

بررسی تجربی و عددی ارتقا کیفی مشعل به Ultra Low NO_x از طریق اصلاح مسیر هوا و گاز

ایوب عادل^{۱*}، لادن سمائی^۲

۱- مدیرعامل، شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت، تهران، Info@sholehsanat.com

۲- کارشناس تحقیق و توسعه، شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت، تهران، Ladan.samaei@gmail.com

* نویسنده مخاطب

چکیده

در این تحقیق یک مشعل سرعت بالای درون سوز با شعله غیرپیش آمیخته که در شعله صنعت طراحی و ساخته شده با حداکثر ظرفیت ۲۵۶kwatt (۲۲۰۰۰۰kCal/hour) جهت ارتقا مورد بررسی قرار گرفته و پس از مشخص شدن ناحیه دما بالا در بخشی از شعله مشعل، تاثیر اصلاح مسیر گاز و هوای مشعل بر ارتقا عملکرد آن به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. شبیه سازی عددی مشعل با استفاده از نرم افزار فلونت انجام گرفت. شبکه بندی دامنه محاسباتی به صورت هیبریدی است و در محل های با گرادیان های شدید (تشکیل شعله) شبکه بندی فشرده تر اعمال شده است. نتایج شبیه سازی نشان داد سرعت خروج محصولات احتراق از دهانه مشعل با تغییر هندسه افزایش یافته و یکنواختی حرارتی بالاتری در کوره ایجاد کرده است. همچنین، مشعل قبل و بعد از ارتقا، با گاز طبیعی در شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت به صورت تجربی بررسی شده و نتایج حاکی از آن است که مقدار آلاینده ناکس در حالت اول ppm ۶۴/۱ و پس از اصلاح به ۳۳/۲ppm رسیده است و همچنین صدای مشعل در هنگام کار در حداکثر شعله، کاهش یافته است. لازم به ذکر است این مشعل جزء مشعل های با ناکس پایین دسته بندی می شد که با اصلاح مسیر هوا و گاز در دسته مشعل های Ultra Low NO_x قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: احتراق صنعتی، مشعل سرعت بالا، ارتقا عملکرد، آلاینده NO_x

مقدمه

در یک نگاه کلی، احتراق، اکسید شدن سریع هیدروکربن ها و مواد کربن دار همراه با تولید حرارت و نور به شکل شعله است. بدلیل نقش مهم مشعل های کوره های صنعتی در تولید حرارت بعنوان یکی از بزرگترین مصرف کننده های سوخت های فسیلی، تلاش های بسیاری برای بهبود کارایی این تجهیزات صورت گرفته است. با افزایش قیمت نفت در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی، تلاش برای بکارگیری فناوری های پیشرفته، جهت کاهش مصرف سوخت و افزایش کارایی مشعل ها بیشتر شد. یکی از مهمترین محصولات فناوری جدید، مشعل های سرعت بالا بود. مشعل های سرعت بالا به مشعل هایی گفته می شود که سرعت خروج محصولات احتراق از دهانه مشعل به بیش از ۷۰ متر بر ثانیه می رسد. به این مشعل ها مشعل های درون سوز هم گفته می شود زیرا بخش اصلی واکنش احتراق در محفظه مربوط به سر مشعل صورت گرفته و محصول (احتراق) با سرعت زیادی از دهانه مشعل خارج می شود. با پیشرفت فناوری احتراق، سرعت خروج محصولات احتراق از دهانه مشعل در حال حاضر به بیش از ۲۰۰ متر بر ثانیه رسیده است. این نوع مشعل ها عمدتاً برای افزایش انتقال حرارت به روش جابجایی در کوره های صنعتی (کوره های نظیر کوره های تنش گیری که یکنواختی دمایی در آن ها از اهمیت خاصی برخوردار است) بکار گرفته می شوند. طراحی این مشعل ها چالش های زیادی برای طراحان دارند زیرا عوامل بسیاری در طراحی و انتخاب مواد اولیه مشعل تاثیر گذار هستند که از آن جمله می توان سرعت و

دمای جت خروجی، طول و قطر شعله، ممنتم لازم برای فرآیند حرارت دهی مورد نظر و رعایت حد مجاز آلاینده ها را نام برد. شبیه سازی عددی احتراق این فرصت را مهیا می کند که با حداقل هزینه، جوانب مختلف طراحی یک سیستم احتراقی مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات زیادی در زمینه تجربی و عددی احتراق انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آن ها اشاره شده است.

