

بررسی تجربی تأثیر استفاده از ریتادرها در راندمان حرارتی در مشعل و دیگ حرارتی پلت سوز

حمیدرضا رحمانی^{۱*}، افشین امامی بر سری^۲، جواد لطیفی پشتنهانی^۳، هادی بابایی^۴

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران، hamidreza.rahmani5905@iau.ac.ir

۲- کارشناسی مهندسی مکانیک، مدیر واحد مهندسی، شرکت صنعتی شوفازکار، تاکستان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، رییس واحد تحقیق و توسعه، شرکت صنعتی شوفازکار، تاکستان، ایران

۴- کارشناسی مهندسی مکانیک، کارشناس واحد تحقیق و توسعه شرکت صنعتی شوفازکار، تاکستان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷)

چکیده: با افزایش تقاضا برای سامانه‌های گرمایشی جایگزین سوخت‌های فسیلی، دیگ‌های پلت سوز به دلیل کارایی بالا و سازگاری زیست محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، اثر استفاده از ریتادر در به عنوان یک عامل مقاومتی در مسیر گازهای خروجی، بر راندمان حرارتی و کیفیت احتراق یک دیگ آب گرم پلت سوز صنعتی، به صورت تجربی بررسی شده است. آزمایش‌ها در سه حالت مختلف شامل نصب ۱، ۲ و ۳ عدد ریتادر انجام شده و متغیرهایی نظیر دمای دودکش، راندمان حرارتی، درصد مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن و افت فشار در سیستم اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان دادند که استفاده از سه ریتادر، دمای گازهای خروجی را از ۲۵۰ به ۱۹۰ درجه سلسیوس کاهش داده و راندمان حرارتی را از ۷۰ در صد به ۷۳ در صد افزایش داده است. همچنین، غلظت مونوکسید کربن تا ۵۵ در صد کاهش یافته است. نوآوری پژوهش در ارائه روشی ساده و صنعتی برای بهبود راندمان با استفاده از تجهیزات مکانیکی قابل پیاده سازی در صنایع حرارتی است. تحلیل آماری نتایج و بررسی پایداری عملکرد نیز در راستای افزایش قابلیت تعمیر پذیری نتایج انجام شده است.

کلیدواژگان: مشعل و دیگ حرارتی پلت سوز، افزایش راندمان حرارتی، ریتادر

مقدمه

امروزه استفاده از دیگ‌ها و مشعل‌های پلت سوز در مناطقی که با کمبود منبع فسیلی روبرو هستند رو به افزایش است این دیگ و مشعل‌ها با توجه به سهولت استفاده و همچنین حمل و نقل آسان و استفاده در هر منطقه و بدون نیاز به آب، گاز و برق در بسیاری از مناطق دارای کاربرد زیادی است همچنین سوخت ارزان این تجهیزات باعث استفاده مقرون به صرفه شده است. این پژوهش به تاثیر استفاده از ریتادرها^۱ در افزایش راندمان حرارتی دیگ‌های پلت سوز می‌پردازد.

مشعل‌های پلت سوز نوعی از مشعل‌های گرمایشی هستند که به جای سوخت‌های فسیلی مانند گاز یا گازوئیل، از پلت‌های زیستی به عنوان منبع سوخت استفاده می‌کنند. پلت‌ها معمولاً از ضایعات فشرده شده چوب، کشاورزی یا سایر مواد زیست توده‌ای تولید می‌شوند و به دلیل دارا بودن چگالی انرژی مناسب، سوختی مقرون به صرفه و دوستدار محیط زیست به شمار می‌روند.

¹ Biomass Pellets

این مشعل‌ها از مکانیزم خاصی برای تغذیه خودکار پلت، احتراق کنترل شده و تنظیم دمای شعله برخوردارند و در انواع سیستم‌های گرمایشی مانند دیگ‌های آب گرم، بخاری‌ها و کوره‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین مزایای مشعل‌های پلت‌سوز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، کاهش تولید آلاینده‌ها، قابلیت استفاده در مناطق فاقد گاز یا برق و هزینه عملیاتی پایین‌تر در بلند مدت. با توجه به شرایط زیست محیطی و اقتصادی، این مشعل‌ها گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی با مشعل‌های سنتی در صنایع و ساختمان‌ها محسوب می‌شوند.

ریتارد را به تجهیزاتی گفته می‌شود که در مسیر گازهای داغ خروجی دیگ‌های آب گرم قرار می‌گیرند تا سرعت جریان گاز را کاهش داده و تبادل حرارت را بهبود بخشند. استفاده از این تجهیزات می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر راندمان دیگ آب گرم داشته باشد. ریتاردها باعث افزایش زمان تماس گازهای داغ با سطح داخلی دیگ می‌شوند. این امر به انتقال بیشتر حرارت از گازهای احتراق به آب داخل دیگ منجر شده و راندمان حرارتی را افزایش می‌دهد. با کاهش سرعت جریان گازهای داغ، زمان بیشتری برای انتقال حرارت به آب فراهم می‌شود. در نتیجه، دمای گازهای خروجی کاهش یافته و میزان هدررفت انرژی به محیط کمتر می‌شود. با افزایش راندمان حرارتی، میزان انرژی مورد نیاز برای گرم کردن آب کاهش می‌یابد. این امر موجب کاهش مصرف سوخت و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش تولید آلاینده‌ها می‌شود. ریتاردها با بهبود فرآیند تبادل حرارت، عملکرد مبدل حرارتی دیگ را ارتقا داده و باعث یکنواخت‌تر شدن دمای آب گرم خروجی می‌شوند.

