواحی دور از دیواره به صورت شش وجهی<sup>۳</sup> انجام می‌گردد تا علاوه بر حفظ دقت بالا، هزینه‌ی محاسباتی نیز کاهش یابد. در نقاطی از سیال که دارای گرادیان‌های بالا می‌باشد، شبکه‌بندی با چگالی بیشتر، اعمال شده است. از جمله این نواحی، نقاط اطراف پرهای چرخاننده جریان و نازل‌های گاز می‌باشد. در شکل ۱۴، نمایی از شبکه بندی مورد استفاده در حل این مسئله آورده شده است.

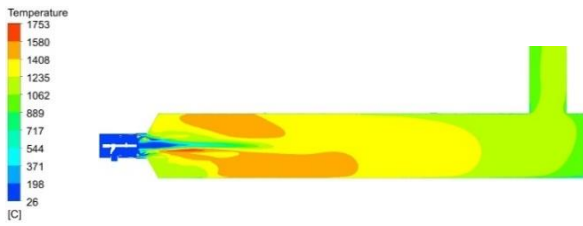
در بحث مطالعات شبکه، تعداد سلول، حافظه مورد استفاده جهت حل و نیز مدت زمان حل در هر شبکه در جدول ۲ آورده شده است. در هر مطالعه از دو پردازنده Core i 9 با قدرت پردازش ۳.۶ GHz به صورت موازی استفاده شده است. معیار همگرایی و انتخاب شبکه پارامتر  $Y^+$  (به عنوان معیاری برای ارزیابی ارتفاع المان شبکه حل در نزدیکی دیواره)، تعداد سلول شبکه و میزان همگرایی مقادیر فشار در مقطع ورودی هوا، فشار در مقطع ورودی گاز و نیز میانگین کسر مولی کربن مونوکسید در مقطع خروجی دودکش است.

همان‌طور که در جدول ۲ آورده شده است، به منظور مطالعه شبکه از سه شبکه متفاوت استفاده شده است. در شبکه اول تعداد ۱۶ میلیون سلول استفاده شده است. در شبکه‌بندی دوم به کمک روش BOI<sup>۴</sup> ناحیه‌ای به طول ۳ متر و قطر یک متر در محل تشکیل شعله درون محفظه احتراق، شبکه‌بندی ریزتری اعمال شده است. این شبکه‌بندی در شکل ۱۵ نشان

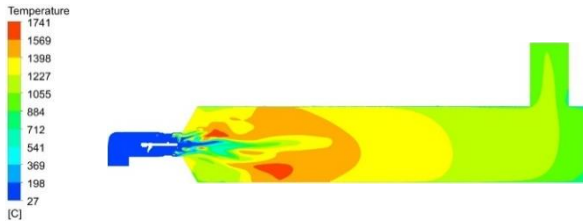
<sup>3</sup> Hexcore  
<sup>4</sup> Body Of Influence

<sup>1</sup> Mosaic Meshing Method  
<sup>2</sup> Polyhedral

طول شعله کوتاه، به گونه‌ای است که با کنترل دمای شعله در فرآیند احتراق با ۲۰ درصد هوای اضافه، توده دمای بالاتر از ۱۷۴۱ در آن وجود ندارد.



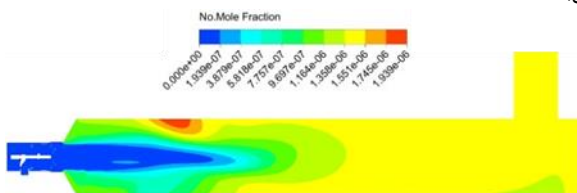
شکل ۱۶: کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کشیده، در حالت ظرفیت بیشینه



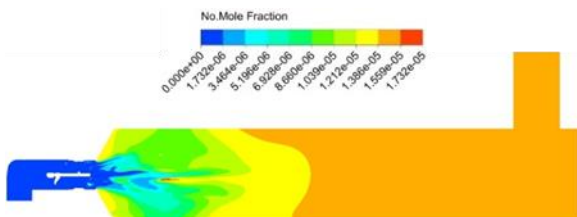
شکل ۱۷: کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه

در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ کانتور ناکس به ترتیب در صفحه گذرنده از مرکز مشعل و بویلر، در حالت بیشینه ظرفیت بویلر با طول شعله کشیده و طول شعله کوتاه آورده شده است. با دور شدن از مشعل و نزدیک شدن به محل دودکش، مقدار میانگین کسر مولی به دلیل انباشت ناکس در طول محفظه احتراق، افزایش می‌یابد. لذا در خروجی دودکش بیشترین مقدار ناکس وجود دارد. بنابراین در شبیه سازی‌های انجام شده، مقدار ناکس خروجی دودکش مورد بررسی قرار گرفته شده است.

