

Simulation of Emergency Evacuation during Fire in one of the Hospitals in Shiraz City, Iran

Fatemeh Omidvari¹, Reza Mehryar², Mehdi Jahangiri³, Mojtaba Kamalinia⁴,
Meysam Sotoudeh⁵, Ghazal Nikaeen¹, Majid Ranjbar¹

Original Article

Abstract

Background: Fire is one of the most perilous phenomena, resulting in human and financial losses. Hospitals and medical centers are among the places where a large number of fires occur every year, making the timely evacuation of patients, individuals with disabilities, and staff crucial. The aim of this study was to simulate and analyze the emergency evacuation of individuals in a hospital in Shiraz City, Iran.

Methods: This study was performed in the treatment building of a hospital that lacked emergency exits. Evacuation simulations were performed in both fire and non-fire modes to investigate the impact of smoke and combustion products on the evacuation time of individuals. Fire Dynamics Simulator (FDS)+Evac and PyroSim software were applied to simulate fire and evacuation.

Findings: The results of the emergency evacuation simulation showed that under normal conditions (without a fire), the average evacuation time was 815 seconds, during which 295 individuals successfully evacuated. In contrast, during the fire scenario, when the ventilation system was either operational or non-operational, 10 and 32 individuals, respectively, were unable to exit the building after 900 seconds.

Conclusion: The results of this study demonstrate the crucial role of ventilation systems in preventing smoke from reaching the floors, by making emergency exit doors available.

Keywords: Simulation; Fires; Emergency evacuation; Medical center

Citation: Omidvari F, Mehryar R, Jahangiri M, Kamalinia M, Sotoudeh M, Nikaeen G, et al. **Simulation of Emergency Evacuation during Fire in one of the Hospitals in Shiraz City, Iran.** J Health Syst Res 2025; 20(4): 390-400.

1- Student Research Committee AND Department of Occupational Health and Safety, School of Health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanic, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

3- Professor, Department of Occupational Health and Safety, School of Health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

4- Assistant Professor, Department of Occupational Health and Safety, School of Health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

5- Department of Mechanic, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Corresponding Author: Mehdi Jahangiri: Professor, Department of Occupational Health and Safety, School of Health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran; Email: Jahangiri_m@sums.ac.ir

شبیه‌سازی تخلیه اضطراری در زمان حریق در یکی از بیمارستان‌های شیراز

فاطمه امیدواری^۱، رضا مهریار^۲، مهدی جهانگیری^۳، کمالی‌نیا^۴، میثم ستوده^۵، غزل نیک‌آیین^۶، مجید رنجبر^۱

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: آتش‌سوزی یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌هایی است که خسارات جانی و مالی عمده‌ای را به وجود می‌آورد. بیمارستان‌ها و مراکز درمانی، از جمله مکان‌هایی هستند که سالانه تعداد زیادی حریق در آن‌ها اتفاق می‌افتد و به همین دلیل، تخلیه بیماران، افراد ناتوان و کارکنان از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از انجام پژوهش حاضر، شبیه‌سازی و تخلیه اضطراری افراد در زمان آتش‌سوزی در یکی از بیمارستان‌های شیراز بود.

روش‌ها: این مطالعه در ساختمان درمانی یک بیمارستان بدون خروجی اضطراری صورت گرفت. شبیه‌سازی تخلیه در دو حالت حریق و بدون حریق جهت بررسی تأثیر دود و محصولات احتراقی بر روی زمان تخلیه افراد انجام شد. به منظور شبیه‌سازی حریق و تخلیه، از نرم‌افزار PyroSim+Evac (FDS) استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری نشان داد که میانگین زمان تخلیه در شرایط عادی (بدون حریق) ۸۱۵ ثانیه بود و در این زمان تمام ۲۹۵ نفر تخلیه شدند. در زمان حریق هنگامی که سیستم‌های تهویه روشن یا خاموش بودند، به ترتیب ۱۰ و ۳۲ نفر از ۲۹۵ نفر قادر به تخلیه ساختمان در مدت زمان ۹۰۰ ثانیه نبودند.

نتیجه‌گیری: نتایج به دست آمده حاکی از نقش مهم سیستم‌های تهویه در جلوگیری از رسیدن دود به طبقات پایین‌تر از طریق در دسترس قرار دادن درب‌های خروج اضطراری بود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی؛ حریق‌ها؛ تخلیه اضطراری؛ مراکز درمانی

ارجاع: امیدواری فاطمه، مهریار رضا، جهانگیری مهدی، کمالی‌نیا میثم، ستوده میثم، نیک‌آیین غزل، رنجبر مجید. شبیه‌سازی تخلیه اضطراری در زمان حریق در یکی از بیمارستان‌های شیراز. مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۴۰۳؛ ۲۰ (۴): ۳۹۰-۴۰۰

تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۷/۵

برخوردار است (۶).

مطالعات زیادی جهت شبیه‌سازی تخلیه اضطراری افراد در ساختمان‌های درمانی صورت گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق راهوتی و همکاران نشان داد که نوع بیماران و توانایی آن‌ها در حرکت بر روی تخلیه اثر می‌گذارد. بنابراین، تعداد افراد بیشتری به کمک احتیاج دارند و زمان تخلیه افزایش می‌یابد (۷). Ze-min و همکاران در پژوهش خود که در اتاق برق یک ساختمان سه طبقه صورت گرفت، از نرم‌افزار PyroSim+Evac (FDS) استفاده کردند. نتایج نشان داد که عرض خروجی‌ها و جانمایی آن‌ها از عوامل مهم در تخلیه مؤثر از بیمارستان می‌باشد (۸). در مطالعه Wei و همکاران که در یک ساختمان دو طبقه انجام شد، از نرم‌افزار FDS+Evac استفاده شد و نتایج نشان داد وقتی افراد به صورت پیوسته حرکت می‌کنند، اثر آشنایی با درب‌های خروجی کمتر می‌باشد؛ چرا که افراد تمایل دارند از رفتار یکدیگر تقلید و پشت سر هم حرکت کنند. در صورتی که جریان حرکت افراد متناوب باشد، آشنایی با درب‌های خروجی اثر زیادی در حرکت افراد دارد؛ به خصوص زمانی که سرعت حرکت افراد کم باشد (۹). در تحقیق Mikulik و همکاران از نرم‌افزار

مقدمه

آتش‌سوزی یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌هایی است که خسارات جانی و مالی عمده‌ای را به وجود می‌آورد (۱). در کشور ما سالانه حدود ۱۴۰۰ نفر در اثر آتش‌سوزی کشته و بیش از ۴۵۰۰ نفر به سختی مجروح می‌شوند که موجب وارد شدن نزدیک به ۴۵۰ میلیارد ریال خسارت بر جامعه می‌گردد (۲). از جمله مکان‌هایی که سالانه تعداد زیادی حریق در آن‌ها اتفاق می‌افتد، بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی-درمانی می‌باشد (۳). در این مراکز به علت وجود منابع و فرایندهای اشتعال‌زا و نیز حضور افراد ناتوان و بیمار خطر بالایی از نظر حریق وجود دارد. بنابراین، در کنار اقداماتی که برای پیشگیری از رخداد حریق ایجاد می‌شود، تمهیدات مربوط به کاهش شدت پیامدهای ناشی از حریق از جمله تخلیه اضطراری افراد حایز اهمیت است (۴، ۵). در بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی-درمانی به دلیل امکان تداخل و توقف فعالیت‌های درمانی، امکان برگزاری مانور برای تخلیه افراد و شناسایی عوامل مؤثر بر تخلیه به آسانی امکان‌پذیر نیست. در این شرایط، شبیه‌سازی تخلیه اضطراری افراد با هدف شناسایی نقاط ضعف و طراحی و جانمایی خروجی‌ها و... از اهمیت زیادی

