

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Fire Growth and Smoke Transport Modeling Based on Risk Assessment in a High-Rise Hospital in Tehran

Ozra Dargahi-Gharehbagh<sup>1</sup>, Mousa Jabbari<sup>2,3\*</sup>, Ghazaleh Monazami Tehrani<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Workplace Health Promotion Research Center, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Department of Health, Safety and Environment, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 23-12-2024

Accepted: 27-12-2025

### ABSTRACT

**Introduction:** Hospitals represent a critical fire safety challenge. The presence of patients with limited mobility, specialized staff, and invaluable infrastructure makes them seriously vulnerable. Further, toxic smoke inhalation, as a primary product of fire, is a leading cause of mortality. To address this concern, our study intended to conduct a comprehensive fire safety assessment of a teaching hospital in Tehran (2023-2024) by integrating risk assessment with numerical modeling.

**Material and Methods:** This study was conducted in a teaching hospital following three consecutive steps: risk assessment, fire scenario design, and fire and smoke modeling. First, vulnerable zones were identified using the FRAME method. Next, fire scenarios and control strategies were designed based on the identified risk factors and a review of the relevant literature. Ultimately, fire and smoke transport was modeled using the CFAST software to ascertain the performance of the proposed strategies.

**Results:** The risk assessment pinpointed two wards with unacceptably high occupant risk levels: the inpatient ward on the 10th floor, owing to a cluster of unsafe behaviors, and the basement warehouse, owing to improper storage and inadequate emergency exit access. Fire and smoke modeling was performed for these two zones, comparing the "current situation" against a proposed "risk control strategy." The modeling results revealed that the control strategy positively affected key life safety indicators, significantly ameliorating the Fractional Effective Dose (FED) and Heat Release Rate (HRR).

**Conclusion:** According to this study, a fire risk assessment provides a clear and detailed perspective on a hospital building's fire safety. Integrating the results of the FRAME assessment with CFAST simulations results in a comprehensive understanding of the facility's safety status. These data can be utilized to design effective emergency plans and calculate the Required Safe Egress Time (RSET), thereby preventing life-threatening harm to occupants against toxic gases.

**Keywords:** Fire risk assessment, control strategy, CFAST modeling, hospital management, FRAME.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Dargahi-Gharehbagh O., Jabbari M., Monazami Tehrani Gh. Fire Growth and Smoke Transport Modeling Based on Risk Assessment in a High-Rise Hospital in Tehran. *J Health Saf Work.* 2025; 15(4): 842-863.

## 1. INTRODUCTION

In the context of Iranian healthcare infrastructure, fire safety is a deadly threat. Its consequences include property damage,

endangering patient lives, and interruption of vital healthcare services. Effective fire management in such vulnerable environments is contingent upon identifying hazards, integrating intrinsically safe design, and training staff in fire safety. A

\* Corresponding Author Email: [Jabbarim@sbsmu.ac.ir](mailto:Jabbarim@sbsmu.ac.ir)

fundamental step to mitigate this threat involves the initial identification of hazards with a robust risk assessment. Methods such as the Fire Risk Assessment Method for Engineers (FRAME) are well-known in healthcare environments for their structured approach, which can identify hazards as well as determine the level of fire risk. As indicated in studies focused on hospital safety, the FRAME method was selected for this study because of its proven effectiveness in quantifying risks to building contents, occupants, and activities separately—a feature that is particularly valuable in the compartmentalized environment of a hospital.

While risk assessment identifies static hazards, comprehending the dynamic behavior of fire and smoke is critical for effective evacuation planning and remedial actions. Since toxic smoke inhalation is the leading cause of fire-related deaths, this study employed numerical fire modeling to analyze conditions in high-risk areas. Among the modeling outputs, the Fractional Effective Dose (FED) served as a proxy for toxic gas exposure, and the Heat Release Rate (HRR) represented the thermal intensity of the fire.

For the dynamic simulation, the Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST) model, a well-validated tool developed by NIST, was utilized. This model splits compartments into hot upper and cooler lower layers, effectively simulating key environmental conditions including temperature, gas concentration, and activation times of sprinklers as well as detectors.

## 2. MATERIAL AND METHODS

This cross-sectional study was undertaken in 2023-2024 in a 13-story high-rise hospital (12 above ground, one basement) in Tehran. The study focused on 12 of its active departments, as some sections were inactive at the time. Each department had an approximate area of 670 square meters. The concrete structure had a fire resistance rating between 30 and 60 minutes. The interior surfaces were mainly covered with stone. The active fire protection system comprised two water sources with high-pressure pumps and hydrant valves. All departments were equipped with manual and automatic fire alarm systems, fireboxes, fire doors, and emergency exits, and were complemented using guidance signage. A notable observation from the initial walkthrough was the inconsistency in periodic inspections of electrical installations across departments, in spite of compliance with

national electrical standards.

The general methodology involved three consecutive steps: i) risk assessment, ii) scenario design, and iii) fire dynamics modeling.

For the initial risk assessment, the semi-quantitative FRAME method was applied. This method calculates the fire risk based on three core parameters: i) Potential Risk (P), ii) Acceptance Level (A), and iii) Protection Level (D) afforded by existing systems. It reports separate, dimensionless risk indices for property (R), occupants (R1), and activities (R2). For the analysis of the results, risk levels  $\leq 1.0$  are placed within the risk acceptance range.

Fire scenarios for the identified high-risk zones (nephrology ward and warehouse) were developed based on FRAME results, a review of relevant literature, and hospital documents. Fire and smoke modeling was performed using CFAST software (v7.7.4) with focus on FED and HRR as key output parameters. The modeling was undertaken under two distinct protection strategies.

- Strategy A (Current Conditions): Represents the existing setup, where smoke detectors are installed in all residential areas, corridors, and the warehouse, but sprinklers are limited to hallways as well as the warehouse entrance.

- Strategy B (Enhanced Protection): Assumes a comprehensive upgrade with both smoke detectors and sprinklers installed in all residential rooms (for patients and staff), corridors, and on the warehouse shelves.

Two specific fire scenarios were simulated:

- Nephrology Ward: A fire initiated by an electrical short circuit in a patient room outlet, involving a blanket, bed, and chair as the primary fuel.

- Warehouse: A fire started by a spark igniting three cardboard cartons.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

According to the FRAME risk assessment, the property and activity fire risks were within acceptable limits ( $R < 1$ ) across all departments. Nevertheless, the occupant risk was unacceptable in the warehouse (1.34) and the nephrology ward (1.11). These findings are in line with previous studies, confirming that inpatient wards—such as the nephrology ward on the 10th floor—are high-risk. This risk was owing to an accumulation of unsafe behaviors—such as insufficient staff safety training and high-risk regulatory violations like

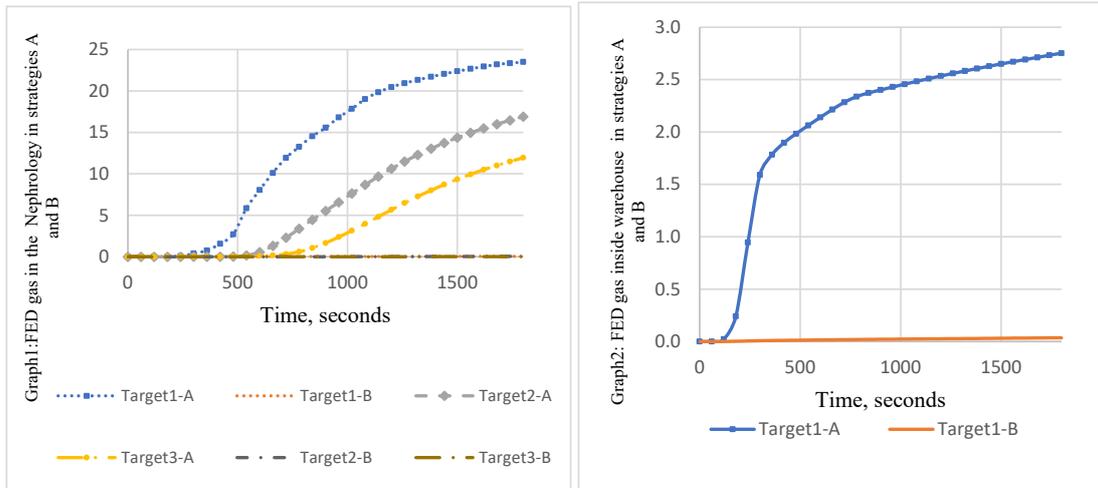


Fig. 1: Fractional Effective Dose (FED) for indoor targets under strategies A and B: (1) Nephrology ward, (2) Warehouse.

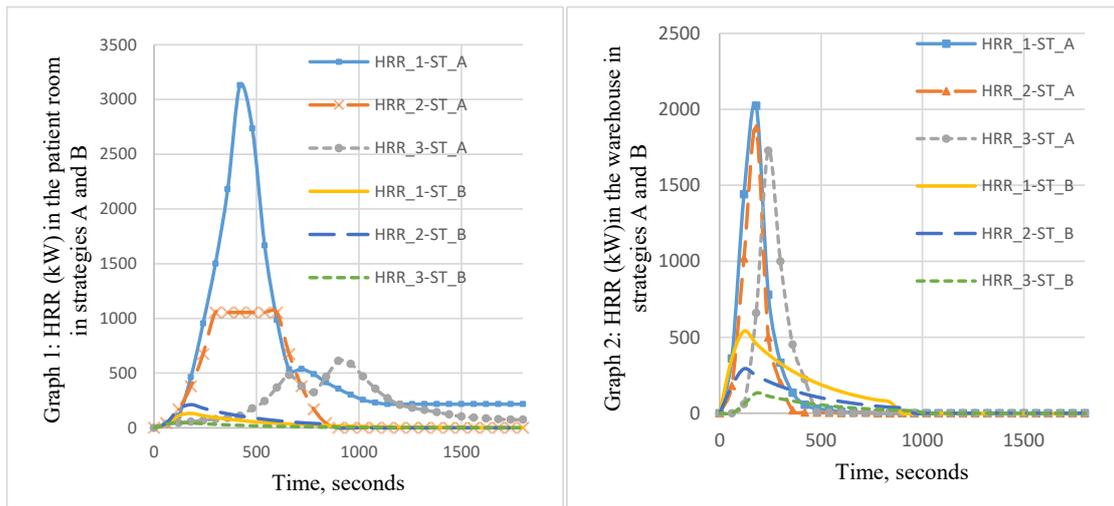


Fig. 2: Heat Release Rate (HRR) for ignition sources under strategies A and B: (1) Nephrology ward (10th floor), (2) Warehouse (basement).

smoking—compounded by the concentration of patients with limited mobility, significantly impeding evacuation efficiency. Likewise, the warehouse in the basement presents a high risk due to the storage of combustible materials and inadequate access to emergency exits.

Following the risk assessment, fire modeling was performed using CFAST software in the two identified high-risk zones: the nephrology ward and the warehouse. Two distinct safety strategies were simulated: Strategy A, which represented the current safety conditions, and Strategy B, which

assumed enhanced installation of smoke detectors along with sprinklers in all residential rooms, corridors, and warehouse shelves.

The FED results for toxic gases in both wards under Strategies A and B are displayed in Fig. 1, while the HRR results are depicted in Fig. 2. Given the significantly higher values in the fire source room, the results for Target 1 (within the fire room) and other targets were plotted separately. Fig. 1 indicates that toxic gases are primarily generated in the fire source room. Thus, the sprinklers we implemented in Strategy B drastically lowered FED

values, highlighting their efficacy in suppressing combustion and toxic gas production at the source. Smoke movement followed a predictable path from the fire room to the corridor and then to common areas such as the nursing station, with the highest concentrations recorded in these zones.

The comparative analysis of HRR results between the two strategies, as illustrated in Figure 2, highlights a critical finding: the proximity of sprinklers to the fire source is a key determinant of life safety. Sprinklers located close to the ignition source (Strategy B) presented a superior ability to suppress the Heat Release Rate during the fire's growth stage. This rapid suppression directly prolongs the Available Safe Egress Time (ASET), a vital metric for occupant survival. This finding is well-supported by existing literature on performance-based fire safety, which positions automatic sprinklers as a key measure for controlling fire development as well as enhancing life safety.

#### 4. CONCLUSIONS

The present study applied an integrated approach through combining the FRAME risk assessment method with fire modeling using CFAST software to ascertain and boost fire safety in a high-rise hospital. The FRAME risk assessment identified the nephrology ward and the warehouse as high-risk zones, which were subsequently selected for detailed modeling. The primary aim was to undertake a comprehensive fire safety analysis of the hospital and generate reliable data for future performance-based designs.

