



## روش های کاهش NOx در مشعل ها و انواع مشعل های Low NOx

کریم محرابی

شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا، کارشناس مهندسی آب، توسعه و بهبود فرایندهای تولید

حسین کوهستانی

شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا، کارشناس مهندسی و برنامه ریزی مواد تولید

مهدی کشوری

شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا، کارشناس مهندسی صنایع و برنامه ریزی تولید

### چکیده

در دهه گذشته، به دلیل افزایش آلودگی هوا و تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، کشورهای مختلف قوانین سخت‌گیرانه‌تری را برای کنترل آلاینده‌های خروجی صنایع و خودروها اجرا کرده‌اند. در فرایند احتراق در دستگاه‌های حرارت ساز علاوه بر تشکیل آلوده کننده‌هایی چون CO و CO<sub>2</sub>، گاز آلوده کننده دیگری نیز شکل می‌گیرد که محصولی از واکنش نیتروژن هوا و اکسیژن در درجه حرارت شعله است و به طور کلی به صورت NOx نشان داده می‌شود. در مشعل‌ها، هر چه درجه حرارت شعله بیشتر باشد، مقدار NOx بیشتر خواهد بود. مشعل‌های Low NOx با مدیریت فرایند احتراق سوخت و هوا شرایطی فراهم می‌کنند که میزان تولید آلاینده‌های آنها کاهش پیدا کند. در طی این فرایند، رسیدن به پایداری و ابعاد شعله مناسب یک چالش می‌باشد که نیاز به طراحی مناسب دارد. به همین دلیل، در این مقاله به بررسی انواع کاربرد های مشعل‌های Low NOx و روش‌های کاهش NOx در مشعل‌های با کاربری‌های مختلف خواهیم پرداخت.

واژگان کلیدی: مشعل، برنر، Low NOx، احتراق، سوخت



## مقدمه

حدود ۸۸٪ انرژی دنیا، از احتراق سوخت‌های فسیلی مثل نفت، گاز طبیعی و ذغال سنگ بدست می آید. در احتراق سوخت‌های فسیلی، به علت دمای بالا، رادیکال‌های نیتروژن و اکسیژن تشکیل می شوند که با هم واکنش داده و اکسید نیتروژن تولید میشود. اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) نه تنها آلاینده هوا هستند، بلکه میتوانند با هوا واکنش داده و ازن تولید کنند، یا با مولکول‌های آب واکنش دهند و بارانهای اسیدی تولید شود، پس میتوانند منبعی برای ایجاد آلاینده های ثانویه هم باشند.

اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) یکی از آلاینده‌های غالب در دیگ های بخار زغال سنگ هستند. زیرا  $\text{NO}_x$  می تواند سلامت انسان را به شدت به خطر بیندازد و باعث باران اسیدی شود، تقاضای عمومی جهت کاهش انتشار  $\text{NO}_x$  افزایش یافته است. بسیاری از کشورها محدودیت های جدید انتشار  $\text{NO}_x$  را اعلام کرده اند. در چین، برای تمام نیروگاه های سوخت زغال سنگ بعد از سال ۲۰۱۴، انتشار مجاز  $\text{NO}_x$  باید کمتر از ۱۰۰ میلی گرم ( $6\% \text{O}_2$ )  $\text{NO}_2/\text{Nm}^3$  باشد. در اتحادیه اروپا، انتظار می رود برای نیروگاه های بیش از ۵۰۰ مگاوات تا سال ۲۰۱۶ حد انتشار  $\text{NO}_x$  به ۲۰۰ میلی گرم ( $6\% \text{O}_2$ )  $\text{NO}_2/\text{Nm}^3$  کاهش یابد ( $\text{NO}_x$ , Wikipedia).

مشعل های Low  $\text{NO}_x$  به مشعل هایی اطلاق می شود که در طی فرآیند احتراق سوخت، انتشار  $\text{NO}_x$  پایینی دارند. استفاده از مشعل های کم  $\text{NO}_x$  می تواند انتشار اکسیدهای نیتروژن را در طی فرآیند احتراق کاهش دهد.