۱- کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات دانشجویی و گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و هوا فضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۵- کارشناس ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و هوا فضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

نویسنده مسؤول: مهدی جهانگیری؛ استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

Email: Jahangiri_m@sums.ac.ir

تمامی نقاط کشور و اهمیت پاسخ سریع به این وقایع و آمادگی واکنش در شرایط اضطراری و از آنجایی که حفظ حیات ساکنان مراکز درمانی و عدم تداخل و وقفه در فعالیت آن‌ها به ویژه در مواقع بحرانی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی تخلیه اضطراری افراد در یکی از بیمارستان‌های شیراز و بررسی شاخص‌های مؤثر بر کاهش زمان تخلیه در زمان خروج افراد به خصوص در زمان حریق که شرایط خروج افراد به دلیل دود و محصولات احتراقی بسیار مهم است، انجام شد.

روش‌ها

این مطالعه در ساختمان یکی از بیمارستان‌های شهر شیراز در تیر ماه سال ۱۳۹۸ صورت گرفت. ساختمان مذکور دارای ۴ طبقه و ۱۷ بخش بود که آزمایشگاه و تأسیسات در طبقه زیرزمین، رادیولوژی، صندوق و پذیرش، اورژانس، اتاق سرور، OB1 (Obstetrics)، NICU2 Neonatal intensive care unit، OB2، Non-stress test (NST)، دفتر سوپروایزر و خوابگاه در طبقه همکف، NICU1، زایشگاه و اتاق عمل در طبقه اول و روماتولوژی و اعصاب و روان در طبقه دوم قرار داشت. این ساختمان دارای دو خروجی اصلی و خروجی‌های اضطراری آن در هنگام انجام تحقیق مسدود بود. در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی تخلیه افراد هم در حالت حریق و هم در حالت بدون حریق صورت گرفت تا اثر دود و محصولات احتراقی بر زمان خروج افراد مورد بررسی قرار گیرد. جهت پیاده‌سازی نقشه بیمارستان از نرم‌افزار PyroSim نسخه ۲۰۱۹ که یک رابط گرافیکی جهت ترسیم فضای مورد نظر است، استفاده گردید. همچنین، جهت شبیه‌سازی حریق و تخلیه از نسخه ۶٫۵ نرم‌افزار FDS+Evac (۱۶) استفاده شد.

شبیه‌سازی تخلیه اضطراری افراد در حالت بدون حریق EE-WF یا Emergency evacuation-without fire: جهت شبیه‌سازی تخلیه اضطراری از بیمارستان، ابتدا با توجه به اطلاعات کسب شده از مشاهده میدانی و پرسش از مسئولان بیمارستان، تعداد نفرات اعم از بیماران و کارکنان در هر بخش و اتاق به تفکیک در نرم‌افزار تعریف شد. به طور کلی، تعداد نفرات حاضر جهت تخلیه ۲۹۵ نفر بود. سناریوی EE-WF در شب و در حالتی که تعداد بیماران و همراهان در حداکثر حالت خود و تعداد کارمندان مطابق برنامه شیفت‌بندی بیمارستان بود، تعریف گردید. بدین منظور، سرعت حرکت و زمان تخلیه افراد با توجه به شرایط موجود در بیمارستان و مطالعات پیشین (۲۴، ۷)، مطابق جدول ۱ در بیمارستان تعیین گردید. سرعت حرکت افراد در راه‌پله‌های طبقه زیرزمین، اول و دوم نیز به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۲۸، ۰/۳۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

سناریوی اول: در این سناریو، شبیه‌سازی در حالت عادی فعالیت بیمارستان و حداکثر ظرفیت از نظر پذیرش بیمار و حضور همراهان انجام شد. در این حالت، در مجموع ۲۹۵ نفر در ساختمان درمانی حضور داشتند. سرعت حرکت و زمان تخلیه افراد مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد.

سناریوی دوم: در این سناریو، شبیه‌سازی با فرض خالی ماندن تخت‌های اضافی موجود در اتاق‌های بستری انجام شد تا تأثیر تعداد نفرات در خروج افراد بررسی گردد. در این حالت، در مجموع ۲۳۷ نفر در ساختمان درمانی حضور داشتند (جدول ۲).

سناریوی سوم: در این حالت، شبیه‌سازی بدون وجود تخت‌های اضافه موجود در برخی اتاق‌های بستری انجام شد تا تأثیر موانع بر روند خروج افراد بررسی شود.

FlexSim Healthcare جهت شبیه‌سازی استفاده گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که به کارگیری اقداماتی جهت ارتقای امکانات بیمارستان جهت کاهش زمان تخلیه به نصف مؤثر می‌باشد. این اقدامات شامل تغییر دستورالعمل‌های سازمان مانند تغییر مکان بیمارانی که نیازمند کمک در زمان تخلیه می‌باشند در طبقه اول ساختمان، دادن مسئولیت‌های جدید به کارکنان، آموزش به کارکنان حداقل دو بار در سال و برداشتن موانع از سرراه تخلیه افراد بود (۱۰). بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تخلیه اضطراری افراد در خارج از کشور بوده است و مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی حریق در ایران، با هدف تشخیص زمان تخلیه افراد، نحوه رفتار افراد در زمان خروج، حرکت افراد و شبیه‌سازی در مکان‌هایی غیر از بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی- درمانی می‌باشد (۱۱-۱۴).

جهت شبیه‌سازی حریق و تخلیه افراد از نرم‌افزارهای مختلفی از جمله Exodus، Simulex، STEP، FDS+Evac، Pathfinder، VISSIM و... استفاده می‌گردد (۱۵). یکی از این نرم‌افزارها، FDS+Evac (۱۶) می‌باشد که ویرایش اول آن در سال ۲۰۰۰ توسط مرکز تحقیقات فنی VTT فنلاند توسعه یافت.

نرم‌افزار Pathfinder: این نرم‌افزار به منظور شبیه‌سازی تخلیه در محیط داخل و به جهت قابلیت‌های آن در شبیه‌سازی فرایند تخلیه بدون نیاز به هزینه بالای راه‌اندازی اولیه به طور مؤثرتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. تمرکز محاسبات بر مکان‌هایی است که جهت خروج به کار می‌رود و زمان مورد نیاز برای افراد حاضر در ساختمان برای رسیدن به این نقطه می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار و پس از تهیه مدل سه بعدی مکان مورد نظر، ابتدا موقعیت قرارگیری افراد و کارکنان در قسمتی از دل مشخص می‌گردد و سپس با استفاده از مسیرهای تعریف شده، خروج افراد از موقعیت مورد نظر شبیه‌سازی می‌شود (۷).