مطالعات متعددی در حوزه بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و زیست‌محیطی دیگ‌ها و مشعل‌های پلت‌سوز انجام شده‌اند. تمرکز این پژوهش‌ها عمدتاً بر بهبود احتراق، کاهش آلاینده‌ها، و افزایش راندمان از طریق تغییر در طراحی مشعل، تنظیم نسبت هوا به سوخت، یا اعمال سامانه‌های کنترلی پیشرفته بوده است. در ادامه به مهم‌ترین یافته‌ها اشاره می‌شود. باکا و همکاران در سال ۲۰۲۵ به بررسی احتراق پلت‌های کشاورزی در یک مشعل خانگی ۱۸ کیلوواتی پلت سوز پرداختند و تأثیر تنظیم هوا بر عملکرد، آلاینده‌های CO، NO_x، SO₂ و رفتار خاکستر را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تنظیم جریان هوا به‌تنهایی قادر به جلوگیری کامل از ذوب خاکستر نیست، اما نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد و کاهش آلاینده‌ها دارد. اندازه‌گیری‌هایی در زمینه انتشار گازهای CO، NO_x و SO₂ و دماهای بستر سوخت و شعله انجام شد. تغییر در میزان هوا منجر به کاهش قابل توجه عملکرد سیستم، به‌ویژه در پلت صنوبر (کاهش تا ۲/۶ کیلووات) شد. پلت یونجه با افزایش قابل توجه CO از ۷۹۴۴ به ۱۲۷۶۴ و NO_x از ۳۰۷ به ۸۵۱ میلی‌گرم بر نرمال متر مکعب مواجه شد. در پلت شبدر نیز افزایش تأمین هوا موجب افزایش SO₂ از ۱۴۷۹ به ۱۶۸۳ میلی‌گرم بر نرمال متر مکعب شد [۱]. سارابون و همکاران در سال ۲۰۲۵ به بررسی سوزاندن زباله شهری پیش‌تفکیک شده (PMSW) همراه با پلت چوب در یک گازی‌ساز نوآورانه پایلوت با فناوری بازسوزی گاز سنتز پرداختند دمای منطقه احتراق به حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید که نشان‌دهنده بهینه‌سازی فرآیند احتراق است. گاز سنتز تولیدی حاوی CO₂ بالا و CO پایین بود و ارزش حرارتی پایینی بین ۲،۷۸-۴،۵۵ MJ/Nm³ داشت. ترکیب PMSW و پلت چوب موجب کاهش هیدروکربن‌های آلیفاتیک، افزایش ترکیبات معطر تک‌حلقه‌ای و افزایش دمای ذوب خاکستر شد. ذرات معلق و CO در محدوده مجاز باقی ماندند و انتشار کربن ۷/۹ برابر کمتر از سوزاندن روباز گزارش شد. این سیستم گازی‌سازی پتانسیل خوبی برای مدیریت پایدار پسماند دارد. [۲] بیلال و باسار در سال ۲۰۲۳ تأثیر طراحی محفظه مشعل با تغییر موقعیت ورودی هوای احتراق در سه نسبت هوای اضافی و سه توان حرارتی مختلف بر عملکرد حرارتی و آلاینده‌ها در اجاق پلت به‌صورت تجربی بررسی کردند. چهار فاصله مختلف برای ورود هوا (۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۷۵ میلی‌متر از کف محفظه) طراحی و آزمایش شدند. نتایج نشان داد بهترین عملکرد حرارتی و آلاینده‌ها در توان ۶-۹ کیلووات، نسبت هوای اضافی $\lambda = 1.7-2.2$ و فاصله ۳۰ میلی‌متر به دست آمد. [۳] استانیستاوسکی و همکاران در سال ۲۰۲۲ رویکردی نوین برای کاهش انتشار CO در گازهای خروجی دیگ‌های پلت‌سوز کوچک مقیاس ارائه دادند. با استفاده از کنترل پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر مدل و کنترل دقیق جریان هوا، بدون نیاز به تغییر در طراحی دیگ، کاهش ۳۵

¹ Retarder

تا ۵۰ درصدی CO حاصل شد. این روش با هزینه پیاده‌سازی پایین، قابلیت کاربرد صنعتی دارد. [۴] ون و همکاران در سال ۲۰۲۱ به مطالعه‌ای پرداختند که، با بهبود جریان و کیفیت هوای ورودی به دیگ پلت چوبی، راندمان حرارتی افزایش یافت. از نازل‌های مخصوص و مولد گردابه برای بهینه‌سازی هوای اولیه و ثانویه استفاده شد و سامانه‌ای برای رطوبت‌زدایی و گرم کردن هوای ورودی با محلول لیتیوم بروماید طراحی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که راندمان حرارتی بین ۲/۸۱ درصد تا ۵/۷۸ درصد نسبت به دیگ‌های معمولی افزایش یافت و کارایی سامانه بهبود یافته تأیید شد [۵]. کاردوزو و همکاران در سال ۲۰۱۴ عملکرد تجربی یک سامانه ترکیبی از مشعل پلت چوبی ۲۰ کیلوواتی با موتور استرلینگ ۱ کیلوواتی بررسی کردند. گرمای جذب‌نشده توسط موتور برای تولید آب گرم استفاده می‌شود. نتایج نشان داد موقعیت قرارگیری موتور استرلینگ نقش کلیدی در جذب گرمای تابشی دارد؛ جابجایی ۵ سانتی‌متری می‌تواند دمای سمت گرم موتور را تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. همچنین، پلت‌های ۸ میلی‌متری گرمای بیشتری به موتور می‌رسانند نسبت به پلت‌های ۶ میلی‌متری. راندمان کلی سیستم به ۷۲ درصد رسید، اما با یکپارچه‌سازی موتور استرلینگ، تلفات حرارتی و شیمیایی کمی افزایش یافت [۶].

مطالعات پیشین به بررسی تغییر طراحی مشعل، نسبت هوا به سوخت، و کنترل کیفیت هوا پرداخته‌اند، اما تاکنون پژوهش جامع تجربی بر تأثیر تعداد ریتاردرها بر عملکرد حرارتی و زیست محیطی دیگ‌های پلت سوز صنعتی انجام نشده است. پژوهش حاضر، با هدف پر کردن این خلأ، به ارزیابی دقیق تأثیر نصب یک تا سه عدد ریتاردر بر متغیرهای کلیدی همچون دمای دودکش، بازده حرارتی، و ترکیب گازهای خروجی می‌پردازد.

در این مقاله تلاش شده است تا با ارائه داده‌های تجربی قابل اتکا، و تحلیل فنی پارامترهای مؤثر، راهکاری عملی و صنعتی برای ارتقاء راندمان و کاهش آلاینده‌های احتراقی معرفی کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه تحقیق و توسعه شرکت صنعتی شوفاژ کار انجام گرفته است. شرکت صنعتی شوفاژ کار بزرگترین طراح و سازنده دیگ‌های آب گرم در ایران است. در این آزمایش از مشعل پلت سوز مدل B-home ساخت شرکت بی مکس ایتالیا استفاده شده است (شکل ۱). این مشعل دارای مکانیزم کنترل شعله و تغذیه خودکار پلت است. مشخصات فنی آن در جدول (۱) ذکر شده است.



Figure 1- Pellet Burner

شکل ۱- مشعل پلت سوز

جدول ۱- مشخصات فنی مشعل پلتسوز
Table 1- Technical specifications of pellet burner

Specification	Value
Thermal Capacity	Max: 34 kW Min: 5 kW
*Pellet Consumption	Max: 7 Kg/h Min: 1 Kg/h
Power Supply	230 V / 50 Hz
Average Consumption	60 W
Start-up Power	170 W
Noise Level	35 dB
Weight	14 Kg

*میزان مصرف محاسبه شده با پلتها دارای گواهینامه UNI EN 14961-2 con P.C.I. 5.2 کیلووات بر کیلوگرم

دیگ پلتسوز مورد استفاده در این گزارش دیگ ۵ پره CSB ساخت شرکت صنعتی شوفاز کار در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مشخصات فنی آن در جدول ۲ ذکر شده است.



