



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Society of
Manufacturing
Engineering of
Iran

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

Research Article

Sayed Ahmad Kebriyaei¹, Mohammad Moghiman² , Hamid Niazmand³, Seyedeh Mohadeseh Miri⁴

 [10.22067/jacsm.2025.90429.1292](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.90429.1292)

Abstract-- Positive pressure ventilation (PPV) is a common method used to enhance smoke removal and reduce ambient temperatures during firefighting operations; however, its effectiveness depends on the ventilation conditions of the compartment. This experimental study investigated the effects of natural and forced ventilation in a metal compartment measuring $12.2 \times 2.4 \times 2.35$ meters, using 10 kilograms of wooden pallets as fuel. Ventilation was evaluated under two modes—natural and forced (blower with an airflow rate of $18,500 \text{ m}^3/\text{h}$)—with configurations involving one or two active openings. The results indicated that flashover did not occur in any of the tests due to the limited fuel load. Under forced ventilation with two openings, the peak temperature above the fire source decreased by 9% (from 280°C to 255°C), while the temperature behind the fire increased by 20% (from 176°C to 211°C). In contrast, with only one opening, forced ventilation led to a 30% increase in peak temperature above the fire (from 141.9°C to 185.6°C) and a 45% increase in the rear temperature (from 101°C to 147°C) compared to natural ventilation. Additionally, the time to reach peak temperature under forced ventilation with two openings was delayed by an average of 48 seconds, while in the one-opening configuration, it occurred 61 seconds earlier. These findings suggest that using PPV in compartments with only one opening may increase the risk of overheating and the accumulation of hot gases. Therefore, it is recommended that this technique be employed only when at least two openings are available.

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

1- Introduction

One effective method in firefighting is the use of positive pressure ventilation (PPV) with portable fans, which creates additional pressure to exit heat and smoke from buildings [1–3]. The PPV effectiveness and the factors

influencing it have been examined in numerous studies. According to the U.S. National Institute of Standards and Technology, when properly adjusted, PPV can enhance safety by preventing smoke infiltration into stairwells [4]. Although PPV offers significant advantages, the suitable exhaust opening location can play an essential role in effective smoke removal and fire growth control [5]. Also, increasing the cross-sectional area of the exhaust outlet improves ventilation performance by increasing airflow and reducing velocity [6]. In contrast, PPV may pose risks to trapped occupants and increase the likelihood of fire spreading to adjacent rooms [7]. Firefighters' entry can alter the ventilation-to-fuel ratio, and PPV may accelerate combustion rates by increasing fuel mass loss [8]. Consequently, temperatures rise in downwind rooms and decrease in upwind rooms. Numerical studies have shown that PPV can, under certain conditions, reignite fires after flashover, jeopardizing operational safety. A review of previous research highlights the scarcity of studies evaluating PPV effectiveness in single-opening scenarios with no pathway for hot gas expulsion. Furthermore, prior studies rarely compared thermal behavior under PPV and natural ventilation in chambers with one or two openings. The difference in the number of openings can significantly impact hot gas behavior and the intensity and timing of phenomena like flashover. To address this gap, the present study, as an experimental innovation, designed and conducted a series of tests in an educational chamber with two openings.

2- Problem Theory

Figure 1 and Tables 1 and 2 show the combustion chamber specifications, the conditions of the openings in different tests, and the positions of the thermocouples.

* Manuscript received 2024 October 25, Revised 2025 March 21, Accepted 2025 June 7.

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Corresponding Author: Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email:** moghiman@um.ac.ir

³ Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

⁴ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran.

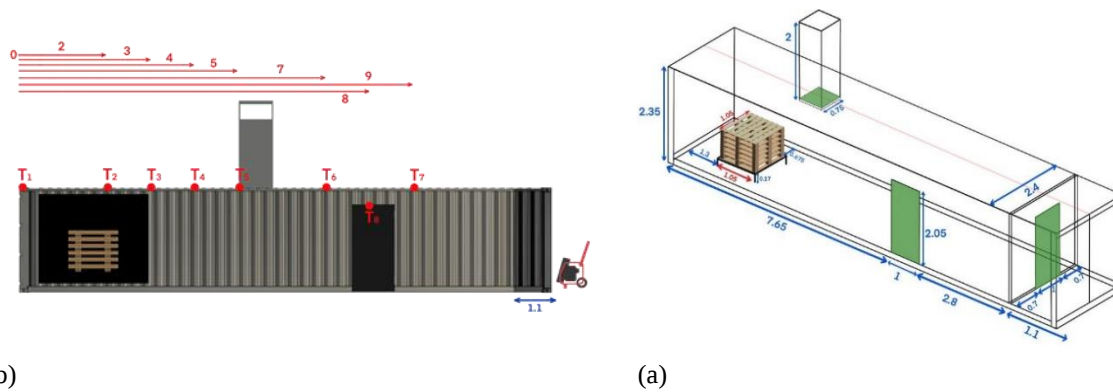


Figure 1 - Dimensions of the chamber along with the location of the fuel load and thermocouples: a) 3D view of the chamber. b) 2D view of the thermocouples and the location of the positive pressure fan.

Table 1- Specifications of the fuel load weight, the location of the openings, and the ventilation conditions

Test Number	Ambient air pressure (mbar)	Relative humidity of (%) ambient air	Ambien (°C) Temperature	Compartment Air Temperature (°C)	Ventilation Condition	Opening Situation			(Kg) Fuel Load
						Roof Opening	Input Opening	Side Opening	
1	1018	25	29	35	Natural	Closed	Open	Open	10
2	1021	23	31	37	Forced	Closed	Open	Open	10
3	1019	24	30	36	Natural	Closed	Open	Closed	10
4	1018	25	20	35	Forced	Closed	Open	Closed	10

Table 2 - Position of thermocouples installed in the test chamber

Thermocouple Number	Location X (m)	Location Y (m)	Location Z (m)
T_1	1.25	.	2.2
T_2	1.25	2	2.2
T_3	1.25	3	2.2
T_4	1.25	4	2.2
T_5	1.25	5	2.2
T_6	1.25	7	2.2
T_7	1.25	9	2.2
T_8	1.25	8	2.2

Fires progress through five stages: 1) ignition, 2) growth, 3) flashover, 4) fully developed fire, and 5) decay. Flashover is defined as the transition from a growing fire to a fully developed fire, where all combustible items in the compartment ignite. The fully developed stage exhibits the highest heat release rate, influenced by compartment conditions such as size, construction materials, opening dimensions and shape, and fuel type, quantity, and distribution. The decay stage occurs as fuel is consumed, leading to reduced heat release and compartment temperatures. In current study, 4 tests were designed according to the conditions stated in Table 1. Wooden pallets were used as fuel. Analyzing the fire thermal

behaviour in each test, is the study goal, which is discussed in the results section.