نرم‌افزار FDS+Eva: این نرم‌افزار ترکیبی از شبیه‌ساز دینامیک آتش و مدل تخلیه است که اجازه می‌دهد به طور هم‌زمان آتش و روند تخلیه در تراکم جمعیت بالا و پایین و با در نظر گرفتن تقابل بین افراد و آتش شبیه‌سازی شود. همچنین، این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی حریق و تخلیه هر کدام به تنهایی نیز می‌باشد. در این نرم‌افزار افراد با جهت حرکت یک میدان برداری، به سمت درهای خروج حرکت می‌کنند که این میدان برداری از حل تقریبی جریان پتانسیل برای مسأله‌های دو بعدی با سیال تراکم‌ناپذیر و با توجه به شرایط مرزی ارایه می‌گردد. در این روش، حل تمام دیوارهای لحاظ شده به صورت یک مانع ساکن و درهای خروجی مانند یک فن عمل می‌کند که سیال را به خارج از میدان هدایت می‌کند. این نرم‌افزار با هر فرد در حال تخلیه مانند یک نهاد تنها و منحصر به فرد رفتار می‌نماید که می‌تواند خصوصیات شخصی و استراتژی فرار مخصوص به خود را داشته باشد. روش مورد استفاده در این نرم‌افزار، مدل عامل مبنا (Agent based model) است و جهت بررسی حرکت افراد در الگوریتم حرکتی هر فرد از مدل نیروی اجتماعی استفاده می‌گردد و هر فرد در روند تخلیه، نیروها و مومنتوم‌های تماسی، نیروهای روحی و روانی و نیروهای محرکی همچون آتش را تجربه می‌کند. مطالعات زیادی با استفاده از این نرم‌افزار انجام شده است که از آن جمله می‌توان راهوتی و همکاران (۷)، De-Ching و همکاران (۱۷)، شیائوگ Wei و همکاران (۹)، Khan و همکاران (۱۸)، Glasa و Valasek (۱۹)، Kong و همکاران (۲۰)، Hostikka و همکاران (۲۱)، Lei و همکاران (۲۳، ۲۲) اشاره کرد.

با توجه به وقوع حوادث و شرایط بحرانی مانند زلزله، حریق، سیل و... در

جدول ۱. مقادیر سرعت حرکت افراد و زمان تخلیه جهت شبیه سازی برگرفته از تحقیقات قبلی (۷، ۲۴)

گروه	سرعت حرکت (متر بر ثانیه)	زمان تخلیه (ثانیه)
انتظامات	$1/20 \pm 0/30$	۴۵-۶۵
تأسیسات		۴۵-۶۵
آزمایشگاه		۸۵-۹۵
رادیولوژی	$1/20 \pm 0/30$	۴۵-۶۵
کارکنان بیمار		۴۵-۶۵
همراه بیمار		۴۵-۶۵
NICU	$0/8-0/6$	*۴۵-۶۵ **۱۱۵-۱۲۵
نوزادان		۴۵-۶۵
کارکنان		۱۱۵-۱۲۵
همراه نوزاد		۴۵-۶۵
OB	$0/4-0/6$	۱۱۵-۱۲۵
بیماران		۴۵-۶۵
همراه بیمار	$0/5-0/9$	۱۱۵-۱۲۵
کارکنان	$0/4-0/6$	۱۱۵-۱۲۵
بخش روان	$0/8-1/0$	۱۱۵-۱۲۵
بیمار آقا	مقدار پیش فرض آقایان	۱۱۵-۱۲۵
بیمار خانم روماتولوژی	مقدار پیش فرض خانمها	۱۱۵-۱۲۵
کارکنان	$1-0/8$	۱۱۵-۱۲۵

NICU: Neonatal intensive care unit; OB: Obstetrics

* طبقه پایین، ** طبقه بالا

نحوه انتشار دود و میزان Fractional effective dose (FED) بود.

جدول ۲. تعداد نفرات موجود در طبقات مختلف ساختمان

در دو سناریوی مورد بررسی

طبقه ساختمان	تعداد نفرات در سناریوی اول	تعداد نفرات در سناریوی دوم
زیرزمین	۵	۵
همکف	۹۶	۸۲
اول	۱۳۳	۱۰۶
دوم	۶۱	۴۴
مجموع	۲۹۵	۲۳۷

یافته ها

پس از تعریف هندسه ساختمان مورد نظر در نرم افزار PyroSim، وضعیت خروج افراد بدون در نظر گرفتن حریق در دو بخش مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱ طبقات مختلف ساختمان همراه با اسامی بخش ها در نرم افزار PyroSim را نشان می دهد.

نتایج شبیه سازی تخلیه اضطراری افراد در حالت بدون حریق: نتایج شبیه سازی تخلیه اضطراری در بیمارستان مورد نظر در چهار سناریو مورد بررسی در حالت بدون حریق در جدول ۳ ارائه شده است.

در شکل ۲ تجمع افراد در طبقه اول در زمان خروج افراد نشان داده شده است. **نتایج شبیه سازی تخلیه اضطراری افراد در زمان حریق با سامانه تهویه:** پس از تعریف فضای کلی بیمارستان در نرم افزار FDS+Evac، شبیه سازی تخلیه اضطراری افراد در زمان حریق و با در نظر گرفتن سامانه تهویه به مدت ۹۰۰ ثانیه صورت گرفت.

بر اساس شکل ۳، حریق از اتاق تأسیسات برق در کنار راهپله طبقه همکف شروع شد و در ثانیه ۲۰ دود شروع به بیرون آمدن از اتاق می کند. از آن جایی که دود و محصولات احتراقی سبک می باشد، به سمت سقف حرکت می کند. با گذشت زمان، دود وارد راهپله ها می شود، اما به دلیل این که سامانه تهویه فعال می باشد، با ایجاد فشار مثبت در طبقه اول، دود وارد فضای طبقه اول نمی گردد، اما در این زمان با توجه به فشار هوای ناشی از سامانه تهویه، دود وارد طبقه زیرزمین می شود.

سناریوی چهارم: در این حالت، تخلیه اضطراری در شرایط عادی یعنی بدون وجود حریق (۲۹۵ نفر) و با فرض تعبیه یک خروجی اضطراری (علاوه بر خروجی اصلی) شبیه سازی گردید.

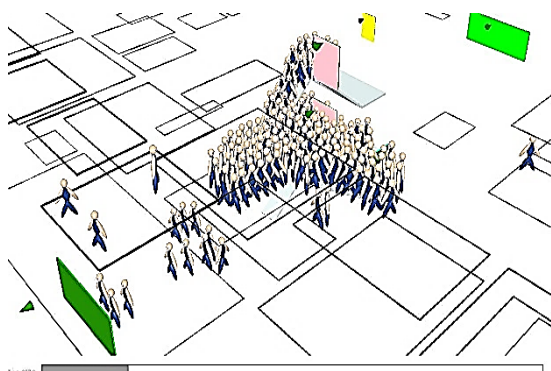
شبیه سازی تخلیه اضطراری افراد در حالت حریق: در پژوهش حاضر، اتاق تأسیسات برق طبقه همکف جهت شبیه سازی حریق انتخاب گردید. بدین منظور، چنین فرض شد که با یک جرقه در تابلو برق اصلی ساختمان، حریق شروع می شود. میزان بار حریق در این سناریو، ۱ مگاوات و مدت زمان شبیه سازی تخلیه اضطراری افراد، ۱۵ دقیقه (۹۰۰ ثانیه) در نظر گرفته شد. با توجه به تأثیر مهم تهویه در جلوگیری از ورود و یا تجمع دود و محصولات احتراقی در مناطق حساسی مانند اتاق های عمل، ICU و...، تخلیه اضطراری در زمان حریق یک مرتبه با در نظر گرفتن سامانه های تهویه و بار دیگر بدون در نظر گرفتن سامانه های تهویه، شبیه سازی گردید. هدف از این کار، بررسی اثر تهویه در تعداد افراد خارج شده،



شکل ۱. موقعیت بخش‌ها و طبقات مختلف ساختمان ترسیم شده در نرم‌افزار PyroSim

قسمت b منطقه قرمز رنگ مربوط به اتاق تأسیسات و منطقه سبز رنگ مربوط به موقعیت راه پله می‌باشد.

