

مطالعه آزمایشگاهی تأثیرات تهویه اجباری و طبیعی بر رفتار حریق چوب با بار سوختی محدود

سید احمد کبریایی^۱، محمد مقیمان^۲، حمید نیازمند^۳، سیده محدثه میری^۴

چکیده تهویه فشار مثبت برای بهبود تخلیه دود و کاهش دما در اطفای حریق استفاده می‌شود، اما کارایی آن وابسته به شرایط تهویه فضا است. این مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تهویه طبیعی و اجباری (دمنده با دبی ۱۸۵۰۰ مترمکعب بر ساعت) را در یک محفظه با سوخت ۱۰ کیلوگرم پالت چوبی و ترکیب‌های مختلف بازشوها بررسی کرد. نتایج نشان داد که به دلیل محدودیت سوخت، مرحله فلش‌اور رخ نداد. در شرایط تهویه اجباری با دو بازشو، دمای بیشینه بالای کانون حریق ۹٪ کاهش (از ۲۸۰ به ۲۵۵ درجه سانتی‌گراد) یافت. اما در حالت یک بازشو، تهویه اجباری منجر به افزایش ۳۰٪ این دما (از ۱۴۱/۹ به ۱۸۵/۶ درجه سانتی‌گراد) نسبت به تهویه طبیعی شد. همچنین، زمان وقوع دمای بیشینه در دو بازشو ۴۸ ثانیه تأخیر و در یک بازشو ۶۱ ثانیه تسریع شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از تهویه فشار مثبت در فضاهای با تنها یک بازشو دما را افزایش می‌دهد، بنابراین بهینه است که فقط در فضاهایی با حداقل دو بازشو به کار رود.

کلمات کلیدی: رفتار حریق چوب، تهویه اجباری، تهویه طبیعی، دمای بیشینه.

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده دمندهی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۲ نویسنده مسئول: استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده دمندهی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. Email: moghiman@um.ac.ir

^۳ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده دمندهی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۴ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده دمندهی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

Experimental Study of the Effects of Forced and Natural Ventilation on Wood Fire Behavior with a Limited Fuel Load

Abstract Positive pressure ventilation (PPV) is used to improve smoke extraction and reduce temperatures in fire suppression, but its effectiveness depends on the space's ventilation conditions. This laboratory study examined the impact of natural and forced ventilation (using a blower with a flow rate of 18,500 m³/h) in a compartment with a 10 kg wooden pallet fire and varying opening configurations. Results showed that no flashover occurred due to fuel limitations. Under forced ventilation with two openings, the maximum temperature above the fire source decreased by 9% (from 280°C to 255°C). However, with a single opening, forced ventilation increased this temperature by 30% (from 141.9°C to 185.6°C) compared to natural ventilation. Additionally, the time to peak temperature was delayed by 48 seconds in the two-opening scenario but accelerated by 61 seconds in the single-opening case. These findings indicate that PPV raises temperatures in spaces with only one opening, making it optimal for use only in compartments with at least two openings.

Keywords: wood fire behavior, forced ventilation, natural ventilation, maximum temperature.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های مؤثر در اطفای حریق، استفاده از تهویه فشار مثبت^۱ (PPV) با کمک دمنده‌های قابل حمل است که با ایجاد فشار اضافی، گرما و دود را از ساختمان خارج می‌کند [3]–[1]. موفقیت این تکنیک به تحلیل دقیق شرایط محلی و رعایت اصول تهویه وابسته است [4]. بر اساس نتایج مؤسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا، در صورت تنظیم صحیح، PPV می‌تواند با جلوگیری از نفوذ دود به راه‌پله‌ها، ایمنی را افزایش دهد [5]. زایسلر و همکاران [6] نیز به کاهش سریع دما، افزایش کیفیت هوا، بهبود دید و تغییر جهت شعله‌ها از محل آتش‌نشان‌ها به عنوان مزایای PPV اشاره کرده‌اند. هرچند PPV مزایای قابل توجهی دارد، اما وجود دهانه تخلیه مناسب برای خروج مؤثر دود و کنترل رشد آتش ضروری است [7]. همچنین در صورت تأمین فشار کافی، PPV می‌تواند با حفظ شرایط بدون دود در راه‌پله‌ها، دود را به‌طور مؤثر تخلیه کرده و در عین حال موجب افزایش دما و رشد آتش در ارتفاعات پایین

¹ Positive Pressure Ventilation

شود [9], [8]. از طرفی با افزایش مقطع خروجی، دبی هوای خروجی افزایش یافته و سرعت کاهش می‌یابد که در بهبود عملکرد تهویه مؤثر است [10].

در مطالعه‌ای که شامل ۲۰ آزمایش بود، تأثیر الگوهای مختلف عملیات تهویه و اطفاء بررسی شد. یافته‌ها نشان دادند که PPV می‌تواند مفید باشد، اما کاربرد آن باید با احتیاط همراه باشد تا از پیامدهای منفی جلوگیری شود. لازم به ذکر است که در این آزمایش‌ها، تهویه طبیعی در نظر گرفته نشده بود [11]. اگرچه PPV می‌تواند دمای اتاق حریق را اندکی و دمای راهروها را به‌طور محسوسی کاهش دهد [12]. اما ممکن است خطراتی برای ساکنان گرفتار در داخل ساختمان ایجاد کرده و احتمال گسترش آتش را به اتاق‌های مجاور افزایش دهد. همچنین ورود آتش‌نشانان می‌تواند نسبت تهویه و سرعت سوخت را تغییر داده و PPV نیز با افزایش نرخ کاهش جرم سوخت، سرعت سوختن را بیشتر کند. در نتیجه دما در اتاق‌های پشت به باد افزایش و در اتاق‌های رو به باد کاهش می‌یابد [13].

اثربخشی PPV و عوامل مؤثر بر آن در مطالعات متعددی بررسی شده است. در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر، با انجام ۱۰۶ آزمایش در فضایی مشابه تونل، اثربخشی PPV با چهار دمنده در موقعیت‌های مختلف بررسی شد و نتایج حاکی از کارایی بالای این تکنیک در تمامی حالات بود [14]. یکی از پارامترهای مؤثر بر ارزیابی عملکرد PPV محل و عملکرد دهانه ورودی و خروجی هوا/دود می‌باشد. در یک مطالعه عددی، تأثیر محل دهانه خروجی هوا بر شرایط اتاق حریق در طول عملیات PPV بررسی شد. نتایج نشان دادند که محل خروجی، نقش مهمی در توزیع دما، غلظت گازهای سمی و کارایی تهویه دارد [15]. در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر ارتفاع ورودی هوا بررسی شد. نتایج نشان داد که کاهش ارتفاع ورودی موجب اختلاط بهتر سوخت و هوا شده و افزایش ارتفاع آن، نرخ آزادسازی گرما را تا ۴۰٪ کاهش می‌دهد [16]. همچنین نتایج یک تحقیق عددی نشان داد که استفاده از کاهنده ناحیه بازشوی درب می‌تواند مقاومت در برابر جریان خروجی را افزایش داده و عملکرد تهویه را بهبود بخشد [17]. لی و همکاران [18] عملکرد مجرای خروج دود را در شرایط تهویه طبیعی و مکانیکی بررسی کردند. بر اساس یک تحقیق آزمایشگاهی، بستن دریچه ورودی، نرخ سوختن و

مدت زمان حریق را کاهش می‌دهد بدون تأثیر چشمگیر بر دما یا فشار گاز؛ اما بستن هم‌زمان ورودی و خروجی می‌تواند موجب نوسانات فشار شود [19].

ازکی و همکاران [21], [20] با تعریف دو ناحیه مجزا به‌عنوان اتاق حریق و اتاق قربانی، تأثیر تهویه فشار مثبت را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از دمنده باعث افزایش دمای اتاق حریق و راهرو شده و همچنین در ارتفاع بالای اتاق قربانی، دمای گاز افزایش یافته است. با این حال، مزایای تهویه مانند کاهش دما در سایر بخش‌ها و بهبود دید، از معایب آن پیشی گرفته و تهویه اتاق حریق نسبت به اتاق قربانی حرارتی مؤثرتر بوده است. پارامترهایی مانند فاصله دمنده از ورودی، اندازه و تعداد خروجی‌ها، و حجم ساختمان نیز بر فرآیند احتراق و تهویه تأثیرگذار هستند. به‌عنوان مثال، با افزایش فاصله دمنده تا حدی معین، جریان ورودی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش اندازه خروجی‌ها باعث کاهش افت جریان و افزایش کارایی تهویه می‌شود، در حالی که تأثیر تعداد خروجی‌ها غیرخطی است. همچنین با افزایش حجم ساختمان، کارایی PPV به دلیل نشت هوا کاهش می‌یابد [22]. مطالعه‌ای تجربی و عددی نشان داد که نادیده گرفتن نشت هوا در شبیه‌سازی PPV منجر به پیش‌بینی‌های غیرواقعی از رفتار آتش می‌شود [23]. لامبرت و مرسی [24] تأثیر پارامترهایی مانند فاصله دمنده تا در، زاویه دمنده و استفاده از دمنده‌های موازی یا سری را بررسی کرده و نشان دادند که زاویه ۷۵ درجه برای حریق سطحی و ۹۰ درجه برای حریق طبقات، تهویه بهتری فراهم می‌کند. همچنین استفاده از چند دمنده اثربخشی تهویه را افزایش می‌دهد، هرچند شرایط تهویه محدود در این تحقیق بررسی نشده بود.

در بررسی‌های عددی، فنگ و لی [25] سه روش تهویه را با نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش^۱ (FDS) ارزیابی کرده و دریافته‌اند که PPV می‌تواند فشار اضافی ناشی از اثر دودکش را کاهش داده و در مقایسه با روش‌های سنتی، حفاظت بهتری ارائه دهد. در ادامه، نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت جریان هوای دمیده‌شده به راه‌پله‌ها، دما کاهش می‌یابد [26]. در شبیه‌سازی حریق استخری

¹ Fire Dynamics Simulator

با تهویه طبیعی، افزایش دمای هوای ورودی موجب افزایش دمای بیشینه حریق شد [27]. همچنین در بررسی استفاده از دمنده‌ها در ایستگاه مترو، نتایج نشان داد که PPV موجب کاهش غلظت CO و دمای سقف می‌شود [28].

یکی از مسائل کلیدی در استفاده از PPV، ایمنی و اثربخشی آن در عملیات آتش‌نشانی است. محدودسازی جریان هوا به ناحیه حریق می‌تواند به کاهش شدت آن کمک کند. هرچند PPV در مراحل اولیه ممکن است موجب افزایش دما شود، اما با تسریع در تخلیه گازهای سمی و حرارت، به بهبود شرایط زیستی، کاهش گسترش حریق و ارتقاء ایمنی آتش‌نشانان می‌انجامد [29]. در مطالعه‌ای تجربی، اینگاسون [30] عملکرد دمنده‌های سیار را در تهویه دود دو نوع ساختمان با ابعاد متفاوت بررسی کرد. این آزمایش‌ها در شرایط سرد و بدون حضور حرارت و دود انجام شد و نتایج نشان داد که تهویه موازی نسبت به تهویه سری عملکرد بهتری دارد و نسبت بهینه سطح خروجی به ورودی بین ۱٫۵ تا ۲ است.