در بررسی هندسه بویلر و مشعل در حالت شعله کشیده و شعله کوتاه در حالت بیشترین ظرفیت، میزان ناکس تولیدی به ترتیب برابر ۵ و ۱۴ پی‌پی‌ام است، که این مقدار مطابق با استاندارد ۷۵۹۵ در محدوده مجاز می‌باشد.



شکل ۱۸: کانتور NO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کشیده، در حالت ظرفیت بیشینه



شکل ۱۹: کانتور NO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه

جدول ۴ شرایط مرزی ورودی‌های گاز، هوا و آب و همچنین دیواره‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است که کلیه دیواره‌ها به صورت کدر<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده‌اند. شبیه سازی‌ها در دو حالت ظرفیت کمینه و بیشینه مشعل انجام شده است. ظرفیت بیشینه مشعل مورد شبیه‌سازی ۱۲،۵ مگاوات و با نسبت تبدیل ۱:۱۰ می‌باشد.

جدول ۳: 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 ۴: شرایط مرزی

Boundary Name	Type of Boundary	Flow Rate [kg/s]	Pressure [pa]
Air Inlet	Mass Flow Rate	4.86	-
Gas Inlet	Mass Flow Rate	0.26	-
Water Inlet	Mass Flow Rate	100	-
Water Outlet	Pressure Outlet	-	0.0
Boiler Wall	Couple	-	-
Stack Outlet	Pressure Outlet	-	0.0

### مطالعات شبکه

مقادیر فشار میانگین در مقطع ورودی گاز، فشار میانگین در مقطع ورودی هوا و کسر مولی میانگین کربن مونوکسید در مقطع خروجی دودکش برای شبکه‌بندی‌های مختلف در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: پارمترهای مورد بررسی به منظور مطالعه شبکه

No. of Cells (Million)	Area Averaged of Pressure		CO Mole Fraction
	Gas Inlet [pa]	Air Inlet [pa]	
16	128	51.35	1.3 e-6
20	114	45.18	8e-7
26	116	44.56	8.5e-7

بیشترین مقدار خطای پارامتر فشار در شبکه‌بندی اول نسبت به شبکه‌بندی دوم برابر ۱۳/۵٪ است. این خطا در مورد شبکه‌بندی دوم و سوم برابر ۲٪ است. همچنین مقدار خطا در محاسبه کسر مولی کربن مونوکسید برای شبکه بندی اول و دوم ۶٪ و در شبکه بندی دوم و سوم این خطا به ۶٪ رسیده است.

### نتایج

در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز مشعل و بویلر، در حالت بیشینه ظرفیت بویلر با طول شعله کشیده و طول شعله کوتاه آورده شده است. همانطور که مشخص است بیشینه دمای شعله در حالت بیشینه ظرفیت بویلر در حالت شعله با طول کشیده و شعله کوتاه به ترتیب برابر ۱۷۵۳ و ۱۷۴۰ درجه سانتیگراد است. طراحی هندسه مشعل با

<sup>1</sup> Opaque



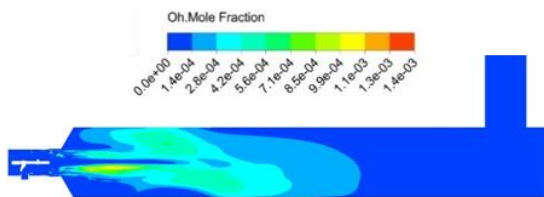
جدول ۷: اندازه سرعت متوسط گاز خروجی از نازل‌های سوخت در هندسه با شعله کوتاه