رادیولوژی فاقد سامانه تهویه بود، انتشار دود در این ناحیه نسبت به بخش OB که دارای سامانه تهویه بود، بیشتر است. قسمت رادیولوژی به دلیل انتشار بیشتر محصولات احتراقی، تیره‌تر از قسمت OB می‌باشد.



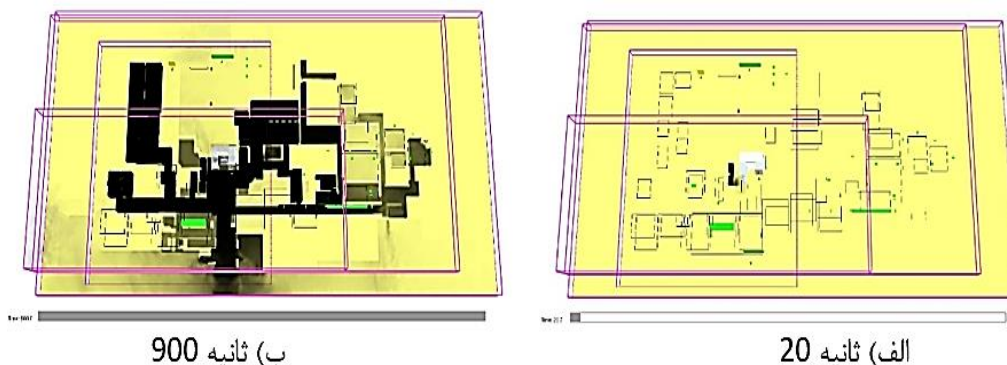
شکل ۲. شبیه‌سازی تجمع افراد در خروجی طبقه اول با استفاده از نرم‌افزار (FDS+Evac) Fire Dynamics Simulator+Evac

شکل ۴ نشان دهنده قابلیت دید افراد در زمان شبیه‌سازی در ارتفاع ۴/۶ متری از سطح زمین می‌باشد. قابلیت دید افراد از صفر تا ۳۰ متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی زمان تخلیه افراد در حالت بدون حریق در سناریوهای مختلف بیمارستان مورد بررسی

سناریو	تعداد نفرات	اجرا	زمان تخلیه (ثانیه)	میانگین زمان تخلیه (ثانیه)
۱	۲۹۵	۱	۸۱۲/۸	۸۱۵/۰
		۲	۸۱۱/۴	
		۳	۸۱۹/۸	
۲	۲۳۷	۱	۷۱۳/۰	۷۱۰/۲
		۲	۷۰۴/۶	
		۳	۷۱۳/۰	
۳	۲۳۷	۱	۶۸۰/۶	۶۷۹/۴
		۲	۶۷۵/۸	
		۳	۶۸۱/۸	
۴	۲۹۵	۱	۳۲۷/۴	۳۲۵/۳
		۲	۳۲۷/۸	
		۳	۳۲۰/۶	

در ثانیه ۹۰۰ دود کل طبقه همکف را فراگرفته و ضخامت لایه آن در مجاورت سقف به شدت افزایش پیدا کرده است. به دلیل این که قسمت



شکل ۳. شبیه‌سازی نحوه انتشار دود در ساختمان بیمارستان مورد بررسی در زمان‌های مختلف با سامانه تهویه

در ۲۰ ثانیه، تنها درون اتاق تأسیسات برق که حریق رخ داده است، قابلیت دید، صفر و در بقیه نقاط به دلیل این که هنوز دود به طور کامل منتشر نشده است، ۳۰ متر می‌باشد. در ثانیه ۹۰۰ تقریباً در کل طبقه همکف به جزء بخش OB، قابلیت دید به صفر کاهش می‌یابد و در برخی از بخش‌های OB این مقدار در نقاط مختلف متفاوت است و به ۳۰ متر نیز می‌رسد.

مطابق شکل ۵، قابلیت دید افراد در نقاط مختلف با گذشت زمان به دلیل وجود دود و محصولات احتراقی کاهش می‌یابد. در بخش OB به دلیل عملکرد سامانه تهویه در راهرو و دیر رسیدن دود و محصولات احتراقی به آن مکان، پس از گذشت ۹۰۰ ثانیه قابلیت دید به ۲۳ متر کاهش یافته است. با گذشت زمان، در سایر نقاط طبقه همکف از جمله خوابگاه، رادیولوژی، اورژانس، راه‌پله و سالن، قابلیت دید افراد به شدت کاهش پیدا می‌کند و در نهایت، به کمتر از ۵ متر می‌رسد.

در تحقیقات Purser (۲۵) و McAllister و Purser (۲۶) مشخص گردید که هرگاه میزان FED بین صفر تا ۰/۲ باشد، افراد دچار آسیب جدی نمی‌شوند. همچنین، وقتی میزان FED به ۰/۳ می‌رسد، افراد با مشکلات زیادی روبه‌رو می‌شوند و سرعت حرکت آن‌ها به میزان زیادی کاهش می‌یابد و افراد دچار آسیب‌های جدی می‌شوند. سپس آن‌ها مقدار بحرانی یعنی میزان FED معادل

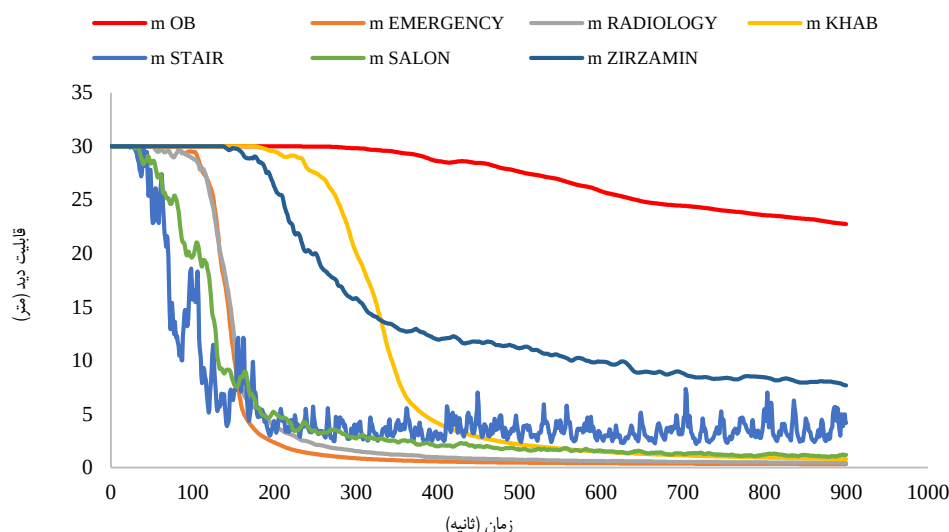
۰/۳ برای افراد در نظر گرفتند؛ با این مفهوم که اگر در شبیه‌سازی‌های انجام شده افراد به این میزان از FED رسیدند، دچار آسیب‌های جدی می‌شوند (۲۶، ۲۵). در سناریوی حاضر، تعداد افراد باقی‌مانده در ساختمان پس از ۹۰۰ ثانیه شبیه‌سازی، ۱۰ نفر بودند. شکل ۶ بیانگر تغییرات شاخص FED در طول زمان و وضعیت سلامت افراد باقی‌مانده در ساختمان است.

نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری افراد در زمان حریق بدون سامانه تهویه:

شبیه‌سازی تخلیه اضطراری افراد در زمان حریق و بدون سامانه تهویه به مدت ۹۰۰ ثانیه صورت گرفت. شکل ۷ نحوه انتشار دود در ساختمان از لحظه شروع حریق را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. در ثانیه ۲۰، دود کل اتاق تأسیسات برق را در بر گرفته است و شروع به انتشار به سمت بیرون می‌نماید. در ثانیه ۴۰، به دلیل این که هنوز لحظات ابتدایی شروع حریق می‌باشد، دود در ارتفاعات بالاتر قرار دارد و کل سالن مقابل اتاق تأسیسات را در بر گرفته است. در ثانیه ۹۰۰، کل طبقات از دود پر شده و ضخامت لایه دود به شدت افزایش پیدا کرده است. به دلیل این که دود و محصولات احتراقی سبک می‌باشد و تمایل به حرکت به سمت بالا و طبقات بالاتر را دارد و از آنجایی که سامانه‌های تهویه نیز غیر فعال است، دود تا ثانیه ۹۰۰ به طبقه زیرزمین نفوذ نکرده، اما انتشار آن در سایر نقاط به شدت افزایش پیدا کرده است.



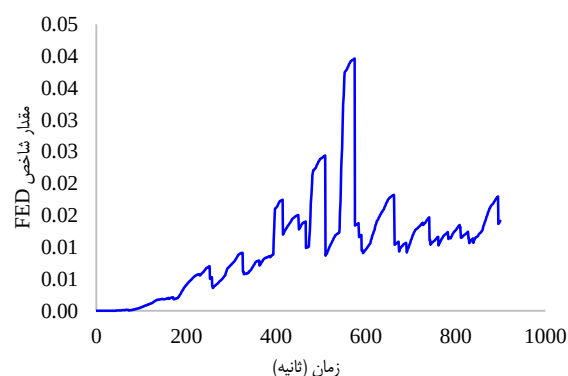
شکل ۴. قابلیت دید افراد در ارتفاع ۴/۶ متری در زمان‌های مختلف بر حسب متر در طبقه همکف ساختمان بیمارستان مورد بررسی با سامانه تهویه



شکل ۵. قابلیت دید افراد بر حسب زمان در نقاط مختلف طبقه همکف ساختمان بیمارستان مورد بررسی سامانه تهویه

شکل ۸ بیان‌کننده قابلیت دید افراد در زمان شبیه‌سازی در طبقات مختلف ساختمان می‌باشد که در ارتفاعی برابر با ۱/۶ متر از کف هر طبقه مورد بررسی قرار گرفت. در ثانیه ۲۰ تنها در اتاق تأسیسات برق در طبقه همکف که حریق در آن اتفاق افتاده است قابلیت دید افراد صفر می‌باشد و در سایر نقاط ۳۰ متر است. در ثانیه ۹۰۰، در کل طبقه همکف قابلیت دید صفر می‌باشد به جزء ۲ تا از اتاق‌های بخش OB به دلیل پیچیدگی مسیر و دیر رسیدن محصولات احتراقی به آن ناحیه، قابلیت دید افراد ۹ متر می‌باشد. در این زمان، حداقل قابلیت دید در اتاق عمل طبقه اول ۷ متر، در بخش نوزادان ۱۰ متر و در بخش زنان و زایمان و OB به ۴ متر می‌رسد. در طبقه دوم در بخش روماتولوژی، حداقل این میزان ۲ متر و در برخی از بخش‌های اعصاب و روان به ۱۰ متر نیز می‌رسد.

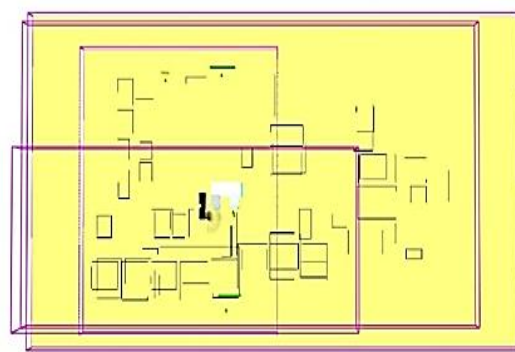
شکل ۹ نشانگر قابلیت دید افراد در نقاط مختلف در طبقه همکف ساختمان می‌باشد. مطابق نمودار، قابلیت دید افراد در زمان حریق با مرور زمان به شدت کاهش یافت و در نهایت، در زمان ۹۰۰ ثانیه قابلیت دید به کمتر از ۵ متر رسید.



شکل ۶. تغییرات شاخص Fractional effective dose (FED) در طول زمان در ساختمان مورد بررسی با سامانه تهویه

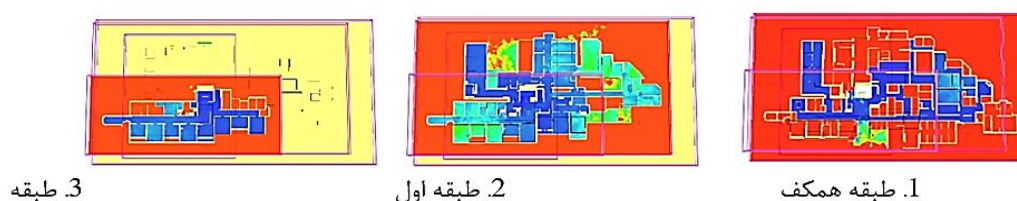
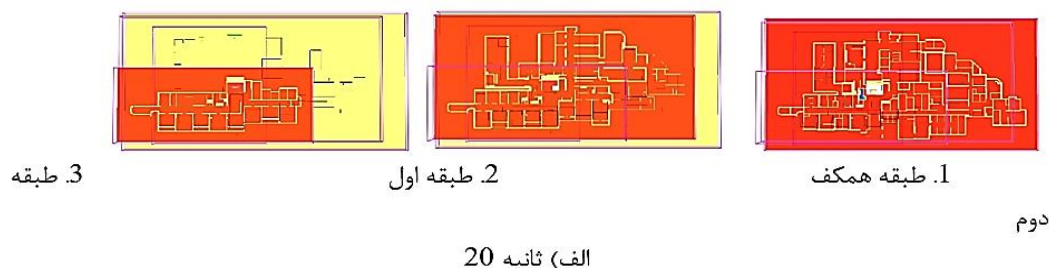