با این حال، بررسی‌های عددی نشان داده‌اند که PPV در برخی شرایط می‌تواند باعث شعله‌ور شدن مجدد حریق پس از وقوع فلش‌اور شود و ایمنی عملیات را به خطر اندازد [31]. در مطالعات آزمایشگاهی دیگر، تأثیر تهویه طبیعی و موقعیت و تعداد بازشوها در محفظه‌های آموزشی آتش‌نشانان بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش تعداد بازشوها موجب تسریع در رسیدن به دمای بیشینه می‌شود، هرچند مقدار آن تفاوت چشمگیری ندارد؛ با این حال، تأثیر تهویه فشار مثبت در این پژوهش‌ها بررسی نشده است [32]. همچنین در پژوهشی دیگر، اثر افزایش نسبت سوخت به هوا در محفظه‌ای با تنها یک بازشو مطالعه شد و نتایج افزایش دمای بیشینه را نشان داد، اما همچنان تأثیر PPV و مقایسه آن با تهویه طبیعی مغفول ماند [33].

۱-۱- شناسایی خلأهای پژوهشی در کاربرد تهویه فشار مثبت در فضاهای با تهویه محدود: ضرورت ارزیابی تجربی

و تحلیل رفتار دمایی

مطالعات پیشین در زمینه کاربرد تهویه فشار مثبت با استفاده از دمنده‌های قابل حمل، عمدتاً به بررسی تأثیر متغیرهایی نظیر محل و زاویه قرارگیری دمنده، ابعاد دمنده، ابعاد فضا، و تعداد و موقعیت ورودی‌ها و خروجی‌ها پرداخته‌اند. این مطالعات عموماً تأکید

داشته‌اند که اثربخشی PPV وابسته به وجود حداقل یک مسیر خروجی برای گازهای داغ، دود و محصولات احتراق است تا تخلیه مؤثر صورت گیرد. با این حال، در شرایط واقعی عملیات اطفای حریق، آتش‌نشانان غالباً با فضاهایی مواجه می‌شوند که تنها یک ورودی دارند و فاقد هرگونه خروجی برای تخلیه دود و گازهای داغ هستند. در چنین شرایطی، به دلیل محدودیت‌های عملیاتی و آموزش‌های رایج، استفاده از تهویه فشار مثبت کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

مرور مطالعات موجود نشان می‌دهد که پژوهش‌های اندکی به ارزیابی اثربخشی PPV در شرایطی پرداخته‌اند که تنها یک بازو وجود دارد و هیچ مسیری برای خروج گازهای داغ فراهم نیست. علاوه بر این، تحقیقات پیشین کمتر به مقایسه رفتار دمایی در شرایط PPV و تهویه طبیعی در محفظه‌هایی با یک یا دو بازو پرداخته‌اند. این در حالی است که تفاوت تعداد بازوها می‌تواند تأثیر چشمگیری بر رفتار گازهای داغ، شدت و زمان وقوع پدیده‌هایی مانند فلش‌اور داشته باشد.

برای پر کردن این شکاف علمی، مطالعه حاضر به‌عنوان یک نوآوری تجربی، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را در یک محفظه آموزشی با دو بازو طراحی و اجرا کرده است. در این آزمایش‌ها از پالت چوبی به‌عنوان سوخت استفاده شد و شرایط در دو سناریوی تهویه (طبیعی و فشار مثبت) و دو وضعیت بازو (فقط یک بازو و هر دو بازو فعال) مورد ارزیابی قرار گرفت.

اهداف اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- بررسی اثر نظام‌های تهویه فشار مثبت و طبیعی بر رفتار حرارتی لایه بالایی گازها در حالت تک بازو؛
- بررسی تفاوت رفتار حرارتی گازها در حالت دو بازو تحت تأثیر تهویه طبیعی و فشار مثبت؛
- تحلیل مرحله کاملاً توسعه‌یافته آتش‌سوزی و ارزیابی احتمال وقوع یا عدم وقوع فلش‌اور در سناریوهای مختلف تهویه.

برای دستیابی به این اهداف، دو پرسش کلیدی در این مطالعه مطرح شده است:

۱- آیا تفاوت معناداری میان عملکرد نظام‌های تهویه فشار مثبت و طبیعی در کنترل رفتار دمایی گازها در شرایط تک بازو

و دو بازو وجود دارد؟

۲- کدام نظام تهویه در کاهش و کنترل دمای گازهای لایه بالایی مؤثرتر عمل می‌کند؟

همچنین، پژوهش حاضر با تحلیل داده‌های دمایی به این پرسش نیز پاسخ می‌دهد:

۳- احتمال وقوع فلش‌اور در مرحله توسعه‌یافته آتش‌سوزی، تحت کدام شرایط تهویه‌ای (طبیعی یا اجباری) و باتوجه‌به الگوهای

دمایی، بیشتر است؟

در این مطالعه، نوع تهویه (طبیعی یا فشار مثبت) و تعداد بازشوها (یک یا دو) به‌عنوان متغیرهای مستقل، و رفتار دمایی گازهای لایه بالایی و احتمال وقوع فلش‌اور به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده‌اند. رویکرد داده‌محور و استفاده از اندازه‌گیری‌های دقیق دمایی، امکان تحلیل علمی و نظام‌مند تأثیر تهویه و هندسه بازشو بر ایمنی و توسعه آتش را فراهم ساخته است.

۲. تئوری مسئله

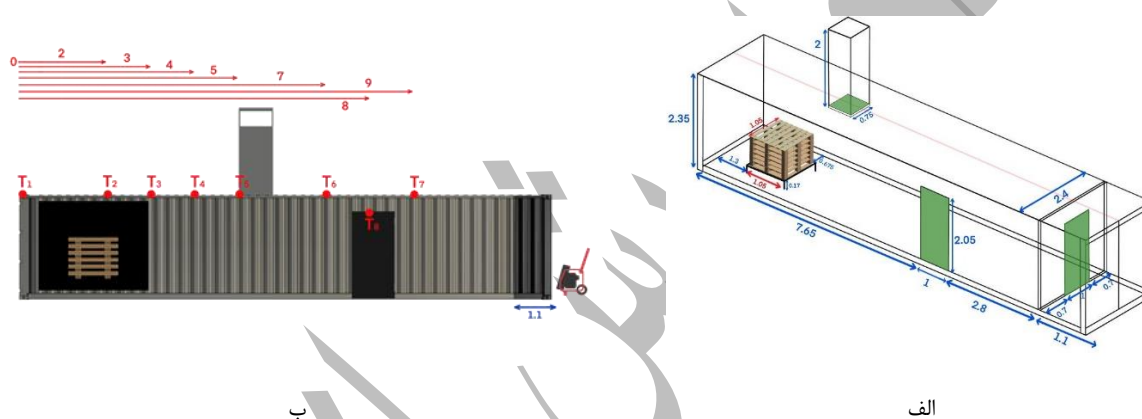
۱-۲. جزئیات محفظه و روش‌شناسی آزمایش‌ها

در این بخش مشخصات محفظه احتراق، مشخصات دمنده فشار مثبت برای ایجاد تهویه اجباری و همچنین جنس و مشخصات سوخت انتخابی توضیح داده می‌شود. در ادامه شرایط حاکم بر آزمایش‌ها، شامل موقعیت بازشوها و شرایط تهویه اجباری توضیح داده خواهد شد. برای انجام آزمایش‌ها از محفظه‌ای با ابعاد نشان‌داده‌شده در شکل (۱) استفاده شده است. ابعاد این محفظه با طول، عرض و ارتفاع ۱۲/۲، ۲/۴ و ۲/۳۵ متر بوده است (شکل (۱-ب)). پوشش کف محفظه شامل یک ورق فولادی به ضخامت ۲ میلی‌متر بوده که با یک‌لایه بتن به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر پوشانده شده است. جنس دیوارها و سقف محفظه نیز از ورق فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر بوده است. مطابق با شکل (۱-الف) محفظه دارای دو درب در اضلاع جلویی و جانبی و یک روزنه روی سقف بوده است. این دریچه‌ها به‌صورت دستی از طریق یک ساختار مکانیکی کنترل می‌شوند و امکان باز و بسته‌شدن را فراهم می‌کنند. شرایط حاکم بر آزمایش‌ها به‌لحاظ باز یا بسته‌بودن این دریچه‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

پالت‌های چوبی یکی از منابع سوخت رایج و مهم در آزمایش‌های رفتار حریق هستند که به دلیل ساختار هندسی، مواد قابل احتراق و رفتار تکرارپذیرشان، به طور گسترده‌ای در تحقیقات علمی استفاده می‌شوند. این پالت‌ها معمولاً از چوب‌های نرم؛ مانند کاج یا چوب‌های سخت مانند بلوط ساخته شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تأثیر قابل توجهی بر رفتار آتش‌سوزی دارند. ساختار باز پالت‌ها و فاصله‌های بین الوارها باعث بهبود جریان هوا در اطراف آتش و افزایش شدت گسترش آتش‌سوزی می‌شود. پالت چوبی عمدتاً از سه ترکیب آلی اصلی تشکیل شده است: سلولز ($C_6H_{10}O_5$)، همی سلولز و لیگنین. پالت چوبی در مطالعه حاضر به عنوان سوخت استفاده شده است. ابعاد این پالت چوبی برابر با $1/05 \times 1/05 \times 0/075$ متر با وزن هر پالت چوبی به مقدار $10 \pm 1\%$ کیلوگرم) بود. پالت‌های چوبی در تمام آزمایش‌ها در یک مکان ثابت روی سازه فولادی قرار داده شدند. با توجه به وزن پالت چوبی، در هر آزمایش از یک پالت استفاده شد. رطوبت اولیه چوب تأثیر مستقیمی بر نرخ پیرولیز، آزادسازی گازهای فرار و رفتار احتراقی آن دارد. برای تعیین رطوبت وزنی پالت‌های چوبی، از رطوبت‌سنج دیجیتال نفوذی استفاده شد. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده با رطوبت‌سنج میانگین رطوبت اولیه پالت‌های چوبی حدود 11% بود. تراکم متوسط پالت‌های چوبی مورد استفاده در این مطالعه برابر با حدود 550 کیلوگرم بر مترمکعب بود.