اکسیدهای نیتروژن تولید شده در فرآیند احتراق عمدتاً  $\text{NO}$  و  $\text{NO}_2$  هستند و این دو اکسید نیتروژن عموماً به عنوان اکسیدهای نیتروژن  $\text{NO}_x$  شناخته می شوند. تعداد زیادی از نتایج تجربی نشان می دهد که اکسید نیتروژن ساطع شده از دستگاه احتراق عمدتاً  $\text{NO}$  است که به طور متوسط حدود ۹۵٪ را شامل می شود، در حالی که  $\text{NO}_2$  فقط حدود ۵٪ را تشکیل می دهد.

$\text{NO}$  تولید شده توسط احتراق سوخت عمومی عمدتاً از دو جنبه ناشی می شود: یکی اکسیداسیون نیتروژن در هوای مورد استفاده برای احتراق (هوای احتراق). دیگری تجزیه حرارتی و اکسیداسیون مجدد نیتروژن موجود در سوخت در طی فرآیند احتراق است. در اکثر دستگاه های احتراق، اولی منبع اصلی  $\text{NO}$  است. ما این نوع  $\text{NO}$  را " $\text{NO}$  واکنشگر حرارتی"، دومی را " $\text{NO}$  سوخت" و " $\text{NO}$  سریع" می نامیم.

$\text{NO}$  تشکیل شده در طی احتراق می تواند با محصولات میانی حاوی اتم های نیتروژن واکنش دهد تا  $\text{NO}$  به  $\text{NO}_2$  کاهش یابد. در واقع، علاوه بر این واکنش ها،  $\text{NO}$  می تواند با ترکیبات مختلف حاوی نیتروژن نیز  $\text{NO}_2$  تولید کند. هنگامی که واکنش در دستگاه احتراق واقعی به تعادل شیمیایی می رسد، نسبت  $[\text{NO}_2]/[\text{NO}]$  بسیار کوچک است، یعنی تبدیل  $\text{NO}$  به  $\text{NO}_2$  بسیار کم است و می توان آن را نادیده گرفت.

## فن آوری احتراق برای کاهش $\text{NO}_x$

$\text{NO}_x$  از طریق احتراق تولید می شود و روش احتراق و شرایط احتراق تأثیر بیشتری بر تولید  $\text{NO}_x$  دارد. بنابراین می توان از بهبود فناوری احتراق برای کاهش  $\text{NO}_x$  استفاده کرد. راه های اصلی به شرح زیر است:

سوخت‌هایی با محتوای نیتروژن کمتر، از جمله نیترات زدایی سوخت و تبدیل به سوخت‌های کم نیتروژن را انتخاب کرد.

کاهش ضریب هوای اضافی و سازماندهی احتراق بیش از حد برای کاهش غلظت اکسیژن در اطراف سوخت.

در مورد هوای اضافی کمتر، پیک دما را کاهش داده تا " $\text{NO}$  واکنش حرارتی" کاهش یابد.

در صورت غلظت کم اکسیژن، زمان ماندن مواد احتراق در نقطه اوج جلوی شعله و منطقه واکنش افزایش داده شود. روش‌های خاصی که معمولاً برای کاهش تشکیل و انتشار  $\text{NO}_x$  استفاده می‌شوند عبارتند از: احتراق مرحله‌ای، احتراق مجدد، احتراق با اکسیژن کم، احتراق انحراف غنی و چرخش مجدد گاز دودکش. شکل ۱، شماتیکی از یک برنر Low- $\text{NO}_x$  می باشد.