The simulation results provided quantitative, evidence-based support for the proposed safety interventions. The findings indicated that although the building's inherently safe architecture—featuring compartmentalization, fire-rated doors, and emergency exits—established a good level of passive protection, this alone was insufficient to guarantee life safety in high-risk areas. The

modeling clearly demonstrated that implementing a comprehensive automatic sprinkler system (Strategy B) significantly lowers both FED and HRR. This suppression markedly enhances the Available Safe Egress Time (ASET), which plays a critical role in evacuating patients with limited mobility.

Thus, to achieve the highest possible level of life safety, the complete installation of sprinklers in all patient rooms, corridors, and especially in high-risk storage areas is strongly recommended. This study clearly indicates that achieving optimal safety in complex environments such as hospitals depends on integrating “inherently safe structural design” with “active fire protection systems.” Ultimately, to address the identified operational vulnerabilities, the following key measures are proposed within a unified management framework:

- Implementation of a regular periodic inspection program
- Continuous training of personnel
- Enforcement of clear protocols to reduce high-risk behaviors

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

We also extend our thanks to the management and staff of the studied hospital for their valuable cooperation as well as for providing the necessary data and access for the field surveys.

#### 6. ETHICAL CODE

The ethical approval for this research was granted by the ethics committee of Shahid Beheshti University of Medical Sciences (Ethical code: IR.SBMU.PHNS.REC.1403.018).

#### 7. FUNDING

This study was derived from a master's thesis and was supported by Shahid Beheshti University of Medical Sciences. The authors express their sincere gratitude for this financial and institutional support.

## مدل سازی رشد حریق و انتقال دود بر اساس ارزیابی ریسک آتش سوزی در بیمارستان بلندمرتبه تهران

عذرا درگاهی قره‌باغ<sup>۱</sup>، موسی جباری<sup>۲،\*</sup>، غزاله منظمی تهرانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>مرکز تحقیقات ارتقای سلامت محیط کار، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>گروه سلامت، ایمنی و محیط‌زیست، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۶

### چکیده

**مقدمه:** حساسیت بیمارستان در برابر حریق، به علت محدودیت‌های حرکتی و هوشیاری جمعیت ساکن، وجود کارکنان متخصص، ارزش زیرساختی در نظام درمان، تجهیزات گران‌قیمت، به‌عنوان یکی از دغدغه‌های مدیریت بیمارستان‌ها مورد توجه است. همچنین، دود به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین علل مرگومیر ناشی از حریق مطرح است. این پژوهش با هدف بررسی وضعیت ایمنی حریق و مدل‌سازی انتشار دود و حریق بر اساس نتایج ارزیابی ریسک حریق در یک بیمارستان آموزشی و درمانی در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۳ انجام شد.

**روش کار:** این مطالعه در سه گام متوالی شامل ارزیابی ریسک، طراحی سناریو حریق و مدل‌سازی دود و حریق در یک بیمارستان آموزشی و درمانی انجام شد. بخش‌های آسیب‌پذیر در برابر حریق با استفاده از روش FRAME شناسایی شدند. سپس، سناریو حریق و استراتژی کنترلی بر اساس علل ریسک شناسایی شده در گام اول و نیز با مرور منابع طراحی گردید. در گام پایانی، مدل‌سازی دود و حریق با نرم‌افزار CFAST انجام شد و کارایی استراتژی کنترلی مورد بررسی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** از میان بخش‌های مورد ارزیابی بیمارستان، بخش بستری واقع در طبقه دهم به دلیل تجمع چندین رفتار نایمن و بخش انبار واقع در طبقه منفی یک به علت انبارش نامناسب و دسترسی ناکافی به خروجی اضطراری، دارای ریسک حریق افراد بالاتر از حد مجاز (سطح نامطلوب) ارزیابی شدند. مدل‌سازی دود و حریق در این دو طبقه، برای دو استراتژی «وضعیت موجود» و «کنترل ریسک» انجام شد. نتایج مدل‌سازی در هر دو مورد، تأثیر مثبت استراتژی کنترلی را بر بهبود شاخص‌های دوز مؤثر کسری (FED) و نرخ انتشار حرارت (HRR) نشان داد.

**نتیجه‌گیری:** ارزیابی ریسک می‌تواند دیدگاه روشنی از جزئیات ایمنی حریق ساختمان بیمارستان ارائه دهد. تلفیق نتایج ارزیابی ریسک FRAME با شبیه‌سازی CFAST، به درک جامعی از وضعیت ایمنی حریق بیمارستان منجر می‌شود. از این داده‌ها می‌توان برای طراحی برنامه‌های اضطراری و محاسبه زمان خروج ایمن موردنیاز (RSET) بهره برد تا از آسیب‌های جانی ناشی از گازهای خفه‌کننده برای ساکنان پیشگیری شود.

**کلمات کلیدی:** ارزیابی ریسک حریق، استراتژی کنترلی، مدل‌سازی CFAST، مدیریت بیمارستان، FRAME

عمده مراجعین بیمارستان گروه های آسیب‌پذیر مانند سالمندان، نوزادان و بیمارانی هستند. به گونه‌ای که لازمه تخلیه سریع و ایمن بیماران در شرایط اضطراری داشتن برنامه‌ریزی و نیروی کمکی است (۵). علاوه بر این نیروی کار بیمارستان آموزشی شامل متخصصان و دانشجویان درحال تحصیل است که آموزش و تربیت آن‌ها سرمایه‌گذاری مالی کلانی بر عهده وزارت بهداشت و درمان کشور دارد. بر این اساس حفظ ایمنی کارکنان و بیماران از وظایف راهبردی مدیریت سیستم می‌باشد.

جنبه دیگر تهدید حریق در بیمارستان‌های آموزشی مرتبط با تجهیزات گران‌قیمت و تکنولوژی های کیمیا درمانی است؛ از مهم‌ترین پیامدهای حادثه حریق می‌توان به خسارت‌های مالی ناشی از نابودی دستگاه‌ها، دشواری یا عدم امکان جایگزینی تجهیزات آسیب‌دیده و توقف در خدمات درمانی اشاره کرد (۶). مجموعه پیامدهای مذکور، بر الزام پیشگیری و مدیریت حریق تأکید می‌کند.

هدف مدیریت حریق، ایجاد شرایط برای اطمینان از حفاظت افراد و اموال در برابر حریق است. مطالعات بر اهمیت اجرای اقدامات جامع ایمنی آتش‌نشانی، از جمله ارزیابی منظم سیستم‌ها، انجام نظارت دوره‌ای و ارائه آموزش ایمنی تأکید می‌کنند (۷). برای اجرای برنامه مدیریت حریق مختص هر بیمارستان در مرحله بهره‌برداری، شناسایی خطرات اختصاصی حریق می‌تواند مهم‌ترین گام اجرای برنامه در راستای شناسایی و اولویت‌بندی استراتژی‌های کنترلی باشد.

در راستای شناخت کاستی‌های سیستم‌های ایمنی حریق و ارائه راهکارهای کنترلی در بیمارستان‌ها، از چارچوب‌ها و روش‌های متنوعی برای ارزیابی ریسک بهره گرفته شده است. روش ارزیابی ریسک آتش‌سوزی برای مهندسين<sup>2</sup> (FRAME) (۷-۵) و تحلیل حالت و اثر شکست<sup>3</sup> (FMEA) (۸) همچنین روش NFPA 101 که به‌صورت اختصاصی در ایالات متحده برای ارزیابی ریسک مراکز درمانی و بیمارستان‌ها استفاده شده است. این

حریق از مخرب‌ترین حوادث در بیمارستان‌هاست و در سه حوزه جانی، مالی و زیرساختی ضربات جبران‌ناپذیر به‌نظام سلامت هر کشور تحمیل می‌کند. در کشورمان آمار دقیق حوادث حریق بیمارستان‌ها به‌صورت سیستماتیک و جامع منتشر نشده است؛ ولیکن مطالعه‌ی اردلانی و همکاران بر پایه تجزیه‌وتحلیل داده‌های ۴۲۱ بیمارستان ایرانی با به‌کارگیری شاخص ایمنی بیمارستان<sup>1</sup> (HSI) حریق یکی از مهم‌ترین خطرات تهدیدگر بیمارستان شناسایی شده است (۱). از جمله حوادث مرگبار حریق در سال‌های اخیر ایران که در منابع علمی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، می‌توان به حادثه حریق و انفجار کلینیک سینا اطهر در تیرماه ۱۳۹۹ با ۱۹ قربانی (۲) و حادثه حریق بیمارستان قائم رشت در خردادماه ۱۴۰۳ با ۹ قربانی (۳) اشاره کرد. این فجایع نشان می‌دهد که سیستم‌های درمانی کشورمان هنوز در برابر این خطر کاملاً آسیب‌پذیر هستند.

متأسفانه مطالعات میدانی نیز ضعف سیستم‌های ثبت و تحلیل علل حوادث را تأیید می‌کنند. برای نمونه، در مطالعه علی‌آبادی و همکاران که ۸۶ گزارش حادثه حریق بیمارستان بررسی شده است؛ علل حوادث بیمارستانی ایران به شرح زیر گزارش شده است. ۵۶ حادثه فاقد علت مشخص بودند. از بین ۳۰ حادثه دارای علت شناسایی شده؛ اتصال کوتاه الکتریکی به‌عنوان بیشترین علت گزارش شده بود (۱۷ مورد)، سایر علل گزارش شده شامل زیرساخت (۴ مورد)، انفجار سیلندر اکسیژن (۲ مورد)، آتش‌سوزی (۲ مورد)، انفجار گاز فاضلاب (۲ مورد)، انفجار هواکش (۱ مورد)، دمای بالا (۱ مورد)، استفاده از شعله پخت‌وپز در چادر برپا شده در حیاط بیمارستان (۱ مورد)، سیگار کشیدن در اتاق بیمارستان (۱ مورد) نشت گاز (۱ مورد) و شعله پخت‌وپز در بخش پزشکی بیمارستان (۱ مورد) (۴). حریق در بیمارستان‌ها از چند منظر، تهدیدی حیاتی برای سیستم مراقبت درمانی است. این تهدید نخست به ویژگی‌های جمعیتی محیط درمانی برمی‌گردد؛

1. Hospital Safety Index

2. Fire Risk Assessment Method for Engineering

3. Failure Mode and Effects Analysis

کاهش دید افراد می‌شود، بلکه دارای مواد سمی و مرگ‌آور است. لازم به ذکر است که آسیب‌پذیری افراد در برابر دود به‌ویژه در بیمارستان بیشتر است زیرا جمعیت آن شامل سالمندان و کودکان و مبتلایان به بیماری‌های تنفسی مانند آسم و انسدادی مزمن ریه<sup>۳</sup> (COPD) است (۱۴). بر این اساس، بررسی رفتار دود به‌عنوان معیاری کلیدی در ارزیابی کارایی سیستم‌های ایمنی حریق بیمارستان‌ها برای کاهش این مخاطرات محسوب می‌شود.

برای سنجش کمی اثرات گازهای سمی می‌توان از شاخص دوز مؤثر کسری<sup>۴</sup> (FED) بهره برد. این کمیت بدون واحد به غلظت گازهای خفه‌کننده و همچنین مدت زمان مواجهه بستگی دارد و اثرات ترکیبی عواملی مانند گرما، کاهش دید ناشی از دود و سمیت گازها بر سلامت انسان در طی یک رویداد آتش‌سوزی را کمی می‌سازد (۱۵). محاسبات FED عوامل مختلفی از جمله سمیت محصولات احتراق را در نظر می‌گیرد و برای برآورد احتمال آسیب‌پذیری افراد در حین تخلیه استفاده می‌شود (۱۶). مدل‌سازی رایانه‌ای آتش و دود ابزاری برای پیش‌بینی رفتار حریق و انتقال دود است. این فناوری تأثیر مستقیم کاستی‌های سازه‌ای و ضعف سیستم ایمنی را بر گسترش دود آشکار می‌سازد و امکان تحلیل سناریوهای مختلف را در یک فضای مجازی و تحت شرایط گوناگون فراهم می‌سازد. این روش غیرمخرب و منعطف، با ارائه خروجی‌های بصری (نظیر تصاویر رنگی و نمودارها) می‌تواند ما را برای طراحی برنامه تخلیه ایمن یاری دهد (۱۷) شبیه‌سازی رایانه‌ای بر اساس دانش تجربی و علمی با آزمایش‌های واقعی قابل‌مقایسه است (۱۸). مدل‌سازی حریق در بیمارستان‌های بلندمرتبه با در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه‌ای، می‌تواند گزینه مقرون‌به‌صرفه‌تری برای مطالعات اولیه به شمار آید که ایمنی جان بیماران را افزایش دهد.