Figure 2- Pellet Boiler

شکل ۲- دیگ پلت سوز

جدول ۲- مشخصات فنی دیگ پلت سوز

Table 2- Technical specifications of Pellet Boiler

Model	CSB-3	CSB-4	CSB -5	CSB -6
NO. of Section (Pc's)	3	4	5	6
Coal heating output (kW)	16	26.5	36.4	48
Coal heating output (kcal/h)	13,800	22,800	31,300	41,300
Coal heating output (Btu/h)	55,000	90,000	124,000	164,000
Hardwood heating output (kW)	13	21.2	29.1	38.4
Hardwood heating output (kcal/h)	11,200	18,200	25,000	33,000
Hardwood heating output (Btu/h)	44,000	70,000	97,000	124,000
Pellet heating output (kW)	12.6	20.5	28.4	38
Pellet heating output (kcal/h)	10,800	17,600	24,300	32,500
Pellet heating output (Btu/h)	43,000	70,000	97,000	124,000
Operating temperature (Max °C)	90	90	90	90
Operating pressure (Max bar)	4	4	4	4
Chimney bore (mm)	150	150	150	150
In-Out connections (inch)	2	2	2	2
Water content (Liter)	12.15	15.75	19.35	22.95
Weight (kg)	148	184	220	256
Length (mm)	306	408	510	612
Height (mm)	923	923	923	923
Width (mm)	450	450	450	450

همچنین از تجهیزات زیر برای کنترل و اندازه گیری داده‌های آزمایش استفاده شد. آنالایزر گاز احتراق که ساخت شرکت KIMO (فرانسه) مدل XGA8800 با دقت اندازه‌گیری $\pm 1\%$ برای گازهای CO، CO₂ و O₂، کالیبره شده طبق استاندارد EN 50379 است. این دستگاه یکی از پیشرفته‌ترین دستگاه‌های موجود در دنیا است (شکل ۳).



Figure 3- Gas analysis device

شکل ۳- دستگاه آنالیز گاز

فلومتر دیجیتال ساخت شرکت زینمس آلمان جهت اندازه‌گیری دبی آب عبوری از دیگ با دقت $\pm 0.5\%$ درصد (شکل ۴).

حمیدرضا رحمانی، افشین امامی برسری، جواد لطیفی پشتهانی، هادی بابایی

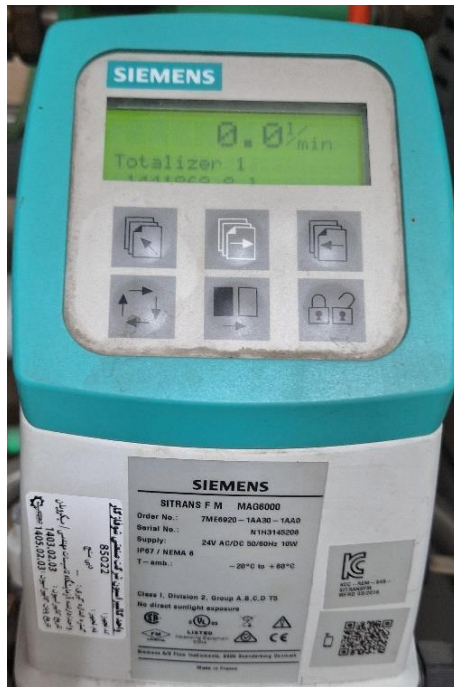


Figure 4- Digital Flow Meter

شکل ۴- دستگاه فلومتر دیجیتال

دماسنج میله ای همراه با نمایشگر دیجیتال نصب شده در ورودی و خروجی دیگ با دقت $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (شکل ۵).



Figure 5- Thermometer with digital display

شکل ۵- دماسنج میله ای همراه با نمایشگر دیجیتال

دستگاه اندازه گیری فشار ساخت شرکت KIMO فرانسه (شکل ۶).



Figure 6- Pressure Measuring Device

شکل ۶- دستگاه اندازه‌گیری فشار

سوخت مصرفی پلت چوبی با قطر ۶ میلی‌متر و رطوبت ۸-۱۰ درصد بود. ارزش حرارتی متوسط آن طبق آنالیز نمونه ۱۸ MJ/kg تعیین شد. جرم مصرفی پلت در هر آزمایش به‌طور دقیق وزن‌کشی و ثبت شد (شکل ۷).



Figure 7- Pellet Fuel

شکل ۷- سوخت مصرفی پلت

طراحی آزمایش‌ها

برای بررسی اثر ریتاردرها بر عملکرد دیگ، آزمایش‌ها در دو گروه اصلی و طبق استاندارد ملی ایران به شماره‌ی ISIRI 4472 به‌صورت تکراری (سه بار برای هر حالت) انجام شدند [۷].

گروه اول بدون ریتاردر:

- دیگ و مشعل در حالت عادی نصب و راه‌اندازی شدند. (شکل ۸). این سیستم قابلیت تغذیه خودکار سوخت را دارد و همچنین با توجه به حسگرهای دمایی که وجود دارد میزان مصرف سوخت و شعله را تنظیم می‌کند (شکل ۹).
- دمایی ورودی و خروجی آب دیگ تنظیم و طبق استاندارد ISIRI 4472 پایدار در اختلاف دمایی 20°C (۴۵→۶۵) نگه داشته شد.

- پلتها با جرم دقیق ۸/۲ کیلوگرم به مدت ۶۰ دقیقه وارد سیستم شدند.
- دمای گازهای خروجی، غلظت CO، CO₂، O₂ و فشار گازهای احتراقی ثبت شد.



Figure 8- Burner & Boiler Installation

شکل ۸- نصب دیگ و مشعل



Figure 9- Burner & Boiler startup

شکل ۹- راه اندازی دیگ و مشعل

گروه دوم با ریتاردر:

- ریتاردرهای چدنی در مسیر گازهای احتراق نصب شدند (شکل ۱۰).
- آزمایش در سه حالت انجام شد: با ۱، ۲ و ۳ عدد ریتاردر
- در هر حالت، کلیه تنظیمات همانند گروه اول حفظ شد و تنها تغییر، تعداد ریتاردرها بود.
- دمای گازهای خروجی، راندمان حرارتی، غلظت گازها و افت فشار ثبت شد.



Figure 10- Cast Iron Retarder

شکل ۱۰- ریتارد در چدنی

۵ - شرایط محیطی و کنترل خطا

- دمای محیط آزمایشگاه در طول انجام آزمون‌ها $25 \pm 1/5$ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۲۸ درصد بود (شکل ۱۱).
- تجهیزات پیش از شروع آزمون، کالیبره و بررسی دقت شدند.
- هر مرحله از آزمایش سه بار تکرار شد و مقدار گزارش شده، میانگین داده‌ها با انحراف معیار \pm مشخص است.
- منابع خطای احتمالی نظیر نوسانات فشار، تهویه و نشست گاز بررسی و کنترل شدند.