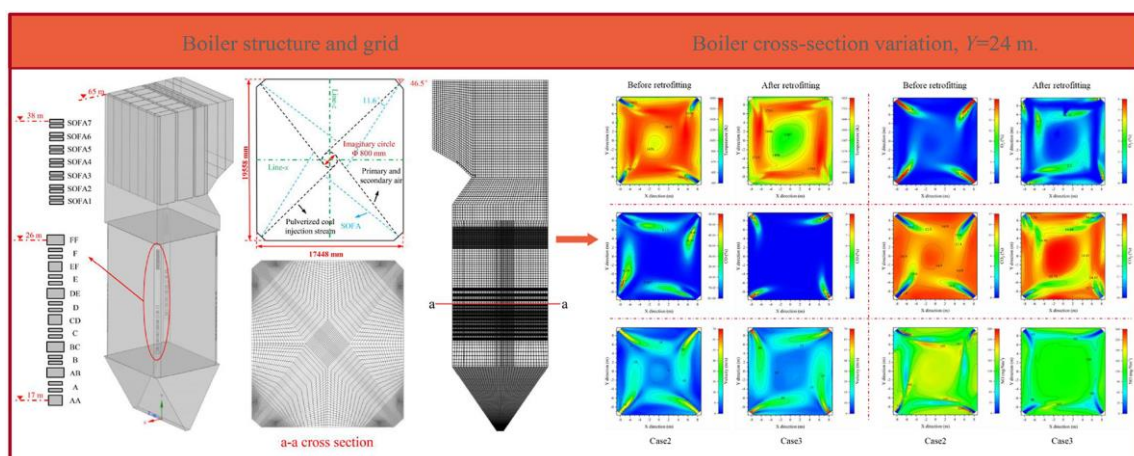


شکل ۱. شماتیک برنر Low-NOx

در ادامه به مطالعات مختلفی که در این حوزه توسط محققان انجام شده است خواهیم پرداخت. (Wu et al, 2020) برای دستیابی به محدودیت های دقیق انتشار NOx، ترکیبی از دو یا چند تکنیک کاهش NOx باید از استفاده شود. در حال حاضر، تکنیک های کاهش NOx تجاری موجود عبارتند از مرحله بندی هوا، سوزاندن مجدد، مشعل کم نیتروژن، احیای کاتالیزوری انتخابی (SCR) و انتخابی کاهش غیر کاتالیزوری (SNCR). در میان آنها، هوا مرحله ای، سوزاندن مجدد و مشعل با نیتروژن کم تکنیک های احتراق کم NOx هستند، در حالی که SCR و SNCR فن آوری های کاهش NOx پس از احتراق برای درجات مختلفی از قابلیت کنترل NOx استفاده می شوند.

انتشار دیگ بخار منابع اصلی انتشار اکسید نیتروژن اتمسفریک (NOx) می باشد. فراتر از این محدوده انتشار می تواند دیگ را خاموش کند و باعث خسارات مالی شود. (Guoijia et al, 2023)، یک روش احتراق پیش گرم شده جدید برای جلوگیری از گذشتن حد NOx دیگ های بخار زغال سنگی در بار های کم را پیشنهاد داد. این مطالعه شبیه سازی احتراق داخلی مشعل و یک بویلر شعله ای ۶۰۰ مگاوات مماس دیگ با استفاده از روش پیش گرمایش زغال سنگ پودر شده بود که الگوهای تولید گاز سنتز پس از پیش گرم شدن زغال سنگ پودر شده، اثرات ویژگی های جریان، و تغییرات در NOx و محتوای کربن نسوخته تحت نسبت های مختلف پیش گرمایش را بررسی می کند.

در این مطالعه تحلیل شبکه و ساختار بویلر و متغیر های دخیل مطابق شکل ۲، تحلیل و ارزیابی شد.



شکل ۲. شبکه و ساختار بویلر و متغیر های دخیل



نتایج آنها نشان داد که مشعل احتراق داخلی دارای اثر پیش گرمایش پایدار است. کسر حجمی  $\text{H}_2$  و  $\text{CO}$ ،  $\text{CH}_4$  به ترتیب 0.95%، 12.7% و 0.8% بود.

در مجله (Power, 1993)، ریچارد استورم به بررسی بهینه سازی فرایند احتراق بویلر های با استفاده از مشعل های Low-NOx پرداخت. مطابق این مطالعه، دستیابی به احتراق بهینه با استفاده از مشعل های Low-NOx نیازمند فرایند های متعددی می باشد.