عزیزی با استفاده از شبیه سازی عددی به بررسی عددی یکی از مشعل های نیروگاه حرارتی شرکت ذوب آهن اصفهان پرداخت. وی با استفاده از شبیه سازی عددی علت آسیب دیدگی مشعل ها را بالا رفتن دما در سرمشعل برآورد کرد. همچنین، برای انجام این شبیه سازی از مدل احتراق غیرپیش آمیخته^۱ و مدل توربولانسی کی-اِپسیلون RNG در نرم افزار تجاری انسیس فلونت استفاده نمود و سپس راهکاری برای کاهش دمای سرمشعل ارائه داد به طوری که موجب ناپایداری شعله نشود [۱]. چن و چانگ تولید ناکس در یک جریان آشفته غیر پیش آمیخته را با رویکرد PDF بررسی نمودند. نتایج آن ها نشان داد حرارت منتقل شده از طریق تشعشع تاثیر بسزایی بر پیش بینی صحیح غلظت ناکس در نقاط دور از مبدا شعله دارد [۲]. علی زاده نودهی در یک پژوهش به بررسی تجربی و عددی احتراق پیش آمیخته آشفته در یک مشعل سرعت بالا پرداخت. بررسی تجربی این تحقیق شامل اندازه گیری طول شعله، بدست آوردن میدان دما و بررسی محدوده پایداری شعله بود که در آن بررسی توزیع دما توسط ۸ ترموکوپل که در موقعیت های مختلف قرار داده شده است انجام شد. همچنین از مدل آشفتنگی کی-اِپسیلون^۲ و مدل احتراق زیمونت به منظور انجام شبیه سازی عددی احتراق پیش آمیخته توسط نرم افزار فلونت استفاده شده است. وی نتیجه گرفت در محفظه احتراق، با افزایش فاصله محسوری، نواحی چرخشی در کنار دیواره جانبی محفظه شکل می گیرند و این نواحی در حدود x/D برابر ۲۰ به بالاترین قدرت می رسند. سپس نتایج عددی میدان دما با نتایج آزمون تجربی مقایسه شد و نشان داد نتایج مدل زیمونت رضایت بخش است [۳]. ویلیامز و همکاران^۳ پارامترهای احتراقی را در یک مشعل شعله چرخشی با سوخت مصرفی از متان خالص تا مخلوط های گاز سنتزی^۴ غنی از H₂ و با مقادیر کم H₂ بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که حضور هیدروژن در سوخت سنتزی گازی باعث متراکم تر شدن شعله، افزایش پایداری شعله اما از سوی دیگر باعث بالا رفتن دمای شعله می گردد. [۴] کیدرینشکا^۵ و همکاران اخیراً طی تحقیقی امکان استفاده از سوخت گاز طبیعی و یک سوخت گاز سنتزی به طور همزمان در یک مشعل را مورد بررسی قرار دادند. آن ها به این منظور طراحی مشعل را بهبود دادند و سپس به صورت عددی و تجربی پارامترهای احتراقی مشعل بهبود یافته را بررسی نمودند. نتایج آن ها نشان داد که مشعل بهبود یافته در بازه وسیعی از شرایط عملکردی، شعله پایداری دارد و از مشعل بهبود یافته در ظرفیت ۴۰۰ کیلووات در کوره پیش گرم فولاد استفاده کردند [۵]

⁴ Synthesis gas
⁵ Kiedrzyńska et al

¹ Non-Premixed model
² k-ε
³ Williams et al

در شکل ۳ نمایی از بستر آزمون فضای باز شرکت شعله صنعت که برای مشاهده ساختار شعله مورد استفاده قرار گرفته است، نشان داده شده است.