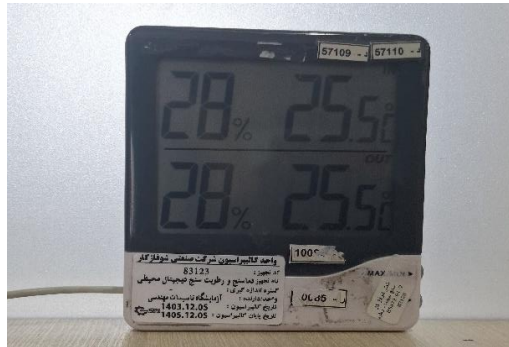


Figure 11- Digital Thermometer and Hygrometer

شکل ۱۱- دماسنج و رطوبت سنج دیجیتال

۶- نحوه محاسبه راندمان حرارتی

راندمان بر اساس معادله زیر محاسبه شد:

$$(1)$$

که در آن:

η = راندمان

m = جرم آب، Kg

c = ظرفیت گرمایی ویژه آب، $KJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

ΔT = اختلاف دما، $^{\circ}C$

E = انرژی حرارتی پلت، Mj

M = جرم پلت استفاده شده، Kg

$$\eta = \frac{m \times c \times \Delta T}{E \times M}$$

که:

جرم آب با استفاده از محاسبه دبی حجمی آب که توسط دستگاه فلومتر اندازه‌گیری شد مقدار ۱۲۴۰ کیلوگرم بدست آمد.
 $M=V \times A$ (۲)

که در آن

V = سرعت سیال، m/s

A = سطح مقطع، M^2

است.

برای برآورد لحظه‌ای توان حرارتی تولیدی دیگ از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

$$Q=m \times c \times \Delta T \quad (۳)$$

که در آن:

Q = توان حرارتی خروجی دیگ، Kw

m = دبی جرمی آب، Kg/s

c = ظرفیت گرمایی ویژه آب، $KJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

ΔT = اختلاف دمای آب ورودی و خروجی، $^{\circ}C$

همچنین ظرفیت گرمایی ویژه آب از جداول ترمودینامیکی مقدار $4,187 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ بدست آمد [8].

اختلاف دمای رفت و برگشت ۲۰ سلسیوس که مقدار $T1=45$ و مقدار $T2=65$ بود عدد ۲۰ است.

انرژی حرارتی پلت‌ها نیز از جداول، عدد ۱۸ مگاژول در نظر گرفته شد [۹].

همچنین جرم پلت‌های استفاده شده در مدت زمان ۶۰ دقیقه ۷ کیلوگرم بدست آمد.

بررسی فشار و افت فشار

برای تحلیل اثر ریتاردرها بر جریان گاز، فشار ورودی و خروجی گازهای احتراقی در دودکش نیز در هر مرحله اندازه‌گیری شد. اختلاف فشار بین ورودی و خروجی به‌عنوان معیار افت فشار در مسیر احتراق ثبت شد.

تحلیل داده‌ها

داده‌های عددی حاصل از هر مرحله، پس از جمع‌آوری، به‌صورت میانگین \pm انحراف معیار گزارش شده و با نرم‌افزار Excel و SPSS تحلیل آماری مقدماتی بر آن‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

محاسبه راندمان مشعل در حالت اول

با توجه به رابطه (۱) مقدار راندمان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{1240 \times 4.187 \times 20}{8.2 \times 18000} \times 100 = 70 \%$$

ذکر این نکته مهم است که راندمان حرارتی در پکیج شوفاژهای دیواری گازسوز به دلیل دارا بودن سیستم‌های هوشمند کنترلی، مبدل حرارتی با جنس مس و غیره حدوداً بین ۸۸ تا ۹۳ درصد متغیر است و این مقدار برای دیگ‌های آب گرم چدنی بین حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد متغیر است ولی در دیگ‌های پلت‌سوز به دلیل پایین‌تر بودن ارزش حرارتی پلت نسبت به گاز طبیعی، راندمان این سیستم‌ها بسیار کم‌تر از سیستم‌های مشابه گرمایشی است.

نصب ریتارد در و نتایج آزمایش دوم

۱. مقایسه راندمان حرارتی

نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان داد که استفاده از ریتارد در مسیر گازهای احتراق، اثر قابل توجهی بر بهبود راندمان حرارتی دیگ پلت‌سوز دارد. نمودار ۱۲ تغییرات راندمان را با توجه به تعداد ریتادرها نشان می‌دهد.

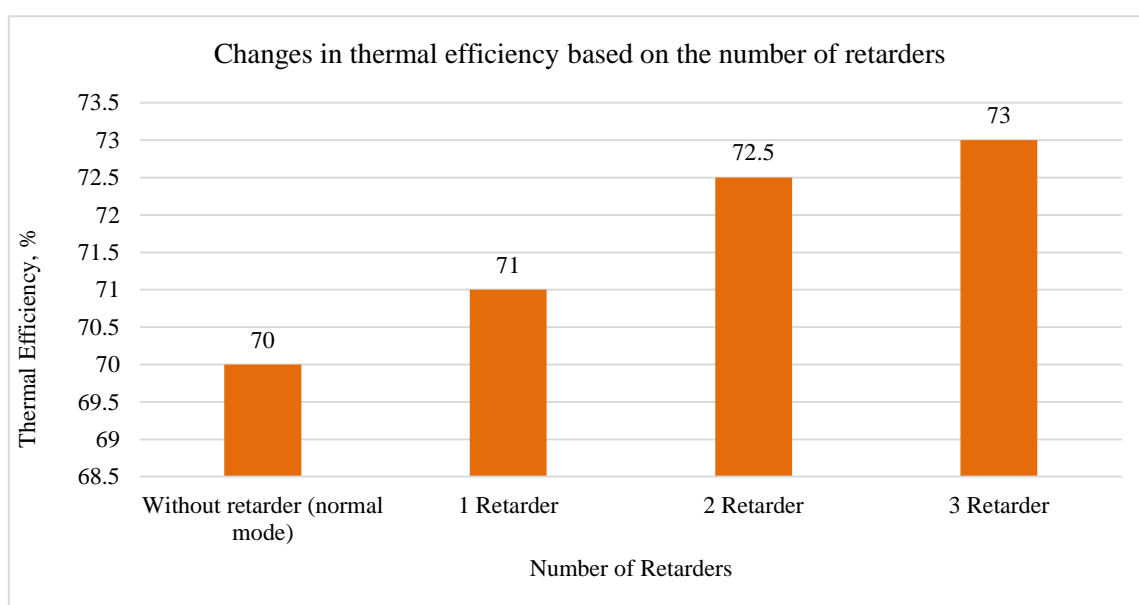


Figure 12- Changes in thermal efficiency based on the number of retarders

شکل ۱۲- تغییرات راندمان حرارتی نسبت به تعداد ریتادرها

افزایش راندمان در حضور ریتارد ناشی از افزایش سطح تبادل حرارت و کاهش سرعت عبور گازهای داغ است. این موضوع منجر به افزایش زمان ماند گازها در محفظه تبادل و انتقال بیشتر انرژی به آب داخل دیگ می‌شود. همانطور که در نمودار ۱۲ مشخص است با اضافه کردن تعداد ۳ عدد ریتارد در مسیر احتراق نسبت به حالت عادی به میزان حدود ۴ درصد افزایش راندمان مشاهده می‌شود.