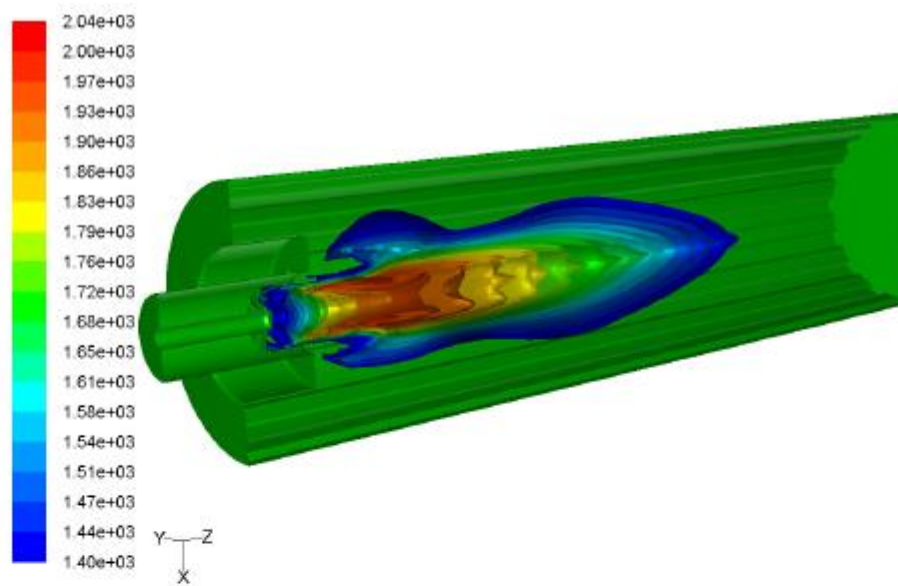
- گاز خروجی کوره باید اکسید شود، معمولاً ۳ درصد اکسیژن بیشتر.
- خلوص سوخت می بایست بیشتر از ۵۲ درصد باشد و از ۲۰۰ مش بیشتر و کمتر از ۰.۵ درصد آن نیز در ۵۰ مش باقی بماند.
- توزیع سوخت باید در محدوده  $\pm 5\%$  تا  $\pm 10\%$  باشد.
- جریان هوای اولیه (PA)، یک شیب مشخص را باید دنبال کند، معمولاً نسبت هوا/سوخت 1.8:1 در بار های پودر شده بالا، با ترانس های در محدوده  $\pm 5\%$  یا بهتر.

در یک مطالعه دیگر، (Marek et al, 2007) به ارزیابی طراحی برنر های Low-NOx با CFD پرداختند. یک ست شامل ۲۷ متغیر برای شناسایی هندسه بهینه نازل های سوخت ثانویه از یک برنر آزمایشی با تولید NOx حداقل معرفی شدند. مدل محاسباتی نرم افزار FLUENT جهت محاسبات CFD با استفاده از مدل ها و الگوریتم ها انجام گردید و مش محاسباتی با نرم افزار GAMBIT مطابق شکل ۳ انجام گردید.