3- Results and Discussion

Thermocouples placed at varying distances from the fire source recorded different temperatures across experiments. Figure (2) displays the temperature of the upper layer of hot gases inside the chamber, recorded by thermocouples during one repetition of Test 2. Notably, T_2 consistently recorded the highest temperatures due to its proximity to the fire source directly above it. These temperatures were used to analyze growth, fully developed, decay, and peak temperature stages.

Thermocouple No. 2, installed above the fire source (flame), exhibited distinct behavior compared to other thermocouples, as shown in Figure (3). In Test 2, forced ventilation with PPV reduced the air temperature above the fire source compared to Test 1 (natural ventilation). This reduction resulted from enhanced airflow and facilitated combustion product expulsion through the opposing opening. In contrast, Tests 3 and 4, with only one active opening and PPV installed at the same location, showed restricted exhaust pathways. The pressurized air encountered resistance, hindering combustion product expulsion and transforming the compartment into a high-pressure, poorly ventilated space. Hot gases accumulated in the upper compartment, reducing convective heat transfer. Under these conditions, no opposing force prevented smoke and hot gas from ascending, leading to lower temperatures recorded by Thermocouple No. 2 above the fire source.

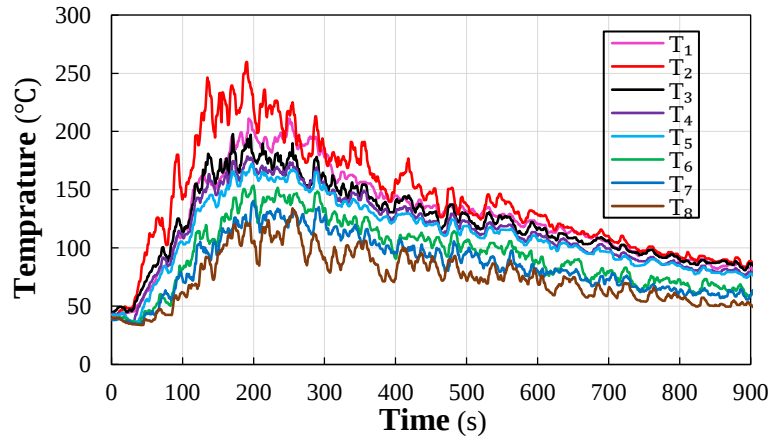


Figure 2 - Temperatures measured by thermocouples during one of the test iterations

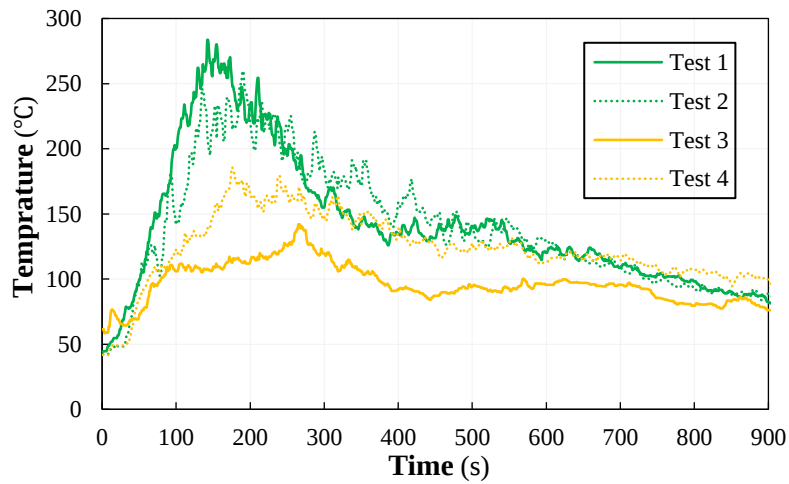


Figure 3 - Temperature measured by T_2 in tests 1-4

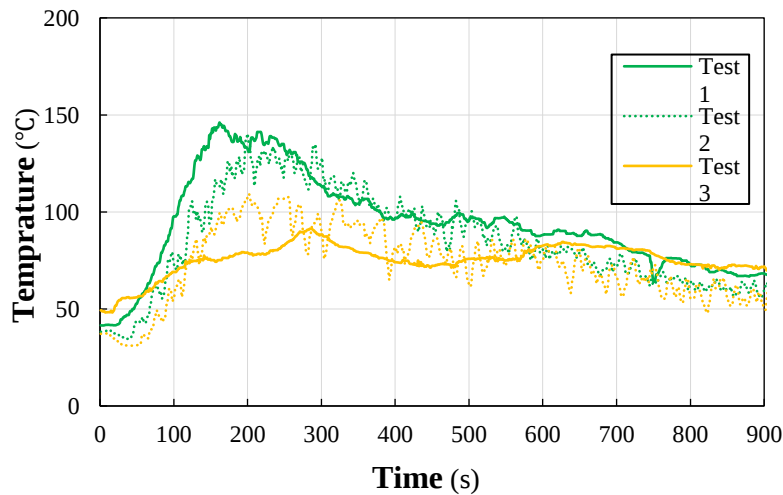


Figure 4 - Temperature measured T_7 in tests 1-4

Flashover is defined as the point when temperatures reach 600°C. Figure (3) shows that neither natural nor forced ventilation conditions led to flashover or fully developed fire stages, attributed to the limited fuel load. Notably, in Test 2, PPV delayed the decay stage by

approximately 20 seconds compared to Test 1, with temperatures during this stage (from 270 to 440 seconds) averaging 9% higher. In Test 4, PPV significantly increased peak temperatures and raised the average fire source temperature by 27% from the 100th second until the

test's conclusion compared to Test 3.

Other thermocouples exhibited similar behavior. Figure (4) displays the behavior of Thermocouple No. 7 across Tests 1–4. Thermocouple No. 7, located near the side opening and closest to the inlet, recorded lower temperatures in Test 2 (forced ventilation) than in Test 1 (natural ventilation). The peak temperature in Test 2 occurred approximately 50 seconds later, attributed to increased oxygen supply but lower temperature ranges under forced ventilation. Despite its distance from the fire, temperatures in Test 4 (forced ventilation) were higher than in Test 3 (natural ventilation) from 100 to 400 seconds due to hot gas recirculation in the upper chamber layer. Beyond this point, lower temperatures in Test 4 indicated fire decay, with PPV acting as a cooling mechanism.