برای شبیه‌سازی آتش در اغلب مطالعات از شبیه‌ساز دینامیک آتش<sup>۵</sup> (FDS) (۱۹) و مدل تلفیقی رشد آتش

روش در قالب‌های نرم‌افزاری اکسل<sup>۱</sup> (CFSES) و آنلاین<sup>۲</sup> (FSES) به صورت رایگان در دسترس است؛ مبنای آن بر پایه رعایت حداقل الزامات مندرج در استاندارد NFPA 101A (کد ایمنی جان) استوار شده است (۹).

از میان روش‌های مذکور، روش FRAME به‌عنوان یک چارچوب نیمه کمی، می‌تواند نتایج عددی قابل‌مقایسه‌ای برای بخش‌های مختلف بیمارستان ارائه دهد. این ابزار ارزیابی ریسک در مقایسه با رویکردهای کیفی، از عینیت و قابلیت سنجش بیشتری برخوردار است و در مقابل روش‌های کاملاً کمی، با پیچیدگی محاسباتی و هزینه اجرای کمتری همراه می‌باشد (۱۰). همچنین برتری در پوشش پارامتریک گسترده‌تر دارد؛ روش FSES فقط ۱۳ پارامتر ایمنی حریق را پوشش می‌دهد (۱۱). در حالیکه FRAME طیف وسیع‌تری از عوامل مؤثر در شروع و رشد حریق را در محاسبات ریسک لحاظ می‌کند.

بررسی تأثیر یک استراتژی کنترلی برای کاهش ریسک و انتخاب بهترین از بین سایرین، می‌تواند دغدغه اساسی مدیران اجرایی ایمنی حریق باشد. روش‌های زیادی برای بررسی و اولویت‌بندی استراتژی‌ها وجود دارند. انجام آزمایش واقعی حریق و بررسی تأثیر اسپرینکلر می‌تواند یک نمونه پرهزینه برای بررسی استراتژی نصب اسپرینکلر باشد (۱۲). در مقابل، فناوری‌های نوین مدل‌سازی رایانه‌ای با هزینه به مراتب کمتر و انعطاف‌پذیری بالاتر قادر به پیش‌بینی دقیق شاخص‌هایی چون دما و انتشار دود هستند (۱۳). با در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه‌ای در بیمارستان‌های کشور، مدل‌سازی کامپیوتری می‌تواند گزینه کم‌هزینه و عملی‌تر برای مطالعات اولیه حریق به شمار آید.

با توجه به اهمیت ایمنی جان ساکنین بیمارستان، دود به‌عنوان فرآورده خطرناک حریق می‌تواند معیاری کارآمد برای سنجش اثربخشی استراتژی کنترلی باشد. دود، کاهش میدان دید و حرارت از محصولات حریق هستند که دود تولیدشده در طی فرآیندهای احتراق نه‌تنها باعث

3. Asthma and Chronic Obstructive Pulmonary Disease

4. Fractional Effective Dose

5. Fire Dynamics Simulator

1. Computerized Fire Safety Evaluation System

2. Fire Safety Evaluation System

ساختمانی به کار گرفته‌شده، مشخصات تهویه مکانیکی، مشخصات اسپرینکلر و دتکتورهای دودی و حرارتی، ویژگی‌های منبع اشتعال می‌تواند نتایج در قالب خروجی متنی به صورت فایل‌های اکسل ایجاد کند و برای تجسم شبیه‌سازی به نرم‌افزار smoke viewer متصل می‌شود (۲۰). مدل CFAST به مقادیر محدودی از توان محاسباتی نیاز دارد و نتایج نسبتاً سریعی را ارائه می‌کند (۲۳). با وجود سطح محدود جزئیات، مدل‌های منطقه‌ای ثابت کرده‌اند که روشی عملی و مؤثر برای ارائه برآورد اثرات آتش‌سوزی هستند.

در این مطالعه برای ارزیابی ریسک حریق از روش FRAME استفاده شد که از مزایای اصلی آن می‌توان به شفافیت، عینی و عدد بودن نتایج نهایی اشاره کرد. پیشنهاد استراتژی کنترلی بر مبنای سطح ریسک نهایی از دیگر مزیت‌های روش FRAME می‌باشد. در ادامه‌ی مطالعه بخش با ریسک حریق بالا در کنار استراتژی پیشنهادی روش FRAME برای کاهش ریسک حریق، وارد مدل‌سازی CFAST شد و نتایج مدل‌سازی بر پایه دوز مؤثر کسری برای اهداف مشخص‌شده در مطالعه گزارش شد.

هدف از این مطالعه بررسی وضعیت فعلی ایمنی حریق در بیمارستان با مدل‌سازی انتشار دود و حریق بر اساس ارزیابی ریسک حریق در یک بیمارستان آموزشی و درمانی است و نتایج آن می‌تواند برای تدوین برنامه مدیریت ایمنی حریق بیمارستان و داده‌های مرجع برای طراحی‌های مبتنی بر عملکرد سایر سازه‌های بیمارستانی مورد استفاده قرار گیرد.

### روش کار

مطالعه پیش‌رو، از نوع توصیفی-تحلیلی می‌باشد که به‌صورت مقطعی در سال ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در بخشی از یک مجتمع آموزشی درمانی در کلان‌شهر تهران انجام شد. بیمارستان مذکور یک سازه بلندمرتبه به ارتفاع ۶۶ متر و ظرفیت ۸۲۱ تخت می‌باشد که با به کارگیری پیشرفته‌ترین تجهیزات تشخیصی و درمانی به ارائه

و انتقال دود<sup>۱</sup> (CFAST) (۲۰) استفاده می‌شود که هر دو توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری<sup>۲</sup> (NIST) توسعه‌یافته و تأییدشده‌اند. نرم‌افزار FDS به‌عنوان یک نرم‌افزار نام‌آشنا برای پدیده‌های پیچیده آتش‌سوزی در حوزه شبیه‌سازی آتش کاربرد دارد که با آزمایش‌ها تجربی تأییدشده است (۱۹). به دست آوردن نتایج دقیق و قابل‌اعتماد به تجربیات عددی متنوع کاربر در طراحی اندازه شبکه وابستگی دارد (۱۸). از طرفی هزینه محاسباتی بالا و داده‌های فیزیکی بالا همراه با زمان زیاد شبیه‌سازی از معایب این نرم‌افزار به شمار می‌آیند (۲۱). از طرفی CFAST سازگاری بالا با کامپیوترهای ضعیف‌تر و حداقل هزینه محاسباتی را ارائه می‌دهد. در مقایسه با سایر ابزارهای تحلیلی، ابزاری کاربردی به دلیل محاسبات سریع و عملکرد پیش‌بینی برتر برای محفظه‌های محاسباتی کوچک می‌باشد. مهندسان و محققان آتش‌نشانی صحت CFAST را از طریق آزمایشات تأیید کرده‌اند و نتایج مقرون‌به‌صرفه را گزارش کرده‌اند (۲۱). (۲۲)؛ بنابراین، CFAST ابزاری ساده برای درک دینامیک آتش و به دست آوردن نتایج واضح علیرغم فرضیات ساده‌کننده‌اش فراهم می‌کند.

CFAST برای کمک به تحقیقات در زمینه دینامیک حریق با حداقل نیازهای محاسباتی ایجاد شده است. مدل منطقه‌ای CFAST هر اتاق را به دو حجم پارامتری مجزا یعنی لایه پایینی سرد و لایه بالایی گرم تقسیم می‌کند. آتشی که از ناحیه پایینی یک اتاق منشأ می‌گیرد، هوا را به داخل و گرما و دود را به لایه بالایی منتقل می‌کند (۲۰). مدل با حل عددی معادلات دیفرانسیل معمولی رفتار پیچیده حریق و دود را در ساختمان‌ها شبیه‌سازی می‌کند و به مهندسان اجازه می‌دهد تا ساختمان‌های ایمن‌تری طراحی کنند (۲۰، ۲۵، ۳۱). به کمک این مدل پخش دود حریق، توزیع دما، توزیع گاز سمی مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن، ارتفاع دولایه و FED درصحنه حریق قابل اندازه‌گیری است. مدل CFAST با مجموعه‌ای محدود از داده‌ها شامل هندسه و مساحت سازه، مصالح

1. Consolidated Fire and Smoke Transport  
2. National Institute of Standards and Technology

اسپرینکلر و پارامترهای موردنیاز را گزارش دهد.

### گام اول ارزیابی ریسک حریق

FRAME روشی با رویکرد سیستماتیک برای ارزیابی ریسک حریق است که تأثیرات ذهنی مصنوعی را از بین می‌برد و نتایج قابل‌اعتماد ارائه می‌دهد (۲۴). زیرا دارای شاخص‌های ثابت برای ارزیابی است. این روش بر مبنای سطح ریسک نهایی، اقدامات اصلاحی و کنترلی پیشنهاد می‌کند (۷). برای محاسبه‌ی ریسک حریق در اماکن مختلف از قبیل مراکز درمانی (۵-۷)، تجاری (۲۵) و همچنین ارزیابی ریسک در دوره‌ی نگهداری و بهره‌برداری ساختمان‌ها (۲۴) استفاده شده است.

اساس روش یک فرمول کلی به صورت  $(R = P / (A \times D))$  می‌باشد. فاکتور پتانسیل ریسک بالقوه (P) حاصل ضرب متغیرهای مؤثر در شروع و رشد حریق شامل بار حرارتی، فعالیت‌های پرخطر و قابلیت اشتعال مصالح است. فاکتور پذیرش (A) نماینده زمان مورد نیاز برای تخلیه افراد است و فاکتور سطح حفاظت (D) از حاصل ضرب متغیرهایی به دست می‌آید که نماینده تجهیزات حفاظت فعال (اسپرینکلر، دکتور) و غیرفعال (درب‌های ضدحریق، مصالح مقاوم) می‌باشند (۲۵). در مطالعه حاضر روش FRAME برای شناسایی اولیه استفاده شد. اجرای روش شامل سه مرحله است: انتخاب زون حریق مرحله ابتدایی است، زون حریق بخشی از ساختمان است که به واسطه فاکتور ارتفاع و یا توسط درب ضدحریق از بخش‌های دیگر جدا شود. مرحله دوم شامل جمع‌آوری داده‌های موردنیاز از طریق مشاهده میدانی، مصاحبه با سرپرستار و واحد تأسیسات بیمارستان مذکور است. در مرحله سوم محاسبات با استفاده از فرمول‌های خاص که در اکسل نوشته شده انجام گردید و نهایتاً این روش ریسک حریق را برای ساختمان و محتویات ( $R^1$ )، ساکنین ( $R^2$ )، فعالیت‌ها ( $R^3$ ) به صورت مجزا از هم گزارش داد. برای تحلیل نتایج اعداد ریسک کوچک‌تر و مساوی یک

خدمات تخصصی و فوق تخصصی می‌پردازد. در زمان انجام پژوهش، بخش‌هایی از بیمارستان غیرفعال بودند.

سازه ساختمان بیمارستان شامل ۱۳ طبقه (۱۲ طبقه فوقانی و یک طبقه زیرزمین) با مساحت تقریبی  $643000$  مترمربع دارای سازه بتنی با سیمان پرتلند است (بر اساس کد ساخت و ساز NFPA 220: انواع ساخت و ساز به ۵ دسته مختلف تقسیم‌بندی می‌شود که در این مورد Type I: Noncombustible می‌باشد). نمای داخلی در بیشتر فضاها از سنگ کورین برای افزایش ماندگاری و ضدعفونی بهتر ساخته شده است. بیمارستان دارای سیستم سرمایشی تبریدی و سیستم گرمایشی، هواساز مرکزی و فن کوئل است.