شکل ۳: بستر آزمون فضای باز شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت [۶]

به منظور بررسی تجربی محصولات احتراق از دستگاه آنالیز محصولات احتراق مدل Testo350 استفاده شده است. تصویری از این دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. این دستگاه قابلیت‌های متعددی از جمله قابلیت اندازه‌گیری CO ، NO_x ، SO_x ، CO_2 و O_2 را دارد.



شکل ۴: دستگاه آنالیز محصولات احتراق [۶]

نتایج بررسی کیفیت محصولات احتراق در هنگام اتصال مشعل به بستر آزمون، در هر دو حالت قبل و بعد از تغییر هندسه مشعل، در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که اگرچه مشعل در ابتدا نیز عملکرد احتراقی مناسبی داشت، پس از تغییر هندسه مشعل مقدار اکسیدهای نیتروژن از $64/1$ ppm به $33/2$ ppm و مقدار مونوکسید کربن از 63 ppm به 9 ppm رسیده است که نشان دهنده ارتقا قابل توجه در کیفیت احتراق مشعل است.

جدول ۱: آنالیز محصولات احتراق مشعل قبل از تغییر هندسه

دمای محیط	۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد
هوای اضافی	۴/۳ درصد
آلاینده CO	۶۳ ppm
آلاینده NO_x	۶۴/۱ ppm
آلاینده SO_2	۰ ppm
مقدار CO_2	۱۱/۴۰ درصد
دمای دودکش	۱۰۲۴ درجه سانتی‌گراد

جدول ۲: آنالیز محصولات احتراق مشعل بعد از تغییر هندسه

دمای محیط	۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد
هوای اضافی	۴/۳ درصد
آلاینده CO	۹ ppm
آلاینده NO_x	۳۳/۲ ppm
آلاینده SO_2	۰ ppm
مقدار CO_2	۱۱/۴۱ درصد
دمای دودکش	۸۱۰ درجه سانتی‌گراد

در این تحقیق، ابتدا مشعل با هندسه اولیه مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفته و پس از مشخص شدن یک ناحیه دما بالا در داخل مشعل که ممکن است باعث کاهش عمر مفید آن شود، تاثیر تغییر هندسه سرمشعل بر ارتقا عملکرد آن بررسی شده است. به این منظور، مشعل در هر دو حالت به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان دهنده ارتقا کیفیت احتراق مشعل است (کاهش ناکس از $64/1$ ppm به $33/2$ ppm)

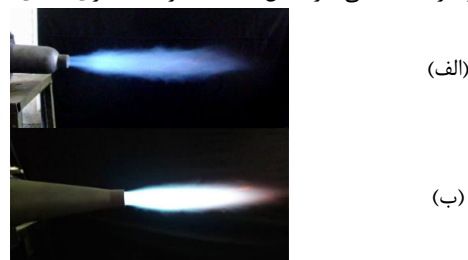
آزمون تجربی

هندسه مشعل مورد نظر قبل و بعد از ارتقا در شکل ۱ (الف) و (ب) نشان داده شده است. این مشعل‌ها توسط شرکت تولیدی و مهندسی شعله‌صنعت طراحی و ساخته شده است.