شروع فرایند اشتعال با کمک 200 سی‌سی بنزین که در یک ظرف فولادی با سطح مقطع مربع، به عرض 20 سانتی‌متر و ارتفاع 5 سانتی‌متر قرار گرفته، انجام می‌شود (به شکل (۱-الف) مراجعه کنید). هشت ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف داخل محفظه قرار گرفته‌اند. ترموکوپل‌ها در هر یک ثانیه داده‌ها را ثبت می‌کنند. این ترموکوپل‌ها به دقت در مجاورت منبع آتش، دقیقاً 1 متر از آن، مستقیماً بالای دهانه جانبی، و در فواصل 2 متری فراتر از دهانه سقفی قرار دارند. شکل (۱-ب) به محل قرارگیری ترموکوپل‌ها را نشان می‌دهد، در حالی که جدول (۲) موقعیت‌های نصب هر ترموکوپل را مشخص می‌کند. آزمایش‌ها در شرایط مشابه، با دمای محفظه (2 ± 36) درجه سانتی‌گراد، دمای محیط (29 ± 2) درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی هوای محیط $(25 \pm 2)\%$ و فشار محیط (101 ± 1) میلی بار انجام شد. شرایط آب‌وهوایی محیطی برای هر آزمایش در جدول ۱ فهرست شده است. برای ایجاد

تهویه فشار مثبت از یک دمنده قابل حمل برقی آتش‌نشانی با دبی هوای ۱۸۵۰۰ مترمکعب بر ساعت که در فاصله ۱/۱ متری از بازشوی ورودی قرار داشت شکل (۱-الف) استفاده شد. وضعیت هریک از بازشوها در جدول (۱) مشخص شده است. در آزمون ۱ هر دو بازشو جانبی و ورودی باز بوده و از تهویه طبیعی استفاده می‌کنیم. در آزمون ۲، همان شرایط برای بازشوها برقرار است؛ اما در این آزمون از دمنده فشار مثبت برای ایجاد تهویه اجباری استفاده شده که محل قرارگیری آن در جلوی بازشو جلویی یا ورودی است. در آزمون ۳ و ۴ فقط بازشو جلویی (ورودی) باز است. در آزمون ۳ از تهویه طبیعی و در آزمون ۴ از تهویه اجباری با دمنده فشار مثبت استفاده شده است.



شکل ۱- ابعاد محفظه همراه با موقعیت مکانی بار سوختی و ترموکوپل‌ها: (الف) نمای سه‌بعدی از محفظه. (ب) نمای دوبعدی از ترموکوپل‌ها و موقعیت دمنده فشار مثبت

جدول ۱- مشخصات وزن بار سوختی، موقعیت بازشوها و شرایط تهویه

شماره آزمون	وزن بار سوختی (Kg)	وضعیت بازشوها			شرایط تهویه	دمای هوای محفظه (□)	دمای هوای محیط (□)	رطوبت نسبی هوای محیط (%)	فشار هوای محیط (میلی بار)
		بازشو جانبی	بازشو ورودی	بازشو سقفی					
۱	۱۰	باز	باز	بسته	طبیعی	۳۵	۲۹	۲۵	۱۰۱۸
۲	۱۰	باز	باز	بسته	اجباری	۳۷	۳۱	۲۳	۱۰۲۱
۳	۱۰	بسته	باز	بسته	طبیعی	۳۶	۳۰	۲۴	۱۰۱۹
۴	۱۰	بسته	باز	بسته	اجباری	۳۵	۲۰	۲۵	۱۰۱۸

جدول ۲- موقعیت ترموکوپل‌های نصب شده در محفظه آزمایش

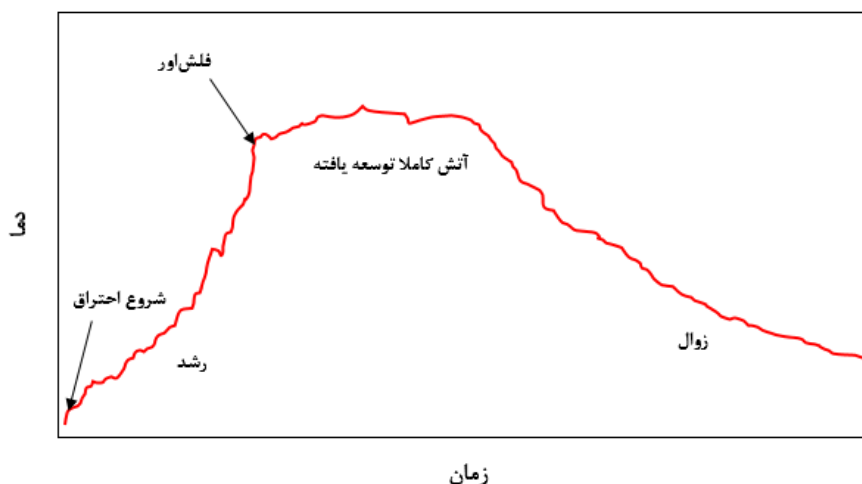
شماره ترموکوپل	موقعیت X (m)	موقعیت Y (m)	موقعیت Z (m)
T_1	۱/۲۵	۰	۲/۲
T_2	۱/۲۵	۲	۲/۲
T_3	۱/۲۵	۳	۲/۲
T_4	۱/۲۵	۴	۲/۲
T_5	۱/۲۵	۵	۲/۲
T_6	۱/۲۵	۷	۲/۲
T_7	۱/۲۵	۹	۲/۲
T_8	۱/۲۵	۸	۲/۲

۲-۲. مراحل حریق در یک محفظه

آتش‌های محفظه‌ای به‌عنوان آتش‌سوزی در فضاهای بسته تعریف می‌شوند که معمولاً به‌عنوان اتاق‌هایی در ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شوند، اما ممکن است شامل فضاهای دیگری مانند مواردی که در وسایل حمل‌ونقل مانند کشتی‌ها، هواپیماها، قطارها و مانند آن‌ها یافت می‌شود، باشد. آتش‌سوزی در محفظه‌ها در ۵ مرحله تعریف می‌شود: ۱- اشتعال، ۲- رشد، ۳- فلش‌اور^۱، ۴- توسعه‌یافتگی کامل، ۵- زوال. اگرچه بسیاری از آتش‌سوزی‌ها از این ایده‌آل‌سازی پیروی نمی‌کنند، اما چارچوب مفیدی برای بحث آتش‌سوزی محفظه فراهم می‌کند. همه آتش‌سوزی‌ها شامل یک مرحله اشتعال هستند، اما فراتر از آن، ممکن است رشد نکنند، یا ممکن است قبل از گذراندن تمام مراحل ذکر شده در بالا، تحت تأثیر فعالیت‌های اطفای حریق دستی یا خودکار قرار گیرند. مرحله اشتعال: زمانی که در طی آن آتش‌سوزی در یک محفظه شروع می‌شود. مرحله رشد: پس از اشتعال، آتش در ابتدا به‌عنوان تابعی از خود سوخت

¹ Flashover

رشد می‌کند، با تأثیر کم یا بدون تأثیر شرایط محفظه. فلش‌اور به‌طور کلی به‌عنوان یک آتش فزاینده به یک آتش کاملاً توسعه‌یافته تعریف می‌شود که در آن تمام اقلام قابل‌احتراق در محفظه درگیر آتش می‌شوند. در طی این انتقال تغییرات سریعی در محیط محفظه رخ می‌دهد. دمای گاز ۳۰۰-۶۵۰ درجه سانتی‌گراد با شروع فلش‌اور همراه بوده است، اگرچه دمای ۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرحله توسعه‌یافتگی کامل: در این مرحله، سرعت انتشار گرمای آتش بیشترین میزان را دارد. رفتار آتش‌سوزی در این مرحله تحت تأثیر شرایط محفظه مانند اندازه و مصالح ساختمانی، اندازه و شکل دهانه‌ها، نوع مقدار و توزیع سوخت در محفظه است. مرحله زوال: زوال حریق زمانی رخ می‌دهد که سوخت مصرف می‌شود و سرعت انتشار گرما و دمای داخل محفظه کاهش می‌یابد. شکل (۲) مراحل حریق را نمایش می‌دهد [34].



شکل ۲- مراحل مختلف حریق در اتاق

۳. تحلیل تکرارپذیری و عدم قطعیت آزمایش‌ها

در مطالعه پیشرو از روش مراجع [36], [35], [32] برای ارزیابی تغییرپذیری در تکرار آزمایشات استفاده می‌شود که در ادامه به تفصیل شرح داده خواهد شد. معادله (۱) بیانگر عدم قطعیت کل است که با استفاده از عدم قطعیت تکرار (δu_{rep}) و تجهیزات (δu_{eqp}) محاسبه می‌شود و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\delta u = \sqrt{(\delta u_{eqp})^2 + (\delta u_{rep})^2} \quad (۱)$$

برای محاسبه مقادیر عدم قطعیت تکرار (δu_{rep}) و عدم قطعیت تجهیزات (δu_{eqp}) از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\delta u_{eqp} = a/\sqrt{3} \quad (۲)$$

$$\delta u_{rep} = \sigma/\sqrt{N} \quad (۳)$$

در معادله (۲)، a بیانگر نصف دقت دستگاه اندازه‌گیری و در معادله (۳)، σ بیانگر انحراف استاندارد و N بیانگر تعداد تکرار است. دقت ترموکوپل نوع K توسط کارخانه سازنده برابر با (۰/۵ درجه سانتی‌گراد + ۰/۰۴٪) تعیین شده است. لازم به ذکر است که هر آزمایش در سه تکرار انجام شده تا از قابلیت اطمینان و صحت نتایج اطمینان حاصل شود.

جدول ۳ محاسبه عدم قطعیت را به‌عنوان مثال برای آزمون ۱ با استفاده از معادلات (۱) تا (۳) ارائه می‌دهد. بر اساس تجزیه و تحلیل عدم قطعیت‌ها، عدم قطعیت تجهیزات به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقدار آن برای نوع تکرار است که می‌تواند به حداقل بودن عدم قطعیت کل کمک کند. این تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان بالای نتایج تجربی را نشان می‌دهد؛ چراکه میانگین عدم قطعیت کل از ۶/۹۷ درجه سانتیگراد کمتر است.