نازل	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳
سرعت [ms]	۱۰۹	۱۰۲	۱۱۱

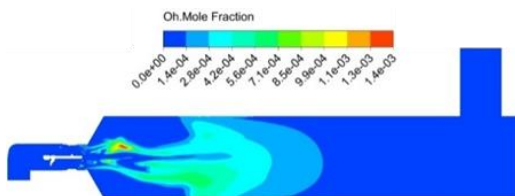
قطر خروجی نازل‌های گاز در مشعل با شعله کشیده برابر ۱۶ میلی‌متر است. در مشعل شعله کوتاه به منظور کاهش افت فشار گاز از مجموعه زانویی و نازل‌ها، قطر خروجی نازل‌ها به ۱۹ میلی‌متر افزایش داده شده است. در نتیجه این افزایش قطر، کاهش افت فشار گاز به میزان ۳۰٪ حاصل شده است. در نتیجه کاهش افت فشار گاز، سرعت خروجی گاز از نازل‌های مشعل با شعله کوتاه کاهش یافته است.

جهت ایجاد شعله‌ای پایدار و جلوگیری از پرتاب شعله، لازم است سرعت گاز متناسب با سرعت هوا تنظیم گردد. با کاهش سرعت محوری هوا در مشعل شعله کوتاه، سرعت خروجی گاز نیز کاهش یافته است.

در این مقاله با بررسی کانتور کسر مولی OH شکل شعله و طول آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. کانتور OH در دو هندسه مشعل با شعله کشیده و مشعل با طول شعله کوتاه در ظرفیت بیشینه به ترتیب در شکل ۲۲ و شکل ۲۳ آورده شده است. با توجه به کانتورهای OH ارائه شده، طول شعله در مشعل موجود برابر ۶ متر و در مشعل طراحی شده جدید با شعله کوتاه برابر ۴/۵ متر، به دست آمده است.



شکل ۲۲: کانتور OH در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کشیده، در حالت ظرفیت بیشینه

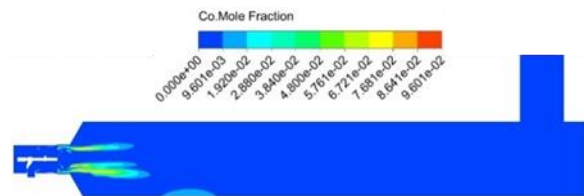


شکل ۲۳: کانتور OH در صفحه گذرنده از مرکز مشعل شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه

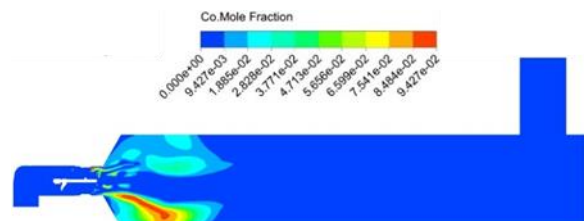
به منظور اطمینان از عملکرد بهینه مشعل شعله کوتاه با هندسه طراحی شده، در مینیم ظرفیت کاری، شبیه سازی در حالت ظرفیت کمینه انجام گرفته است. با توجه به شکل ۲۴، ماکزیمم دمای شعله در مشعل شعله کوتاه در حالت ظرفیت کمینه برابر ۱۶۹۹ است.

در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ کانتور کربن مونواکسید به ترتیب در صفحه گذرنده از مرکز مشعل و بویلر، در حالت بیشینه ظرفیت بویلر با طول شعله کشیده و طول شعله کوتاه آورده شده است. در بررسی هندسه بویلر و مشعل در حالت طول شعله کشیده و شعله با طول کوتاه در حالت بیشترین ظرفیت، میزان تولید کربن مونواکسید در هر دو حالت، کمتر از یک پی‌پی‌ام برآورد شده است. تولید بسیار پایین آلاننده کربن مونواکسید در این مشعل، بدلیل اختلاط مناسب سوخت و هوا می‌باشد. این اختلاط مناسب با تعبیه تجهیزاتی همچون چرخاننده هوا و دیفیوزر در مسیر جریان، حاصل می‌گردد.