سیستم ایمنی حریق بیمارستان شامل سیستم اعلام حریق دستی و اتوماتیک (ترکیب دتکتورهای دود و حرارتی)، سیستم هشدار صوتی، و جعبه‌های فایرباکس در تمامی بخش‌ها می‌باشد. سیستم تأمین آب شامل دو منبع با پمپ‌های فشارقوی است. تمامی طبقات به چهار بخش درمانی مجزا با درب‌های ضدحریق تقسیم شده (مساحت کمتر از  $1600$  متر) و هر بخش دارای دو خروجی (یک درب داخلی و یک درب اضطراری) می‌باشد. همچنین کلیه طبقات (به جز طبقه اول و منفی یک) دارای دو پلکان داخلی محصور شده، چهار درب خروج اضطراری و شش آسانسور هستند. تابلوهای راهنمای مسیریابی، خروج اضطراری و شماره طبقات در سرتاسر سازه نصب شده است. تجهیزات الکتریکی بر اساس استاندارد ملی برق می‌باشد.

با وجود رعایت اغلب الزامات مبحث سوم مقررات ملی ساختمان و استانداردهای برق ملی، کاستی‌هایی در اجرای الزامات وجود دارد: پوشش ناقص اسپرینکلر در فضاهای قابل سکونت و تعداد ناکافی کپسول‌های اطفای حریق. همچنین بازدید دوره‌ای منظم از تأسیسات برقی در همه بخش‌ها انجام نمی‌شد. در این مطالعه، از روش ارزیابی ریسک FRAME برای شناسایی نقاط پرخطر و از نرم‌افزار مدل‌سازی CFAST 7.7.4 برای شبیه‌سازی حریق استفاده شد که می‌تواند زمان فعال‌سازی آشکارساز دود و

1. Property
2. Occupants
3. Activities

مسکونی (اتاق‌های بیمار و کارکنان) و راهرو نصب باشند

### گام سوم مدل‌سازی حریق

CFAST برای محاسبه توزیع دود در حال گسترش، گازهای ناشی از سوختن منبع اشتعال و دما را در هر محفظه در هنگام حریق محاسبه می‌کند. محیط شبیه‌سازی می‌تواند از محفظه کوچک، در حدود ۱ مترمکعب تا فضاهای بزرگ در حدود ۱۰۰۰ مترمکعب باشند. حجم اتاق برای مدل‌های زون به مناطق کوچک با شرایط ثابت طبقه‌بندی می‌شود (۳۱). معادلات حاکم مورداستفاده در CFAST بر اساس قوانین بقای جرم، تکانه و انرژی است؛ که در نهایت شکل یک سیستم معادلات دیفرانسیل معمولی را به خود می‌گیرد.

بخش‌هایی از بیمارستان که در گام اول ریسک بالاتر از یک دارند، برای مدل‌سازی انتخاب شدند. داده‌ها و پارامترهای موردنیاز برای مدل‌سازی بخش انتخابی جمع‌آوری شد سپس داده‌ها از طریق پنجره CEdit وارد نرم‌افزار CFAST شد. برای ایجاد هندسه اولیه سازه اطلاعاتی مانند ابعاد، ضخامت و جنس پوشش داخلی دیوارها، سقف و کف در پنجره‌ی محفظه وارد شد. سپس مشخصات تهویه طبیعی (درب‌ها و پنجره‌ها و پنجره‌های سقفی و کف) به ترتیب در برگه‌های دریچه دیواری، دریچه سقف و کف و اطلاعات فن‌ها در برگه تهویه مکانیکی وارد شد. ویژگی‌های منبع اشتعال شامل نوع، زمان اشتعال، موقعیت حریق در برگه حریق ثبت شد. برای جانمایی اسپرینکلر و آشکارساز در هر محفظه به‌طور مجزا از برگه دکتور استفاده شد. برای محاسبه‌ی دوز مؤثر کسری و دمای لایه بالا، هدف‌ها با ویژگی‌های حرارتی منتسب به انسان به‌عنوان target در نرم‌افزار تعریف و نهایتاً نرم‌افزار اجرا شد.

جمع‌آوری داده برای تکمیل برگه‌ها با مشاهدات میدانی و استفاده از نقشه‌های تأسیسات سازه و اندازه‌گیری با متر لیزری در برخی موارد انجام شد. همچنین ابعاد محفظه حریق و سایر جزئیات مدل‌سازی در جدول ۱ به صورت مجزا برای دو استراتژی مختلف در بخش

در محدوده پذیرش ریسک قرار می‌گیرند (۶) همچنین روش بر مبنای اعداد ریسک نهایی، استراتژی‌هایی برای کاهش سطح ریسک پیشنهاد می‌دهد. در انتهای گام اول بخش‌هایی با عدد ریسک بالاتر از سایرین به‌عنوان بخش با ریسک بالا انتخاب و مدل‌سازی انجام شد.

### گام دوم انتخاب نقاط پرخطر برای ورود به مدل و سناریو حریق

در این گام بخش‌هایی با اعداد ریسک نامطلوب در گام قبلی، برای مدل‌سازی انتخاب شدند. سناریوهای حریق محتمل با مطالعه منابع معتبر و حوادث بیمارستانی ایران طراحی گردید و سپس سناریو متناسب با محیط مطالعه با نگاهی بر مستندات بیمارستان مذکور با نظر تیم تحقیق از میان سایر سناریوها تعیین شد. استراتژی‌های افزایش ایمنی حریق پیشنهادی روش FRAME (به‌دست‌آمده در گام اول) موردتوجه قرار گرفت.

بر اساس نتایج ارزیابی ریسک و تجزیه و تحلیل خطرات شناسایی شده در بیمارستان مذکور (گام اول) و با توجه به شایع‌ترین علل شناسایی‌شده، دو سناریوی محتمل طراحی شد: شروع حریق با اتصال الکتریکی در انبار دارویی محتمل تر بود پس سناریو آتش‌سوزی به علت اتصال کوتاه الکتریکی پریز و ایجاد جرقه در انبار باعث اشتعال سه کارتن شد. همچنین حریق به علت رفتار نایمن بیماران، همراهان و تعمیرات احتمالی در بخش‌های درمانی مانند بستری، یکی از علل افزایش عدد ریسک شناسایی شد پس سناریو آتش‌سوزی به علت سیگار کشیدن در اتاق بیمار در بخش بستری کلیه با توجه به مستندات و حادثه قبلی بیمارستان مذکور برای مدل‌سازی انتخاب گردید که در این سناریو یک پتو و تخت و صندلی به‌عنوان ماده‌ی سوختنی موردبررسی قرار گرفت. استراتژی A مدل‌سازی که شرایط موجود ایمنی حریق را در نظر گرفته است. (اتاق‌های بیمار مجهز به دکتور دود می‌باشد ولی اسپرینکلر در اتاق بیمار نصب نشده است و فقط راهروها مجهز به اسپرینکلر می‌باشند.) و استراتژی B فرض می‌کند که دکتورهای دود و اسپرینکلرها در تمامی نقاط

جدول ۱: پارامترهای ورودی نرم‌افزار CFAST شامل ابعاد محفظه، نوع حریق، جانمایی دکتور و اسپرینکلر

حریق	ترتیب اشتعال	نرخ رشد حریق	گرمای احتراقی (کیلوژول بر کیلوگرم)
بخش بستری	پتو	۱۰۵۴	۵۰۰۰۰
	تشک تخت	۶۶۰	۱۷۱۰۰
	صندلی	۳۴۴۷	۱۸۹۰۰
محفظه حریق	زمان شروع اشتعال (ثانیه)	نرخ رشد حریق	گرمای احتراقی (کیلوژول بر کیلوگرم)
اتاق بستری ۸	۷۵۰	۱۰۰	۲۴۰
	۳۴۰	۱۰۰	۱۰۴
	۳۲۰	پنجره باز است	باز
دکتور بخش بستری	نوع دکتور	جانمایی	حساسیت
اتاق بستری ۸	دودی	۱۷۰ سانتی‌متر فاصله از پنجره	۲۳/۹۳۴ (۱/m <sup>۲</sup> )
اسپرینکلر A بخش بستری	شاخص زمان واکنش	چگالی آبپاش	جانمایی
راهرو بخش بستری کلیه	۴۰۴ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه	۰/۰۰۰۰۷ متر بر ثانیه	۳۰۰ سانتی‌متر فاصله از پنجره
اسپرینکلر B بخش بستری	شاخص زمان واکنش	چگالی آبپاش	جانمایی
اتاق بستری ۸	۴۰۴ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه	۰/۰۰۰۰۷ متر بر ثانیه	۳۰۰ سانتی‌متر فاصله از درب خروجی اضطراری راهرو
حریق	زمان شروع اشتعال (ثانیه)	نرخ رشد حریق	گرمای احتراقی (کیلوژول بر کیلوگرم)
حریق بخش انبار	۰	۹۰۰۰	۱۶۳۳۳
	۲۰	۹۰۰۰	۱۶۳۳۳
	۴۰	۹۰۰۰	۱۶۳۳۳
محفظه حریق	ابعاد اتاق/محفظه (سانتی‌متر)	ابعاد پنجره (سانتی‌متر)	ابعاد درب (سانتی‌متر)
انبار ۱	۳۴۰	-	۲۴۰
	۴۰۰	-	۱۰۴
	۳۲۰	-	باز
دکتور بخش انبار	نوع دکتور	جانمایی	حساسیت
انبار ۱	دودی	وسط بخش انبار	۲۳/۹۳۴ (۱/m <sup>۲</sup> )
اسپرینکلر A بخش انبار	شاخص زمان واکنش	چگالی آبپاش	جانمایی
بخش انبار	۴۰۴ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه	۰/۰۰۰۰۷ متر بر ثانیه	۱۵۰ سانتی‌متر فاصله از درب انبار
اسپرینکلر B بخش انبار	شاخص زمان واکنش	چگالی آبپاش	جانمایی
بخش انبار	۴۰۴ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه	۰/۰۰۰۰۷ متر بر ثانیه	وسط بخش شمالی انبار

بیماران و کارکنان می‌باشد؛ برای انتخاب حداکثر بازه زمانی مدل‌سازی حریق به زمان تخلیه توجه شد. زمان بحرانی برای تخلیه در هنگام آتش‌سوزی بسته به سناریو خاص و ویژگی‌های ساختمان متفاوت است. در مطالعه‌ی Ivanov و همکاران (۲۰۲۳) تخلیه آزمایشی تحت نظارت کارکنان آتش‌نشانی در یک ساختمان با ارتفاع ۱۰۷ متر

بستری کلیه و انبار دارویی آمده است. نتایج مدل‌سازی در محدوده زمانی انتخابی و توسط پارامتر HRR برای هر کدام از منابع اشتعال و پارامتر FED برای هر کدام از اهداف تعیین شده گزارش شده است. با توجه به هدف مطالعه که پیش‌بینی شرایط دود و حرارت در هنگام حریق و جلوگیری از اثر این دو متغیر روی

در واحد میکرو لیتر در لیتر اندازه‌گیری شده.  $\phi HCN$ : میانگین غلظت گاز سیانید هیدروژن در طول زمان اندازه‌گیری در واحد میکرو لیتر در لیتر اندازه‌گیری شده.

$vCO_2$ : برای افزایش نرخ تأثیر گازهای خفه‌کننده به دلیل تهویه بیش‌ازحد استفاده می‌شود که  $\phi CO_2$  میانگین غلظت مولی  $CO_2$  در طول افزایش زمان  $\Delta t$  است. این عبارت به ارتباط بین غلظت  $CO_2$  و نرخ گازهای خفه‌کننده در شرایط هایپرونتیلیسیون اشاره دارد و نشان می‌دهد که چگونه غلظت  $CO_2$  می‌تواند بر نرخ گازهای خطرناک تأثیر بگذارد (۲۹).

وقتی مقدار FED برابر با  $0/3$  است،  $11,3$  درصد از جمعیت به احتمال زیاد مستعد اثرات مواجهه با گاز خفگی آور هستند. در  $1/3$ ، تقریباً  $90$  درصد از جمعیت احتمالاً مستعد اثرات هستند. برای افراد مسن، افراد بسیار جوان و کسانی که از قبل شرایطی مانند آسم دارند، حساسیت بالاتری انتظار می‌رود. مرگ در FED بین  $2$  تا  $3$  پیش‌بینی می‌شود (۱۶). در این مطالعه از این مفهوم برای تعیین کمیت قدرت سمی گازهای تولیدشده در سناریو حریق استفاده شد. اهداف موردنظر برای گزارش FED در ارتفاع  $1/8$  متری از کف و در فاصله  $0/2$  متری از مرزهای محفظه قرار گرفتند تا تأثیر شرایط مرزی حجم کنترل به حداقل برسد.