جدول ۳- مشخصات عدم قطعیت در اندازه‌گیری دما

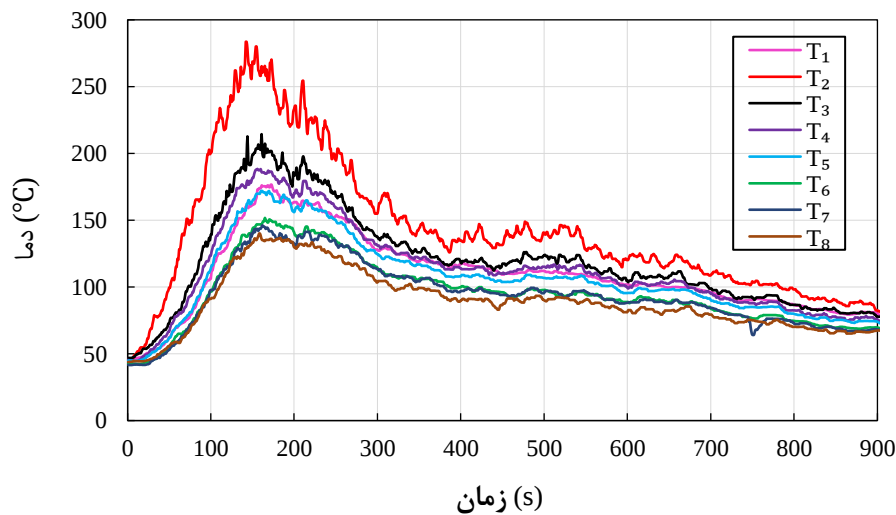
شماره ترموکوپل	u_{eqp}	u_{rep}	u_{tot}
	°C	°C	°C
T_1	۰/۳۱	۶/۸۹	۶/۸۹
T_2	۰/۳۷	۸/۰۵	۸/۰۵
T_3	۰/۳۴	۷/۴۳	۷/۴۳
T_4	۰/۳۸	۵/۹۵	۵/۹۶
T_5	۰/۴۱	۶/۴۳	۶/۴۴
T_6	۰/۳۶	۷/۲۱	۷/۲۱

$$T_7 \quad 0/39 \quad 5/98 \quad 5/99$$

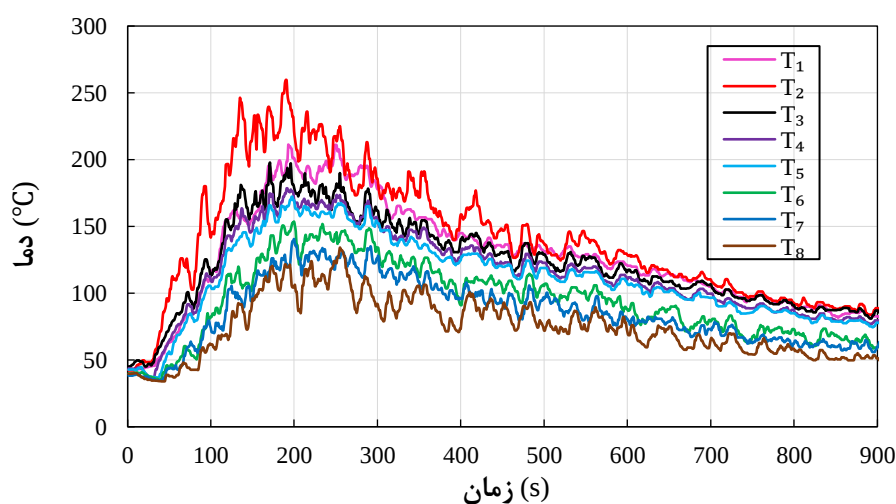
$$T_8 \quad 0/37 \quad 7/86 \quad 7/86$$

۴. نتایج و بحث

بخش نتایج به بررسی تأثیر تهویه فشار مثبت بر رفتار حریق با سوخت پالت چوب می‌پردازد. شکل‌های (۳) و (۴) دمای لایه بالایی گازهای داغ درون محفظه را نمایش می‌دهد که توسط ترموکوپل‌ها در طی یکی از تکرارهای آزمون‌های ۱ و ۲ ثبت شده است. دما با استفاده از روش‌شناسی یکسان در همه آزمایش‌ها به طور یکنواخت اندازه‌گیری شد. قابل ذکر است، T_2 به طور مداوم بالاترین دما را در هر آزمایش ثبت کرد. این به دلیل نزدیکی آن به منبع آتش است که مستقیماً بالای آن قرار دارد. این دمای ثبت شده برای تجزیه و تحلیل مراحل رشد، رشد کامل، زوال و دمای بیشینه مورد استفاده قرار گرفته است.



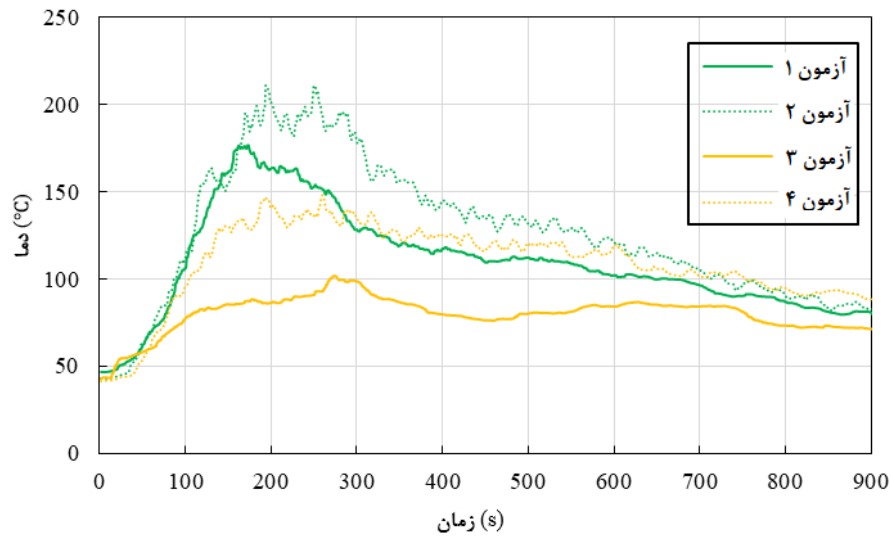
شکل ۳- دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها در طول یکی از تکرارهای آزمون ۱



شکل ۴- دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها در طول یکی از تکرارهای آزمون ۲

۴-۱. تحلیل توزیع دما در نقاط مختلف محفظه

ترموکوپل ۱ در پشت منبع حریق جانمایی شده است. در شکل (۵) دماهای ثبت شده توسط این ترموکوپل را در طی آزمون‌های ۴-۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل‌مشاهده است در حالت باز بودن هر دو بازشو (آزمون‌های ۱ و ۲)، و باز بودن تنها یک بازشو (آزمون‌های ۳ و ۴)، دمای ثبت شده توسط ترموکوپل ۱ در حالت وجود تهویه اجباری بیشتر است. یعنی هوای حاصل از احتراق در آزمون‌های ۲ و ۴ دارای دماهای بالاتری در محل ترموکوپل ۱ هستند. علت این پدیده نقش دمنده دمنده در عقب راندن جریان هوا به سمت انتهای محفظه احتراق است. در انتهای محفظه هیچ دریچه بازشویی نداریم و به‌نوعی جریان هوا حالت محبوس به خود می‌گیرد و دما در آن منطقه بالا می‌رود. پس در هر دو حالت یک و دو بازشو برای تهویه اجباری منطقی است که ترموکوپل ۱ دمای بالاتری را برای تهویه اجباری نسبت به تهویه طبیعی نشان دهد؛ بنابراین در عملیات اطفای حریق با استفاده از تهویه فشار مثبت توجه به این نکته حائز اهمیت است دمای محفظه تحت هر شرایطی (وجود و نبود خروجی هوا) در فضای قرار گرفته پشت کانون حریق بیشتر از شرایط تهویه طبیعی است و این برای افراد محبوس و آتش‌نشانان یک تهدید به شمار می‌آید. افزایش دما در آزمون ۲ نسبت به ۱ و افزایش دما در آزمون ۴ نسبت به ۳ که شکل ۵ آن را نمایش می‌دهد این موضوع را تصدیق می‌کند.



شکل ۵- دمای اندازه‌گیری شده توسط T_1 در آزمون‌های ۴-۱

ترموکوپل شماره ۲ در بالای کانون حریق (شعله) نصب شده است. مطابق شکل (۶)، دمای ثبت‌شده توسط این ترموکوپل رفتار متفاوتی نسبت به ترموکوپل ۱ نشان می‌دهد که باتوجه به موقعیت قرارگیری آن و شرایط تهویه، منطقی به نظر می‌رسد. در آزمون ۲ نسبت به آزمون ۱، استفاده از تهویه اجباری با دمنده فشار مثبت موجب کاهش دمای هوای بالای کانون حریق شده است. این کاهش دما ناشی از تقویت جریان هوای ورودی و تسهیل خروج محصولات احتراق از بازشوی مقابل است. در این وضعیت، جریان همرفتی گرمایی به دلیل وجود یک مسیر مشخص برای ورود و خروج هوا منظم‌تر شده و گرمای تولیدشده به سرعت از محفظه خارج می‌گردد. به عبارتی، دمنده فشار مثبت موجب افزایش سرعت جریان هوا در داخل محفظه شده و لایه داغ بالای شعله را با هوای تازه جایگزین می‌کند که این خود باعث کاهش دمای ثبت‌شده توسط ترموکوپل ۲ می‌شود.

در مقابل، در آزمون‌های ۳ و ۴ که تنها یک بازشوی ورودی باز است و دمنده فشار مثبت نیز در همان محل نصب شده، به دلیل نبود مسیر خروج مشخص، هوای پرفشار واردشده به محفظه با مقاومت روبرو می‌شود و امکان خروج آسان محصولات احتراق فراهم نمی‌شود. این موضوع باعث می‌شود که داخل محفظه به ناحیه‌ای با فشار بالا و تهویه محدود تبدیل شود. در چنین شرایطی، گازهای داغ حاصل از احتراق در قسمت فوقانی محفظه تجمع پیدا می‌کنند و انتقال حرارت همرفتی کاهش می‌یابد، چرا که جریان‌های

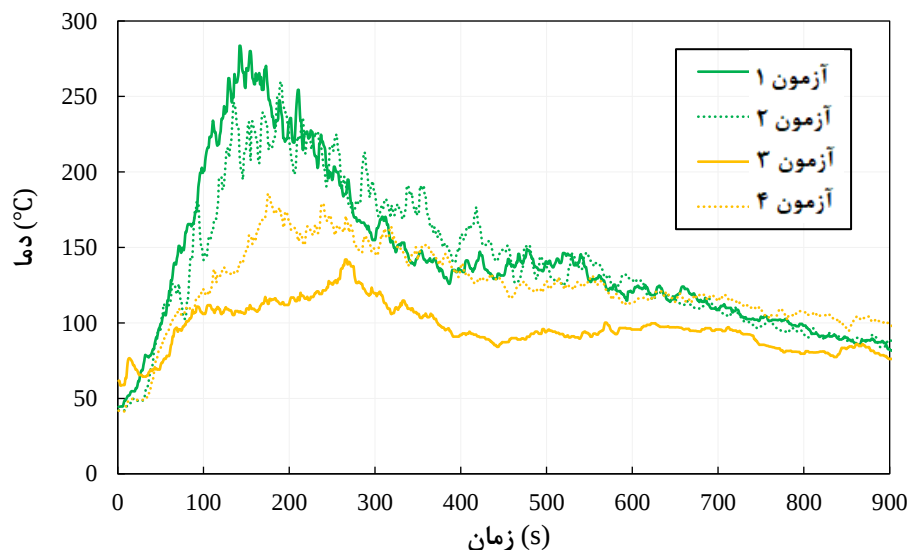
طبیعی بالارو ناشی از گرمایش، توسط جریان هوای فشار مثبت مختل شده‌اند. همچنین، در نبود یک جریان مؤثر برای تخلیه گازهای گرم، اختلاط و توربولانس نیز کاهش می‌یابد و این به افزایش دمای نقطه بالای شعله منجر می‌گردد. در حالت تهویه طبیعی، باوجود یک بازشوی باز و نبود جریان فشار مثبت، محصولات احتراق با استفاده از جریان طبیعی همرفت از محفظه خارج می‌شوند. در این شرایط، هیچ نیروی مخالفی برای جلوگیری از صعود و خروج دود و گازهای داغ وجود ندارد و در نتیجه، دمای ثبت‌شده توسط ترموکوپل ۲ در بالای کانون حریق کاهش می‌یابد.

نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود اثر مخرب تهویه اجباری در صورت وجود یک بازشو در افزایش دما و ایجاد مشکلات برای فرایند اطفای حریق توسط آتش‌نشانان است. به دلیل تزریق هوای تازه به داخل محفظه احتراق و اکسیژن‌رسانی بیشتر به شعله و عدم تخلیه راحت هوای حاصل از احتراق از محل بازشویی که دمنده در آن تعبیه شده باعث می‌شود این اکسیژن مازاد به کمک فرایند احتراق بیاید و دمای شعله را بالاتر ببرد. این افزایش دما در کانون حریق در آزمون ۴ نسبت به آزمون ۳ در شکل ۶ نمایش داده شده است.

ورود به محفظه به مرحله فلش‌اور زمانی تعریف می‌شود که دما به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد [32]. شکل ۶ نشان می‌دهد که در هیچ یک از شرایط تهویه طبیعی و اجباری، از پنج مرحله حریق (شروع حریق، رشد، فلش‌اور، توسعه‌یافتگی و مرحله زوال)، مرحله فلش‌اور و توسعه‌یافتگی کامل اتفاق نیفتاده است. فلش‌اور مخرب‌ترین مرحله حریق است که هم برای اعضای گرفتار در حریق و هم برای آتش‌نشانان بسیار خطرناک است. از آنجاکه در دو حالت تهویه طبیعی و اجباری در حریق مراحل فلش‌اور و توسعه‌یافتگی کامل رخ نداده است می‌توان نتیجه گرفت دلیل آن استفاده از بار سوخت کم و محدود بوده است. همچنین نکته حائز اهمیت این است که وجود تهویه فشار مثبت در آزمون ۲ نسبت به آزمون ۱ باعث شد که مرحله زوال با تأخیر حدود ۲۰ ثانیه شروع شود و دمای این مرحله را از ۲۷۰ تا ۴۴۰ام به طور میانگین ۹٪ بالاتر باشد. اما در آزمون ۴ نسبت به آزمون ۳ تأثیر تهویه فشار مثبت

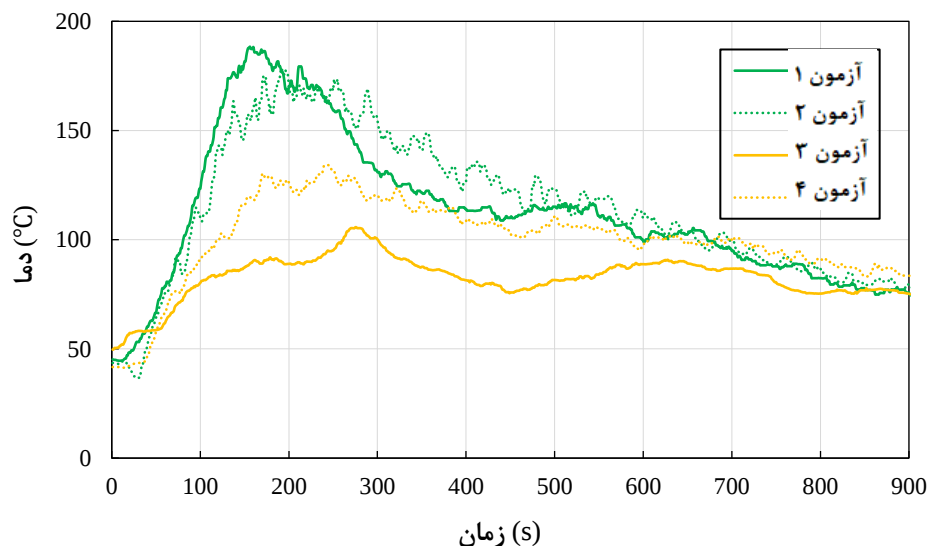
بسیار قابل توجه بود به طوری که نه تنها به طور قابل توجهی دمای بیشینه را افزایش داده؛ بلکه دمای میانگین کانون حریق را از ثانیه

۱۰۰ تا ثانیه پایان آزمایش به طور میانگین ۲۷٪ بالاتر برد.



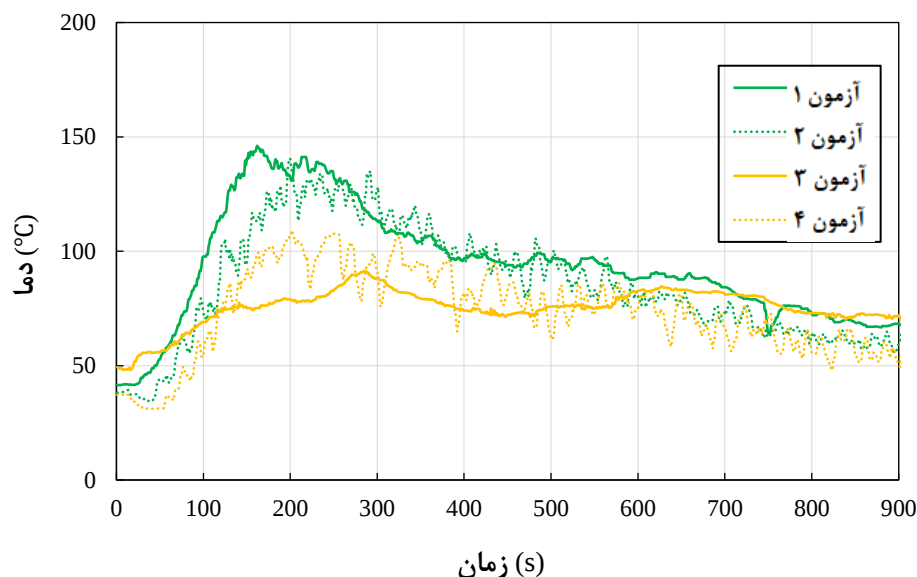
شکل ۶- دمای اندازه گیری شده توسط T_2 در آزمون های ۱-۴

رفتار حریق در محل ترموکوپل ۴ در شکل (۷) نشان داده شده است. این ترموکوپل در فاصله ۲ متری از کانون حریق تعبیه شده است. همان طور که از شکل نیز مشاهده می شود، همان فرایند ثبت شده توسط ترموکوپل ۲، در اینجا نیز مشاهده می گردد با این تفاوت که به دلیل فاصله گرفتن از کانون حریق، دما در این نقطه به طور کلی کاهش یافته است. تنها لازم است به این نکته اشاره گردد که در آزمون ۲ (تهویه اجباری با دو بازشو) نسبت به آزمون ۱ (تهویه طبیعی با دو بازشو) دیگر کاهش دمای قابل توجه اتفاق نمی افتد که دلیل آن وجود تهویه اجباری است. از ثانیه ۲۵۰ به بعد دمای بیشتری داریم که علت آن جریان هوای برگشتی یا اغتشاش ایجاد شده توسط تهویه اجباری است، از آنجایی که ترموکوپل ۴ قبل از محل خروجی است، تجمع این گازهای داغ در محل ترموکوپل ۴ باعث افزایش دمای هوای حاصل از احتراق شده است. در آزمون ۴ نسبت به آزمون ۳ این مسئله به شکل ملموس تری قابل مشاهده است که این موضوع به علت وجود یک بازشو بوده که این موضوع باعث بالاتر بودن دمای هوا در تمام طول آزمون ۴ برای تهویه اجباری نسبت به تهویه طبیعی در آزمون ۳ شده است؛ لذا می توان نتیجه گرفت استفاده از تهویه فشار مثبت در شرایط وجود یک بازشو در محفظه، رشد دمایی در نقاط نزدیک به کانون حریق اتفاق می افتد که می تواند فرایند اطفای حریق را برای آتش نشانان دچار مشکل نماید و لذا وجود دو بازشو در صورت تعبیه دمنده فشار مثبت مؤثرتر است.



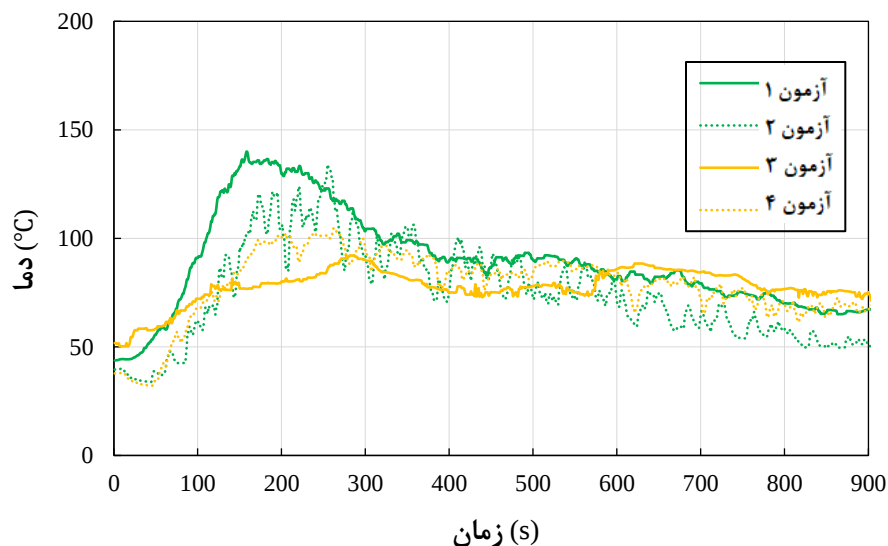
شکل ۷- دمای اندازه‌گیری شده توسط T_4 در آزمون‌های ۱-۴

محل قرارگیری ترموکوپل شماره ۷ بعد از بازشو جانبی و همچنین نزدیک‌ترین ترموکوپل به بازشو ورودی است. در آزمون‌های ۱ و ۲ با دو بازشو دمای ثبت شده توسط این ترموکوپل در آزمون ۲ با تهویه اجباری پایین‌تر از آزمون ۱ با تهویه طبیعی است (شکل ۸). چون هوای خروجی از محفظه از بازشوی جانبی بدون وجود مقاومت خارج می‌شود و دمیده شدن هوا در این شرایط اثر خنک‌کنندگی دارد. حتی نکته قابل توجه اینجاست که دمای بیشینه اتفاق افتاده در آزمون ۲ با تأخیر زمانی در حدود ۵۰ ثانیه اتفاق افتاده و دلیل این موضوع این است که علی‌رغم اینکه تأمین اکسیژن بیشتری را داریم؛ اما رنج دمایی پایین‌تری است که با تهویه اجباری در محفظه احتراق به وجود آمده است. در ضمن میزان دما بین ثانیه‌های ۵۰۰-۲۰۰ در دو آزمون ۱ و ۲ مشابه است و بعد از آن به دلیل اینکه حریق روبه‌زوال رفته اثر خنک‌کنندگی تهویه اجباری محسوس‌تر است. اما در آزمون ۳ و ۴ با یک بازشو نتایج کمی متفاوت است. شکل ۸ نشان می‌دهد که در اینجا نیز با وجود اینکه ترموکوپل ۷ در دورترین نقطه از حریق قرار دارد، دما از ثانیه ۱۰۰-۴۰۰ در آزمون ۴ با تهویه اجباری نسبت به آزمون ۳ با تهویه طبیعی بالاتر است. دلیل این موضوع بازگشت گازهای داغ در لایه بالای محفظه است. از آن به بعد در آزمون ۴ دماهای پایین‌تری مشاهده می‌شود که حریق روبه‌زوال بوده و وجود دمنده فشار مثبت در نقش خنک‌کننده عمل می‌کند.