شکل ۱: هندسه مشعل (الف) قبل از تغییر (ب) بعد از تغییر [۶]

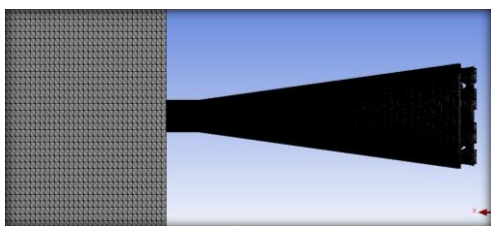
هر دو مشعل در شعله صنعت مورد آزمون تجربی قرار گرفته است. جهت مشاهده ساختار شعله، ابتدا مشعل‌ها در بستر آزمون فضای باز کارخانه شعله صنعت بررسی شده است. ساختار شعله در هر دو حالت قبل و بعد از تغییر هندسه مشعل در شکل ۲ (الف) و (ب) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، با تغییر هندسه مشعل، ساختار شعله محکم‌تر و زیباتر حاصل شده است. همچنین طول شعله خارج از سرمشعل کاهش یافته است و مشعل درون سوزتر شده است. علاوه بر این با توجه به رنگ شعله، پیش‌بینی می‌شود میزان تشعشع شعله نیز افزایش یافته است که این امر می‌تواند موجب کاهش آلاینده ناکس خروجی مشعل شود. همچنین نتایج آزمون تجربی نشان داد، صدای مشعل در حالت حداکثر ظرفیت، پس از تغییر هندسه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در آزمون تجربی در فضای باز، مشاهده شد که بدنه مشعل قابل تماس با دست غیر مسلح است که مسلماً این امر باعث افزایش طول عمر سرمشعل می‌شود. داغ نشدن بدنه مشعل ناشی از وجود یک لایه عایق هوا در لایه داخلی سرمشعل است که در شبیه‌سازی عددی مشاهده شد.



شکل ۲: مشاهده ساختار شعله در آزمون تجربی (الف) قبل از تغییر هندسه مشعل (ب) بعد از تغییر هندسه مشعل [۶]

مدل سازی

به منظور انجام تحلیل عددی، مشعل متصل به یک کوره به طول ۲ متر و عرض و ارتفاع ۱ متر در نظر گرفته شده است. مشعل و دودکش هر دو در یک سمت کوره قرار گرفته است. دلیل استفاده از این نوع کوره تجربه‌های صنعتی بوده است که موقعیت مشعل و دودکش در این صورت باعث یکنواختی بهتر دمای درون کوره می‌شود و کاهش اتلاف حرارت تولیدی را به دنبال خواهد داشت.



(الف)



(ب)

شکل ۷: شبکه بندی دامنه محاسباتی مشعل بعد از تغییر هندسه (الف) نمای کلی (ب) برش از صفحه میانی محل اتصال مشعل به کوره

معادلات حاکم بر حل عددی

معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و بقای گونه‌ها به صورت زیر است [۷].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

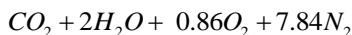
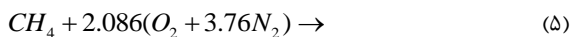
$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Phi \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho y_i)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho V y_i) + \frac{1}{Re \cdot Sc} \nabla \cdot (\rho D_{iN} \nabla y_i) + Da \omega_i \quad (3)$$

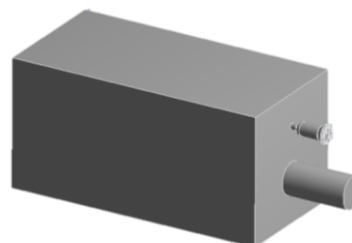
$$\frac{\partial (\rho y_i)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho V y_i) + \frac{1}{Re \cdot Sc} \nabla \cdot (\rho D_{iN} \nabla y_i) + Da \omega_i \quad (4)$$

که در آن ρ ، V و Φ به ترتیب نشان دهنده چگالی، سرعت و تنش‌های ویسکوز است. همچنین y_i کسر جرمی هریک از گونه‌ها و D_{iN} ضریب پخش جرمی گونه‌هاست. Da ، Re و Sc نشان دهنده اعداد بی بعد دامکولر، رینولدز و اشمیت هستند.