با توجه به اینکه زیرزمین شامل بخش‌های انبار، سالن‌های غذاخوری، راهرو، دو خروجی‌های اضطراری، تاسیسات و رختشورخانه است؛ محاسبات FED برای اهداف در موقعیت‌های گزارش شده در جدول ۲ انجام شد. با توجه به اینکه این بیمارستان بخشی از یک مجموعه بزرگتر است که دارای تاسیسات و لاندی مرکزی می‌باشد؛ دو واحد تاسیسات و رختشورخانه در زمان انجام پژوهش در مرحله ساخت بودند و مورد ارزیابی ریسک قرار نگرفته و در مدل‌سازی به‌عنوان محفظه بسته در نظر گرفته شدند.

طبقه دهم شامل بخش‌های درمانی بستری کلیه و بستری داخلی و دو بخش غیرفعال بود که مدل‌سازی

در بلغارستان اجرا شد و یافته‌های مطالعه نشان داد، بازه زمانی آزمایش تجربی برای تخلیه عادی  $177$  نفر از طبقات مختلف در محدوده  $2$  دقیقه تا  $6$  دقیقه می‌باشد که نتایج با نتایج شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار Pathfinder (کل زمان تخلیه:  $6$  دقیقه و  $26$  ثانیه) مطابقت دارد و همچنین نتایج شبیه‌سازی حداکثر ظرفیت ساکنین ساختمان با  $2195$  نفر ( $24$  دقیقه و  $48$  ثانیه برای کل زمان تخلیه) بود (۲۶). با توجه به مطالعات و نظر خبرگان، بازه زمانی  $0$  تا  $1800$  ثانیه برای مدل‌سازی حریق با نرم‌افزار CFAST انتخاب گردید.

دود سمی بر حرکت و شرایط پایداری ساکنین هنگام حریق تأثیر می‌گذارد (۲۷) و تعیین کمیت قدرت سمی گازهای تولیدشده در آتش‌سوزی یک پارامتر مهم در ایمنی آتش است. پارامتر FED که پایه مفهومی آن در استانداردهای معتبر بین‌المللی مانند ISO13571 ارائه شده است، توسط مراجع معاصر مانند انجمن مهندسين حفاظت آتش (SFPE) (۱۵) و همچنین در مطالعات تجربی اخیر Hostikka و همکاران (۱۲) مورد تأیید و به کارگیری قرار گرفته است. این پارامتر به‌احتمال غیرقابل تحمل بودن شرایط برای درصد معینی از جمعیت از طریق توزیع لگ‌نرمال مربوط می‌شود و یکی از پارامترهای مهم خروجی نرم‌افزار است که برای محاسبات زمان خروج ایمن هم مورد توجه قرار می‌گیرد. FED گاز به غلظت گاز خفه‌کننده و زمان مواجهه بستگی دارد. نرم‌افزار CFAST از فرمول ارائه‌شده توسط ISO 13571 برای تخمین FED استفاده می‌کند. گازهایی که به‌طور خاص به‌عنوان بخشی از محاسبات FED در نرم‌افزار CFAST هستند، عبارت‌اند از مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) و سیانید هیدروژن (HCN) (۱۳، ۲۸).

$$FED_{in}(t) = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\phi CO \cdot vCO_2}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{(\phi HCN \cdot vCO_2)^{2.36}}{1.2 \times 10^6} \Delta t \quad (1)$$

$\phi CO$ : میانگین غلظت CO در طول زمان اندازه‌گیری

جدول ۲: موقعیت جانمایی اهداف طبقه ی زیرزمین در مدل‌سازی CFAST برای محاسبات FED

هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	هدف ۴	هدف ۵
انبار	سالن غذاخوری بانوان	سالن غذاخوری آقایان	خروجی اضطراری شماره ۱	خروجی اضطراری شماره ۲

جدول ۳: موقعیت جانمایی اهداف طبقه ی زیرزمین در مدل‌سازی CFAST برای محاسبات FED

هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	هدف ۴	هدف ۵	هدف ۶	هدف ۷
اتاق بیمار ۸	راهرو	ایستگاه پرستاری	لابی طبقه دهم	بخش درمانی مجاور	بخش درمانی مجاور	بخش درمانی مجاور

با توجه به جدول ۴ سطح ریسک برای ساختمان و محتویات و فعالیت‌ها در تمامی بخش‌های مورد مطالعه کمتر از یک و در محدوده پذیرش ریسک بود. بیشترین سطح ریسک حریق برای ساکنین در انبار دارویی (۱/۳۴) و بخش بستری کلیه (۱/۱۱) ثبت شد.

بررسی‌ها نشان داد که با وجود مشابهت معماری سازه در اغلب طبقات (به جز طبقه منفی یک) و یکنواختی سطح حفاظت در بیشتر بخش‌ها (به جز طبقات چهارم و پنجم)، دو عامل اصلی افزایش ریسک ساکنین عبارت بودند از رفتارهای نایمن و سطح حفاظت ناکافی. عللی چون سیگار کشیدن بیماران، تعمیرات کوچک جوشکاری تخت بیماران (نقطه جوش)، عدم بازرسی منظم تأسیسات برقی، عدم آموزش برخی از کارکنان برای استفاده از تجهیزات اطفای حریق در مجموعه رفتارهای نایمن قرار گرفتند. در حوزه سیستم‌های حفاظت حریق مواردی مانند تعداد ناکافی کپسول‌های اطفای حریق دستی و نصب نامناسب اسپرینکلر از دلایل افزایش ریسک حریق افراد در این سازه بود. اگرچه هر یک از این عوامل به صورت مجزا در بخش‌های مختلف وجود داشت، اما تجمع تمامی آنها در بخش‌های خاصی مانند بستری کلیه منجر به تشدید ریسک گردید. مواردی مانند سیگار کشیدن و تعمیرات جوشکاری عمدتاً در بخش‌های بستری ثبت شد با این حال، حضور پرسنل آموزش دیده در این بخش‌ها به‌عنوان یک نقطه قوت در مقابله با حریق شناسایی شد. همچنین مشکل نصب ناقص اسپرینکلر در اغلب بخش‌ها (به جز طبقات چهارم و پنجم) به‌عنوان نقطه ضعف اصلی سیستم حفاظت فعال تایید گردید.

حریق در بخش بستری کلیه انجام و محاسبات FED برای اهداف شامل نقاط مکانی گزارش شده در جدول ۳ گزارش شده است.

### یافته‌ها

مطالعه حاضر در یک بیمارستان بلندمرتبه به‌عنوان بخشی از یک مجتمع آموزشی درمانی در تهران انجام شد. ۱۲ بخش مورد مطالعه قرار گرفت. مقاومت سازه بتونی بین ۳۰ تا ۶۰ دقیقه متغیر در نظر گرفته شد. در اکثر فضاها پوشش داخلی سطح بیمارستان از سنگ بود. سازه مجهز به دو منبع آب با دو پمپ فشارقوی، شیرهای هدرانت، سیستم سرمایشی تبریدی و سیستم گرمایشی، هواساز مرکزی و فن کوئل بوده است. هر طبقه از سازه به ۴ بخش درمانی تقسیم و بخش‌های بیمارستان دارای سیستم اعلام حریق دستی و خودکار، جعبه‌های فایرباکس، درب‌های ضد حریق و خروجی اضطراری بوده است. همچنین تابلوهای راهنمای مسیریابی و تابلو خروج اضطراری و راهنمای شماره طبقات در کلیه سازه نصب شده. تجهیزات الکتریکی بر اساس استاندارد ملی برق می‌باشد ولی بازدید دوره‌ای و منظم از تأسیسات برقی در همه‌ی بخش‌ها دیده نمی‌شد.

### نتایج روش FRAME

نتایج ارزیابی ریسک برای شاخص‌های ریسک و ریسک نهایی برای هر بخش بیمارستان به ترتیب برای جنبه‌های ریسک شامل ساختمان و محتویات، افراد، فعالیت‌ها در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴: نتایج ارزیابی ریسک FRAME برای شاخص‌های ریسک و ریسک نهایی برای هر بخش بیمارستان

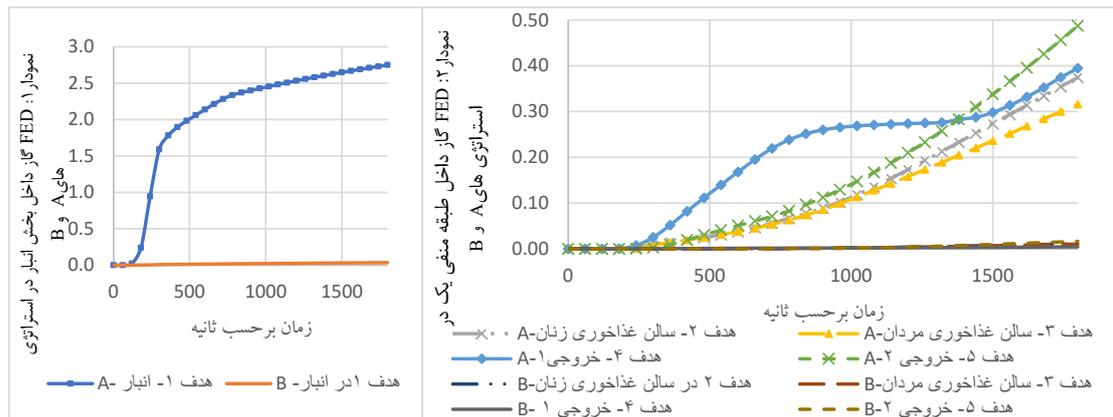
ردیف	طبقه/زون حریق	جنبه‌های ریسک	سطح ریسک بالقوه	سطح پذیرش ریسک	سطح حفاظت	سطح ریسک نهایی
۱	منفی یک/ سالن غذاخوری	ساختمان و محتویات	۰/۶۸	۱/۰۸	۲/۲۱	۰/۲۹
		افراد	۰/۸۴	۰/۶۳	۱/۷۵	۰/۷۷
		فعالیت‌ها	۰/۵۱	۱/۰۰	۱/۸۱	۰/۲۸
۲	منفی یک/ انبار دارویی	ساختمان و محتویات	۰/۷۲	۱/۱۷	۱/۸	۰/۳۴
		افراد	۱/۵۲	۰/۷۲	۱/۵۸	۱/۳۴
		فعالیت‌ها	۰/۳۶	۰/۹۰	۱/۴۷	۰/۲۷
۳	همکف/درمانگاه‌های تخصصی ۱	ساختمان و محتویات	۰/۳۱	۱/۰۰	۲/۰۹	۰/۱۵
		افراد	۰/۳۴	۰/۷۵	۲/۴۶	۰/۱۸
		فعالیت‌ها	۰/۲۷	۰/۶۰	۱/۹۹	۰/۲۲
۴	طبقه اول/ آزمایشگاه	ساختمان و محتویات	۰/۳۱	۱/۰۰	۲/۰۹	۰/۱۵
		افراد	۰/۴۱	۰/۷۵	۲/۴۶	۰/۲۳
		فعالیت‌ها	۰/۲۷	۰/۶۰	۱/۹۹	۰/۲۲
۵	طبقه دوم/ امور مالی و اداری	ساختمان و محتویات	۰/۴۶	۱/۰۸	۱/۹۹	۰/۲۲
		افراد	۰/۶۳	۰/۸۳	۲/۲۲	۰/۳۴
		فعالیت‌ها	۰/۳۷	۰/۵۰	۱/۸	۰/۴۱
۶	طبقه سوم/ بخش زنان و زایمان	ساختمان و محتویات	۰/۳۷	۰/۵۹	۲/۴۴	۰/۲۵
		افراد	۰/۵۰	۰/۳۴	۲/۷۳	۰/۵۳
		فعالیت‌ها	۰/۳۲	۰/۷۰	۲/۲۱	۰/۲۱
۷	طبقه چهارم/ مجموعه اتاق عمل	ساختمان و محتویات	۰/۴۱	۰/۳۷	۳/۲۷	۰/۳۴
		افراد	۰/۵۵	۰/۱۲	۴/۷۲	۰/۹۸
		فعالیت‌ها	۰/۳۵	۰/۶۰	۲/۹۹	۰/۲۰
۸	طبقه پنجم/ بخش ICU	ساختمان و محتویات	۰/۴۲	۰/۴۰	۲/۷۱	۰/۳۸
		افراد	۰/۵۷	۰/۱۵	۳/۸۶	۰/۹۶
		فعالیت‌ها	۰/۳۷	۰/۶۰	۲/۴۵	۰/۲۵
۹	طبقه ششم/ بخش ارتوپدی ۱	ساختمان و محتویات	۰/۴۳	۰/۵۸	۲/۲۱	۰/۳۴
		افراد	۰/۵۸	۰/۳۳	۲/۴۶	۰/۷۲
		فعالیت‌ها	۰/۳۸	۰/۳۰	۱/۹۹	۰/۶۳
۱۰	طبقه نهم/ بخش بستری نورولوژی	ساختمان و محتویات	۰/۴۶	۰/۵۱	۲/۲۱	۰/۴۰
		افراد	۰/۶۲	۰/۲۶	۲/۴۶	۰/۹۵
		فعالیت‌ها	۰/۴۰	۰/۳۰	۱/۹۹	۰/۶۶
۱۱	طبقه دهم/ بخش بستری کلیه	ساختمان و محتویات	۰/۴۸	۰/۴۹	۲/۲۱	۰/۴۵
		افراد	۰/۶۵	۰/۲۴	۲/۴۶	۱/۱۱
		فعالیت‌ها	۰/۴۲	۰/۳۰	۱/۹۹	۰/۷۰
۱۲	طبقه یازدهم/ بخش بستری VIP	ساختمان و محتویات	۰/۴۹	۰/۷۷	۲/۲۱	۰/۲۹
		افراد	۰/۶۶	۰/۵۲	۲/۴۶	۰/۵۲
		فعالیت‌ها	۰/۴۳	۰/۶۰	۱/۹۹	۰/۳۶