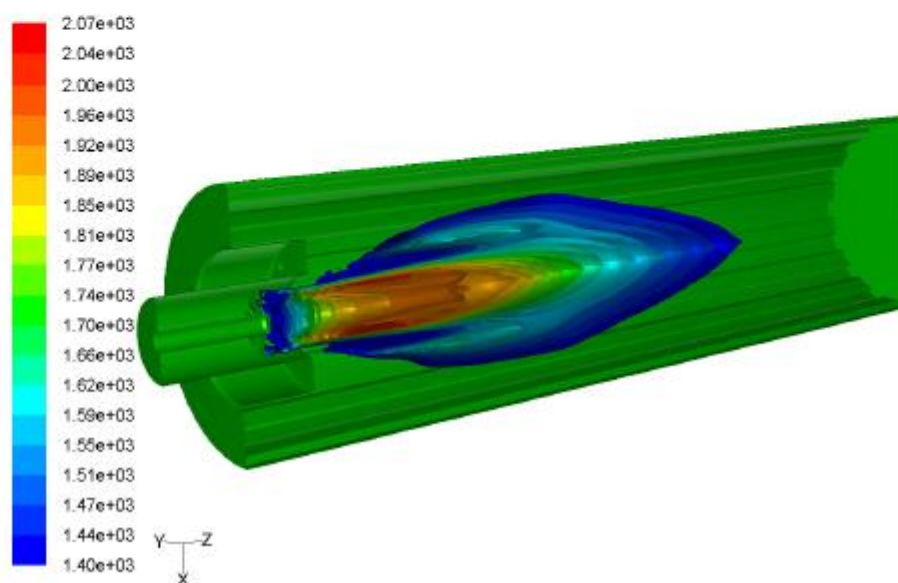


شکل ۳. مدل هندسی (برش ۱۸۰ درجه جهت دید بهتر)

در نهایت در این پژوهش مطابق نتایج تحلیل در شکل ۴، مشخص شد که اشکال شعله ها به صورت قابل توجهی متفاوت است. این به دلیل چرخش نازل های سوخت ثانویه می باشد. حداکثر دما برای جایگزین ۱ 2040K و برای جایگزین ۴ نیز 2074K بود. در مقایسه نرخ انتقال حرارت کل گذرا از پوسته محفظه احتراق ابعاد مشابهی بدست آمد - 632kW برای جایگزین ۱ و 624kW برای انتخاب ۴.



Alternative 1 (slewing 45°)



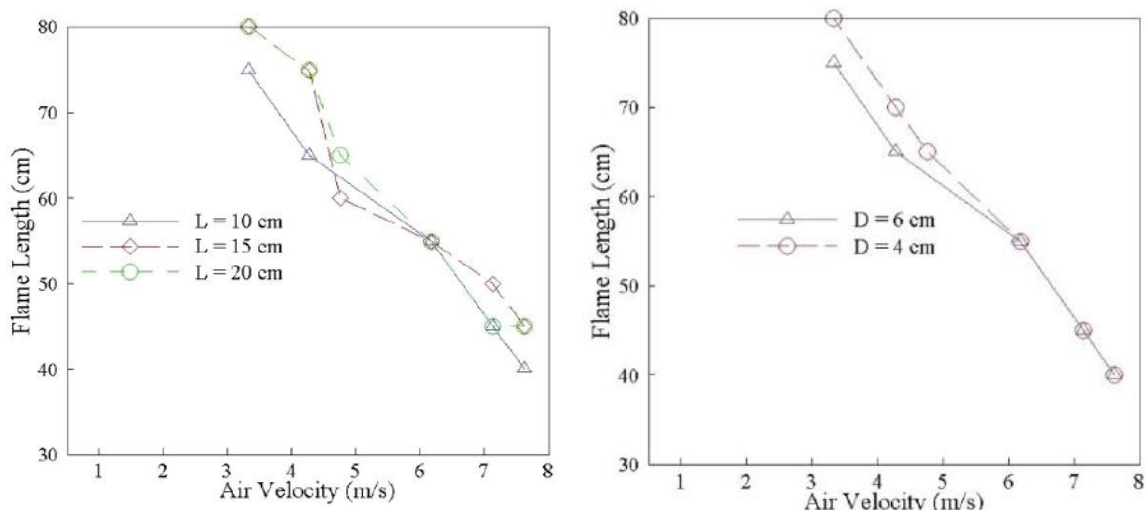
Alternative 4 (slewing 90°)

شکل ۴. اشکال شعله برنر

طول شعله، تولید آلاینده های  $\text{CO}$  و  $\text{NO}_x$  و پایداری شعله در یک مشعل غیر آمیخته، توسط (عبدالمهدی و همکاران، ۱۳۹۲) مطالعه و مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه در یک سری از آزمون ها از سر مشعل های با قطر ۴، ۶ و ۸ سانتی متر و طول یکسان ۱۰ سانتی متر و در سری دیگر از سر مشعل های با طول های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متر و قطر داخلی یکسان ۶ سانتی متر استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مطابق شکل ۵ با کاهش قطر سر مشعل پایداری شعله افزایش می یابد و شعله در نسبت هم ارزی کوچکتری خاموش گردید. همچنین مشخص شد که با افزایش قطر سر مشعل مقدار غلظت آلاینده  $\text{NO}_x$  کاهش پیدا می کند. علاوه بر