کاربونو و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی تجربی و تحلیلی به بررسی راهکارهای افزایش راندمان حرارتی در دیگ‌های آب‌گرم پرداختند. هدف آن‌ها بهینه‌سازی طراحی حرارتی و هیدرولیکی این دیگ‌ها از طریق اصلاح پارامترهای جریان، مقاومت هیدرولیکی و سطح انتقال حرارت بود. در این راستا، طراحی جدیدی ارائه شد که تقریباً مشابه ریتادرهای مورد استفاده در این پژوهش است که در مسیر گازهای داغ خروجی نصب شدند. این تغییر باعث افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت و ارتقاء راندمان حرارتی دیگ تا حدود ۱۵ درصد شد [۱۰].

در بخش نظری، با استفاده از تحلیل معادلات نیوتنی جریان بین دو استوانه هم‌محور، توزیع سرعت، افت فشار و ضریب اصطکاک هیدرولیکی در شرایط دمایی مختلف بررسی شد. همچنین ون و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی راندمان

یک دیگ پلت سوز را حدود ۷۳ درصد بدست آوردند که با تغییر در مکان و درصد هوای ورودی راندمان دیگ را تا ۷۸ درصد افزایش داد. این مطالعات با نتایج پژوهش حاضر در تعیین راندمان دیگ و همچنین استفاده از ریتاردرها برای افزایش راندمان حرارتی دیگ همخوانی دارد.

۲. دمای گازهای خروجی

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اتلاف انرژی، دمای گازهای خروجی از دودکش است. با افزایش تعداد ریتاردرها، دمای گازهای خروجی کاهش محسوسی داشت.

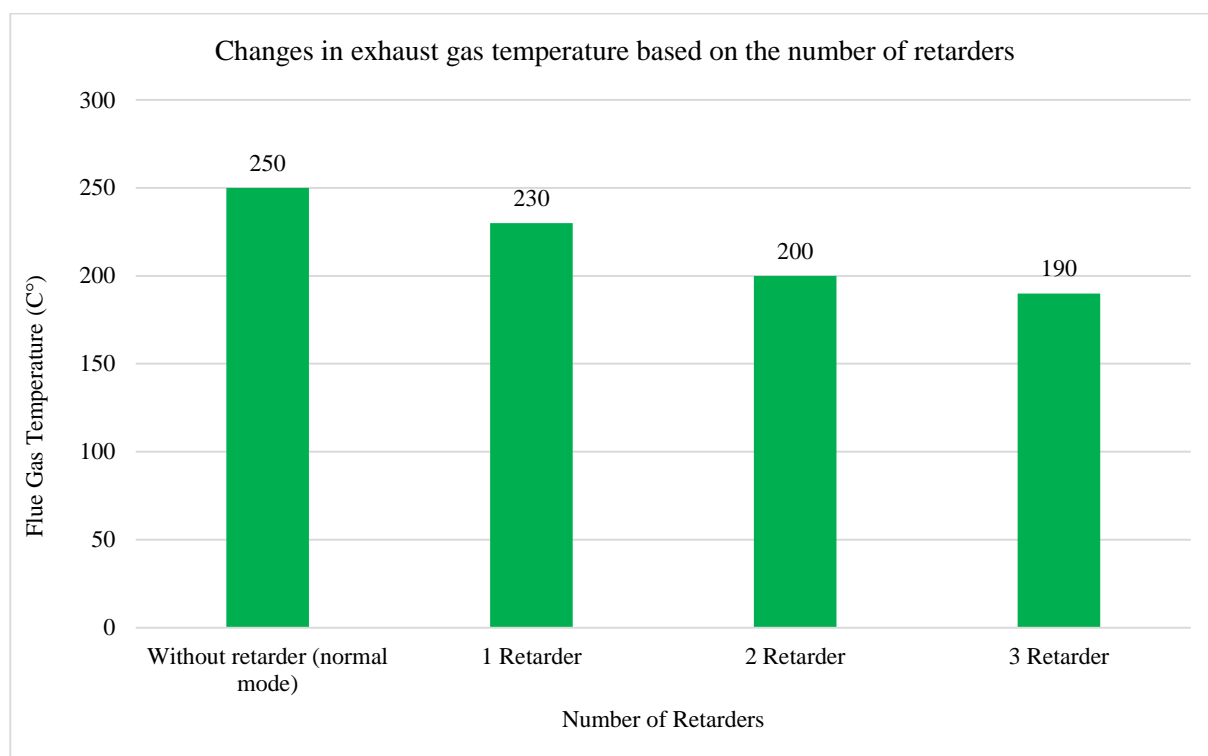


Figure 13- Changes in exhaust gas temperature based on the number of retarders

شکل ۱۳- تغییرات دمای گاز خروجی نسبت به تعداد ریتاردرها

همان‌طور که در نمودار ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد ریتاردرها با دمای گازهای خروجی از ۲۵۰°C به ۱۹۰°C کاهش می‌یابد و اتلاف حرارت از طریق دودکش به‌طور چشمگیری کاهش یافته و انتقال حرارت مؤثرتر به آب دیگ انجام می‌گیرد. این امر مطابق با قوانین دوم ترمودینامیک و تحلیل انرژی، نشان‌دهنده کاهش تلفات غیرمفید انرژی است. چنین کاهش تلفاتی منجر به مصرف کمتر سوخت برای تولید انرژی مشخص شده و در نتیجه، تولید کلی گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد. فیلیپ و همکاران در سال ۲۰۲۳ به مطالعه عددی سه‌بعدی دیگ پلت چوبی کوچک برای بهبود انتشار گازهای دودکش با استفاده از بازیافت گاز دودکش و مرحله‌بندی هوا پرداختند. در این مطالعه، با افزودن ۳۰ درصد گاز دودکش بازیافتی به جریان هوای ثانویه، دمای گازهای خروجی حدود ۳۳ درصد کاهش یافته و راندمان احتراق بهبود یافته است. همچنین، انتشار CO تا ۶۳ درصد و NO_x تا ۲۲ درصد کاهش یافته است [۱۲]. این مطالعه که با نتایج پژوهش حاضر در استفاده از ریتاردرها برای کاهش دمای گازهای خروجی احتراق همخوانی دارد.