4- Conclusion

This experimental study examined wood fire behavior in a compartment, analyzing the effects of PPV compared to natural ventilation with a 10 kg fuel load. Key findings include:

1. **Flashover and Fully Developed Stage:** Neither occurred in any test due to the limited fuel load.
2. **Peak Temperature:** PPV increased peak temperatures behind the fire source in both opening configurations.
3. **Time to Peak Temperature:** With two openings (Test 2 vs. Test 1), PPV delayed peak temperatures by an average of 48 seconds. With one opening (Test 4 vs. Test 3), PPV accelerated peak temperatures by 61 seconds.
4. **Effect on Decay Stage:** PPV delayed decay onset by 20 seconds in Test 2 but raised average temperatures by 27% in Test 4.
5. **Operational Implications:** PPV should be used with consideration of the opening number and position. Results recommend at least two openings to mitigate hot gas accumulation risks. PPV is not advised for single-opening compartments with limited fuel loads.

Reference

- [1] K. Garcia, R. Kauffmann, R. Schelble, Positive Pressure Attack for Ventilation & Firefighting, 2006.
- [2] A. Tewarson, J. Steciak, Fire ventilation, 1983. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(83\)90011-1](https://doi.org/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. <https://doi.org/10.3390/fire7120486>
- [4] 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.
- [5] T.Y. Yeung, W.K. Chow, H. Kong, T. Hong, K. Polytechnic, This is the Pre-Published Version . A Study on Positive Pressure Ventilation in Room Fires Using a Small Scale Model, vol. 50, pp.243–261. (2019)
- [6] 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," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42147-5>
- [7] W.E. Hurford, Effect of positive pressure ventilation on cardiovascular function, *Curr. Opin. Anaesthesiol.* vol. 2, no. 6, pp. 789–795 (1989). <https://doi.org/10.1097/00001503-198912000-00019>.
- [8] S. Svensson, Experimental study of fire ventilation during fire fighting operations, *Fire Technol.* vol. 37, pp. 69–85. (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1011653603104>.



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

مقاله پژوهشی

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

doi 10.22067/jacsm.2025.90429.1292

چکیده تهویه فشار مثبت برای بهبود تخلیه دود و کاهش دما در آتش‌نشانی 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.

واژه‌های کلیدی رفتار حریق چوب، تهویه اجباری، تهویه طبیعی، دمای بیشینه.

مقدمه

یکی از روش‌های مؤثر در آتش‌نشانی، استفاده از تهویه فشار مثبت (Positive Pressure Ventilation) (PPV) با کمک دمنده‌های قابل حمل است که با ایجاد فشار اضافی، گرما و دود را از ساختمان خارج می‌کند [1]–[3]. 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 آتش‌نشانی‌ها 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 به طور مؤثر تخلیه کند و در عین حال موجب افزایش دما و رشد آتش در ارتفاعات پایین شود [8]، [9]. از طرفی با افزایش مقطع خروجی، دبی هوای خروجی افزایش 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

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۳/۱۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۳) استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۴) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل.

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 فرایند احتراق و تهویه تأثیرگذار هستند؛ به عنوان مثال، با افزایش فاصله دمنده تا حدی معین، جریان ورودی افزایش 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 کردند 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 (Fire Dynamics Simulator) (FDS) ارزیابی کردند و دریافتند که PPV می‌تواند فشار اضافی ناشی از اثر دودکش را کاهش دهد و در مقایسه با روش‌های سنتی، حفاظت بهتری ارائه کند. در ادامه، نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت جریان هوای دمیده شده به راه‌پله‌ها، دما کاهش می‌یابد [26]. در شبیه‌سازی حریق استخری 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

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 به طور محسوسی کاهش دهد [12]، اما ممکن است خطراتی برای ساکنان گرفتار در داخل ساختمان ایجاد کند و احتمال گسترش آتش را به اتاق‌های مجاور افزایش دهد. همچنین ورود آتش‌نشانان می‌تواند نسبت تهویه و سرعت سوخت را تغییر دهد 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 داد 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 می‌شود 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 دهد 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 بدون تأثیر چشمگیر بر دما یا فشار گاز، کاهش می‌دهد، اما بستن همزمان ورودی و خروجی می‌تواند موجب نوسانات فشار شود [19].

ازکی و همکاران [20] و [21] با تعریف دو ناحیه مجزا به عنوان اتاق حریق و اتاق قربانی، تأثیر تهویه فشار مثبت را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از دمنده باعث افزایش دمای اتاق حریق و راهرو شده و

به ارزیابی اثربخشی PPV در شرایطی پرداخته‌اند که تنها یک بازشو 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 بازشو پرداخته‌اند. این در حالی است که تفاوت تعداد بازشوها می‌تواند تأثیر چشمگیری بر رفتار گازهای داغ، شدت و زمان وقوع پدیده‌هایی مانند فلش‌اور داشته باشد.

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

اهداف اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

۱. بررسی اثر نظام‌های تهویه فشار مثبت و طبیعی بر رفتار حرارتی لایه بالایی گازها در حالت تک بازشو.
 ۲. بررسی تفاوت رفتار حرارتی گازها در حالت دو بازشو تحت تأثیر تهویه طبیعی و فشار مثبت.
 ۳. تحلیل مرحله کاملاً توسعه یافته 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 بازشو و دو بازشو 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:
۱. احتمال وقوع فلش‌اور در مرحله توسعه یافته آتش‌سوزی، تحت کدام شرایط تهویه‌ای (طبیعی یا اجباری) و با توجه به الگوهای دمایی، بیشتر است؟

در این مطالعه، نوع تهویه (طبیعی یا فشار مثبت) و تعداد بازشوها (یک یا دو) به عنوان متغیرهای مستقل، و رفتار دمایی گازهای لایه بالایی و احتمال وقوع فلش‌اور به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده‌اند. رویکرد داده‌محور و استفاده از

گسترش حریق و ارتقای 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 از تأثیر PPV و مقایسه آن با تهویه طبیعی غفلت شده است [33].

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 آتش‌نشانی، آتش‌نشانان غالباً با فضاهایی مواجه می‌شوند که تنها یک ورودی دارند و فاقد هر گونه 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

اندازه‌گیری‌های دقیق دمایی، امکان تحلیل علمی و نظام‌مند تأثیر تهویه و هندسه بازشو بر ایمنی و توسعه آتش را فراهم ساخته است.