شکل ۸- دمای اندازه‌گیری شده توسط T_7 در آزمون‌های ۱-۴

ترموکوپل ۸ روی بازشوی جانبی نصب شده است (شکل (۹)). مقادیر دمایی ثبت شده توسط این ترموکوپل در آزمون‌های ۳ و ۴ تقریباً مشابه است و علت این است که بازشو جانبی در این دو آزمون بسته بوده است. گرچه در آزمون ۴ در برخی زمان‌ها اندکی دمای بالاتری ثبت شده که علت مشابه موارد تحلیل شده برای ترموکوپل ۷ است. جهت تأکید ذکر می‌گردد که وجود جریان هوای اجباری باعث مغشوش شدن جریان هوای داخل محفظه شده و از طرفی اکسیژن‌رسانی نیز بیشتر بوده و لذا دمای بیشینه حریق در حالت تهویه اجباری بیشتر از تهویه طبیعی است. اما نتایج در شکل ۹ نشان می‌دهد که در حالت دو بازشو، دمای این ترموکوپل در آزمون ۲ با تهویه اجباری کمی پایین‌تر از آزمون ۱ با تهویه طبیعی است که دلیل آن اثر خنک‌کنندگی تهویه اجباری در دریچه‌های خروجی نشان می‌دهد. همین‌طور در اینجا نیز به دلیل وجود تهویه اجباری، وقوع دمای بیشینه اندکی با تأخیر اتفاق افتاده است. دمای ثبت شده توسط ترموکوپل ۸ که در محل بازشو قرار دارد در تهویه اجباری بسیار کمتر بوده که این موضوع برای آتش‌نشانان در طی فرایند اطفای حریق بسیار حائز اهمیت است و شرایط برای انجام عملیات اطفای حریق را بیشتر مهیا می‌نماید و دمای پایین در میزان توانمندی آتش‌نشانان در عملیات امداد و نجات بسیار تعیین‌کننده است.



شکل ۹- دمای اندازه‌گیری شده توسط T_8 در آزمون‌های ۱-۴

۴-۲. تحلیل دمای بیشینه در محفظه

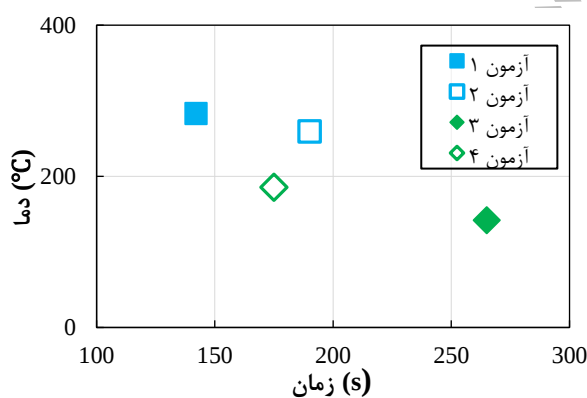
شکل (۱۰) به مقایسه دمای بیشینه در ۵ نقطه از محفظه می‌پردازد. این مقایسه شامل زمان وقوع و مقدار دمای بیشینه می‌شود. در شکل (۱۰-الف) دمای بیشینه آزمون‌های ۱-۴ را در ترموکوپل ۱ نشان داده است. در مقایسه بین آزمون‌های ۲ و ۱، مشاهده می‌شود وجود تهویه اجباری دمای بیشینه حین فرایند حریق در موقعیت پشت حریق از حدود ۱۷۶ سانتی‌گراد در تهویه طبیعی به مقادیر حدودی ۲۱۱ درجه سانتی‌گراد رسیده است. دلیل آن هم به جهت روبه‌جلوی جریان اجباری و تجمع و محبوس شدن هوای حاصل از احتراق در انتهای محفظه است. اگرچه زمان وقوع این دمای بیشینه با تأخیر افتاده؛ اما این نقطه به دلیل تجربه کردن بیشینه دمای بالاتر نقطه آسیب‌پذیرتری است که آتش‌نشانان باید لزوم امداد رسانی سریع‌تری را نسبت به افراد گرفتار در این نقاط را متوجه باشند. اما شکل (۱۰-الف) همچنین نشان می‌دهد که در آزمون‌های ۳ و ۴ با یک باز شو نکته قابل توجه اینجاست که برای تهویه اجباری دمای بیشینه هم به لحاظ زمان وقوع زودتر بوده هم دمای بالاتری داشته است که این مسئله قابل توجهی در شناسایی مناطق با ریسک بالا به لحاظ سرایت حریق به سایر نقاط و آسیب‌پذیری افراد گرفتار در این نقاط است.

در شکل (۱۰-ب) دمای بیشینه روی کانون حریق نشان داده شده است. در آزمون ۲ نسبت به ۱، استفاده از دمنده اول باعث تأخیر ۴۸ ثانیه‌ای در زمان وقوع دمای بیشینه شده و ثانیا مقدار این دما از ۲۸۰ درجه سانتیگراد به ۲۵۵ درجه نیز کاهش یافته است که این کاهش ۹ درصدی نکته مثبتی است و یافته‌های قبلی را تأیید می‌کنند. اما در آزمون ۳ و ۴ با یک بازشو، استفاده از تهویه اجباری و نبود خروجی اضافی باعث گردید که دمای بیشینه ۸۰ ثانیه زودتر در حالت تهویه فشار مثبت رخ دهد و هم مقدار آن حدود ۳۰ درصد افزایش یابد و به مقدار ۱۸۵/۶ سانتیگراد برسد. نتایج دمای ثبت شده در کانون حریق که در شکل (۱۰-ب) بیان شده است این نکته را مشخص می‌کند که استفاده از تهویه فشار مثبت در شرایطی که بار حریق محدود است نه تنها تأثیر مثبتی بر فرایند اطفای حریق نداشته؛ بلکه باعث افزایش دمای بیشینه کانون حریق و همچنین وقوع زودتر آن می‌گردد. همچنین نکته قابل توجه این است که در آزمون‌های ۳ و ۴ که محفظه فقط یک بازشوی باز داشت حتی با وجود تهویه فشار مثبت دمای بیشینه به طرز قابل توجهی از آزمون‌های ۱ و ۲ کمتر بود و این نشان‌دهنده اهمیت شرایط تهویه در حریق محفظه است (شکل (۱۰-ب)).

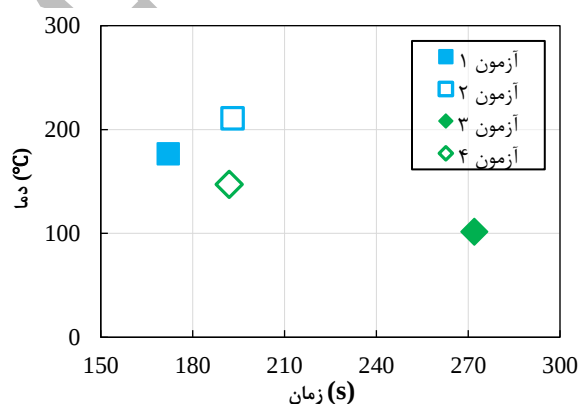
دمای بیشینه ثبت شده توسط ترموکوپل ۴ را طی چهار آزمون در شکل (۱۰-ج) نشان داده شده است. در آزمون ۲ نسبت به آزمون ۱، دمنده اثر خنک‌کنندگی داشته که دمای بیشینه هم کاهش ۵٪ داشته و هم به لحاظ زمانی ۳۵ ثانیه به تأخیر افتاده است. اما در خصوص شرایط محفظه با یک بازشو در آزمون‌های ۳ و ۴، دمنده نقش افزایش دما را بازی کرده که در تهویه اجباری به دلایلی که پیش‌ازین نیز ذکر شد هم افزایش ۲۷٪ داشته و به ۱۳۴/۲ درجه سانتیگراد رسیده است و هم زمان وقوع آن ۳۶ ثانیه زودتر بوده است. در شکل (۱۰-د) دماهای ثبت شده توسط ترموکوپل ۷ که بیشترین فاصله را تا منبع حریق و کمترین فاصله را تا بازشوی ورودی دارد، بیان شده است. در اینجا در هر دو حالت دو بازشو (آزمون‌های ۱ و ۲) و تک بازشو (آزمون‌های ۳ و ۴) مقادیر دما به یکدیگر نزدیک هستند. اما به لحاظ تأخیر زمانی اتفاق افتاده مشاهده می‌شود در حالتی که دو بازشو داریم وجود تهویه اجباری وقوع دمای حداکثر را ۳۸ ثانیه به تعویق انداخته که همان اثر خنک‌کنندگی است. اما در حالت تک بازشو وجود تهویه اجباری وقوع دمای

حداکثر را ۸۲ ثانیه به جلو انداخته که ناشی از اثر گردابه‌ها و محبوس شدن هوا و اکسیژن‌رسانی بیشتر به فرایند حریق و نیز بازگشت جریان هوای گاز داغ است.

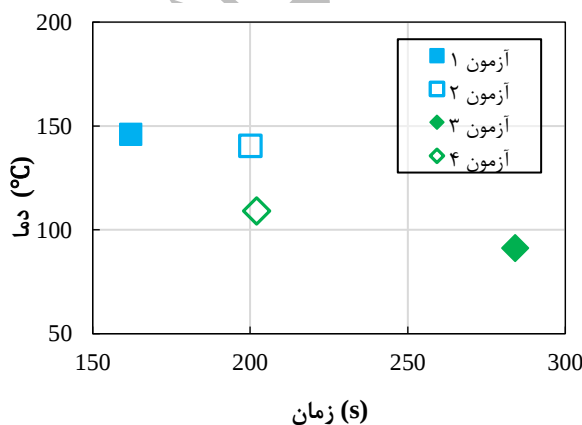
دماهای ثبت شده در ترموکوپل ۸ در شکل (۱۰-ه) نشان داده شده است. این ترموکوپل بر روی دهانه باز شو جانبی متصل شده است. در آزمون‌های ۳ و ۴ (یک باز شو) این دریچه بسته بوده و لذا ترموکوپل دمایی که در هر دو حالت تهویه اجباری و طبیعی ثبت کرده به لحاظ مقداری و زمان وقوع به هم نزدیک بوده که باتوجه به دوری این نقطه از منبع آتش این نتیجه منطقی و قابل درک است. اما در آزمون‌های ۱ و ۲ (وجود دو باز شو) پدیده دمای حداکثر مقادیر نزدیک به هم داشته که باتوجه به دور بودن از منبع آتش قابل درک است. اما به لحاظ زمانی تهویه اجباری باعث تأخیر ۹۷ ثانیه‌ای در وقوع دمای بیشینه شده که باتوجه به جریان تخلیه هوا از باز شو دوم و اثر خنک‌کنندگی دمنده، این تأخیر زمانی نیز قابل توجیه است.