ج) ثانیه ۹۰۰



الف) ثانیه ۲۰

شکل ۷. نحوه انتشار دود در ساختمان مورد بررسی در زمان‌های مختلف بدون سامانه تهویه



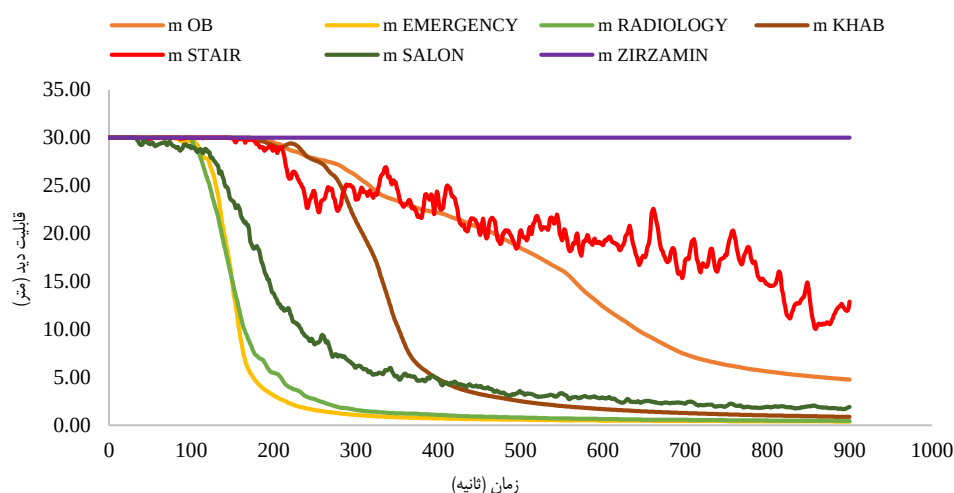
شکل ۸. قابلیت دید افراد در زمان‌های مختلف بدون سامانه تهویه

در طول ۹۰۰ ثانیه شبیه‌سازی گردید. با انجام شبیه‌سازی به مدت ۹۰۰ ثانیه، از ۲۹۵ نفری که در ساختمان حضور داشتند، ۳۲ نفر باقی ماندند که با نتایج به دست آمده از میزان FED، مشاهده می‌شود که تمامی ۳۲ نفر در ساختمان زنده می‌مانند.

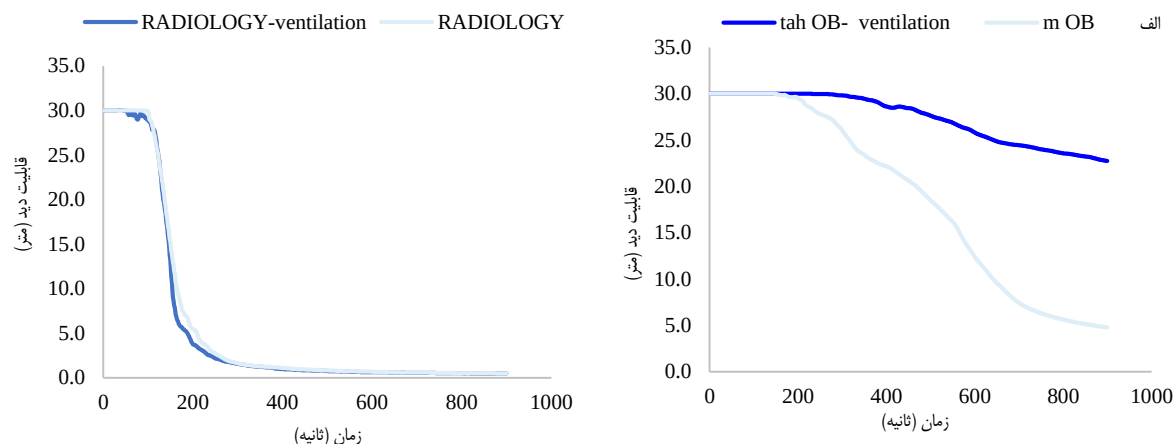
در شکل ۱۳ تغییرات شاخص FED در طول زمان شبیه‌سازی به صورت نوار رنگی در کنار هر شکل نشان داده شده است. بر این اساس، در حالتی که حریق بدون سامانه تهویه در محیط باشد، حداکثر میزان این شاخص ۰/۰۴ است که باعث ایجاد آسیب در افراد نمی‌گردد. در قسمت الف به دلیل این که دود به طبقات بالا نیز نفوذ می‌کند، تغییرات FED در این افراد به خوبی مشاهده می‌شود. در قسمت ب نیز میزان FED در فردی که در قسمت اورژانس طبقه همکف قرار گرفته و هنوز خارج نشده است، حداکثر میزان خود (۰/۰۴) و به رنگ قرمز می‌باشد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب بیانگر مقایسه قابلیت دود طبقه همکف در بخش‌های OB و رادیولوژی می‌باشد. بر این اساس، قابلیت دید در بخش OB در زمان فعال بودن سیستم تهویه در طول شبیه‌سازی عدد بالاتری بود. در بخش رادیولوژی قابلیت دید در دو حالت فعال بودن سیستم‌های تهویه و غیر فعال بودن آن تفاوتی نداشت؛ به دلیل این که در بخش رادیولوژی سیستم تهویه وجود ندارد و فعال بودن یا غیر فعال بودن سیستم تهویه طبقه همکف در پخش شدن دود و محصولات احتراقی در این بخش اثری ندارد.

در سناریوی شبیه‌سازی تخلیه افراد در زمان حریق بدون سامانه تهویه، تعداد افراد باقی‌مانده در ساختمان پس از ۹۰۰ ثانیه شبیه‌سازی ۳۲ نفر بود. شکل ۱۲ نشان دهنده تغییرات شاخص FED در طول زمان می‌باشد. با توجه به نمودار، مقدار شاخص FED با گذشت زمان افزایش می‌یابد، اما مقدار شاخص به حدی نیست که باعث آسیب به افراد و یا مرگ و میر افراد

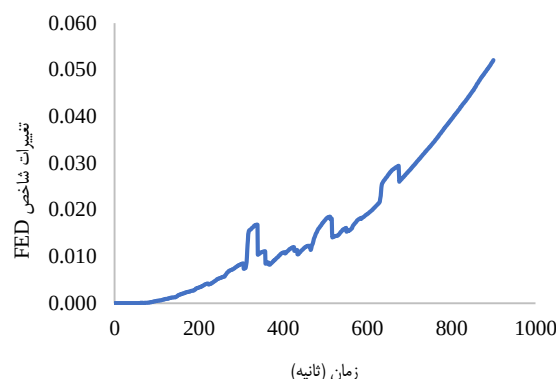


شکل ۹. قابلیت دید افراد بر حسب زمان در نقاط مختلف طبقه همکف بدون سامانه تهویه

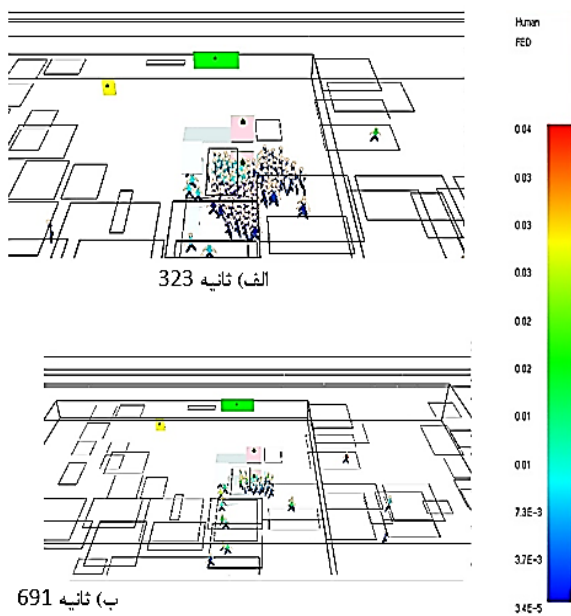


شکل ۱۰. مقایسه قابلیت دید افراد با فعال بودن سیستم تهویه و غیر فعال بودن سیستم تهویه برحسب زمان در بخش‌های Obstetrics (OB) طبقه همکف (الف) و رادیولوژی طبقه همکف (ب)

سرعت کمتری به این بخش نفوذ کند و افراد فرصت بیشتری برای فرار از محل حادثه داشته باشند. زمانی که سامانه تهویه غیر فعال می‌باشد، قابلیت دید در طبقه دوم نسبت به طبقه اول کمتر است؛ چرا که دود به علت سبکی به سمت بالا حرکت می‌کند و انتشار آن در طبقه دوم تا حدودی بیشتر از طبقه اول است. در طبقه همکف نیز به دلیل این که نقطه شروع حریق می‌باشد، دود به سرعت در طبقه مورد نظر پخش می‌گردد و با گذشت زمان قابلیت دید در بیشتر نقاط به صفر می‌رسد. در نتیجه، می‌توان دریافت که عملکرد سامانه‌های تهویه موجب می‌شود دود و محصولات احتراقی با سرعت کمتری گسترش پیدا کند.