به منظور کاهش طول بویلر، لازم است طول شعله کاهش داده شود، با حذف دیفیوزر، پره‌های چرخاننده در مسیر عبور جریان هوا و سوخت تعبیه شده است.



شکل ۲۰: کانتور CO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کشیده، در حالت ظرفیت بیشینه



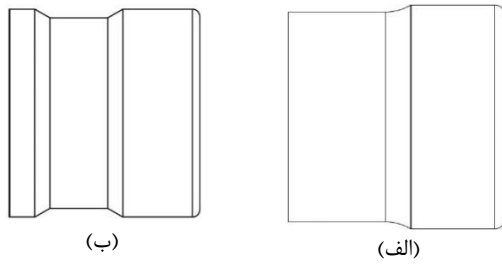
شکل ۲۱: کانتور CO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه

این پرها با ایجاد سرعت شعاعی و مماسی در جریان سیال، باعث افزایش زمان اختلاط سوخت و گاز قبل از ورود به ناحیه وقوع فرآیند احتراق می‌گردند. از طرفی ایجاد سرعت شعاعی و مماسی در جریان سیال موجب افزایش احتمال حضور ترکیب سوخت و گاز در دامنه‌ی شعاعی وسیع‌تری از محفظه احتراق می‌شود، که به نوبه‌ی خود باعث افزایش قطر شعله و در نتیجه کاهش طول آن می‌گردد. همچنین با انحراف زاویه خروج گاز از نازل‌های نوع یک به سمت شعله‌پوش خارجی، سرعت شعاعی و مماسی بخشی از جریان گاز افزایش یافته است. در مشعل شعله کوتاه، میانگین سرعت مخلوط هوا و گاز در مقطع خروج مشعل ۶۱ متر بر ثانیه و در مشعل شعله بلند، متوسط سرعت در مقطع خروجی مشعل برابر ۹۰ متر بر ثانیه است. میانگین سرعت خروجی از نازل‌های گاز در جدول ۶ و جدول ۷ به ترتیب برای هندسه با شعله کشیده و شعله کوتاه آورده شده است.

جدول ۶: اندازه سرعت متوسط گاز خروجی از نازل‌های سوخت در هندسه با شعله کشیده

نازل	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳
سرعت [ms]	۱۵۴	۱۱۴	۱۴۰

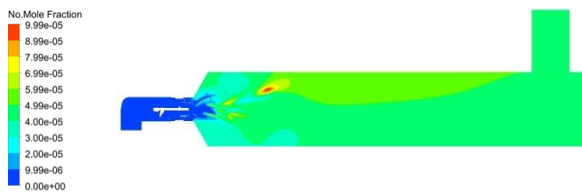
اولیه، به منظور هدایت بهتر جریان و کاهش افت فشار هوا در شعله‌پوش خارجی، ساختار شعله‌پوش خارجی طراحی شده است. لازم به ذکر است، کاهش افت فشار هوا منجر به استفاده از فن با قدرت کمتر و در نتیجه صرفه‌جویی در انرژی و کاهش هزینه‌ها خواهد شد.



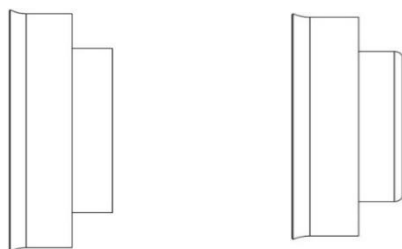
شکل ۲۸: هندسه بدنه مشعل؛ (الف) در طراحی اولیه، (ب) در طراحی نهایی

در نتیجه تغییر هندسه شعله‌پوش خارجی و ایجاد فاصله مناسب شعله‌پوش و صفحه سوآخدار، افت فشار هوا نسبت به حالت اولیه با کاهش ۱۵ میلی‌باری به مقدار ۴۵ میلی‌بار رسیده است.