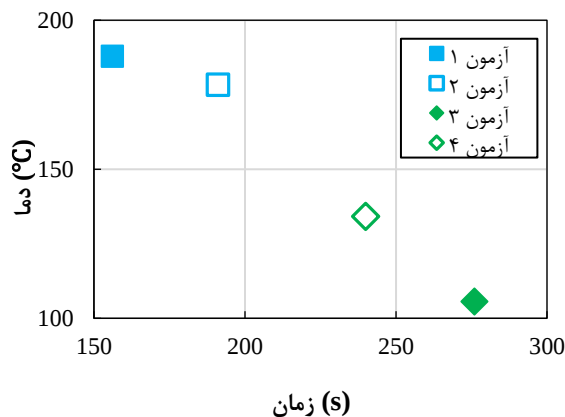
(ب)



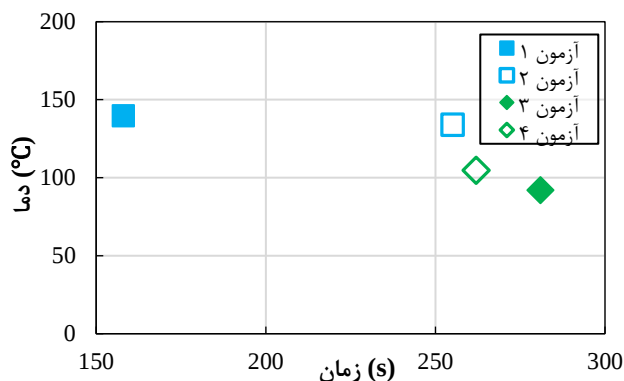
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۱۰- مقایسه دمای بیشینه اندازه گیری شده توسط ترموکوپل‌های الف) T_1 ب) T_2 ج) T_4 د) T_7 ه) T_8

۴-۳. مقایسه شکل ظاهری شعله بر اثر تهویه فشار مثبت و تهویه طبیعی

شکل (۱۱) وضعیت ظاهری شعله را در دقایق ۱، ۳، ۵، و ۷ آزمون‌های ۱ تا ۴ نمایش می‌دهد. نتایج شکل‌های (۱۱) (الف - ب - ه - و

- ط-ی) نشان می‌دهد که در آزمون ۲ که تهویه فشار مثبت فعال شده و محفظه دارای دو بازشو باز بوده است نسبت به آزمون ۱

که فقط دارای تهویه بوده، در مراحل شروع، رشد حریق و دمای بیشینه کانون حریق دارای دمای کمتری بوده و ظاهر شعله نیز

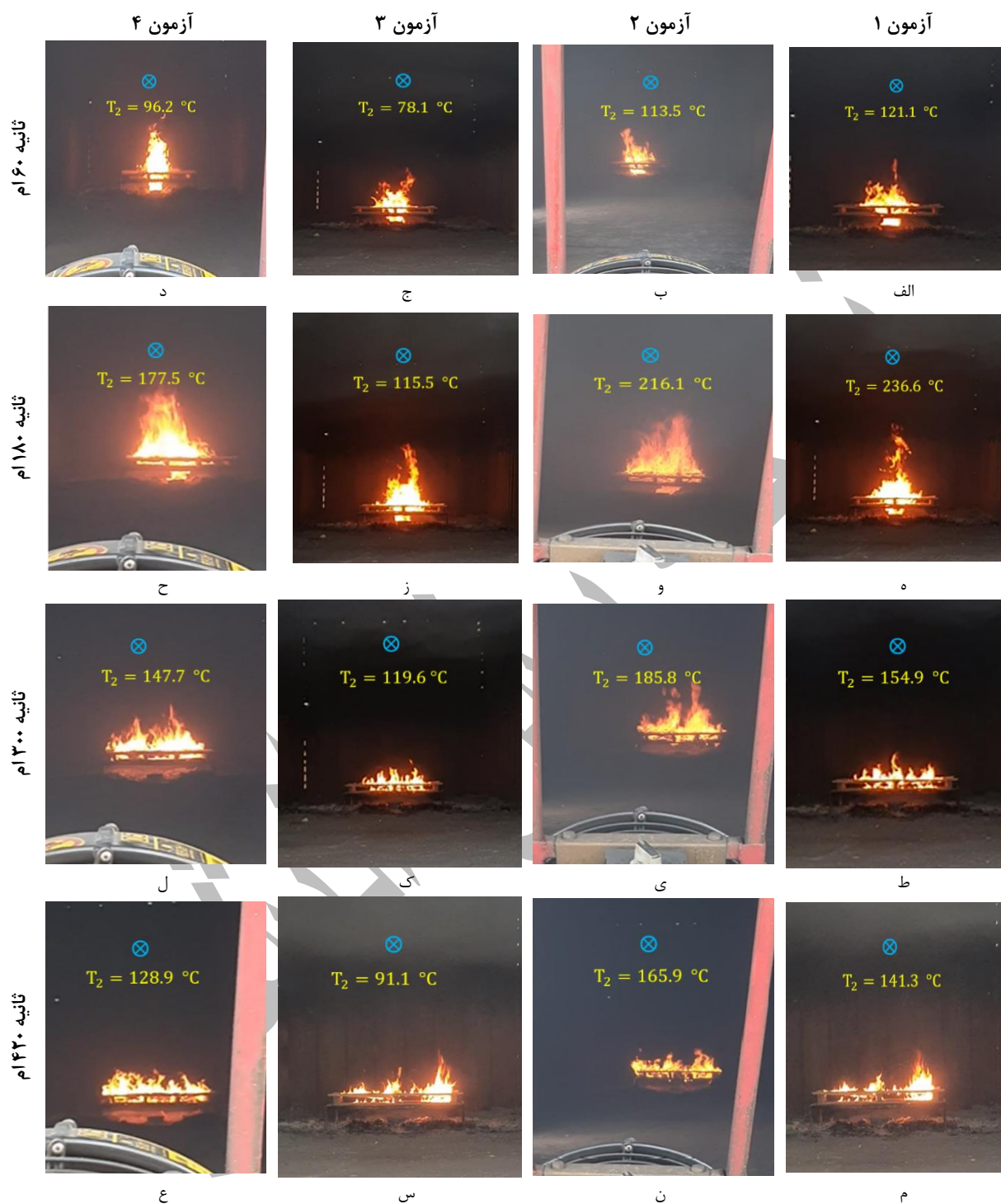
ضعیف‌تر شده است. اما در مرحله زوال وجود تهویه فشار مثبت باعث افزایش دما و تقویت شعله گردیده است (شکل (۱۱) (م - ن))

که این نتایج بیان می‌کند در استفاده از تکنیک تهویه فشار مثبت زمان‌بندی بسیار اهمیت دارد و باید با احتیاط از آن استفاده شود.

شکل‌های (۱۱) (ج-د-ز-ح-ک - ل-س-ع) این نتیجه را نمایش می‌دهد که نبود خروجی دوم در محفظه باعث شده است در تمامی

مراحل حریق استفاده از تهویه فشار مثبت باعث تقویت شعله و بالا رفتن دما شود که در عملیات اطفای حریق یک تهدید محسوب

می‌شود.



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات ظاهر شعله: (الف) ثانیه ۱۲۰ آزمایش ۱، (ب) ثانیه ۱۲۰ آزمایش ۲، (ج) ثانیه ۱۲۰ آزمایش ۳، (د) ثانیه ۱۲۰ آزمایش ۴، (ه) ثانیه ۱۸۰ آزمایش ۱، (و) ثانیه ۱۸۰ آزمون ۲، (ز) ثانیه ۱۸۰ آزمون ۳، (ح) ثانیه ۱۸۰ آزمون ۴، (ط) ثانیه ۳۰۰ آزمون ۱، (ی) ثانیه ۳۰۰ آزمون ۲، (ک) ثانیه ۳۰۰ آزمون ۳، (ل) ثانیه ۳۰۰ آزمون ۴، (م) ثانیه ۴۲۰ آزمون ۱، (ن) ثانیه ۴۲۰ آزمون ۲، (س) ثانیه ۴۲۰ آزمون ۳، (ع) ثانیه ۴۲۰ آزمون ۴.

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه به طور آزمایشگاهی رفتار آتش‌سوزی چوب را در یک محفظه بررسی کرد، و به طور دقیق اثر استفاده از تهویه فشار مثبت و مقایسه آن با تهویه طبیعی را با بار سوختی ۱۰ کیلوگرم تجزیه و تحلیل کرد. محیط آزمایشی شامل یک محفظه با ابعاد $۱۲/۲ \times ۲/۴ \times ۲/۳۵$ متر بود. نتایج این تحقیق بینش‌های مهمی را در مورد پویایی آتش‌نشان می‌دهد که به دانش عملی کمک می‌کند که پیامدهای مستقیمی برای بهینه‌سازی راهبردهای اطفای حریق دارد. نتیجه‌گیری اصلی به شرح زیر است:

فلش‌اور و مرحله توسعه‌یافتگی کامل: در هیچ کدام از آزمون‌ها، مراحل فلش‌اور و توسعه‌یافتگی کامل رخ نداد که به دلیل بار سوخت کم و محدود بود. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت بار سوخت در وقوع مراحل خطرناک حریق است.

مقدار دمای بیشینه: دمای بیشینه در پشت کانون حریق بر اثر تهویه فشار مثبت در هر دو شرایط بازشوهای محفظه افزایش یافت. در شرایط دو بازشو باز از حدود ۱۷۶ درجه سانتی‌گراد به ۲۱۱ درجه سانتی‌گراد افزایش و در شرایط یک بازشوی باز از ۱۰۱/۵ به ۱۴۷/۲ سانتی‌گراد افزایش یافت. در بالای کانون حریق در شرایط دوبازشو باز (آزمون‌های ۱ و ۲، دمای بیشینه با استفاده از تهویه فشار مثبت حدود ۹٪ کاهش یافت) از ۲۸۰ به ۲۵۵ درجه سانتی‌گراد) و در شرایط یک بازشوی باز دمای بیشینه در بالای کانون حریق بر اثر تهویه فشار مثبت در آزمون ۴ نسبت به آزمون ۳ حدود ۳۰٪ افزایش یافت. همچنین به‌طور کلی دمای بیشینه در اثر استفاده از تهویه فشار مثبت در تمامی نقاط محفظه در حالت دو بازشو باز به طور میانگین به استثنای پشت کانون حریق، ۵/۴٪ کاهش و در حالت یک بازشوی باز در تمامی نقاط محفظه حدود ۲۷٪ افزایش داشت.

زمان وقوع دمای بیشینه: در حالتی که محفظه دارای دو بازشوی باز بود (آزمون ۲ نسبت به آزمون ۱) استفاده از تهویه فشار مثبت منجر شد که دمای بیشینه در تمامی نقاط محفظه به طور میانگین ۴۸ ثانیه به تأخیر بیفتد. اما در آزمون ۴ نسبت به آزمون ۳ که تنها یک بازشو باز بود استفاده از تهویه فشار مثبت باعث شد دمای بیشینه در محفظه به طور میانگین ۶۱ ثانیه زودتر رخ دهد.