قفسه‌بندی نامنظم و از سوی دیگر با نگهداری مواد قابل احتراقی مانند الکل در کنار سایر کالاها همراه شده بود. دوم کاستی‌های سازه‌ای و موقعیت قرارگیری انبار بود که مواردی چون قرارگیری انبار در طبقه زیرزمین، عدم

ریسک حریق برای افراد در انبار در محدوده غیرقابل‌پذیرش قرار گرفت. تحلیل نتایج سه گروه عامل کلیدی را در افزایش سطح ریسک مشخص کرد. نخست، مشکل در محتوا و چیدمان انبار که از یکسو با

جدول ۵: نتایج فعال شدن دکتور و اسپرینکلر در استراتژی‌های مختلف

موقعیت حریق	تجهیز	استراتژی A	استراتژی B
بخش بستری کلیه (طبقه دهم)	دکتور دود	۱۲ ثانیه	۱۲ ثانیه
	اسپرینکلر	۶۷۴ ثانیه	۱۴۱ ثانیه
بخش انبار (طبقه منفی یک)	دکتور دود	۲۷ ثانیه	۲۷ ثانیه
	اسپرینکلر	۲۸۹ ثانیه	۷۷ ثانیه



شکل ۱: مقایسه دوز مؤثر کسری (FED) گاز در انبار و طبقه منفی یک تحت استراتژی‌های A و B

مسکونی (اتاق‌های بیمار و کارکنان)، راهرو و روی قفسه انبار نصب باشند. نتایج مربوط به زمان فعال‌سازی دکتورها و اسپرینکلرها در جدول ۵ خلاصه شده است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که فاصله نصب اسپرینکلر از منبع حریق تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر زمان پاسخگویی سیستم و در نتیجه ایمنی ساکنین دارد.

در ادامه، نتایج پارامتر FED گازهای سمی به صورت نمودار آمده است. با توجه به اینکه مقادیر در اتاق منبع حریق به‌طور قابل توجهی بالاتر بود، نتایج برای هدف ۱ و سایرین روی نمودارهای مجزا گزارش شده است. تفاوت نتایج استراتژی A و B، نماینده‌ی اثرات تعیین‌کننده فاصله نصب اسپرینکلر از منبع حریق روی افزایش ایمنی جان و سلامت ساکنین می‌باشد.

شکل ۱ مقادیر FED در انبار را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر FED در استراتژی A به‌طور کلی از استراتژی B بالاتر است. از آنجایی که تنها تفاوت

وجود درب ضد حریق برای جداسازی از راهرو، اتصال مستقیم به طبقه همکف از طریق پلکان‌های داخلی و فقدان خروجی اضطراری مستقل به فضای باز را در بر می‌گرفت. نهایتاً عدم بازرسی منظم تأسیسات برقی که یک ضعف مدیریتی بود. هم‌افزایی این عوامل موجب افزایش سطح ریسک حریق برای افراد در این بخش شده بود.

#### نتایج مدل‌سازی با CFAST

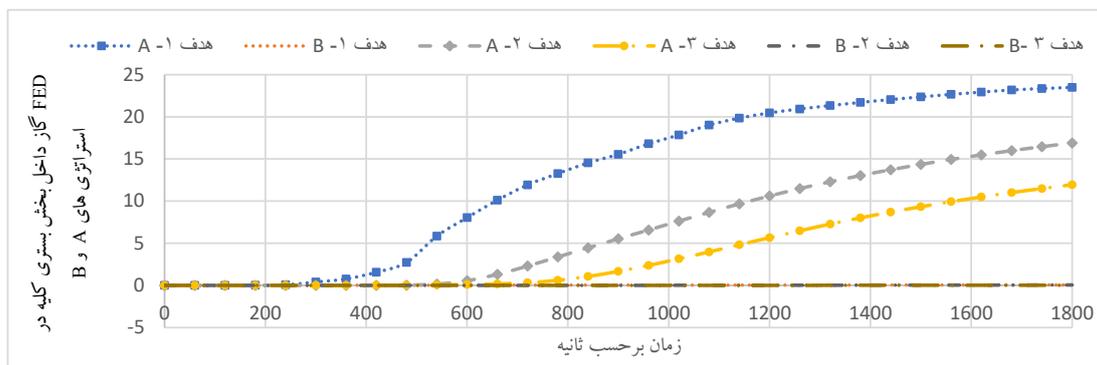
مدل‌سازی برای دو بخش بستری کلیه (واقع در طبقه دهم) و انبار (واقع در طبقه منفی یک) انجام شد. در ادامه نتایج خروجی نرم‌افزار CFAST برای هر دو استراتژی ارائه است؛ استراتژی A شرایط ایمنی فعلی را نشان می‌دهد که دکتور دود در تمامی نقاط مسکونی و راهرو و انبار نصب شده است اما اسپرینکلرها فقط در راهروها و ابتدای انبار زیرزمین نصب شده‌اند. درحالی‌که استراتژی B فرض می‌کند که دکتورهای دود و اسپرینکلرها در تمامی نقاط

محسوس است؛ به‌گونه‌ای که در استراتژی B (نصب اسپرینکلر در اتاق بیمار)، مقادیر FED گازهای خفه‌کننده در مقایسه با استراتژی A (نصب در راهرو)، بسیار ناچیز و نزدیک به صفر ثبت شده است. در مقابل، در شرایط فعلی و هنگام وقوع حریق در اتاق بیمار، غلظت گازهای خفه‌کننده در راهرو می‌تواند به مقادیر کشنده برسد. علاوه بر این، مقایسه مقادیر FED بین بخش منبع حریق (هدف ۴) و بخش‌های مجاور (اهداف ۵، ۶ و ۷)، تأثیر مثبت تقسیم‌بندی فضا در محدود کردن پخش دود و گازهای سمی را به خوبی نشان می‌دهد. به طور مشخص، با شروع حریق در بخش بستری، پخش آلاینده‌ها عمدتاً به بخش‌های مجاور هم‌جوار محدود شده و از گسترش آن به کل طبقه جلوگیری به عمل آمده است.

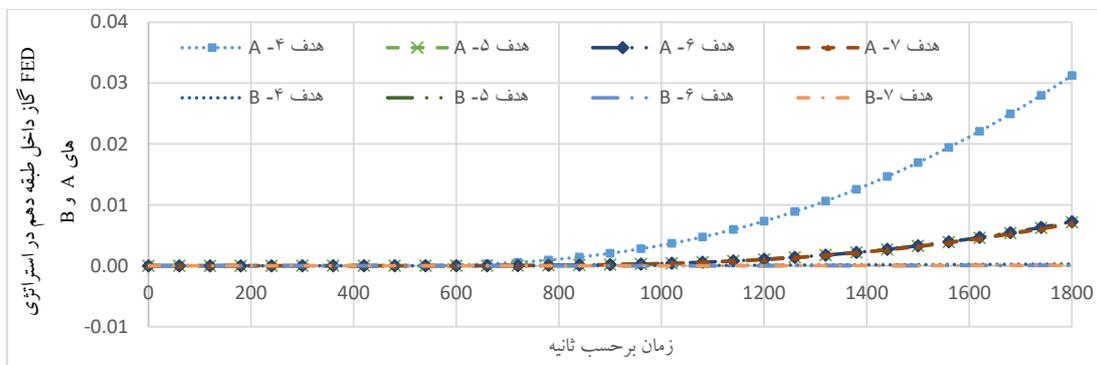
شکل‌های ۴ روند تغییرات نرخ انتشار حرارت را

این دو استراتژی در جانمایی اسپرینکلر است، این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که کاهش فاصله اسپرینکلر از منبع حریق تا چه اندازه در کاهش مقادیر گازهای سمی و دود مؤثر است. در شرایط فعلی (استراتژی A) در صورت وقوع حریق، برای افراد بدون تجهیزات حفاظت تنفسی در انبار، تا زمان ۲۴۰ ثانیه کمترین احتمال ناتوانی وجود دارد، اما پس از این زمان، این احتمال به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، روند افزایشی FED برای خروجی اول تا ۱۳۸۰ ثانیه به دلیل نزدیکی آن به انبار مشاهده شد که استفاده از خروجی دوم را در تخلیه اضطراری منطقی می‌سازد.

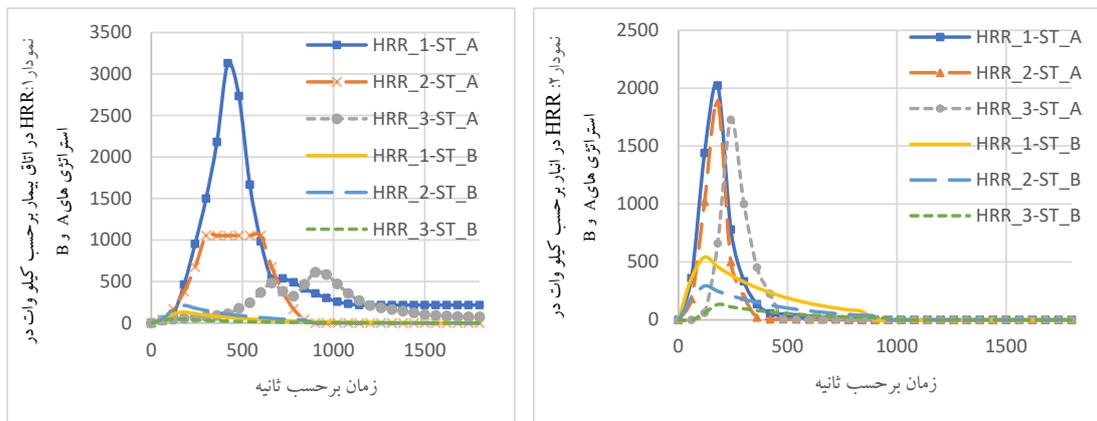
شکل‌های ۲ و ۳ مقادیر FED گازهای سمی را برای حریق در بخش بستری و بخش‌های مجاور آن در طبقه دهم نشان می‌دهند. تفاوت بین دو استراتژی کاملاً



شکل ۲: روند زمانی دوز مؤثر کسری (FED) گاز در بخش بستری کلیه تحت استراتژی‌های A و B



شکل ۳: روند زمانی دوز مؤثر کسری (FED) گاز در بخش‌های مجاور بخش بستری کلیه (طبقه دهم) تحت استراتژی‌های A و B



شکل ۴: نرخ آزادسازی حرارت (HRR) منابع اشتعال در بخش‌های مورد مطالعه تحت استراتژی‌های A و B

می‌تواند با کاهش سرعت پیرولیز مواد و به تأخیر انداختن رسیدن حریق به شرایط بحرانی، تأثیر بسزایی در کاهش رشد حریق و ارتقای ایمنی جانی داشته باشد.

### بحث

مطالعه‌ی حاضر با هدف بررسی وضعیت ایمنی حریق به‌صورت کاربردی در یک بیمارستان آموزشی درمانی بلندمرتبه انجام شد. به‌منظور ارزیابی اولیه وضعیت ایمنی حریق و شناسایی نقاط مستعد آسیب، سطوح ریسک با روش FRAME برای هر بخش به‌طور مجزا بررسی شد. بخش‌هایی با سطح ریسک بالاتر از یک به‌عنوان بخش نامطلوب انتخاب و علل ریسک تحلیل شد. سپس با توجه به علل افزایش ریسک و نگاهی به حوادث حریق بیمارستان‌های ایران، سناریو محتمل حریق طراحی شد. نهایتاً سناریو محتمل و استراتژی‌های پیشنهادی روش FRAME با استفاده از نرم‌افزار CFAST شبیه‌سازی شد و نتایج FED در استراتژی‌های مختلف و همچنین زمان فعال‌سازی اسپرینکلر و دکتورها گزارش شد.