شکل ۱۱. بررسی تغییرات شاخص Fractional effective dose (FED) در طول زمان با استفاده از نرم‌افزار FDS+Evac بدون سامانه تهویه



شکل ۱۲. تغییرات Fractional effective dose (FED) در افراد درون ساختمان در طول زمان بدون سامانه تهویه

بحث

هدف از انجام پژوهش حاضر، شبیه‌سازی تخلیه اضطراری ساکنان بیمارستان در زمان حریق و بررسی برخی عوامل در زمان تخلیه بود. نتایج نشان داد که فعال بودن سامانه تهویه، نبود موانع در مسیر و پیش‌بینی تعداد کافی خروجی، در سرعت تخلیه افراد نقش بسیار مهمی دارد.

نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری حاکی از آن بود که در حالت عادی (بدون حریق)، میانگین زمان تخلیه افراد ۸۱۵ ثانیه بود و در این مدت، ۲۹۵ نفر تخلیه شدند؛ درحالی که در هنگام رخداد حریق در حالت فعال بودن و خاموش بودن سامانه‌های تهویه در مدت زمان ۹۰۰ ثانیه، به ترتیب ۱۰ و ۳۲ نفر قادر به خروج از ساختمان نبودند.

از آن‌جا که ایمنی و حفاظت بخش OB به دلیل وجود مادران باردار پرخطر از اهمیت بالایی برخوردار است و افراد جهت تخلیه نیازمند مدت زمان بیشتری می‌باشند، فعال بودن سامانه تهویه باعث می‌شود که دود و محصولات احتراقی با

است. نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری با در نظر گرفتن پله‌های خروج اضطراری در طبقه‌های اول و دوم نشان داد زمان تخلیه افراد به شدت کاهش یافت که با یافته‌های پژوهش De-Ching و همکاران (افزایش عرض درب خروجی به بیش از ۲ متر) (۱۷) و مطالعه Wang و همکاران (افزایش عرض خروجی‌ها) (۲۸) همخوانی داشت.

انجام تحقیق حاضر با محدودیت‌هایی همراه بود. از آن جایی که هدف از انجام پژوهش، تخلیه اضطراری افراد در زمان حریق بود، از نرم‌افزار FDS+Evac استفاده گردید که نسبت به سایر نرم‌افزارها قابلیت بالایی در شبیه‌سازی حریق و تلفیق آن با تخلیه افراد دارد، اما برخی از شاخص‌های موجود در این نرم‌افزار جهت تخلیه افراد بیمار در محیط‌های درمانی (حمل بیمار با ویلچر، تخت و سایر تجهیزات متصل به آن، بازگشت پرستاران برای کمک به افراد و...) وجود نداشت، به همین دلیل پیشنهاد می‌گردد در صورتی که هدف تنها بررسی نحوه تخلیه اضطراری افراد از ساختمان درمانی بدون وجود حریق می‌باشد، از سایر نرم‌افزارها از جمله FlexSim for Healthcare استفاده گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که شبیه‌سازی تخلیه اضطراری با استفاده از نرم‌افزار FDS+Evac، می‌تواند تأثیر شاخص‌های مؤثر بر تخلیه اضطراری از جمله رفتار افراد، سامانه تهویه، تعداد و جانمایی خروجی‌ها، رفتار حریق از نظر انتشار دود، قابلیت دید افراد و... را بررسی و بر اساس نتایج حاصل از آن، نسبت به انجام اقدامات اصلاحی مورد نیاز برای خروج به موقع کلیه افراد اقدام نماید. همچنین، نتایج حاکی از نقش مهم سامانه تهویه برای جلوگیری از رسیدن دود به طبقات در کنار توجه به مشخصات راه‌های خروج اضطراری از نظر تعداد، جانمایی و موانع بود که لازم است مورد توجه مدیران بیمارستان و مراکز بهداشتی-درمانی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد با شماره ۱۹۶۵۶ و کد اخلاق IR.SUMS.REC.1398.569، مصوب دانشگاه علوم پزشکی شیراز می‌باشد. بدین وسیله از معاونت تحقیقات و فن‌آوری دانشگاه علوم پزشکی شیراز و همچنین، بیمارستان مورد بررسی تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری، مقدار شاخص FED در زمان ۹۰۰ ثانیه حتی در زمان خاموش بودن سامانه تهویه کمتر از ۰/۳ به دست آمد که در این مقدار افراد دچار مشکل نمی‌شوند و زنده خواهند ماند. با این حال، به دلیل وجود دود و محصولات احتراقی، قابلیت دید و سرعت حرکت افراد کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری نشان داد که با کاهش تعداد افراد مستقر در ساختمان درمانی مورد بررسی به ۲۰ درصد (از ۲۹۵ به ۲۳۷ نفر)، میانگین زمان خروج افراد به میزان ۱۳ درصد (از ۸۲۵ به ۷۱۰/۲ ثانیه) کاهش می‌یابد. علاوه بر این، حذف موانع نیز اثر ۴ درصدی را در کاهش زمان تخلیه نشان داد؛ به گونه‌ای که با حذف موانع، زمان تخلیه به ۶۷۹/۴ ثانیه کاهش یافت. در تحقیق Su و همکاران، مدل ارایه شده جهت زمانی که ساعت کار اورژانس بیمارستان در شلوغ‌ترین زمان ممکن می‌باشد، در دو حالت آماده‌سازی تمام بیماران برای خروج و یا اولویت‌بندی و خروج تک‌تک افراد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش آنان نشان داد که اولویت‌بندی آماده‌سازی تمامی بیماران جهت تخلیه، زمان کمتری برای خروج افراد در مقایسه با زمانی که تک‌تک افراد آماده و خارج می‌شوند، نیاز دارد، اما تعداد افرادی که در ۲۰ دقیقه اول نجات پیدا می‌کنند، در مقایسه با حالت انتقال تک‌تک بیماران کمتر می‌باشد (۲۷).

نتایج مطالعه Wang و همکاران که از نرم‌افزار BIM و Pathfinder جهت شبیه‌سازی تخلیه اضطراری ۲۴۰۰ بیمار استفاده کرده بودند و در سناریوهای مختلف تأثیر حالات تخلیه، اندازه خروجی‌ها و موقعیت ابتدایی افراد مورد بررسی قرار گرفت، نشان داد زمانی که به بیماران در امر تخلیه کمک می‌شود، زمان تخلیه نسبت به حالتی که خود بیمار به تنهایی خارج می‌شود، افزایش می‌یابد. در خصوص موقعیت قرارگیری بیماران نیز زمانی که بیماران بدحال در بخشی نزدیک به خروجی‌ها قرار می‌گیرند، زمان تخلیه شبیه‌سازی شده به طور قابل توجهی حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد (۲۸).