اثر تهویه فشار مثبت بر مرحله زوال: وجود تهویه فشار مثبت در آزمون ۲ نسبت به آزمون ۱ باعث شد که مرحله زوال با تأخیر حدود ۲۰ ثانیه شروع شود و دمای این مرحله از ثانیه ۲۷۰ام تا ثانیه ۴۴۰ام به طور میانگین ۹ درصد بالاتر باشد. اما در آزمون ۴ نسبت به آزمون ۳ تأثیر تهویه فشار مثبت بسیار قابل توجه بود به طوری که نه تنها به طور قابل توجهی دمای بیشینه را افزایش داد، بلکه دمای میانگین کانون حریق را از ثانیه ۱۰۰ام تا ثانیه پایان آزمایش به طور میانگین ۲۷٪ بالاتر برد.

اثر استفاده از تهویه فشار مثبت بر عملیات اطفای حریق: استفاده از تهویه فشار مثبت باید باتوجه به تعداد و موقعیت بازشوها انجام شود. مطابق با داده‌های ارائه شده در شکل‌های ۸ و ۹، مشاهده می‌شود که در سناریوهای دارای دو بازشو، دمای تجمعی لایه‌های بالایی کاهش یافته و گازهای داغ سریع‌تر تخلیه می‌شوند؛ بنابراین، استفاده از حداقل دو بازشو در تهویه فشار مثبت توصیه می‌شود. وجود دو بازشو باعث شکل‌گیری مسیر جریان پایدارتر برای ورود و خروج هوا شده و در نتیجه، گازهای داغ انباشته شده در لایه بالایی سریع‌تر خارج می‌شوند. این مسئله در نمودار تغییرات دما در سناریوهای دارای یک و دو بازشو مشهود است. همچنین نتایج نشان‌دهنده این نکته مهم بود که حتی در شرایطی که محفظه داری دو بازشو باز باشد، نقاطی که در پشت کانون حریق قرار دارند با استفاده از تهویه فشار مثبت دمای بالاتری را تجربه می‌کنند.

قدردانی‌ها

نویسندگان نهایت تشکر خود را از سازمان آتش‌نشانی مشهد برای همکاری‌های صمیمانه‌شان ابراز می‌دارند.

واژه نامه

Ignition	اشتعال
Turbulency	اغتشاش
Firefighting	اطفاء حریق
Wooden pallet	پالت چوبی

Thermocouple	ترموکوپل
Repeatability	تکرارپذیری
Fully Developed	توسعه یافتگی کامل
Forced Ventilation	تهویه اجباری
Positive pressure ventilation	تهویه فشار مثبت
Natural Ventilation	تهویه طبیعی
Convection Stream	جریان همرفتی
Return air flow	جریان هوای برگشتی
Growth	رشد
Fire Behaviour	رفتار حریق
Decay	زوال
Flame	شعله
Uncertainty	عدم قطعیت
Flashover	فلش اور
Combustion Chamber	محفظه احتراق

مراجع:

- [1] K. Garcia, R. Kauffmann, and R. Schelble, *Positive Pressure Attack for Ventilation & Firefighting* . 2006.
- [2] A. Tewarson and J. Steciak, *Fire ventilation*, vol. 53, no. 1–3. 1983. doi: 10.1016/0010-2180(83)90011-1.
- [3] C. L. Chow, C. H. Cheng, and W. K. Chow, “Active Firefighting Systems Against Flashover Fires in Big Halls,” *Fire*, vol. 7, no. 12, pp. 4–7, 2024, doi: 10.3390/fire7120486.
- [4] A. Warriar, “EFFECTIVENESS OF POSITIVE PRESSURE,” in *International Conference on Safety and Fire Engineering*, 2017.
- [5] D. S. S. K. Daniel Madrzykowski, S. Kerber, and D. Madrzykowski, “Evaluating positive pressure ventilation in large structures: high-rise pressure experiments,” *Nistir 7412*, p. 72, 2007.
- [6] P. S. Ziesler, F. S. Gunnerson, and S. K. Williams, “Advances in positive pressure ventilation: Live fire tests and laboratory simulation,” *Fire Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 269–277, 1994, doi: 10.1007/BF01040006.

- [7] T. Y. Yeung, W. K. Chow, H. Kong, T. Hong, and K. Polytechnic, "This is the Pre-Published Version . A Study on Positive Pressure Ventilation in Room Fires Using a Small Scale Model," vol. 50, no. May 2018, pp. 243–261, 2019.
- [8] W. D. Walton and S. Kerber, "Full-Scale Evaluation of Positive Pressure Ventilation In a Fire Fighter Training Building," *NIST - Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2006.
- [9] S. Kerber, "Evaluation of fire service positive pressure ventilation tactics on high-rise buildings," 2005.
- [10] P. Kaczmarzyk, Ł. Warguła, and P. Janik, *Experimental studies of the influence of mobile fan positioning parameters on the ability to transport the air stream into the door opening*, vol. 13, no. 1. Nature Publishing Group UK, 2023. doi: 10.1038/s41598-023-42147-5.
- [11] S. Svensson, "A study of tactical patterns during fire fighting operations.PDF," *Fire Saf. J.*, vol. 37, pp. 673–695, 2002.
- [12] W. E. Hurford, "Effect of positive pressure ventilation on cardiovascular function," *Curr. Opin. Anaesthesiol.*, vol. 2, no. 6, pp. 789–795, 1989, doi: 10.1097/00001503-198912000-00019.
- [13] S. Svensson, "Experimental study of fire ventilation during fire fighting operations," *Fire Technol.*, vol. 37, no. 1, pp. 69–85, 2001, doi: 10.1023/A:1011653603104.
- [14] K. Lambert, S. Welch, and B. Merci, "The Use of Positive Pressure Ventilation Fans During Firefighting Operations in Underground Stations: An Experimental Study," *Fire Technol.*, vol. 54, no. 3, pp. 625–647, 2018, doi: 10.1007/s10694-018-0700-8.
- [15] C. M. Beal and O. A. Ezekoye, "EFFECTS OF EXIT VENT LOCATION ON FIRE ROOM CONDITIONS DURING PPV," in *Proceedings of the ASME 2008 Summer Heat Transfer Conference*, 2017, pp. 1–11.
- [16] L. Acherar, H. Y. Wang, J. P. Garo, and B. Coudour, "Impact of air intake position on fire dynamics in mechanically ventilated compartment," *Fire Saf. J.*, vol. 118, no. July, p. 103210, 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103210.
- [17] P. Panindre, N. S. S. Mousavi, and S. Kumar, "Improvement of Positive Pressure Ventilation by optimizing stairwell door opening area," *Fire Saf. J.*, vol. 92, no. May, pp. 195–198, 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.06.007.
- [18] E. J. Lee, C. B. Oh, K. C. Oh, Y. H. Yoo, and H. J. Shin, "Performance of the smoke extraction system for fires in the Busan-Geoje immersed tunnel," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 25, no. 5, pp. 600–606, 2010, doi: 10.1016/j.tust.2010.04.005.
- [19] H. Pr  tre and J. M. Such, "Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment scenario," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 235, no. 20, pp. 2155–2169, 2005, doi: 10.1016/j.nucengdes.2005.03.003.
- [20] O. A. Ezekoye, K. Lakshminarasimhan, P. Seers, and R. Nicks, "Effects of PPV attack on thermal conditions in a compartment downstream of a fire," *Fire Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 193–208, 2005, doi: 10.1007/s10694-005-1270-0.
- [21] O. A. Ezekoye, C. H. Lan, and R. Nicks, "Positive Pressure Ventilation Attack for Heat Transport in a House Fire," *6th ASME-JSME Therm. Eng. Jt. Conf.*, no. C, 2003, [Online]. Available: <http://www.me.utexas.edu/~ezekoye/rsch.dir/documents/Hwy71tests.pdf>
- [22] O. A. Ezekoye and S. Svensson, "Investigating Positive Pressure Ventilation," *ResearchGate*, no. January 2007, p. 12, 2007.
- [23] C. M. Beal, M. Fakhreddine, and O. A. Ezekoye, "Effects of leakage in simulations of positive pressure ventilation," *Fire Technol.*, vol. 45, no. 3, pp. 257–286, 2009, doi: 10.1007/s10694-008-0055-7.
- [24] K. Lambert and B. Merci, "Experimental Study on the Use of Positive Pressure Ventilation for Fire Service Interventions in Buildings with Staircases," *Fire Technol.*, vol. 50, no. 6, pp. 1517–1534, 2014, doi: 10.1007/s10694-013-0359-0.

- [25] X. Feng and Y. Li, "Evaluation of positive pressure ventilation for high-rise buildings in compartment fire situation," *Adv. Mater. Res.*, vol. 446–449, pp. 2908–2913, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.446-449.2908.
- [26] M. M. Fatemeh Behbahani, Mahdi Hamzei, Zahra Mehrdoost, "Numerical Verification of the Effect of Side Wind on the Staircase of a Tall Building with," *J. Appl. Comput. Sci. Mech.*, pp. 21–34, 2024.
- [27] H. N. Seyed Ahmad Kebriyae, Mohammad Moghiman, "Numerical study of the effect of ambient air temperature and relative humidity on diesel pool fire," *J. Fuel Combust.*, vol. 17, no. 2, pp. 57–76, 2024.
- [28] J. Zhao, Z. Wang, Z. Hu, X. Cui, X. Peng, and J. Zhang, "Effects of Fire Location and Forced Air Volume on Fire Development for Single-Ended Tunnel Fire with Forced Ventilation," *Fire*, vol. 6, no. 3, 2023, doi: 10.3390/fire6030111.
- [29] M. Łapicz, R. Makowski, and J. Jędrzejak, "Increased effectiveness of firefighting during internal fires with the use of positive pressure attack," in *MATEC Web of Conferences*, 2018. doi: 10.1051/mateconf/201824700036.
- [30] H. Ingason and R. Fallberg, "Positive pressure ventilation in single medium-sized premises," *Fire Technol.*, vol. 38, no. 3, pp. 213–230, 2002, doi: 10.1023/A:1019825931076.
- [31] W. K. Chow, H. Kong, C. L. Chow, and H. Kong, "About Air Pumping through Openings in a Room Fire," no. June, 2023.
- [32] S. A. Kebriyae, M. Moghiman, and H. Niazmand, "Empirical study on the influence of initial relative humidity on wood crib fire behavior in compartment under varied natural ventilation conditions," *Fire Saf. J.*, vol. 148, no. April, p. 104229, 2024, doi: 10.1016/j.firesaf.2024.104229.
- [33] S. A. Kebriyae, M. Moghiman, and H. Niazmand, S. M. Miri "Investigating Wood Crib Fire Behavior in Firefighting Training Compartment: An Experimental Analysis of Fuel-Air Ratios," *Fire Mater.* 2025; 0:1–17. <https://doi.org/10.1002/fam.3298>.
- [34] W. D. Walton, P. H. Thomas, and Y. Ohmiya, "Estimating temperatures in compartment fires," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition*, Springer New York, 2016, pp. 996–1023. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0_30.
- [35] R. J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1988, doi: 10.1016/0894-1777(88)90043-X.
- [36] R. J. Moffat, "Using uncertainty analysis in the planning of an experiment," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 107, no. 2, pp. 173–178, 1985, doi: 10.1115/1.3242452.