¹ Exergy

۳. کیفیت احتراق - تغییرات CO و CO₂ و O₂

استفاده از ریتارد باعث بهبود کیفیت احتراق نیز شده است. این موضوع از کاهش CO و افزایش CO₂ در گازهای خروجی قابل مشاهده است. یکی از پارامترهای کلیدی در مهندسی احتراق، نسبت استوکیومتری هوا به سوخت است. احتراق کامل در صورتی رخ می‌دهد که هوای اضافی در محدوده بهینه نگه داشته شود. در شرایط کمبود هوا، واکنش ناقص رخ داده و تولید CO افزایش می‌یابد. در مقابل، هوای اضافی بیش از حد باعث کاهش دمای شعله و افزایش مصرف سوخت می‌شود [۱۳].

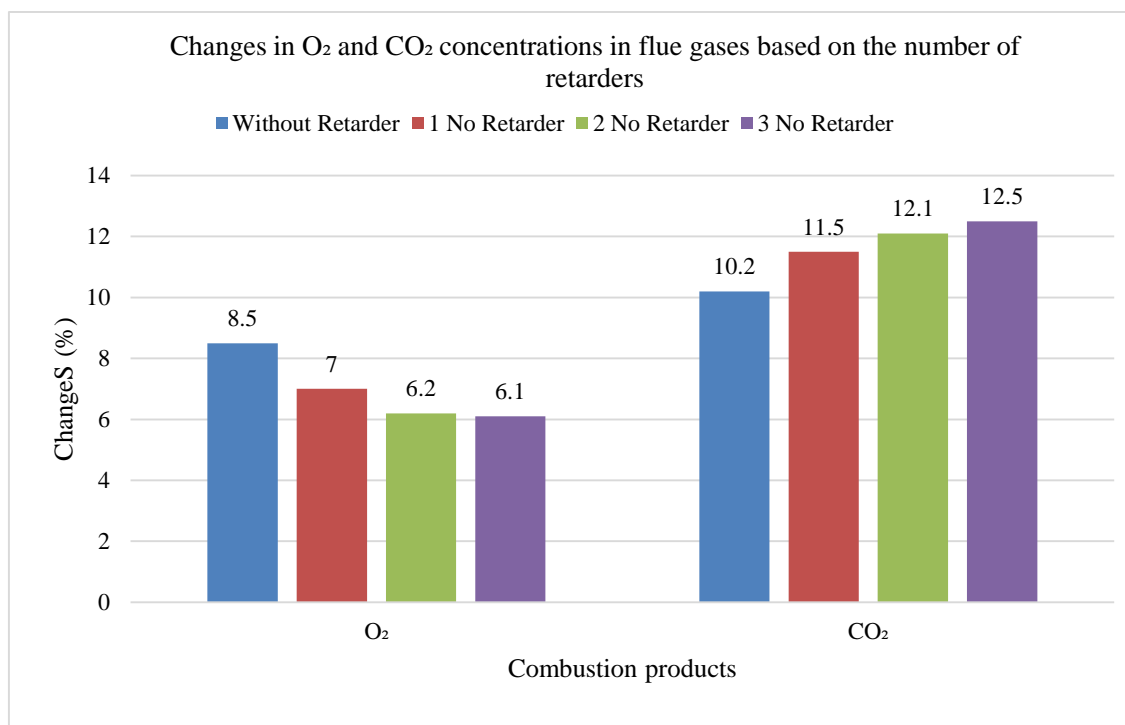


Figure 14- Changes in O₂ and CO₂ concentrations in flue gases based on the number of retarders

شکل ۱۴- تغییرات در گازهای خروجی اکسیژن و دی‌اکسید کربن نسبت به تعداد ریتاردرها

همان‌طور که در نمودار ۱۴ مشاهده می‌شود با به کارگیری ریتارد در مسیر جریان گازهای احتراق اکسیژن موجود در حالت یک، دو و سه ریتارد به ترتیب به میزان ۱/۵، ۲/۳ و ۲/۴ درصد کاهش یافته است همچنین گاز دی‌اکسید کربن موجود نیز در حالت یک، دو و سه ریتارد به ترتیب به میزان ۱/۳، ۱/۹ و ۲/۳ درصد افزایش یافته است. افزایش غلظت حجمی CO₂ در گازهای خروجی، در نگاه اول ممکن است نگران‌کننده به نظر برسد، اما با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت، مشخص می‌شود که نسبت تولید بهینه CO₂ به ازای واحد سوخت مصرفی افزایش یافته و نشان‌دهنده عملکرد بهتر احتراق است. در واقع، افزایش درصد حجمی CO₂ همراه با کاهش تولید جرم آن، بهبود بازده احتراق را اثبات می‌کند. ریتارد با ایجاد آشفتگی^۲ در جریان گازهای احتراق، نه تنها نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد بلکه با بهبود اختلاط و افزایش زمان اقامت گازها در ناحیه احتراق، باعث بهبود کامل شدن فرآیند احتراق می‌شود. این موضوع از طریق کاهش نسبت CO به CO₂ در گازهای خروجی تأیید می‌شود.

¹ Excess Air

² Turbulence

مطالعه زلاتوا و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که تنظیم نسبت هوای اولیه به ثانویه می‌تواند انتشار CO و NOx را کاهش دهد، که مشابه تأثیرات مشاهده شده در تحقیق ما با استفاده از ریتاردرها است [۱۴].

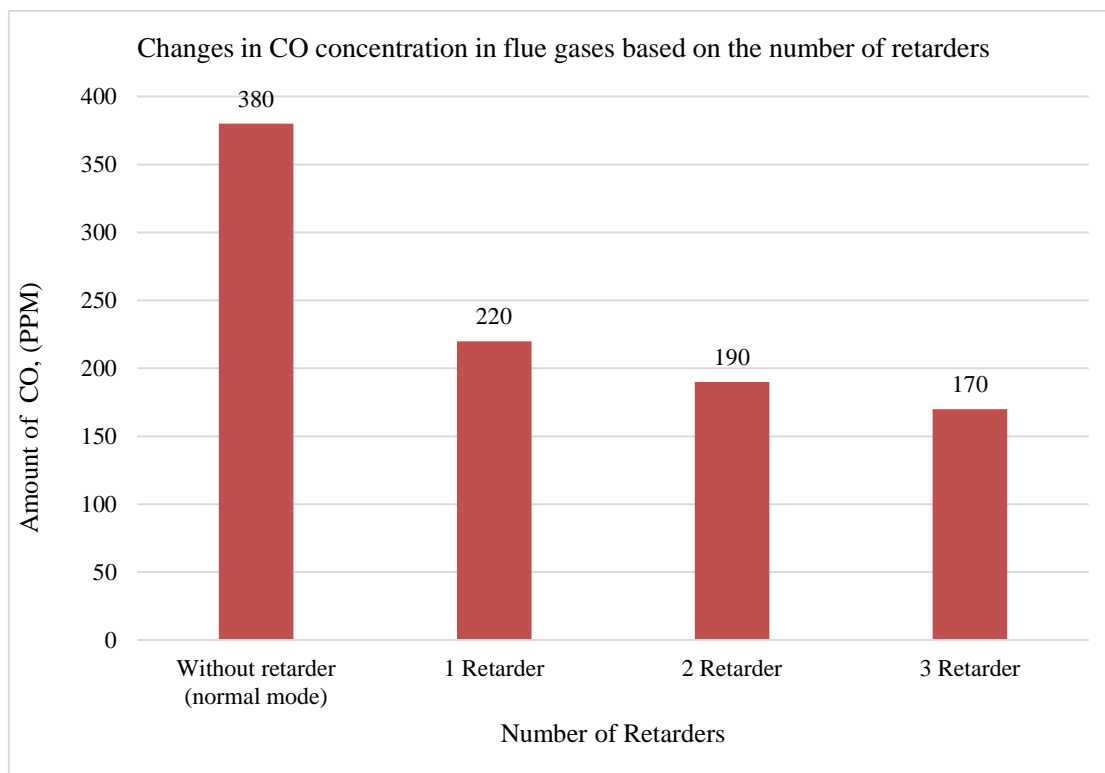


Figure 15- Changes in CO concentration in flue gases based on the number of retarders