همان‌گونه که ذکر شد، در ساختمان درمانی شبیه‌سازی شده در تحقیق حاضر، درب‌های خروج اضطراری در ساختمان وجود نداشت و به دلیل وجود تعداد زیاد ساکنان در طبقه اول ساختمان، در زمان خروج افراد تجمع ایجاد شد و تأخیر در خروج افراد را به دنبال داشت. همچنین، در زمان وقوع حریق و هنگامی که سامانه‌های تهویه فعال نباشد، به دلیل انتشار سریع دود و محصولات احتراقی، پله‌های خروجی ساختمان بدون استفاده می‌شوند. در نتیجه، در نظر گرفتن راه‌پله‌های خروجی اضطراری استاندارد و یا افزایش میزان خروجی‌ها (در نظر گرفتن پله‌های خروج اضطراری در بیرون ساختمان) از اهمیت زیادی برخوردار

References

1. Jahangiri M, Rajabi F, Darooghe F. Fire risk assessment in the selected Hospitals of Shiraz University of Medical Sciences in accordance with NFPA101. Iran Occup Health 2016; 13(1): 99-106.
2. Hokmabadi R, Mahdini M, Zaree R, Mirzaee M, Kahsari P. Fire risk assessment by FRAME in a hospital complex. J North Khorasan Univ Med Sci 2017; 9(2): 173-82.
3. Mahdini M, Yarahmadi R, Jafari MJ, Koohpaie AR, Khazaei M. Fire Risk Assessment and the Effect of Emergency Planning on Risk Reduction in a Hospital. Qom Univ Med Sci J 2011; 5(3): 71-8.
4. Jahangiri M, Choobineh A, Rajabi F, Salmani-Nodooshan H. Safety and occupational health in hospitals and health care centers. 1st ed. Shiraz, Iran: Shiraz University of Medical Sciences; 2018. [In Persian].
5. Omidvari M, Mansouri N, Nouri J. A pattern of fire risk assessment and emergency management in educational center laboratories. Saf Sci 2015; 73: 34-42.
6. Toghi M, Akbarzadeh M, Sabuhanian A. Evaluation of Pedestrian Corridors from Evacuation Perspective-Case Study: Administrative Complex of Isfahan. Motaleate Shahri 2016; 5(17): 5-14.

7. Rahouti A, Datoussaïd S, Lovreglio R, editors. A sensitivity analysis of a hospital evacuation in case of fire. Proceedings of Fire and Evacuation Modelling Technical Conference. 2016 November 16-18. Malaga, Spain. 2016.
8. Ze-min J, Pei-hong Z, Rong-xue S, Xiang-liang T. Investigation and Simulation on Human Evacuation Behaviour in Large Hospital Building in Shenyang. *Procedia Engineering* 2014; (71): 101-6.
9. Wei X, Lv W, Song W, Wang D. Evacuation analysis of a hospital based on fds+ evac software. Proceedings of 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE). 2011 June 24-26; Nanjing, China. p. 3147-50.
10. Mikulik J, Cempel WA, Kracik S, Dąbal D. A Simulation Model for Emergency Evacuation Time and Low-Cost Improvements of a Hospital Facility Using FlexSim Healthcare: A Case Study. In: Korbicz J, Kowal M, editors. *Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol 230. Berlin, Germany: Springer; 2014; p. 334-5.
11. Amin-Ghafouri ME, Banaei-Karizbala M. Simulation of Emergency Exit Operation in a Critical Situation with ANYLOGIC Software. Proceedings of Eighth International Conference on Integrated Natural Disaster Management; 2017 Feb 14-15; Tehran, Iran.
12. Rabipour S, Bagheri S, Bikineh N, Samali-Babaahmadi L. Self-organization and simulation of pedestrian routes in urban environments using social force model (Sample study: Eram Blvd., Hamadan city). *Haft Hesar Journal of Environmental Studies* 2015; 3(10): 47-56.
13. Shafabakhsh G, Mohammadi M. Simulation of pedestrian movement using social force model. *Modeling in Engineering* 2013; 11(34): 49-62.
14. Jalali SME, Norouzi M. Improvement of Emergency Escape Routes in Large Underground Mines Using Dijkstra's Algorithm. *Amir Kabir Scientific and Research Journal* 2010; 21(72): 1-8.
15. Ronchi E, Kinsey M. Evacuation models of the future: Insights from an online survey of user's experiences and needs. Proceedings of Evacuation and Human Behaviour in Emergency Situations; 2011 October 21; Santander, Spain.
16. Korhonen T, Hostikka S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac; Technical Reference and User's Guide. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland; 2018.
17. De-Ching H, Shen-Wen C, Chien-Hung L, Po-Ta H, Yi-Ting S, Huei-Ru S. A study for the evacuation of hospital on fire during construction. *Procedia Eng* 2011; 11: 139-46.
18. Khan EA, Ahmed MA, Khan EH, Majumder SC. Fire Emergency Evacuation Simulation of a shopping mall using Fire Dynamic Simulator (FDS). *J Chem Eng* 2017; 30(1): 32-6.
19. Glasa J, Valasek L. Study on Applicability of FDS+Evac for Evacuation Modeling in Case of Road Tunnel Fire. *Res J Appl Sci Eng Technol* 2014; 8(17): 3603-15.
20. Xie Q, Lu S, Kong D, Wang J. The effect of uncertain parameters on evacuation time in commercial buildings. *J Fire Sci* 2012; 30(1): 55-67.
21. Korhonen T, Hostikka S, Heliövaara S, Ehtamo H, Matikainen K. Integration of an agent based evacuation simulation and the state-of-the-art fire simulation. Proceedings of the 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology; 2007 Sep 20-22; Hong Kong.
22. Lei W, Li A, Gao R, Wang X. Influences of exit and stair conditions on human evacuation in a dormitory. *PHYSICA A* 2012; 391(24): 6279-86.
23. Lei W, Li A, Gao R. Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for a dormitory in China. *PHYSICA A* 2013; 392(1): 79-88.
24. Shi L, Xie Q, Cheng X, Chen L, Zhou Y, Zhang R. Developing a database for emergency evacuation model. *Build Environ* 2009; 44(8): 1724-9.
25. Purser DA. Physiological Effects of Combustion Products and Fire Hazard Assessment. Proceedings of Europacable Seminar: Safety during Fire; 2009 May 6; Brussels, Belgium. p. 3-36.
26. Purser DA, McAllister JL. Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat. In: Hurley MJ, Gottuk D, Hall JR, Harada K, Kuligowski E, Puchovsky M, et al, Editors. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, NY. Springer; 2016. p. 2308-428.
27. Su B, Kwak J, Pourghaderi AR, Lees MH, Tan KBK, Loo SY, et al. A model-based analysis of evacuation strategies in hospital emergency departments. 2021 Winter Simulation Conference (WSC); 2021 Dec 13-15; Phoenix, AZ. p. 1-12.
28. Wang L, Xiang Z, Chen Y, Li D, Wang J. Simulation and Optimization of Emergency Evacuation of Huoshenshan Hospital Based on BIM and Pathfinder. *SHS Web Conf* 2022; 151: 01004.