پس از بهینه شدن حالت ظرفیت بیشینه‌ی مشعل، به بررسی میزان آلاینده‌ی، ماکزیمم دما و طول شعله در حالت ظرفیت کمینه پرداخته شد. در شبیه‌سازی ظرفیت کمینه، میزان آلاینده‌ی نیتروژن مونواکسید در حدود ۴۰ پی‌پی‌ام به دست آمد. با توجه به شکل ۲۹، نقاط با انتشار نیتروژن مونواکسید بالا مشاهده می‌شود، تولید نیتروژن مونواکسید به علت پایین بودن هوای مورد نیاز احتراق در این نواحی می‌باشد. لذا در ادامه با هدف افزایش هوای احتراق در این نقاط، انحنا‌ی انتهایی شعله‌پوش داخلی، نشان داده شده در شکل ۳۰ حذف گردید.

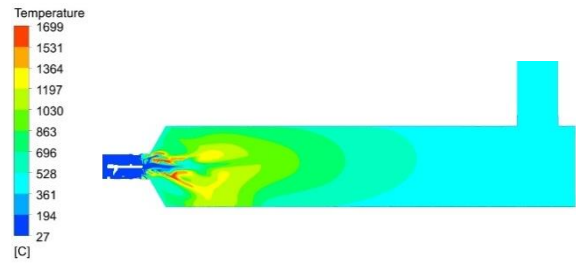


شکل ۲۹: کانتور نیتروژن مونواکسید در حالت وجود شعله‌پوش داخلی انحنا‌دار



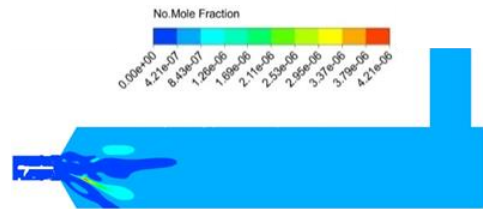
شکل ۳۰: مراحل طراحی مجموعه شعله‌پوش‌های داخلی (الف) هندسه اولیه شعله‌پوش‌ها (ب) حذف انحنا‌ی انتهایی شعله‌پوش

نتایج این شبیه‌سازی، حاکی از انتشار بالای آلاینده نیتروژن مونواکسید می‌باشد. لذا در طراحی نهایی، قسمت مرکزی شعله‌پوش داخلی به طور کامل حذف گردید. شبیه‌سازی طرح نهایی در حالت ظرفیت کمینه، نشان داده شده در شکل ۲۴ تا شکل ۲۷، نشان دهنده‌ی پایین بودن انتشار آلاینده‌های نیتروژن مونواکسید و کربن مونواکسید در این هندسه است. در نهایت با شبیه‌سازی حالت ظرفیت بیشینه، بهینه بودن هندسه شعله‌پوش تایید شده است.

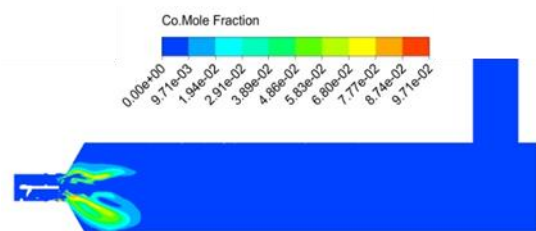


شکل ۲۴: کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز بویلر و مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت کمینه

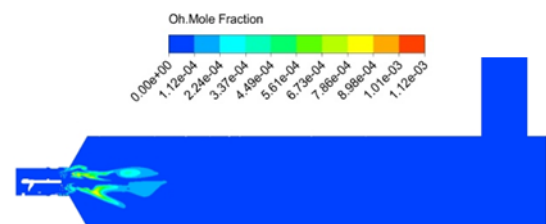
در شکل ۲۵ و شکل ۲۶ کانتور نیتروژن مونواکسید و کربن مونواکسید در صفحه گذرنده از مرکز هندسه نشان داده شده است. میزان انتشار آلاینده‌ی نیتروژن مونواکسید برابر یک پی‌پی‌ام و میزان انتشار آلاینده کربن مونواکسید کمتر از یک پی‌پی‌ام به دست آمده است. در شکل ۲۶ کانتور OH آورده شده است. مطابق با این کانتور، طول شعله برابر یک و نیم متر می‌باشد.