تئوری مسئله

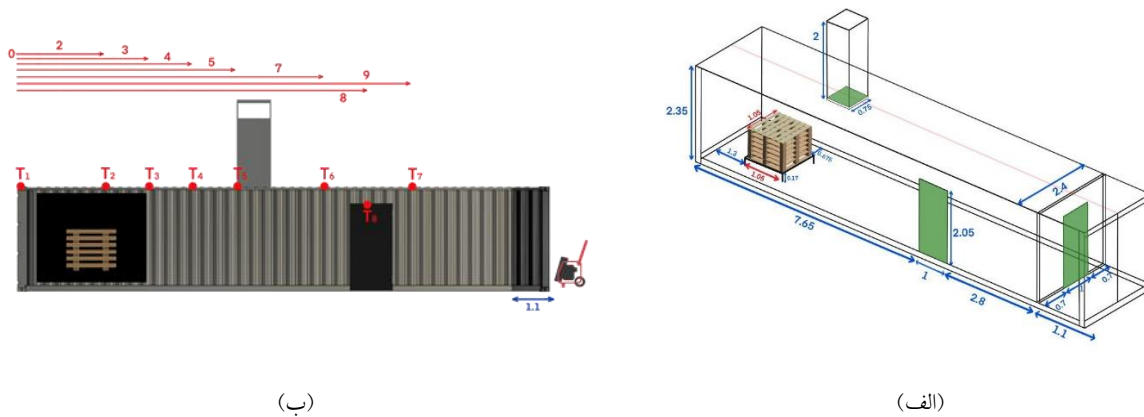
جزئیات محفظه و روش‌شناسی آزمایش‌ها

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 نشان داده شده 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 به صورت دستی از طریق یک ساختار مکانیکی کنترل می‌شوند و امکان باز و بسته شدن را فراهم می‌کنند. شرایط حاکم بر آزمایش‌ها به لحاظ باز یا بسته بودن 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 می‌شوند 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 $۰/۰۷۵ \times ۱/۰۵ \times ۱/۰۵$ 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 ۱۱٪ بود. تراکم متوسط پالت‌های چوبی مورد استفاده در این مطالعه برابر با حدود ۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود.

شروع فرایند اشتعال با کمک ۲۰۰ سی‌سی بنزین که در یک ظرف فولادی با سطح مقطع مربع، به عرض ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ 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 ۱ متر از آن، مستقیماً بالای دهانه جانبی، و در فواصل ۲ متری فراتر از دهانه سقفی قرار دارند. شکل (۱ - ب) محل قرارگیری ترموکوپل‌ها را نشان می‌دهد و جدول (۲) موقعیت‌های نصب هر ترموکوپل را مشخص می‌کند. آزمایش‌ها در شرایط مشابه، با دمای محفظه 36 ± 2 درجه سانتی‌گراد، دمای محیط 29 ± 2 درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی هوای محیط $25 \pm 2\%$ و فشار محیط 1015 ± 10 میلی‌بار انجام شد. شرایط آب و هوایی 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 هر یک از بازشوها در جدول (۱) مشخص شده است. در آزمون ۱ هر دو بازشو جانبی و ورودی باز است 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 می‌شود 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 (°C)	دمای هوای محیط (°C)	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

مراحل حریق در یک محفظه

قطارها و مانند آن‌ها یافت می‌شود. آتش‌سوزی در محفظه‌ها در ۵ مرحله تعریف می‌شود: (۱) اشتعال، (۲) رشد، (۳) فلش‌اور (Flashover)، (۴) توسعه‌یافتگی کامل، (۵) زوال. اگرچه بسیاری از آتش‌سوزی‌ها از این ایدئال‌سازی پیروی نمی‌کنند، اما چارچوب مفیدی برای بحث آتش‌سوزی محفظه فراهم می‌کنند.

آتش‌های محفظه‌ای با عنوان آتش‌سوزی در فضاهای بسته تعریف می‌شوند که معمولاً به صورت اتاق‌هایی در ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شوند، اما ممکن است شامل فضاهای دیگری مانند مواردی باشد که در وسایل حمل و نقل مانند کشتی‌ها، هواپیماها،

(δu_{eqp}) محاسبه می‌شود و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\delta u = \sqrt{(\delta u_{eqp})^2 + (\delta u_{rep})^2} \quad (1)$$

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

$$\delta u_{eqp} = a/\sqrt{3} \quad (2)$$

$$\delta u_{rep} = \sigma/\sqrt{N} \quad (3)$$

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 ± 0.5 درجه سانتی‌گراد ± 0.4 تعیین شده است. لازم به ذکر است که هر آزمایش در سه تکرار انجام شده تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود.

جدول (۳) محاسبه عدم قطعیت را به عنوان 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؛ چرا که میانگین عدم قطعیت کل از $6/97$ درجه سانتی‌گراد کمتر است.

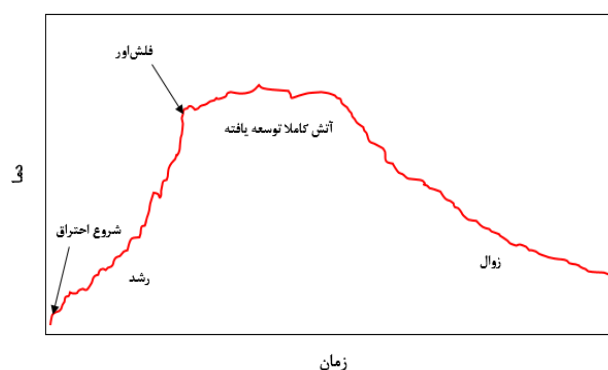
جدول ۳ مشخصات عدم قطعیت در اندازه‌گیری دما

شماره ترموکوپل	u_{eqp} °C	u_{rep} °C	u_{tot} °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	۵/۹۶	۵/۹۶
T_5	۰/۴۱	۶/۴۳	۶/۴۴
T_6	۰/۳۶	۷/۲۱	۷/۲۱
T_7	۰/۳۹	۵/۹۸	۵/۹۹
T_8	۰/۳۷	۷/۸۶	۷/۸۶

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

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 آتش‌نشانی دستی یا خودکار قرار گیرند. مرحله اشتعال زمانی است که در طی آن آتش‌سوزی در یک محفظه شروع می‌شود. مرحله رشد مرحله‌ایست که پس از اشتعال، آتش در ابتدا به عنوان تابعی از خود سوخت، با تأثیر کم یا بدون تأثیر شرایط محفظه، رشد می‌کند. فلش‌اور به طور کلی به عنوان یک آتش فزاینده به یک آتش کاملاً توسعه یافته تعریف می‌شود که در آن تمام اقلام قابل احتراق در محفظه درگیر آتش می‌شوند. در طی این انتقال تغییرات سریعی در محیط محفظه رخ می‌دهد. دمای گاز $300 - 650$ درجه سانتی‌گراد با شروع فلش‌اور همراه بوده است، اگرچه دمای $500 - 600$ درجه سانتی‌گراد بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرحله توسعه‌یافتگی کامل مرحله‌ایست که 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 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].