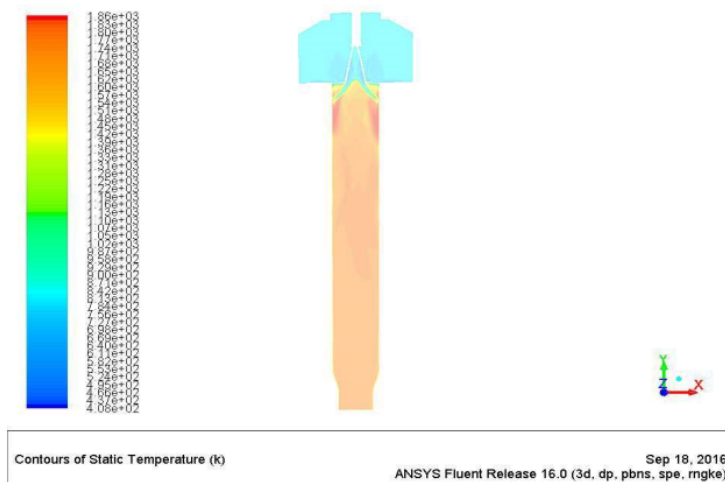


این مقدار دمای اندازه گیری شده گازهای خروجی در دودکش با افزایش قطر سر مشعل در حالت کم سوخت کاهش و در حالت پر سوخت افزایش یافت.



شکل ۵. مقادیر طول شعله بر حسب سرعت هوای ورودی برای سر مشعل با قطر ها و طول های مختلف در توان 7/80 kW

(اسدی و ابراهیمی، ۱۳۹۵) در یک مطالعه دیگر به بررسی عددی کاهش میزان ناکس (NOx) تولیدی در مشعل های پیش مخلوط یک توربین گاز نمونه پرداختند. در این مطالعه، با توجه به اهمیت کاهش آلودگی های زیست محیطی توسط مشعل های نسل جدید موسوم به مشعل های پیش مخلوط به شبیه سازی یک نوع از این مشعل ها (ev burner) و پیش بینی NOx در آن پرداخته شد. در این تحقیق هندسه مشعل در نرم افزار Solidworks رسم، شبکه محاسباتی در نرم افزار Ansys تولید و شبیه سازی جریان نیز در محیط Fluent انجام گردید که مطابق شکل ۵ کانتور دما نیز نمایان می باشد. احتراق به صورت واکنش دو مرحله ای برای مخلوط متان و هوا فرض گردیده شد و مدل احتراقی Finite rate ED استفاده شد. در انتها با توجه به نتایج نمایش داده شده در شکل ۶ مشخص گردید که نتایج حاصل از حل عددی دقیق تر و با دقت بیشتری نسبت به حل عددی مرجع اصلی به دست آورده شده بود و تطبیق دقیق تری با نتایج تجربی حاصل از این مشعل داشت.