در این مطالعه، علت سطوح ریسک پایین در بسیاری از بخش‌های بیمارستان را می‌توان در دو بخش ساخت سازه و نصب تجهیزات حفاظتی تحلیل کرد. از جمله عوامل مؤثر می‌توان به طراحی و ساخت منطبق با قوانین و مقررات ملی ساختمان، پوشش غیرقابل اشتعال داخلی

برای منابع اشتعال در واحد زمان نشان می‌دهند. نتایج به وضوح حاکی از آن است که نرخ انتشار حرارت در استراتژی A به طور قابل توجهی بالاتر از استراتژی B است. این تفاوت، تأثیر دوگانه اسپرینکلرها را در کاهش نرخ رشد شعله و ایجاد اثر خنک‌کنندگی به خوبی نشان می‌دهد.

به طور کلی، ارزیابی تمامی پارامترهای حریق نشان داد که استراتژی B (جانمایی اسپرینکلر در نزدیک‌ترین موقعیت به منبع حریق) شرایط به مراتب مطلوب‌تری را برای ایمنی جانی افراد فراهم می‌کند. در این استراتژی، کاهش همزمان نرخ انتشار حرارت و غلظت گازهای سمی مشاهده شد.

تحلیل الگوی پخش آلاینده‌ها نیز نشان داد که دود و گازهای سمی ابتدا در بخش بستری پخش شده و سپس به تدریج به لابی و بخش‌های مجاور سرایت می‌کنند. این الگو، اثربخشی بخش‌بندی مناسب فضا را در محدود کردن و کنترل حریق تأیید می‌کند. در نتیجه، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که:

- نصب اسپرینکلر در کلیه فضاهای مسکونی و درمانی (اتاق‌های بیماران و کارکنان، راهروها) مطابق با مقررات ملی ساختمان
- نصب اسپرینکلر در داخل قفسه‌بندی‌های انبار مطابق با استاندارد NFPA 13

مطلوب بوده است.

نتایج مطالعه حاضر سیگار کشیدن را رفتار نایمن مهم در افزایش ریسک و یک محرک بالقوه برای شروع آتش‌سوزی در محیط بیمارستانی شناسایی کرد. علیرغم سیاست‌های جامع ممنوعیت استعمال دخانیات در بیمارستان برای همه بیماران سیگاری، همچنان شکاف بین قانون و اجرا وجود دارد. یافته حاضر بر اهمیت مدیریت این خطر رفتاری تأکید می‌کند. مطالعه‌ی Robson و همکاران (۳۲) به طور مستقیم از این موضوع حمایت می‌کند. نویسندگان طی دوره بررسی ۸۱ ماهه در یک بیمارستان با قانون ممنوعیت دود با جایگزینی سیگار الکترونی بجای سیگار معمولی تأیید می‌کنند که حذف سیگار می‌تواند باعث کاهش خطرات حریق محیط بیمارستان‌های روانی شود (۳۲). تصویب قوانین برای خرید و فروش سیگارهایی با کاهش خطر آتش‌سوزی (RFR<sup>1</sup>) در کشورهای اتحادیه اروپا و کانادا و استرالیا نشان از نگرانی‌های جهانی مرتبط با شروع حریق از سیگار در محیط‌های مسکونی و صنعتی می‌باشد (۳۳). همسو با این امر، مطالعه قاسم‌پور و همکاران (۳۴) به صورت کمی تأیید می‌کند که استفاده از سیگارهای "خودخاموش‌شونده" منجر به کاهش قابل توجه آمار آتش‌سوزی‌های ناشی از سیگار در محیط‌های مسکونی شده است. این شواهد قوی، یافته مطالعه حاضر را تقویت کرده و لزوم توجه جدی‌تر به این عامل به ظاهر ساده را خاطرنشان می‌سازد.

انبار بیمارستان به عنوان یک نقطه آسیب پذیر سازه‌ای شناخته شد. این یافته که انبار به دلیل ذخیره مواد قابل اشتعال (مانند الکل) در معرض ریسک بالاتری قرار دارد، با ماهیت ذاتی چنین فضاهایی مطابقت دارد. نتایج مطالعه حاضر در انبار همخوانی داشت با مطالعه‌ی مهدی نیا و همکاران که با روش مشابه انجام و بخش رادیولوژی بیمارستان به علت قرارگیری در زیرزمین و مشکل دسترسی خروج برای ساکنین به هنگام حریق، دارای ریسک حریق غیرقابل قبول بود (۳۵). این تشابه

دیوارها، و استفاده از سنگ (که علاوه بر نرخ پایین گسترش شعله، در فرآیند ضدعفونی نیز نقش دارد) اشاره کرد که همگی در قالب طراحی ذاتاً ایمن نقش مهمی در کاهش سطوح ریسک ایفا می‌کنند. در بخش تجهیزات حفاظتی مواردی مانند خروجی‌های اضطراری با عرض مناسب و حفاظت تمام خروجی‌ها با درب‌های ضد حریق همچنین منبع آب آتش‌نشانی با دو پمپ فشارقوی در حمایت از جعبه‌های اطفاء حریق را علت اصلی افزایش سطح حفاظت و نهایتاً سطوح ریسک پایین در بیمارستان مذکور نام برد.

این یافته که ویژگی‌های طراحی ساختمان عامل کلیدی در کاهش ریسک است، با مطالعه‌ای در ۲۰۲۰ با روش CFSES همسو است که تعداد ۷۹ مجتمع تجاری در منطقه ۱۲ تهران مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیل نتایج ریسک رابطه آماری معناداری بین ساخت سازه و سطوح ریسک گزارش کرد که تأکید داشت ویژگی‌های طراحی ساختمان نقش مهمی در کاهش خطرات مرتبط با خروج در طول شرایط اضطراری ایفا می‌کند (۳۰). به طور مشابه، مطالعه‌ی رحمانی در بیمارستان بلندمرتبه با روش CFSES پیشنهاد داد برای کاهش سطح خطر آتش‌سوزی در بیمارستان‌های بلندمرتبه نیاز به اقدامات ویژه در زمینه اطفاء و مهار حریق از جمله طراحی ساختمان برای سیستم‌های اسپرینکلر خودکار و استانداردسازی کنترل‌های آتش‌سوزی ضروری است (۹). یافته دیگر مطالعه حاضر مبنی بر تأثیر نصب سیستم‌های اطفاء حریق و دتکتورهای خودکار در کاهش ریسک، توسط مطالعه سالاری و همکاران (۳۱) نیز تأیید شده است. مطالعه مذکور با روش مشابه در بیمارستان نشان داد که ریسک ساختمان و اموال در ۲۲ درصد بخش‌ها و ریسک ساکنین برای ۹۰ درصد بخش‌های بیمارستان نامطلوب بود که با نصب سیستم‌های اطفاء حریق و دتکتورهای خودکار در اغلب بخش‌های بیمارستان می‌توان ریسک نهایی حریق را کاهش داد. رعایت همزمان این موارد (هم طراحی ایمن و هم تجهیزات حفاظتی) در بیمارستان مورد مطالعه حاضر، کلید دستیابی به سطوح ریسک

1. Reduced Fire Risk cigarettes

کنترلی ریسک با نتایج FED مورد بررسی قرار گرفت. هم راستا با مطالعه حاضر، Jang و همکاران (۲۳) برای اجرای طراحی مبتنی بر عملکرد در ساختمان‌ها از خروجی مدل‌سازی عددی استفاده کردند و نرم‌افزار CFAST به‌عنوان جایگزین FDS برای محاسبه‌ی زمان در دسترس برای تخلیه‌ی ایمن (ASET<sup>1</sup>) و زمان مورد نیاز برای تخلیه‌ی ایمن (RSET<sup>2</sup>) هنگام حریق به کار برده شد و اعتبار استفاده از CFAST برای پیش‌بینی دود و دما که پیش‌زمینه محاسبات ASET می‌باشند را بررسی کرد. یافته‌های مطالعه نشان داد که نرم‌افزار همبستگی‌های تجربی را بر اساس نرخ انتشار گرما حل می‌کند و دمای بالای گاز را به‌طور مشابه پیش‌بینی می‌کند. نهایتاً تأیید شد که علیرغم داده‌های محدود، CFAST می‌تواند دود را به خوبی پیش‌بینی کند و نتایج ASET معقولی تولید کند.

پژوهش حاضر تأثیر مثبت نصب اسپرینکلر را بر کنترل توسعه آتش، کاهش دما و کاهش سمیت را با بهبود شاخص FED نشان داد. همخوانی دارد با مطالعه Hostikka و همکاران که برای بررسی اثربخشی اسپرینکلرها در محافظت از بیمار در آتش‌سوزی اتاق بیمارستان، از آزمایش واقعی حریق استفاده کردند. ۲۶ آزمایش پاششی و چهار آزمایش سوختگی آزاد در اتاق‌های مجهز به سیستم اسپرینکلر انجام شد که منبع حریق مورد استفاده منسوجات نساجی بیمارستان بود. اثر اسپرینکلر با مقایسه مقادیر دوز مؤثر کسری در سناریوهای متفاوت مشخص شد و یافته‌های آزمایشات، مطالعه حاضر را تأیید و تأکید کرد که نصب اسپرینکلر در اتاق منبع حریق عمده‌تاً از طریق کنترل توسعه آتش، دمای شعله را در سطح پایین نگه می‌دارد و سمیت را کاهش می‌دهد (۱۲).

مطالعه Nonsawat با عنوان «تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم‌های آبپاش خودکار در انبارها با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک آتش» در سال ۲۰۲۰ با مطالعه

نشان می‌دهد که مشکلات دسترسی و مکان‌یابی بدون در نظر گرفتن نوع کالای ذخیره‌شده، به تنهایی یک عامل ریسک‌زای کلیدی باشد. از جهت دیگر، اگرچه مطالعه حاضر به طور خاص انبار دارو را بررسی کرده، اما می‌توان اصول کلی ایمنی‌شناسی آن را با مطالعه Zhang که بر روی انبارهای مواد شیمیایی انجام شد، مقایسه کرد. هر دو مطالعه بر لزوم مکان‌یابی معقول، مسیرهای حمل‌ونقل مناسب و جداسازی با درب‌های ضد حریق به عنوان راهکارهای اساسی برای کاهش ریسک در فضاهای انباری تأکید دارند (۳۶).

مطالعه تأیید کرد که روش FRAME اگرچه در آینده نیازمند توسعه می‌باشد ولیکن در حال حاضر می‌تواند تا حدود زیادی هم‌ی فاکتورهای مؤثر در ریسک حریق بیمارستان‌ها را شناسایی کند و همه‌ی پارامترهای روش‌هایی مانند HSI را پوشش دهد. شاخص ایمنی بیمارستان که توسط سازمان بهداشت جهانی حمایت می‌شود شامل بررسی اختصاصی بیمارستان‌ها در سه حوزه ایمنی ساختاری و غیر سازه‌ای و ظرفیت مدیریت است که در حوزه ایمنی غیر سازه‌ای به بررسی مسائل مرتبط با ایمنی بیمارستان در برابر حریق با عنوان سیستم حفاظت در برابر حریق می‌پردازد (۳۷). از طرفی FRAME در مقایسه با روش تخصصی تر FSES که حداقل‌های ایمنی بیمارستان را می‌سنجد و نقطه قوت آن محاسبه‌ی ضریب ریسک بیمارستان به صورت تخصصی می‌باشد؛ پارامترهای تهویه، ارتفاع سازه، تعداد و نوع کپسول‌های اطفای حریق دستی و جانمایی اسپرینکلرها را با دقت بیشتری ارزیابی می‌کند. یافته‌های مطالعه موردی تأیید می‌کند که این روش به منظور شناسایی اولیه ریسک و ارائه راهکارهای کنترلی قابلیت مناسب دارد.