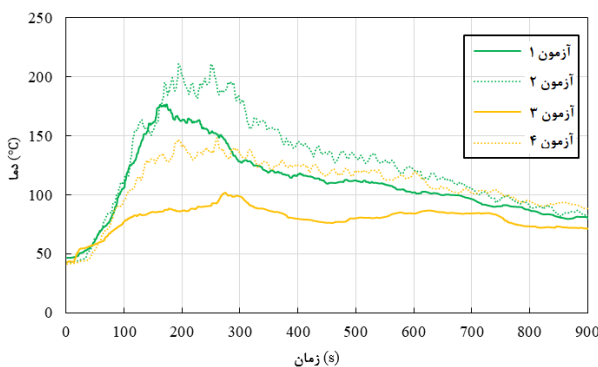


شکل ۲ مراحل مختلف حریق در اتاق

تحلیل تکرارپذیری و عدم قطعیت آزمایش‌ها

در مطالعه پیشرو از روش مراجع [32]، [35]، [36] برای ارزیابی تغییرپذیری در تکرار آزمایش‌ها 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

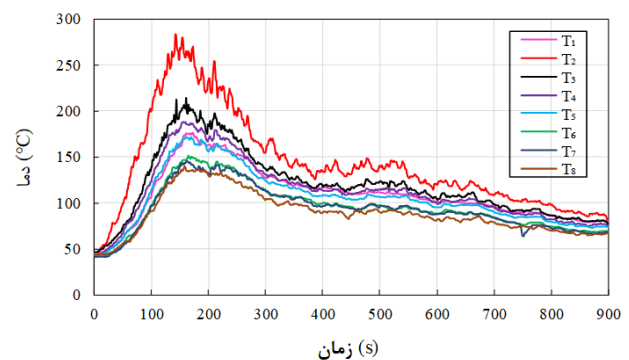
احتراق در آزمون‌های ۲ و ۴ دارای دماهای بالاتری در محل ترموکوپل ۱ هستند. علت این پدیده نقش دمنده در عقب راندن جریان هوا به سمت انتهای محفظه احتراق است. در انتهای محفظه هیچ دریچه بازشویی نداریم و به نوعی جریان هوا محبوس می‌شود و دما در آن منطقه بالا می‌رود. پس در هر دو حالت یک و دو بازشو برای تهویه اجباری منطقی است که ترموکوپل ۱ دمای بالاتری را برای تهویه اجباری نسبت به تهویه طبیعی نشان می‌دهد؛ بنابراین در عملیات آتش‌نشانی با استفاده از تهویه فشار مثبت توجه به این نکته حائز اهمیت است که 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.



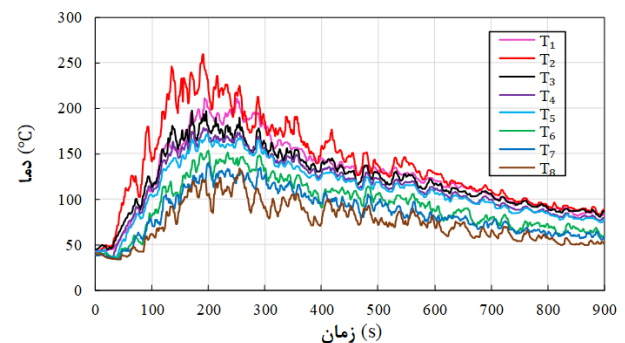
شکل ۵ دمای اندازه‌گیری شده توسط T_1 در آزمون‌های ۱ - ۴

ترموکوپل شماره ۲ در بالای کانون حریق (شعله) نصب شده است. مطابق شکل (۶) دمای ثبت شده توسط این ترموکوپل رفتار متفاوتی نسبت به ترموکوپل ۱ نشان می‌دهد که با توجه 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 تولید شده به سرعت از محفظه خارج می‌گردد. به عبارتی، دمنده فشار

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 که 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

تحلیل توزیع دما در نقاط مختلف محفظه

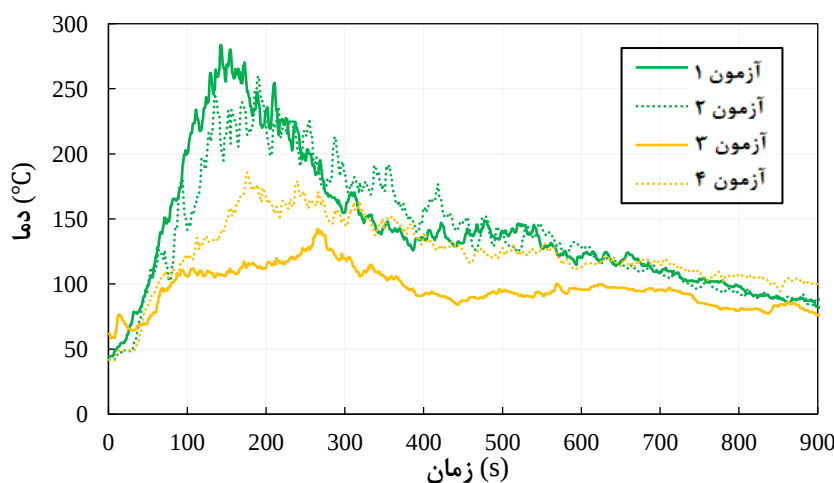
ترموکوپل ۱ در پشت منبع حریق جانمایی شده است. در شکل (۵) دماهای ثبت شده توسط این ترموکوپل را در طی آزمون‌های ۱ - ۴ نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است در حالت باز بودن هر دو بازشو (آزمون‌های ۱ و ۲) و باز بودن تنها یک بازشو (آزمون‌های ۳ و ۴)، دمای ثبت شده توسط ترموکوپل ۱ در حالت وجود تهویه اجباری بیشتر است؛ یعنی هوای حاصل از

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 است 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 آنجا که 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 ثانیه ۲۷۰ام تا ثانیه 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 ۱۱۰ام تا ثانیه پایان آزمایش به طور میانگین ۲۷٪ بالاتر برد.

مثبت موجب افزایش سرعت جریان هوا در داخل محفظه می‌شود و لایه داغ بالای شعله را با هوای تازه جایگزین می‌کند که این خود باعث کاهش دمای ثبت شده 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 وارد شده به محفظه با مقاومت روبه‌رو 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 بالارونده 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، با وجود 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 ثبت شده توسط ترموکوپل ۲ در بالای کانون حریق کاهش می‌یابد.

نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد اثر مخرب تهویه اجباری در صورت وجود یک بازشو در افزایش دما و ایجاد مشکلات برای فرایند آتش‌نشانی توسط آتش‌نشانان است. به دلیل

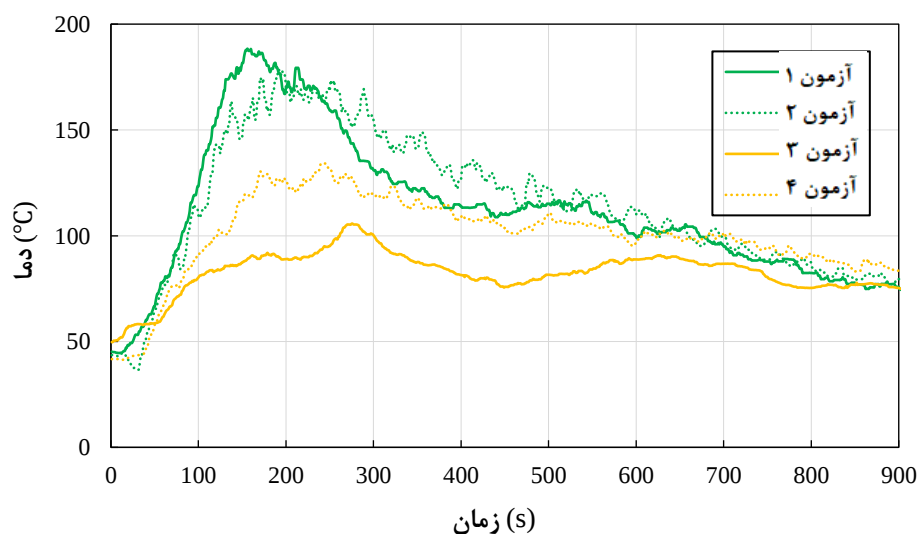


شکل ۶ دمای اندازه‌گیری شده توسط T_2 در آزمون‌های ۱ - ۴

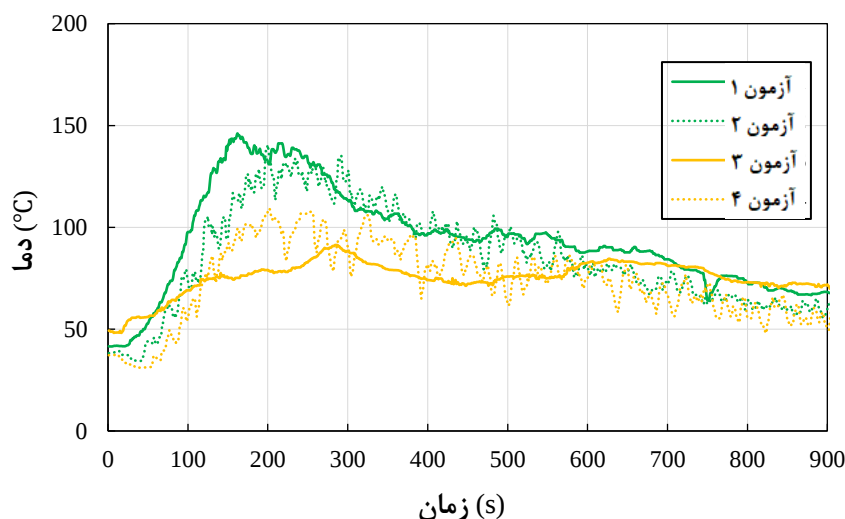
مؤثرتر است.

محل قرارگیری ترموکوپل شماره ۷ بعد از بازشوی جانبی و همچنین نزدیک‌ترین ترموکوپل به بازشوی 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) زیرا 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 است به این دلیل که علی‌رغم اینکه اکسیژن بیشتری تأمین می‌شود اما گستره دمایی به دلیل تهویه اجباری در محفظه احتراق، پایین‌تر 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 رو به زوال رفته است 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 ۴۰۰ - ۱۰۰ 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 رو به زوال است و وجود دمنده فشار مثبت در نقش خنک‌کننده عمل می‌کند.

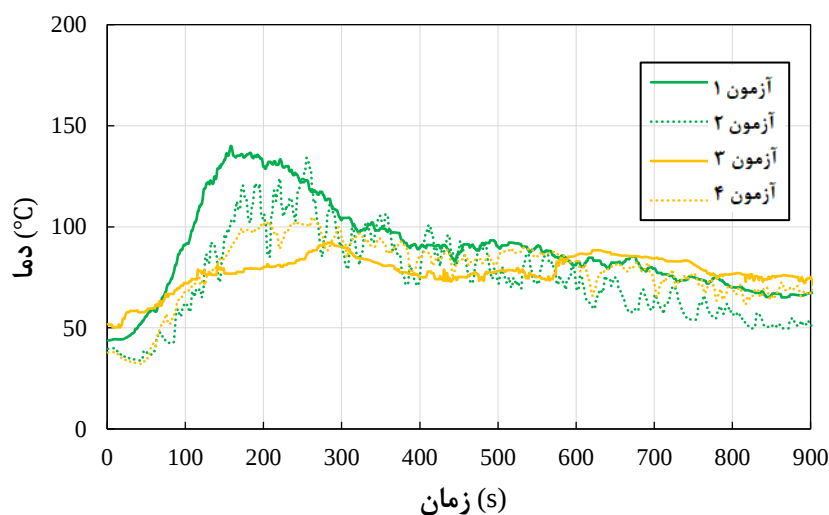
رفتار حریق در محل ترموکوپل ۴ در شکل (۷) نشان داده شده است. این ترموکوپل در فاصله ۲ متری از کانون حریق تعبیه شده است. همان‌طور که از شکل نیز مشاهده می‌شود، همان فرایند ثبت شده توسط ترموکوپل ۲، در اینجا نیز مشاهده می‌گردد با این تفاوت که به دلیل فاصله گرفتن از کانون حریق، دما در این نقطه به طور کلی کاهش 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 نمی‌افتد 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 ملموس‌تری قابل مشاهده است که این موضوع به علت وجود یک بازشو است 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 می‌توان نتیجه گرفت استفاده از تهویه فشار مثبت در شرایط وجود یک بازشو در محفظه، رشد دمایی در نقاط نزدیک به کانون حریق اتفاق می‌افتد که می‌تواند فرایند آتش‌نشانی را برای آتش‌نشانان دچار مشکل کند و لذا وجود دو بازشو در صورت تعبیه دمنده فشار مثبت



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



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



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

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 را 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 است که این موضوع برای آتش‌نشانان در طی فرایند آتش‌نشانی بسیار حائز اهمیت است و شرایط برای انجام عملیات آتش‌نشانی را بیشتر مهیا می‌کند و دمای پایین در میزان توانمندی آتش‌نشانان در عملیات امداد و نجات بسیار تعیین‌کننده است.