شکل ۶. کانتور دمای استاتیک در صفحه میانی





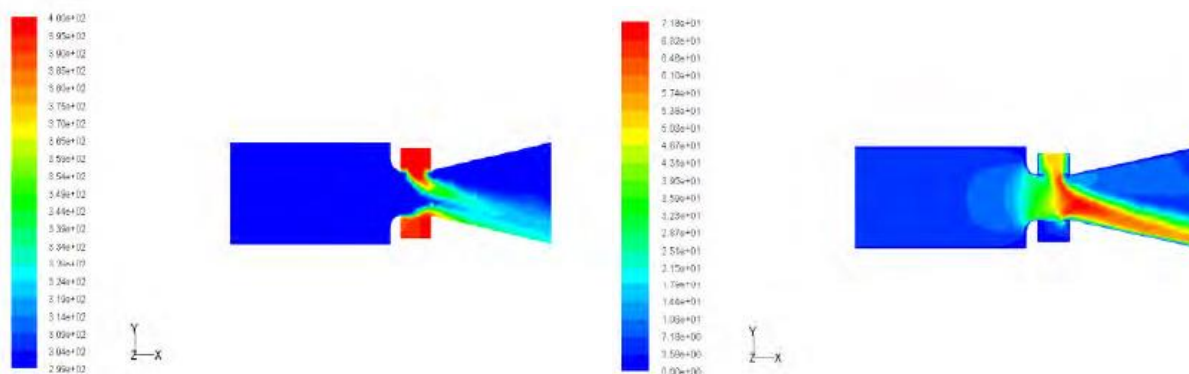
در نهایت مشخص شد که مقدار NOx تولیدی توسط مشعل های پیش مخلوط بسیار کم بوده که این به دلیل آمیختگی مناسب سوخت و هوا قبل از فرایند احتراق و همچنین استفاده از تکنیک احتراق دقیق هوا بود و این ویژگی اصلی این نوع مشعل به شمار می رود. به دلیل همین آلودگی پایین امروزه این مشعل ها به دلیل مسائل زیست محیطی بسیار مورد توجه می باشند. یکی دیگر از ویژگی های این مشعل های پایین بودن دمای احتراق نسب به مشعل های نفوذی می باشد که در فرایند ساخت و انتخاب آلیاژ مناسب بسیار حائز اهمیت می باشد.

در راستای کاهش آلاینده NOx، به خصوص در مول مقیاس موجک تولید همزمان برق و حرارت (CHP) با درایورهای دوگانه سوز (گازوئیلی و گازسوز)، (گودینی و همکاران، ۱۳۹۴) به این امر با استفاده از سیستم EGR پرداختند. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Solidworks طرح اولیه انجام و در نهایت تجزیه و تحلیل CFD با استفاده از نرم افزار Fluent انجام گردید. هندسه بهینه مطابق جدول ۱ در نهایت با استفاده از نرم افزار مشخص و با توجه به شرایط مرزی تعریف شده در پروژه کانتور دما و سرعت مطابق شکل ۷ بدست آمد. در نهایت نیز در این پژوهش نتایج ذیل به دست آمد:

- بهینه سازی و نتوری با استفاده از تجزیه و تحلیل جهت افزایش نرخ EGR در محدوده اعمال بار با از دست دادن حداقل فشار
- مطابق نتایج تجربی مشخص شد که با افزایش اندک نرخ EGR، کاهش بار موتور ایجاد می شود.
- همچنین استفاده از این سیستم در درایور های موجود جهت کاهش آلودگی بسیار مناسب و تاثیر چشمگیری در کاهش NOx دارد.

جدول ۱. هندسه بهینه ونتوری

Contraction Ratio	0.44
Nozzle	Bell-mouth
EGR Entry	d = 10 mm
Diffuser	Expansion Angle $\alpha = 11.85$ Overall Length = 160 mm



شکل ۷. کانتور فشار و دمای توزیع در ونتوری بهینه



## بحث و نتیجه گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته در حوزه ساخت و استفاده از انواع برنر های Low NOx طی سال های گذشته، روز به روز این فناوری در حال پیشرفت می باشد و هدف اصلی آن یعنی کاهش آلودگی های زیست محیطی ناشی از برنر ها نیز در حال رشد چشمگیری می باشد. این سیستم ها موجب افزایش راندمان سیستم های مختلف اعم از نیروگاه ها و سیستم های فرایندی نیز شده است. یکی از چالش های حال حاضر برنر ها که کاهش آلایندگی های تولید شده می باشد، با رسیدن به پایداری و ابعاد شعله مناسب در طی فرایند برنر های Low NOx بهبود یافته و مدیریت فرایند احتراق سوخت و هوا را فراهم می کند. مطابق مطالعات انجام شده در حوزه برنر های Low NOx، مشخص شد که تکنیک های کاهش NOx موجود شامل مرحله بندی هوا، سوزاندن مجدد، مشعل کم نیتروژن، احیای کاتالیزوری انتخابی (SCR) و انتخابی کاهش غیر کاتالیزوری (SNCR) می باشد که در میان آنها، هوا مرحله ای، سوزاندن مجدد و مشعل با نیتروژن کم تکنیک های احتراق کم NOx هستند، در حالی که SCR و SNCR فن آوری های کاهش NOx پس از احتراق برای درجات مختلفی از قابلیت کنترل NOx استفاده می شوند.