شکل ۲۵: کانتور NO در صفحه گذرنده از مرکز بویلر و مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت کمینه



شکل ۲۶: کانتور CO در صفحه گذرنده از مرکز بویلر و مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت کمینه



شکل ۲۷: کانتور OH در صفحه گذرنده از مرکز بویلر و مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت کمینه

در بخش‌های قبل، شبیه‌سازی هندسه بهینه‌شده نهایی مورد بحث قرار گرفت. برخی از تغییرات انجام شده در روند شبیه‌سازی‌ها به منظور بهینه‌سازی هندسه مشعل از نظر ابعاد شعله، میزان آلاینده‌ی‌ها و افت فشارهای ایجاد شده سیال در عبور از سری احتراقی مشعل، در ادامه توضیح داده شده است که دو مورد از شبیه‌سازی‌های مربوط به آن در ادامه، مورد بررسی قرار گرفته است. شعله‌پوش خارجی طراحی شده در هندسه اولیه در شکل ۲۸ نشان داده شده است. پس از شبیه‌سازی‌های

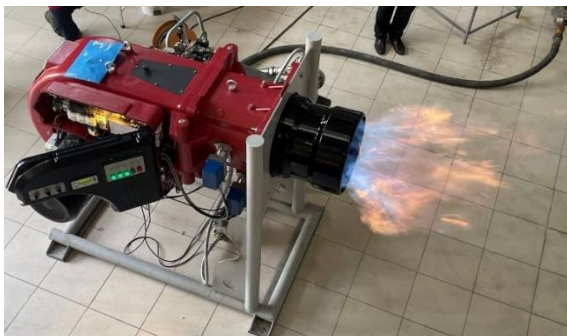


نتایج تجربی، صحیح بودن نتایج عددی حاصل از طول شعله، آورده شده در شکل ۲۲ و شکل ۲۳ را تایید می‌کند. مطابق با این نتایج مشعل طراحی شده همراه با چرخاننده جریان، دارای شعله‌ای قطور با طول کوتاه نسبت به مشعل بدون پره‌های چرخاننده هوا است.

سری حرارتی مشعل به نحوی طراحی شده است که قابلیت نصب روی ساختارهای مونوبلاک<sup>۱</sup> (بخش احتراق و دمنده بر روی یک ساختار) و دوآل بلاک<sup>۲</sup> (بخش احتراق و دمنده به صورت جداگانه) را دارد.



شکل ۳۵: سری مشعل با طول شعله کوتاه، قابل نصب بر روی بدنه‌های مونوبلاک یا دوآل بلاک، تولید شرکت پاکمن



شکل ۳۶: نمایی از شعله‌ی مشعل شعله کوتاه در ساختار مونو بلاک، در مرحله تست تجربی، در حالت ظرفیت کمینه تولید شرکت پاکمن.

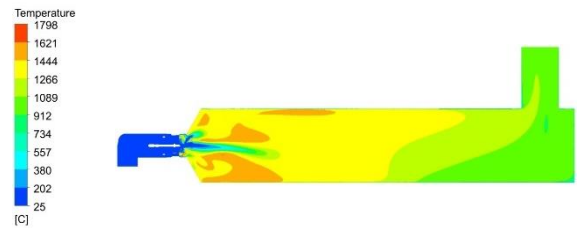


شکل ۳۷: شعله‌ی مشعل شعله کشیده، در ساختار مونو بلاک، در مرحله تست تجربی، در حالت ظرفیت کمینه تولید شرکت پاکمن

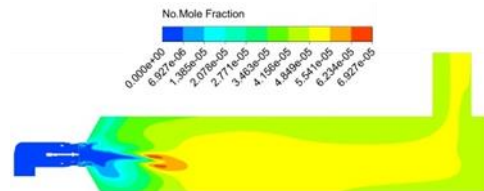
شکل ۳۸ مشعل با ظرفیت ۱۲ مگاوات شعله کوتاه نصب شده روی بویلر بخار با ظرفیت ۱۴ تن بخار در ساعت، ساخت شرکت پاکمن آورده شده است. آنالیز گاز خروجی از دودکش این مشعل در ظرفیت بیشینه در شکل ۳۹ آورده شده است. دستگاه آنالیزر گاز مورد استفاده testo 300 است