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 بازشوی جانبی در این دو آزمون بسته بوده است. در آزمون ۴ در برخی زمان‌ها دما اندکی بالاتر ثبت شده است که علت آن مشابه موارد تحلیل شده برای ترموکوپل ۷ است. جهت تأکید ذکر می‌گردد که وجود جریان هوای اجباری باعث مغشوش شدن جریان هوای داخل محفظه می‌شود و از طرفی اکسیژن‌رسانی نیز بیشتر است 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،

تحلیل دمای بیشینه در محفظه

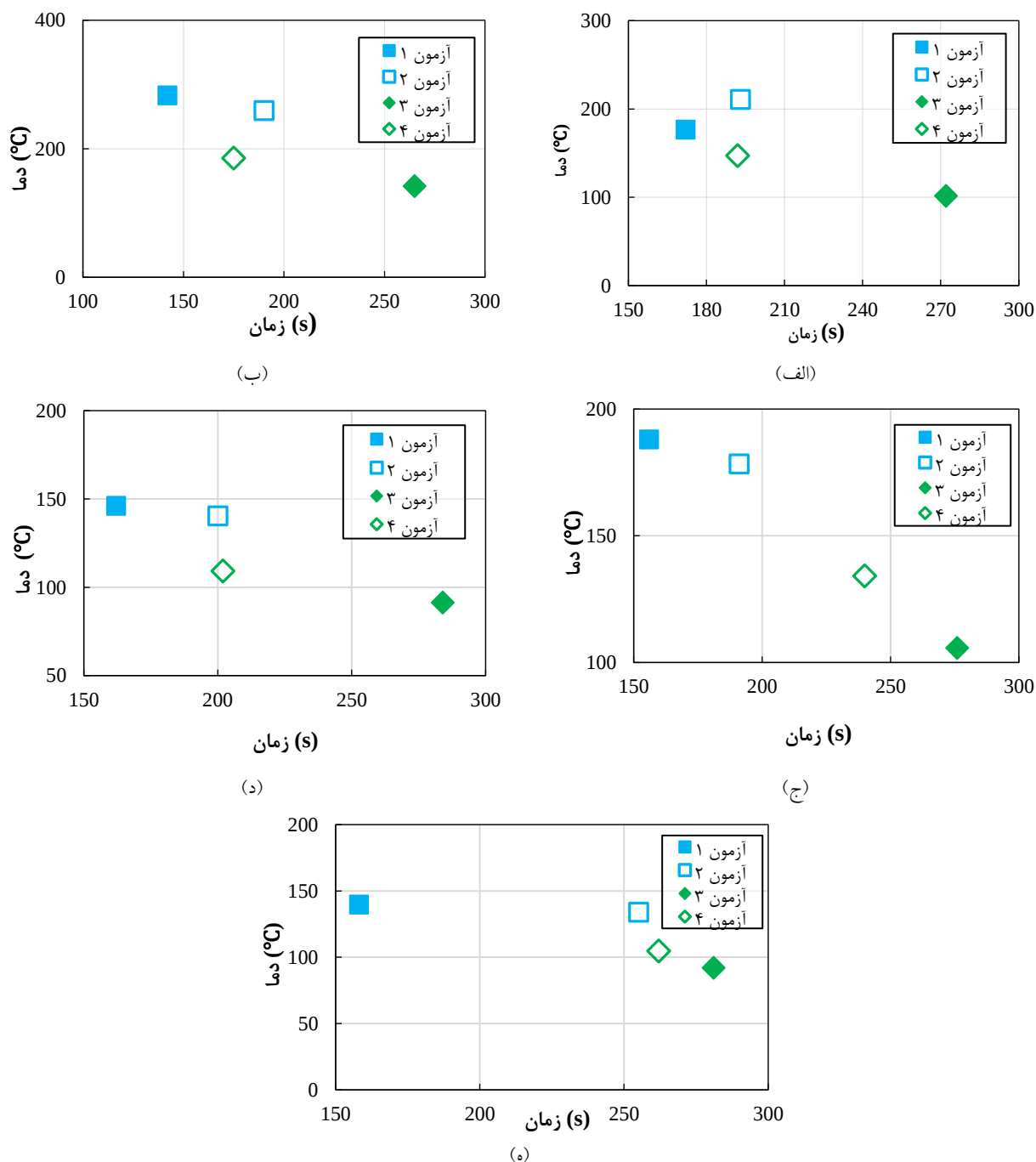
شکل (۱۰) به مقایسه دمای بیشینه در ۵ نقطه از محفظه می‌پردازد. این مقایسه شامل زمان وقوع و مقدار دمای بیشینه می‌شود. در شکل (۱۰ - الف) دمای بیشینه آزمون‌های ۴ - ۱ را در ترموکوپل ۱ نشان داده است. در مقایسه بین آزمون‌های ۲ و ۱، مشاهده می‌شود که وجود تهویه اجباری دمای بیشینه حین فرایند حریق در موقعیت پشت حریق از حدود ۱۷۶ سانتی‌گراد در تهویه طبیعی به مقادیر حدودی ۲۱۱ درجه سانتی‌گراد رسیده است. دلیل آن هم جهت رو به جلوی جریان اجباری و تجمع و محبوس شدن هوای حاصل از احتراق در انتهای محفظه است. اگرچه وقوع این دمای بیشینه با تأخیر اتفاق افتاده است اما این نقطه به دلیل تجربه کردن بیشینه دمای بالاتر نقطه آسیب‌پذیرتری است که آتش‌نشانان باید به لزوم امداد رسانی سریع‌تر نسبت به افراد گرفتار در این نقاط، واقف باشند. شکل (۱۰ - الف) همچنین نشان می‌دهد که در آزمون‌های ۳ و ۴ با یک بازشو نکته قابل توجه اینجاست که برای تهویه اجباری دمای بیشینه هم به لحاظ زمان وقوع زودتر است هم دمای بالاتری داشته است. این امر، 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 اولاً باعث تأخیر ۴۸ ثانیه‌ای در زمان وقوع دمای بیشینه شده و ثانیاً 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 آتش‌نشانی ندارد، 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 نشان دهنده اهمیت شرایط تهویه در حریق محفظه است (شکل ۱۰ - ب).