همچنین در شبیه سازی های مختلف با نرم افزار های تحلیل سیالات و حرارت و نمونه های تجربی اجرا شده نیز در مطالعات متعدد، اثرات ویژگی های جریان، و تغییرات در NOx و محتوای کربن نسوخته تحت نسبت های مختلف پیش گرمایش به منظور بهینه سازی فرایند احتراق بویلر های با استفاده از مشعل های Low-NOx نیز مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مشخص شد با تغییرات روی قطر سر مشعل و طول های مختلف مطابق تحلیل ها و تست های انجام شده منجر به بهبود راندمان و کاهش آلودگی می شود. همچنین نمایان شد که بهینه سازی و نتوری می تواند در رسیدن به سیستم ایده آل و دلخواه با کاهش آلودگی و افزایش راندمان کمک بسزایی کند.

## منابع

<https://en.wikipedia.org/wiki/NOx>

<https://bntet-burner.com/news/Principle-of-Low-NOx-Burner.html>

Qingwei Li, Qingfeng He, Zhi Liu, Low Nox combustion optimization based on partial dimension opposition-based learning particle swarm optimization, Fuel, Volume 310, Part A, 2022, 122352, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122352>.

Wu, S.; Che, D.; Wang, Z.; Su, X. Nox Emissions and Nitrogen Fate at High Temperatures in Staged Combustion. Energies 2020, 13, 3557. <https://doi.org/10.3390/en13143557>

Richard F Storm, Optimizing Combustion in Boilers With Low-Nox Burner, Storm Engineering & Associates Inc, Power, October, 1993

Marek Šarlej, Pavel Petr, and Petr Stehlík, Low-Nox burner design evaluation by CFD 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE17, V. Plesu and P.S. Agachi (Editors) 2007 Elsevier B.V

سید عبدالمهدی هاشمی، حامد فروزنده جونقانی، مجید نیکفر، ۱۳۹۲ دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی بنیامین اسدی، دکتر رضا ابراهیمی، ۱۳۹۵ دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، دانشکده مهندسی هوافضا  
علی گودینی، علی منشاری، مصطفی مافی، ۱۳۹۴، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، گروه مهندسی مکانیک





## NO<sub>x</sub> reduction methods in burners and different types of Low NO<sub>x</sub> burners

Karim Mehrabi<sup>1</sup>, Mapna Boiler and Equipment  
Engineering and Manufacturing Company, Water  
Engineering, Production Development and  
Improvement expert

Hossein Kohestani, Mapna Boiler and Equipment  
Engineering and Manufacturing Company,  
Production Material Engineering and Planning  
expert

Mehdi Keshvari. Mapna Boiler and Equipment Engineering and Manufacturing Company, Industrial  
Engineering and Production Planning expert

### Abstract

In the last decade, due to the rapid increase of air pollution and the production of greenhouse gases caused by the combustion of hydrocarbon fuels, different countries have applied stricter laws to control the emission of greenhouse gases from industries and cars. In the process of combustion in heating devices, in addition to the formation of pollutants such as CO and CO<sub>2</sub>, another pollutant gas is also formed, which is the product of the reaction of nitrogen and air oxygen at the flame temperature and is generally shown as NO<sub>x</sub>. In burners, the higher the flame temperature, the higher the amount of NO<sub>x</sub>. By managing the fuel and air combustion process, Low NO<sub>x</sub> burners provide conditions to reduce their pollutant production. During this process, achieving stability and appropriate flame dimensions is a challenge that requires proper design. For this reason, in this article we will examine different applications of Low NO<sub>x</sub> burners and methods of reducing NO<sub>x</sub> in burners with different methods.

**Keywords:** Burner, Low NO<sub>x</sub>, Combustion, Fuel