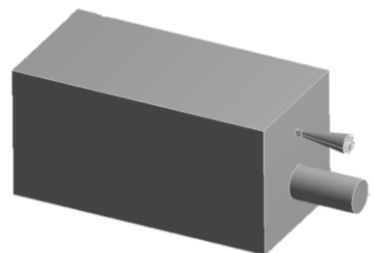
در این پژوهش از نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت ۱۸.۲ برای شبیه‌سازی احتراق در مشعل مورد نظر استفاده شده است. مدل‌سازی مشعل در حداکثر ظرفیت آن (۲۲۰۰۰۰ کیلوکالری در ساعت) و با در نظر گرفتن گاز متان بعنوان سوخت و با احتساب هوای اضافی انجام گرفته است.



برای شبیه‌سازی واکنش احتراق متان و هوا، از احتراق یک مرحله‌ای، مدل Species Transport و مدل احتراقی EDM^۱ با فرض احتراق سریع (عدد دامکولر^۲ بزرگتر از یک) استفاده شده است. لازم به ذکر است از مدل آشفنگی کی‌ایسیلون Realizable برای مدل‌سازی آشفنگی جریان استفاده شده است. استفاده از این مدل، در بسیاری از مراجع به علت هزینه محاسباتی پایین و دقت کافی برای مدل‌سازی احتراق در مشعل توصیه شده است. همچنین از مدل Discrete Ordinate به منظور مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشعی استفاده شده است. این مدل اگرچه زمان محاسباتی بالایی دارد، یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها برای انتقال حرارت تشعشعی است. معادلات حاکم بر این مدل به تفصیل در مرجع [۸] بیان شده است. در شبیه‌سازی حاضر از الگوریتم کوپل فشار و سرعت Simple



(الف)

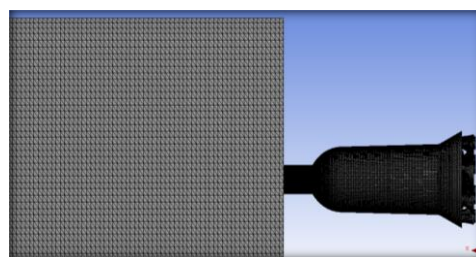


(ب)

شکل ۵: دامنه محاسباتی (الف) مشعل قبل از تغییر هندسه (ب) مشعل بعد از تغییر هندسه

شبکه بندی

شبکه بندی دامنه محاسباتی به صورت هیبریدی (ترکیبی از شبکه منظم و نامنظم) انجام شده است. تعداد سلول‌های عددی شبکه محاسباتی در هر دو حالت به صورت یکسان و برابر ۲۳۷۵۱۶۰ می‌باشد. تصویری از شبکه بندی مشعل و کوره قبل و بعد از تغییر هندسه مشعل در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۶: شبکه بندی دامنه محاسباتی مشعل قبل از تغییر هندسه (الف) نمای کلی (ب) برش از صفحه میانی محل اتصال مشعل به کوره

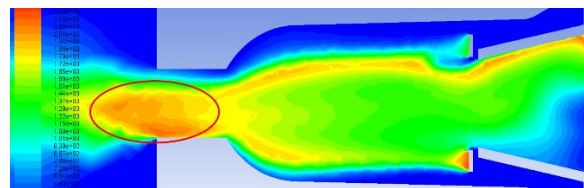
² Damkohler

¹ Eddy Dissipation Model

و حلگر مبتنی بر فشار با الگوریتم فشار Presto برای حل معادلات حاکم بر جریان به صورت پایا و غیرقابل تراکم استفاده شده است.