شکل ۱۵- تغییرات در گاز مونو اکسید کربن نسبت به تعداد ریتاردرها

نمودار ۱۵ تغییرات میزان گاز مونوکسید کربن موجود در محصولات احتراق را نشان می‌دهد همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد ریتاردر این گاز در حالت ۳ عدد ریتاردر به میزان حدود ۵۵ درصد کاهش یافته است که نشان‌دهنده احتراق کامل‌تر و بهینه‌تر است.

۴. تغییرات فشار گاز و اثرات مکانیکی

نصب ریتاردرها باعث افزایش مقاومت در برابر عبور جریان گاز شده و افت فشار را افزایش داده است. در جدول ۳ این تغییرات قابل مشاهده است. اگرچه افت فشار افزایش یافته، اما در حد مجاز طراحی سیستم باقی مانده و عملکرد فن تخلیه را مختل نکرده است. با این حال، در کاربردهای صنعتی نیاز به بازطراحی یا تقویت فن دودکش محتمل است.

جدول ۳- جدول افت فشار بر اساس تعداد ریتاردرها (به میلی بار)

Table 3- Pressure Drop Table Based on Number of Retarders (in millibar)

Mode	Inlet Pressure (mbar)	Outlet Pressure (mbar)	Pressure Drop (ΔP)
Without Retarder	12	10	2
With 1 Retarder	12	8	4
With 2 Retarders	12	5	7
With 3 Retarders	12	3	9

همچنین افزایش جزئی فشار در بخش آب دیگ نیز رخ می‌دهد. به دلیل بهبود انتقال حرارت، افزایش دمای آب داخل دیگ سریع‌تر اتفاق می‌افتد. افزایش دما باعث انبساط بیشتر آب شده که ممکن است منجر به افزایش جزئی فشار سیستم آب شود، ولی این تغییر معمولاً ناچیز است و توسط منبع انبساط جبران می‌شود [۱۵].

محدودیت‌ها و پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

این مطالعه با وجود نتایج مؤثر و قابل توجه، دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر نتایج و تعمیم آن‌ها به سیستم‌های دیگر مورد توجه قرار گیرد:

- ۱- محدودیت در نوع تجهیزات مورد استفاده:
آزمایش‌ها صرفاً بر روی یک نوع مشعل پلت سوز (BM36) و یک مدل خاص دیگ (CSB) در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شده‌اند. عملکرد این سیستم در مقیاس‌های بزرگ‌تر یا مدل‌های دیگر دیگ ممکن است متفاوت باشد.
- ۲- شرایط محیطی کنترل شده:
تمامی آزمایش‌ها در شرایط محیطی پایدار ($1,5 \pm 25$) درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۸ درصد انجام شده‌اند. تغییرات شدید دما یا رطوبت در شرایط واقعی بهره‌برداری ممکن است عملکرد حرارتی یا احتراقی را تحت تأثیر قرار دهد.
- ۳- عدم بررسی طول عمر ریتاردرها:
مطالعه حاضر اثر ریتاردرها را در بازه زمانی کوتاه بررسی کرده و تحلیل مکانیکی یا خوردگی طولانی‌مدت آن‌ها در شرایط واقعی عملیاتی انجام نشده است.
- ۴- عدم بررسی تأثیر ریتاردر بر عملکرد فن و ایمنی:
افزایش افت فشار در سیستم گازهای خروجی ممکن است بر عملکرد فن دودکش، مصرف برق و سطح ایمنی سامانه اثرگذار باشد که نیازمند تحلیل دینامیکی دقیق‌تری است.

پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی

- ۱- بررسی عملکرد سیستم در دیگ‌ها و مشعل‌های متنوع صنعتی:
برای افزایش قابلیت تعمیم، آزمایش‌ها باید در دیگ‌ها با ظرفیت‌های مختلف و در صنایع گوناگون (مثل کشاورزی یا گلخانه‌ها) تکرار شوند.
- ۲- تحلیل دینامیکی و CFD جریان گازها:
استفاده از شبیه سازی عددی (CFD) برای بررسی الگوی جریان و انتقال حرارت در حضور ریتاردر می‌تواند دید فنی عمیق‌تری نسبت به سازوکار عملکرد این تجهیزات ارائه دهد.
- ۳- تحلیل هزینه-فایده نصب ریتاردر:
با وجود افزایش راندمان، باید بررسی شود که در بلندمدت، صرفه‌جویی سوخت و کاهش آلاینده‌ها به صرفه اقتصادی کافی منجر می‌شود یا خیر.
- ۴- ارزیابی دوام مکانیکی ریتاردرها:
در تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود رفتار خستگی، خوردگی و فرسایش ریتاردرها در شرایط کارکرد ۱۰۰۰ ساعت به بالا، با تحلیل مواد و تست‌های تجربی بررسی شود.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تجربی اثر استفاده از ریتارد در عملکرد حرارتی و احتراقی دیگ‌های پلت‌سوز صنعتی انجام شد. ریتاردرها به‌عنوان تجهیزاتی ساده ولی مؤثر، با افزایش مقاومت در مسیر گازهای داغ خروجی، موجب افزایش زمان ماند گازها و ارتقای تبادل حرارت بین گازها و آب درون دیگ می‌شوند.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که استفاده از ریتاردرها در سه پیکربندی مختلف (۱، ۲ و ۳ عدد) باعث بهبود پیوسته و قابل توجه در راندمان حرارتی سیستم شده و راندمان از مقدار پایه ۷۰ درصد به ۷۳ درصد افزایش یافت. همچنین دمای دودکش کاهش محسوسی از ۲۵۰°C به ۱۹۰°C داشته که بیانگر کاهش تلفات حرارتی است. به موازات این بهبود انرژی، غلظت آلاینده‌هایی نظیر مونوکسید کربن تا ۵۵ درصد کاهش یافته و نشان‌دهنده احتراق کامل‌تر و بهینه‌تر است. افزایش درصد گاز دی‌اکسید کربن نیز به‌عنوان نشانه‌ای از کامل‌تر شدن واکنش احتراق، ثبت شده است.