نتایج شبیه‌سازی هندسه طراحی‌شده‌ی ابتدایی که شکل شعله پوش خارجی و شعله پوش داخلی آن به ترتیب مطابق شکل ۲۸ و شکل ۳۰ - الف است، در حالت ظرفیت بیشینه، در شکل ۳۱ تا شکل ۳۴ آورده شده است. در این شبیه‌سازی مقدار ناکس در خروجی دودکش برابر ۴۸ پی‌پی‌ام و مقدار کربن‌مونواکسید برابر ۱۳ پی‌پی‌ام می‌باشد. همچنین دمای بیشینه برابر ۱۷۹۸ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

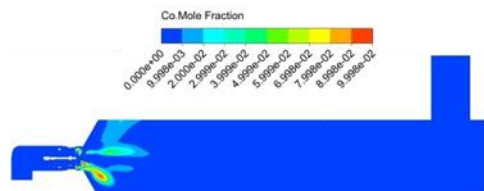
در روند طراحی و شبیه‌سازی‌های انجام شده، پره‌های چرخاننده جریان از نظر تعداد و نیز زاویه قرارگیری پره در مسیر عبور جریان هوا و سوخت، مورد بررسی قرار گرفته است.



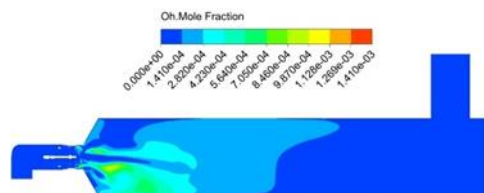
شکل ۳۱: کانتور دما در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه، شبیه‌سازی ابتدایی



شکل ۳۲: کانتور NO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه، شبیه‌سازی ابتدایی



شکل ۳۳: کانتور CO در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه، شبیه‌سازی ابتدایی



شکل ۳۴: کانتور OH در صفحه گذرنده از مرکز مشعل با طول شعله کوتاه، در حالت ظرفیت بیشینه، شبیه‌سازی ابتدایی

### نتایج تجربی

در شکل ۳۵ مشعل ساخته شده با ظرفیت ۱۲ مگاوات با شعله کوتاه آورده شده است. در شکل ۳۶ و شکل ۳۷، به ترتیب تصویری از شکل شعله مشعل با طول کوتاه و طول کشیده، در مرحله تست آزمایشگاهی با ظرفیت کمینه، آورده شده است. همانطور که در شکل ۳۶ و شکل ۳۷ نشان داده شده است.

شکل ۳۹: آنالیز گاز خروجی دودکش بویلر بخار با ظرفیت ۱۴ تن بخار در ساعت توسط دستگاه آنالیزر testo ۳۰۰ در ظرفیت بیشینه مشعل با ظرفیت ۱۲ مگاوات

### نتیجه گیری

انتخاب نادرست مشعل مناسب در بویلرها می تواند آسیب جدی به دیواره های بویلر وارد نماید و باعث ایجاد لرزش در بویلر شود. یکی از پارامترهای مهم در انتخاب مشعل مناسب برای بویلرها، تطابق ابعاد شعله با محفظه احتراق است. می توان با کاهش طول شعله ایجاد شده توسط مشعل، ابعاد بویلر را کاهش داد. در این مقاله با جایگزین کردن یک چرخاننده هوا به جای دیفیوزر مورد استفاده در مشعل یک بویلر بخار با توان ورودی ۱۲ مگاوات و بهینه سازی هندسه ی آن، طول بویلر تا ۱/۵ متر کاهش پیدا کرده است. همچنین با کاهش طول شعله، قطر شعله به میزان ۳۰ سانتی متر افزایش یافته است. اختلاط مناسب سوخت و هوا در مشعل طراحی شده منجر به تولید پایین آلاینده های مونوکسید کربن و ناکس شده است. در این مشعل مقدار مونوکسید کربن در دودکش کمتر از ۱ پی پی ام و مقدار ناکس در دودکش ۱۴ پی پی ام است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی مشعل با طول شعله کشیده و طول شعله کوتاه به طور خلاصه در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: مقایسه نتایج شبیه سازی مشعل های با طول کشیده و طول کوتاه