بررسی نتایج حاصل از حل عددی

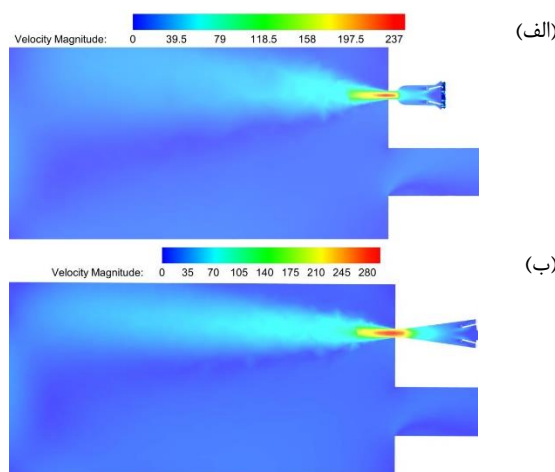
ابتدا مشعل با هندسه اولیه، جهت بررسی دقیق پارامترهای احتراقی که به طور تجربی قبل از اندازه گیری نیستند یا اندازه گیری آن ها هزینه بالایی می‌طلبد، شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد، در بخشی از داخل مشعل واکنش احتراق سریع تر رخ می‌دهد و دما بسیار بالا می‌رود که ممکن است باعث کاهش عمر مفید سرمشعل شود. کانتور دما داخل مشعل در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: کانتور دما داخل سرمشعل (هندسه اولیه)

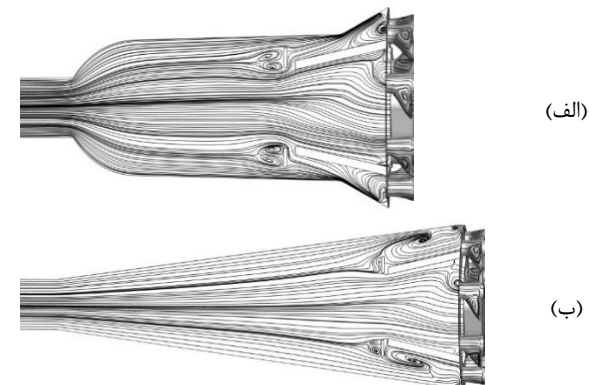
پس از این شبیه سازی و آشکار شدن افزایش دما در بخشی از سرمشعل تصمیم بر ارتقا مشعل گرفته شد. پس از انجام بررسی‌های لازم، ارتقا مشعل با تغییر هندسه آن انجام شد. نتایج مقایسه شبیه سازی مشعل قبل و بعد از تغییر هندسه در ادامه آمده است.

مشعل مورد بررسی از نوع مشعل‌های سرعت بالا می‌باشد. در شکل ۹ توزیع سرعت خروج محصولات احتراق از مشعل نشان داده شده است. بیشترین مقدار سرعت خروجی محصولات احتراق از دهانه مشعل ۲۳۷ m/s بوده است که با تغییر در هندسه مشعل این مقدار به بیش از ۲۷۰ m/s رسیده است.



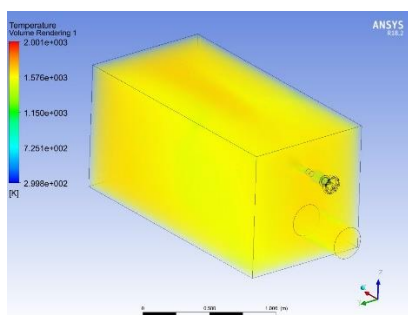
شکل ۹: توزیع سرعت درون مشعل و کوره (الف) هندسه اولیه مشعل (ب) پس از تغییر هندسه مشعل

علت این افزایش سرعت را می‌توان در خطوط جریان درون مشعل جستجو کرد. با توجه به تغییر هندسه مشعل، به علت عدم وجود انحنای در پدنه سرمشعل، انرژی سیال صرف چرخش محصولات احتراق داخل مشعل نمی‌شود و محصولات احتراق با انرژی بالاتری از دهانه خارج خواهد شد. خطوط جریان داخل مشعل در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