نکته مهم این است که این دستاوردها با افزودن یک مداخله مکانیکی ساده (ریتارد چدنی)، بدون نیاز به تغییر در طراحی دیگ یا مشعل و بدون استفاده از سیستم‌های کنترلی پیچیده حاصل شده‌اند؛ بنابراین، می‌توان از این راهکار به‌عنوان یک گزینه صنعتی کم‌هزینه برای ارتقای عملکرد دیگ‌های حرارتی پلت‌سوز استفاده نمود.

با این حال، اثرات طولانی مدت مکانیکی، تأثیر بر عملکرد فن دودکش، و نیاز به انطباق با طراحی‌های مختلف دیگ، مواردی هستند که باید در تحقیقات آتی مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرند.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که افزودن ریتارد می‌تواند یک راهکار ساده، اقتصادی و اثربخش برای کاهش مصرف سوخت، کاهش آلاینده‌ها و افزایش بازده در سامانه‌های حرارتی زیست‌پایه باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود واجب می‌دانند از شرکت صنعتی شوفاژکار به‌دلیل حمایت‌های مالی و معنوی در انجام این تحقیق، صمیمانه سپاس‌گزاری کنند. همچنین، مراتب قدردانی ویژه‌ی خود را از جناب آقای مهندس علایی، مدیرعامل محترم شرکت صنعتی شوفاژکار، که همواره با حمایت‌های بی‌دریغ خود در مسیر فعالیت‌های پژوهشی، علمی و ارتقای دانش و فناوری کشور گام برداشته‌اند، ابراز می‌دارند.

همچنین از جناب آقای مهندس جعفری، معاونت محترم اجرایی شرکت، که همواره مشوق این مجموعه در انجام امور علمی و پژوهشی بوده‌اند، نهایت سپاس و امتنان را داریم.

منابع

- [1] A. Backa, N. Čajová Kantová, R. Nosek, and M. Patsch, "Evaluating the combustion of various biomass pellets in a small heat source with underfeed pellet burner: Heat output, gas emission and ash melting behavior," *Journal of the Energy Institute*, vol. 118, p. 101936, Feb. 2025.
- [2] P. Sarabhorn, et al. "Community-scale co-incineration of pre-sorted MSW with wood pellet using a decoupling gasifier and integrated burner for syngas combustion," *Journal of Cleaner Production*, vol. 487, p. 144588, Jan. 2025.
- [3] B. Sungur and C. Basar, "Experimental investigation of the effect of supply airflow position, excess air ratio and thermal power input at burner pot on the thermal and emission performances in a pellet stove," *Renewable Energy*, vol. 202, pp. 1248–1258, Jan. 2023.
- [4] R. Stanisławski, R. Junga, and M. Nitsche, "Reduction of the CO emission from wood pellet small-scale boiler using model-based control," *Energy*, vol. 243, p. 123009, Mar. 2022.
- [5] J. W. Eo, M. J. Kim, I. S. Jeong, L. Cho, S. J. Kim, S. Park, and D. H. Kim, "Enhancing thermal efficiency of wood pellet boilers by improving inlet air characteristics," *Energy*, vol. 228, p. 120475, Aug. 2021.
- [6] E. Cardozo, C. Erlich, A. Malmquist, and L. Alejo, "Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 671–680, Dec. 2014.

- [7] Iran National Standard ISIRI 4472, Test Method for Capacity and Thermal Efficiency of Boilers for Central Heating and Domestic Hot Water, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 1998.
- [8] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [9] L. J. R. Nunes, J. C. O. Matias, and J. P. S. Catalão, "Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models," *Applied Energy*, vol. 127, pp. 135–140, Aug. 2014.
- [10] A. Arifjanov and K. Kurbonov, "Increasing the thermal efficiency of water heating boilers by improving design parameters," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1210, 012005, 2023.
- [11] W. Eo, M. J. Kim, I. S. Jeong, L. Cho, S. J. Kim, S. Park, and D. H. Kim, "Enhancing thermal efficiency of wood pellet boilers by improving inlet air characteristics," *Energy*, vol. 228, p. 120475, Aug. 2021.
- [12] F. Kokalj, T. Zadavec, A. Jovovic, and N. Samec, "Small wood pellet boiler 3-D CFD study for improved flue gas emissions employing flue gas recirculation and air staging," *Thermal Science*, vol. 27, no. 1, pt. A, pp. 89–101, Jan. 2023.
- [13] M. Krishnamoorthi, R. Malayalamurthi, Z. He, and S. Kandasamy, "A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, p. 109404, Dec. 2019.
- [14] P. Zlateva, A. Terziev, K. Krumov, M. Murzova, and N. Mileva, "Research on the combustion of mixed biomass pellets in a domestic boiler," *Fuels*, vol. 6, no. 2, p. 40, May 2025.
- [15] R. W. Haines and M. E. Myers, *HVAC Systems Design Handbook*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010

English Abstract

Experimental investigation of the effect of using retarders on thermal efficiency in pellet-fired burners and boilers

Hamidreza Rahmani^{1*}, Masoud Emami Barsari², Javad Latifi Poshtahani³, Hadi Babaei⁴

1-Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Takestan Branch, Iran, hamidreza.rahmani5905@iau.ac.ir

2- B.Sc. in Mechanical Engineering, Head of Engineering Department, Chauffageekar Industrial Company, Takestan, Iran

3- M.Sc. Student in Mechanical Engineering, Head of R&D Department, Chauffageekar Industrial Company, Takestan, Iran

4- B.Sc. in Mechanical Engineering, R&D Expert, Chauffageekar Industrial Company, Takestan, Iran

(Received: 2025/04/23, Received in revised form: 2025/06/06, Accepted: 2025/07/08)

With the increasing demand for heating systems as alternatives to fossil fuels, pellet-fired boilers have gained attention due to their high efficiency and environmental compatibility. In this study, the effects of using a retarder as a resistance element in the exhaust gas passage on the thermal efficiency and combustion quality of an industrial pellet-fired hot water boiler are experimentally investigated.

The experiments were conducted under three different conditions involving the installation of 1, 2, and 3 retarders, and variables such as flue gas temperature, thermal efficiency, carbon monoxide and carbon dioxide concentrations, and pressure drop in the system were measured. The results showed that using three retarders reduced the exhaust gas temperature from 250°C to 190°C and increased thermal efficiency from 70% to 73%. Furthermore, carbon monoxide concentration was reduced by up to 55%. The innovation of this research lies in presenting a simple and industrial method to improve efficiency using mechanical equipment that can be implemented in thermal industries. Statistical analysis of the results and evaluation of performance stability were also carried out to enhance the generalizability of the findings.

Keywords: pellet burner and thermal boiler, increased thermal efficiency, retarder