دمای بیشینه ثبت شده توسط ترموکوپل ۴ 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 را هم کاهش ۵٪ داده 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 افزاینده دما را بازی کرده که در تهویه اجباری به دلایلی که پیش از این 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، نشان داده 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 ناشی از 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 بازشوی جانبی متصل شده است. در آزمون‌های ۳ و ۴ (یک بازشو) این درجه 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 با توجه به دوری این نقطه از منبع آتش این نتیجه منطقی و قابل درک است، اما در آزمون‌های ۱ و ۲ (وجود دو بازشو) پدیده دمای حداکثر مقادیر نزدیک به هم داشته که با توجه 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 با توجه به جریان تخلیه هوا از بازشو دوم و اثر خنک‌کنندگی دمنده، این تأخیر زمانی نیز قابل توجیه است.



شکل ۱۰. مقایسه دمای بیشینه اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌های (الف) T_1 ، (ب) T_2 ، (ج) T_4 ، (د) T_7 ، (ه) T_8

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 در 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 بازشوی باز بوده نسبت به آزمون ۱ که فقط دارای تهویه بوده، است 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 آتش‌نشانی یک تهدید محسوب می‌شود.



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

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 را با تهویه طبیعی با بار سوختی ۱۰ کیلوگرم تجزیه و تحلیل کرد. محیط آزمایشی شامل یک محفظه با ابعاد $12/2 \times 2/4 \times 2/35$ متر بود. نتایج این تحقیق بینش‌های مهمی را در مورد پویایی آتش نشان می‌دهد که به دانش عملی کمک می‌کند که پیامدهای مستقیمی برای بهینه‌سازی راهبردهای آتش‌نشانی دارد. نتیجه‌گیری اصلی به شرح زیر است:

فلش‌اور و مرحله توسعه یافتگی کامل. در هیچ کدام از آزمون‌ها، مراحل فلش‌اور و توسعه‌یافتگی کامل رخ نداد که دلیل آن بار سوخت کم و محدود بود. این نتیجه نشان دهنده 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 بازشوی محفظه افزایش یافت. در شرایط دو بازشوی 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 دوبازشوی 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 به طور کلی دمای بیشینه در اثر استفاده از تهویه فشار مثبت در تمامی نقاط محفظه در حالت دو بازشوی 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 بازشوی 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 ۱۴۴۰ام 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 آتش‌نشانی. استفاده از تهویه فشار مثبت باید با توجه 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 می‌یابد 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 می‌شود 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 نشان دهنده این نکته مهم بود که حتی در شرایطی که محفظه دارای دو بازشوی باز باشد، نقاطی که در پشت کانون حریق قرار دارند با استفاده از تهویه فشار مثبت دمای بالاتری را تجربه می‌کنند.

واژه‌نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
اشتعال	ignition	
اغتشاش	turbulency	آشوب
اطفای حریق	Firefighting	آتش‌نشانی
پالت چوبی	wooden pallet	
ترموکوپل	thermocouple	دماجفت
تهویه اجباری	forced ventilation	هواپیرایی اجباری

	flame	شعله
	uncertainty	عدم قطعیت
آتشگیری، آتش گستری	flashover	فلش اور
سوختارگاه، سوختاره	combustion chamber	محفظه احتراق

تقدیر و تشکر

نویسندگان نهایت تشکر خود را از سازمان آتش نشانی مشهد برای همکاری های صمیمانه شان ابراز می دارند.

هوایرایی فشار مثبت	positive pressure ventilation	تهویه فشار مثبت
هوایرایی طبیعی	natural ventilation	تهویه طبیعی
جریان جاذبجایی	convection stream	جریان همرفتی
	return air flow	جریان هوای برگشتی
	growth	رشد
رفتار آتش	fire behaviour	رفتار حریق
	decay	زوال

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, p. 123-134, 1983. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(83\)90011-1](https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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," *Heat Transfer Research*, vol. 50, no. 2018, pp. 243–261, 2019. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2018025564>
- [8] W. D. Walton and S. Kerber, "Full-Scale Evaluation of Positive Pressure Ventilation In a Fire Fighter Training Building," *National Institute of Standards and Technology*, 2006.
- [9] S. Kerber, "Evaluation of fire service positive pressure ventilation tactics on high-rise buildings," *Interflam2007*, pp. 1289-1300, 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," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42147-5>
- [11] S. Svensson, "A study of tactical patterns during fire fighting operations.PDF," *Fire Safety Journal*, vol. 37, no. 7, pp. 673–695, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00027-9](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00027-9)

- [12] W. E. Hurford, "Effect of positive pressure ventilation on cardiovascular function," *Current Opinion in Anesthesiology*, vol. 2, no. 6, pp. 789–795, 1989.
- [13] S. Svensson, "Experimental study of fire ventilation during fire fighting operations," *Fire Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 69–85, 2001. <https://doi.org/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 Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 625–647, 2018. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1115/HT2008-56456>
- [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 Safety Journal*, vol. 118, no. July, p. 103210, 2020. <https://doi.org/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 Safety Journal*, vol. 92, no. May, pp. 195–198, 2017. <https://doi.org/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," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 600–606, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.04.005>
- [19] H. Prêtre and J. M. Such, "Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment scenario," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 235, no. 20, pp. 2155–2169, 2005. <https://doi.org/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 Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 193–208, 2005. <https://doi.org/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 Thermal Engineering Joint Conference*, no. C, 2003.
- [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 Technology*, vol. 45, no. 3, pp. 257–286, 2009. <https://doi.org/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 Technology*, vol. 50, no. 6, pp. 1517–1534, 2014. <https://doi.org/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," *Advanced Materials Research*, vol. 446–449, pp. 2908–2913, 2012. <https://doi.org/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,” *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 36, no. 4, pp. 21–34, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.81802.1178>
- [27] H. N. Seyed Ahmad Kebriyae, Mohammad Moghiman, “Numerical study of the effect of ambient air temperature and relative humidity on diesel pool fire,” *Fuel and Combustion*, 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700036>
- [30] H. Ingason and R. Fallberg, “Positive pressure ventilation in single medium-sized premises,” *Fire Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 213–230, 2002. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.31224/3041>
- [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 Safety Journal*, vol. 148, no. April, p. 104229, 2024. <https://doi.org/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 and Materials*, 2025. <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. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_30
- [35] R. J. Moffat, “Describing the uncertainties in experimental results,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1988. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X)
- [36] R. J. Moffat, “Using uncertainty analysis in the planning of an experiment,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 107, no. 2, pp. 173–178, 1985. <https://doi.org/10.1115/1.3242452>