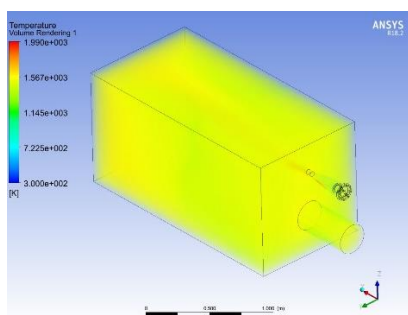


شکل ۱۰: خطوط جریان داخل مشعل (الف) هندسه اولیه مشعل (ب) پس از تغییر هندسه مشعل

توزیع حرارت داخل مشعل و کوره (برحسب کلین) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل در هر دو حالت با توجه به سرعت بالا بودن مشعل و محل مناسب قرارگیری دودکش، یکنواختی حرارتی مناسبی در کوره مشاهده می‌شود که این یکنواختی حرارتی پس از تغییر هندسه مشعل بهبود نیز یافته است. همچنین، حداکثر دمای شعله پس از تغییر هندسه مشعل کاهش یافته است. این کاهش دما و افزایش یکنواختی دمایی درون کوره پس از تغییر هندسه مشعل، ناشی از آن است که با تغییر ایجاد شده در مشعل، میزان تشعشع شعله بالاتر رفته در نتیجه دمای شعله پایین تر و انتقال حرارت به اطراف بالاتر رفته است که به نوبه خود موجب افزایش یکنواختی دمایی درون کوره شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: توزیع دما داخل مشعل و کوره (الف) هندسه اولیه مشعل (ب) پس از تغییر هندسه مشعل

همچنین، یکنواختی حرارتی مناسب درون مشعل و کوره قبل و بعد از تغییر هندسه مشعل ناشی از چرخش مناسب محصولات احتراق درون کوره است که این امر از خطوط جریان محصولات احتراق درون کوره پیداست. خطوط جریان محصولات احتراق درون مشعل و کوره در شکل

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر تغییر هندسه بر کیفیت احتراق یک مشعل صنعتی با حداکثر ظرفیت ۲۲۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. نتایج آزمون تجربی نشان داد پس از تغییر هندسه مشعل، ساختار شعله بهبود یافته و طول شعله خارج سرمشعل کوتاه تر شده است. همچنین، رنگ شعله نشان دهنده میزان بالاتر تشعشع حرارتی است. نتایج اندازه‌گیری محصولات احتراق توسط دستگاه لئالایزر Testo350 مقادیر آلاینده‌های مشعل قبل و بعد از تغییر هندسه با شرایط آزمون یکسان اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل، نشان دهنده کاهش چشمگیر ناکس و مونوکسید کربن در خروجی مشعل است. نتایج عددی نشان داد سرعت خروج محصولات احتراق از دهانه مشعل و یکنواختی حرارتی درون کوره پس از تغییر هندسه مشعل افزایش یافته و بیشینه درجه حرارت شعله کاهش یافته است. علاوه بر این خطوط جریان داخل مشعل نشان دهنده چرخش مناسب محصولات احتراق درون مشعل برای ایجاد یکنواختی حرارتی مناسب است.

فهرست علائم

Da	عدد دامکله-.
P	فشار، Pa
Re	عدد رینولدز،-
Sc	عدد اشمیت،-
T	دما، K
V	سرعت، m/s
γ	کسر جرمی،-
	فهرست علائم یونانی
ρ	چگالی، kg/m^3
Φ	تنش ویسکوز، Pa