بخش مدل‌سازی پژوهش حاضر از نرم‌افزار CFAST به‌عنوان ابزاری مناسب برای مدل‌سازی حریق در فضای بسته مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی پارامتر FED برای بررسی وضعیت گازهای سمی در مسیرهای منتهی به خروجی‌ها استفاده شد و کارایی استراتژی

1. Available Safe Egress Time  
2. Required Safe Egress Time

نصب اسپرینکلر در اتاق‌های بیمار، برگزاری مانورهای اطفاء حریق با همکاری آتش‌نشانی، بررسی دوره‌ای تأسیسات الکتریکی و طراحی اتاق‌های مخصوص سیگار (smoking room) پیشنهاد می‌شود.

در مدل‌سازی پژوهش حاضر، مداخلات انسانی توسط کارکنان بیمارستان یا نیروهای آتش‌نشانی به منظور اطفاء حریق با استفاده از کپسول‌های اطفاء حریق یا جعبه‌های فایرباکس در روند شروع و رشد و اتمام حریق در نظر گرفته نشده است. همچنین حداکثر تعداد محفظه‌های مدل‌سازی ۱۰۰ عدد است و امکان مدل‌سازی با تعداد محفظه بیشتر وجود ندارد. با این وجود، نتایج این مطالعه در حوزه دود و گازهای سمی می‌تواند مبنای ارزشمندی برای محاسبه زمان تخلیه مورد نیاز در شرایط اضطراری (طراحی عملکردی) فراهم آورد. از این داده‌ها می‌توان برای اطمینان از برقراری شرط ایمنی کلیدی  $RSET < ASET$  بهره برد.

### تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد و بخشی از طرح مصوب پژوهشی با کد اخلاق IR.SBMU. PHNS.REC.1403.018 می‌باشد. نویسندگان به دلیل حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید بهشتی کمال سپاس و تشکر را دارد. همچنین نویسندگان کمال تشکر را از مسئولین محترم بیمارستان و واحد بهداشت حرفه‌ای دارند که با فراهم کردن اطلاعات لازم و اجازه بازدید برای پژوهش، ما را در این تحقیق یاری کردند با توجه به استانداردهای اخلاقی، برخی از اطلاعات مربوط به بیمارستان تحت بررسی از جمله نام آن محرمانه نگه‌داشته می‌شود.

### REFERENCES

1. Ardalan A, Kandi Keleh M, Saberinia A, Khorasani-Zavareh D, Khankeh H, Miadfar J, et al. 2015 Estimation of Hospitals Safety from Disasters in I.R.Iran: The Results from the Assessment of 421 Hospitals. PLoS One. 2016;11(9):e0161542.

حاضر در راستای تاثیر خوب نصب اسپرینکلر در انبار همخوانی دارد؛ مطالعه مذکور که با هدف بررسی قابلیت سیستم‌های اسپرینکلر با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک آتش انجام شد و انواع جانمایی اسپرینکلر در انبار را بررسی و نصب اسپرینکلر در نزدیکی منبع اشتعال را یکی از راه‌های کنترل سرعت شعله و کاهش دما برای افزایش ایمنی حریق پیشنهاد کرد (۳۸).

### نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه مؤید آن است که طراحی ایمن بیمارستان‌ها، شامل تقسیم فضاهای بزرگ به بخش‌های کوچک‌تر، ایجاد دسترسی به راه‌های خروج اضطراری، نصب درب‌های ضد حریق و تجهیزات حفاظتی مانند منابع آب و فایرباکس، می‌تواند ایمنی را در سطح مطلوبی حفظ کند. با این حال، برای دستیابی به حداکثر ایمنی، نصب کامل تجهیزاتی مانند اسپرینکلرها ضروری است که با کنترل حریق در مرحله رشد و کاهش انتقال حرارت، موجب کاهش تولید دود می‌شوند.

توجه به این نکته الزامی است که ایمنی یک مفهوم نسبی و وابسته به عوامل انسانی است؛ بنابراین اجرای برنامه‌های مدون شامل تعمیرات دوره‌ای، آموزش‌های مناسب و اجرای برنامه‌های ایمنی حریق می‌توانند رفتارهای نایمن و نگرانی‌های مرتبط با حریق را به حداقل برسانند.

FRAME در این پژوهش به‌عنوان ابزاری مناسب برای تعیین سطح ریسک، شناسایی خطرات و ارائه راهکارهای کنترلی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بالاترین ریسک متوجه افراد است و برای افزایش ایمنی، اقداماتی مانند نصب خاموش‌کننده‌های پودری و گازی در تمام طبقات،

2. Tasnim News Agency. Gas Explosion at Medical Clinic in Northern Tehran Leaves 19 Dead [Internet]. Tehran: Tasnim News Agency; 2020 Jul 01 [cited 2024 Dec 27]. Available from: <https://www.tasnimnews.com/en/news/2020/07/01/2297279/gas-explosion-at-medical-clinic-in-northern-tehran-leaves-19-dead>

3. Tasnim News Agency. Hospital Fire Kills 9 in Iran's Northern City [Internet]. Tehran: Tasnim News Agency; 2024 Jun 18 [cited 2024 Dec 27]. Available from: <https://www.tasnimnews.com/en/news/2024/06/18/3106202/hospital-fire-kills-9-in-iran-s-northern-city>
4. Fallah-Aliabadi S, Abbasian P, Khajehaminian MR. Investigating Characteristics of Hospital Building Fires in Iran. *Health in Emergencies and Disasters Quarterly*. 2023;9(1):23-32.
5. Aslani AM, Habibi E. Evaluation of the Risk of Fire by the FRAME Method and Survey of the Effect of Crisis Management Team, on the Level of Fire Risk at a University Hospital During Year 2017. *Health Scope*. 2019;8(1):e68151.
6. Kurd H, Valipour F, Zaroushani V, Pourtaghi G, Malmir Z. Fire Pathology in a Military Hospital Using the FRAME Technique [Persian]. *Journal of Military Medicine*. 2022;23(5):424-34.
7. Habibi E, Aslani AM. Evaluation of fire risk by FRAME method and studying the effect of trained crisis management team of fire risk level in Hazrat Rasoul-e Akram hospital of Fereydunshahr in 2016 [Persian]. *Sci J Rescue & Relief*. 2017;9(1):46-55.
8. Omidvari F, Jahangiri M, Mehryar R, Alimohammadlou M, Kamalinia M. Fire Risk Assessment in Healthcare Settings: Application of FMEA Combined with Multi-Criteria Decision Making Methods. *Math Probl Eng*. 2020;2020:8913497.
9. Rahmani A, Salem M. Fire risk assessment in high-rise hospitals in accordance with NFPA 101. *J Revista Latinoamericana de Hipertension*. 2018;13(3):242-5.
10. Wu L, Guo S. Comparison and Analysis of Building Fire Risk Assessment Methods. 2018 3rd International Conference on System Reliability and Safety (ICRSRS); 23-25 Nov. 2018; Barcelona, Spain: IEEE; 2018. p. 381-5.
11. Wright DR. Use of the Fire Safety Evaluation System (FSES), National Fire Protection Association (NFPA) 101A, Guide on Alternative Approaches to Life Safety, 2013 Edition by Health Care Occupancies and Board and Care Occupancies. [Report]. Quincy, MA: National Fire Protection Association; 2022.
12. Hostikka S, Veikkanen E, Hakkarainen T, Kajolinna T, Kling T. Effect of sprinklers on the patient's survival probability in hospital room fires. *Fire Saf J*. 2021;120:103092.
13. Cheong H-i, Wu Z, Majumdar A, Yotto Ochieng W. One-Way Coupling of Fire and Egress Modeling for Realistic Evaluation of Evacuation Process. *Transp Res Rec*. 2021;2675(12):1244-59.
14. Zhang Y, Tingting Y, Huang W, Yu P, Chen G, Xu R, et al. Health impacts of wildfire smoke on children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. *Curr Environ Health Rep*. 2024;11(1):46-60.
15. Society of Fire Protection Engineers (SFPE). SFPE guide to human behavior in fire. New York: Springer; 2018.
16. Chow C, Han S, Han G, Hou G, Chow W. Assessing smoke toxicity of burning combustibles by four expressions for fractional effective dose. *Fire Mater*. 2020;44(6):804-13.
17. Pandey AK, Mishra MK. Application of CFAST in Warehouse Fire Simulation. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020;7(4):5462-5.
18. McGrattan KB, Peacock RD, Overholt KJ. Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications Supplement 1 [Report]. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission; 2016. Report No.: NUREG-1824.
19. Brohez S, Caravita I. Fire induced pressure in airhigh houses: Experiments and FDS validation. *Fire Saf J*. 2020;114:103008.
20. Peacock RD, Reneke PA, Forney GP. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7). Volume 2: User's Guide [Report]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2017. Report No.: NIST TN 1889v2.
21. Yun H-S, Hwang C-H, Choi J-H. Study on the Setting Method of CFAST to Predict Heat and Smoke Spread. *Fire Sci Eng*. 2023;37(1):27-36.
22. Williamson J, Beyler C, Floyd J. Validation of numerical simulations of compartment fires with forced or natural ventilation using the fire and smoke simulator (FSSIM), CFAST and FDS. In: *Fire Safety Science - Proceedings of the Tenth International Symposium*. 2011. p. 1277-88.
23. Jang H-Y, Hwang C-H. Evaluation of Available Safety Egress Time (ASET) in Performance-Based Design (PBD) Using CFAST. *Fire*. 2024;7(4):108.
24. Wang L, Li W, Feng W, Yang R. Fire risk assessment for building operation and maintenance based on BIM technology. *Build Environ*. 2021;205:108188.
25. Rabiei H, Zare A, Ahmadian Taheri S, Ebrahimi N,

- Mazaheri Tehrani A, Malakoutikhah M. Fire risk assessment of Kashan's commercial and shopping centers using fire risk assessment method for engineering (FRAME). *Fire Mater.* 2024;48(5):536-41.
26. Ivanov ML, Chow W-K. Experimental and numerical evacuation study in tall office building. *J Build Eng.* 2023;76:107103.
27. Cao S, Fu L, Song W. Exit selection and pedestrian movement in a room with two exits under fire emergency. *Appl Math Comput.* 2018;332:136-47.
28. Peng Y, Yang L, Ju X, Liao B, Ye K, Li L, et al. A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with LiFePO<sub>4</sub> cathode. *J Hazard Mater.* 2020;381:120916.
29. Peacock RD, McGrattan KB, Forney GP, Reneke PA. CFAST-Consolidated Fire and Smoke Transport (Version 7) Volume 1: Technical Reference Guide [Report]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2015.
30. Khakkar S, Ranjbarian M, Khodakarim S, Pouyakian M. Evaluation of fire risk in commercial complexes of district 12 of Tehran and its relationship with their structural and usage characteristics [Persian]. *J Health Saf Work.* 2020;10(3):273-89.
31. Salari S, Soltani A, Nadim Qaziany M, Karimi A. Determining and Analyzing Factors Affecting Fire Safety Based on Fire Risk Assessment Method for Engineering and providing Control Solutions: A Case Study in a Hospital [Persian]. *J Health Saf Work.* 2024;14(3):647-60.
32. Robson D, Spaducci G, McNeill A, Yates M, Wood M, Richardson S. Fire Incidents in a Mental Health Setting: Effects of Implementing Smokefree Polices and Permitting the Use of Different Types of E-Cigarettes. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(23):8951.
33. Antonopoulos N, Haslam I, Tumini V, Hanley-Jones S. Chapter 12: The construction and labelling of Australian cigarettes. In: Greenhalgh EM, Scollo MM, Winstanley MH, editors. *Tobacco in Australia: Facts and issues.* Melbourne: Cancer Council Victoria; 2023.
34. Ghassempour N, Tannous WK, Agho KE, Avsar G, Harvey LA. The impact of reduced fire risk cigarettes regulation on residential fire incidents, mortality and health service utilisation in New South Wales, Australia. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(19):12481.
35. Mahdinia M, Yarahmadi R, Jafari MJ, Koohpaei AR. Presentation of a software method for use of Risk assessment in Building Fire Safety Measure Optimization [Persian]. *Iran Occupational Health.* 2012;9(1):9-16.
36. Zhang C. Analysis of fire safety system for storage enterprises of dangerous chemicals. *Procedia Eng.* 2018;211:986-95.
37. World Health Organization (WHO). *Hospital Safety Index: Guide for Evaluators [Report]*. 2nd ed. Geneva: World Health Organization; 2017. 173 p.
38. Nonsawat P, Patvichaichod S. Performance analysis of automatic sprinkler systems in warehouses using fire dynamic simulation. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Material Engineering and Advanced Manufacturing Technology*; 2020; Shanghai, China. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing Ltd; 2020. p. 012005.