مشعل	ظرفیت	طول شعله [m]	NOx [ppm]	CO [ppm]
شعله بلند	۱۲/۵	۶	۵	کمتر از ۱
شعله کوتاه	۱۲/۵	۴/۵	۱۴	کمتر از ۱
شعله کوتاه	۱/۲۵	۱/۵	۱	۱

### فهرست علائم

AF	نسبت هوا به سوخت
L	طول محفظه احتراق، m
LHV	ارزش حرارتی پایین سوخت، kWh/Nm <sup>3</sup>
m	دبی جرمی، kg/s
- n	تعداد مول،
Q	ظرفیت حرارتی، kW

### مراجع

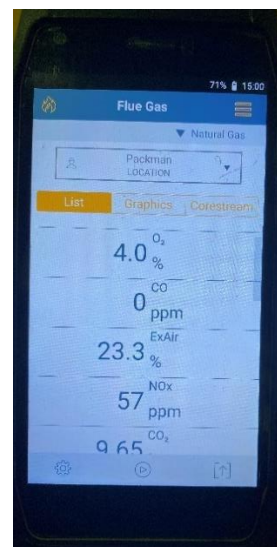
- ۱- مشعلهای گازسوز دمندهدار خودکار- ویژگیها و روشهای آزمون، تجدید نظر دوم، سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران .
- 2- A. Elbaz and W. Roberts, "Stability and structure of inverse swirl diffusion flames with weak to strong swirl," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020.
- 3- M. Sarlej, P. Petr, J. Hajek and P. Stehlik, "Computational support in experimental burner design optimization," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 2727-2731, 2007.
- 4- 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.

[۱۵]. مقدار کربن مونوکسید و ناکس تولیدی با ۲۳ درصد هوای اضافی در این پکیج به ترتیب برابر صفر و ۵۷ پی پی ام است. در واقعیت به دلیل ایجاد نقاط با دمای بالا در محفظه احتراق بویلر، ناکس حرارتی با کلاس II تولید شده است [۱۱].

یکی از دلایل اختلاف مقدار ناکس در خروجی دودکش، وجود تفاوت هندسه بویلر و محفظه احتراق ذکر شده برای شبیه سازی است. همچنین یکی دیگر از عوامل خطا در محاسبه ناکس، می توان به پیچیدگی مکانیزم تشکیل ناکس اشاره کرد که در شبیه سازی باید لحاظ کرد. برای در نظر گرفتن مکانیزم کامل تشکیل ناکس در شبیه سازی احتراق می توان از مکانیزم GRI MECH 3.0 برای گاز طبیعی استفاده کرد که به دلیل هزینه های بالای محاسباتی امکان استفاده از این مدل در این شبیه سازی وجود ندارد.



شکل ۳۸: مشعل شعله کوتاه بر روی ساختار دوال بلاک، با ظرفیت ۱۲ مگاوات بر روی بویلر بخار با ظرفیت ۱۴ تن بخار در ساعت، ساخت شرکت پاکمن



5- 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.

6- 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.

7- P. Medwel, Laser diagnostics in MILD combustion, Ph.D. Thesis. University of Adelaide, Australia, 2007.

8- B. V. W. Sonntag, Fundamentals of Thermodynamics, Sixth Edition, WILEY.

9- E. Charles and J. Baukal, Industrial Burner Handbook, 2003.

10- R. Burner, "Force Draught Burner Hanbook".

11- Forced draught burners for gaseous fuels BS En 676:2013, BSI Standard Publication, 2020.

۱۲- شرکت بهینه سازان صنعت تالیسات-<http://behineh-sazan.ir/>, [Online].

13- N. Syred and J. Beer, "Combustion in swirling flow: A Review," Combustion and Flame, vol. 23, pp. 143-201, 1974.

14- Koen Vanoverberghe, FLOW, TURBULENCE AND COMBUSTION OF PREMIXED SWIRLING JET FLAMES, 2004.

15- Testo. [Online]. Available: <https://www.testo.com/en-UK/products/testo-300>.

۱۶- ا. زوار حسینی، ا. پسندیده فرد "بررسی مشعل های سنتی براساس تکنولوژی مدرن تشعشع در ایران و جهان"، چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق، ۱۳۹۰،