فهرست مراجع

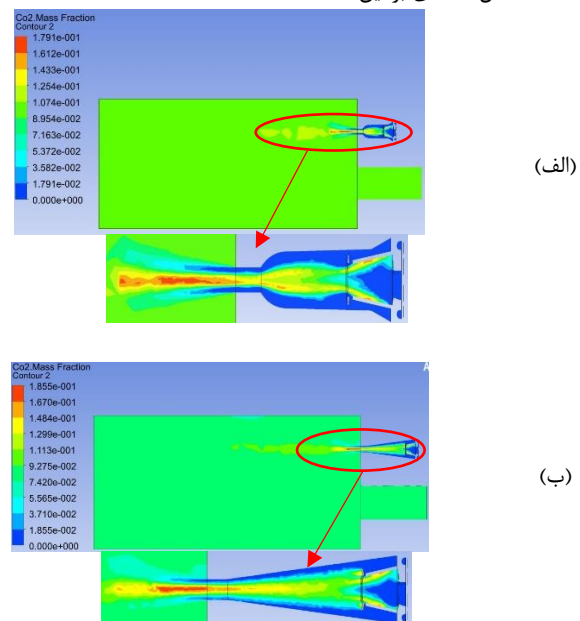
- [۱] پایان نامه کارشناسی ارشد، عزیزی تقی، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی سه بعدی احتراق یکی از مشعل‌های بویلر نیروگاه حرارتی شرکت ذوب آهن اصفهان، دانشگاه کاشان.
- [2] Chen, J.Y. and Chang, W.C., 1996, "Flamelet and PDF modeling of CO and NOx emissions from a turbulent, methane hydrogen jet nonpremixed flame", In *Symposium (International) on combustion*, 26, 2, 2207-2214 .
- [۳] پایان نامه کارشناسی ارشد، حامد علیزاده نودهی، ۱۳۸۹، "احتراق پیش آمیخته در مشعل‌های سرعت بالا"، دانشگاه کاشان.
- [4] Williams, T., Shaddix, C., Schefer, R.W, 2007, "Effect of syngas composition and CO2-diluted oxygen on performance of a premixed swirl-stabilized combustor", *Combustion Science and Technology*, 180, 1, 64-88.
- [5] Józwiak, P., Hercog, J. and Badyda, K., 2020, "Numerical study of natural gas and low-calorific syngas co-firing in a pilot scale burner", *Energy*, 211, 118552.
- [۶] آرشیو فنی، شرکت تولیدی و مهندسی شعله‌صنعت.
- [7] Knio, O.K., Najm, H.N., and Wyckoff, P.S., 1999, "A semi-implicit numerical scheme for reacting flow: II. Stiff, operator-split formulation.", *Journal of Computational Physics*, 154, 2, 428-467.
- [8] Chai, J.C., Lee, H.S. and Patankar, S.V., 1994, "Finite volume method for radiation heat transfer", *Journal of thermophysics and heat transfer*, 8, 3, 419-425.

۱۲ نشان داده شده است. تغییر هندسه مشعل، در چرخش محصولات احتراق درون کوره تغییر قابل توجهی ایجاد نکرده است.



شکل ۱۲: خطوط جریان چرخش محصولات احتراق درون مشعل و کوره (الف) هندسه اولیه مشعل (ب) پس از تغییر هندسه مشعل

به منظور بررسی کیفیت احتراق به صورت عددی و همچنین صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی، مقدار ناکس خروجی مشعل در قبل و بعد از خروجی مشعل در شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد و مقدار ۵۹/۵ ppm و ۲۹/۴ ppm به دست آمد که با نتایج آزمون تجربی تطابق مطلوبی دارد. همچنین میزان کسر جرمی دی اکسید کربن در شبیه‌سازی برای هر دو مشعل اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که این مشعل، درون سوز است و تولید دی اکسید کربن از درون سرمشعل آغاز شده است. همچنین با تغییر هندسه و افزایش طول سرمشعل، مشعل درون‌سوز تر شده است. این امر نکته مثبتی در عملکرد احتراقی مشعل محسوب می‌شود زیرا باعث کاهش چشمگیر ناکس و مونوکسید کربن خواهد شد. نتایج آنالیز تجربی محصولات احتراق و کاهش چشمگیر ناکس و مونوکسید کربن پس از تغییر هندسه مشعل شاهدهی بر این مدعا است.



شکل ۱۳: توزیع محصولات احتراق (دی اکسید کربن) - (الف) هندسه اولیه مشعل (ب) پس از تغییر هندسه مشعل