

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Effect of Exit Route Characteristics on Hospital Evacuation Time: A case study of Azarshahr Shahid Madani Hospital

Bita Ataieian¹, Seyed Shamseddin Alizadeh², Rasoul Ahmadpour², Mahdi Rismanian^{3*}

¹Department of Health, Safety, Environment Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

²Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

³Department of Architecture, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 2024/12/28

Accepted: 2026/04/30

ABSTRACT

Introduction: Rapid and safe evacuation of hospitals during emergencies is a critical issue. This study aimed to analyze the evacuation process of a three-story hospital and to evaluate the effects of evacuation routes on total evacuation time.

Material and Methods: This descriptive-analytical study uses agent-based computer modeling to simulate the evacuation process of a hospital with an area of 8762 square meters and 217 staff. The effects of the variables of the width of horizontal exit routes, the dimensions of exit doors, and the obstacles in common exit routes on the time for complete evacuation of people were examined and compared in ten different scenarios.

Results: Findings indicated that increasing the width of horizontal routes and the dimensions of emergency exits, along with the removal of obstacles, significantly reduced maximum evacuation time.

Conclusion: Optimizing the geometric characteristics of emergency evacuation routes, particularly increasing exit sizes and removing obstacles, plays a key role in minimizing total evacuation time during hospital emergencies. Such improvements can enhance the safety of occupants in critical situations.

Keywords: Exit route, evacuation time, Emergency evacuation, emergency situation, Simulation, Hospital, Horizontal route width

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ataieian B., Alizadeh S. Sh., Ahmadpour R., Rismanian M. Effect of Exit Route Characteristics on Hospital Evacuation Time: A case study of Azarshahr Shahid Madani Hospital. *J Health Saf Work.* 2026; 16(2): 371-395.

1. INTRODUCTION

One of the fundamental requirements for safeguarding the lives of personnel during emergency situation is the proper evacuation of occupants. This necessitates the provision of an adequate number of emergency exits to ensure the timely, orderly and safe evacuation of individuals from buildings and their transfer to secure locations.

This issue is particularly significant in hospitals as the most crucial institutions providing healthcare services, due to the presence of specific

hazards as well as the presence of students, patients, individuals with disabilities, and their companions. Individuals with sensory and motor disabilities not only require assistance for safe evacuation through emergency exits but may also, because of their slower movement speed and the larger space needed for mobility, impede the evacuation of others.

Based on studies conducted in Iran and worldwide, all existing theoretical and empirical methods regarding the process of determining safe evacuation procedures and reducing evacuation time are influenced by three factors: the type of

* Corresponding Author Email: m.rismanian@malayeru.ac.ir

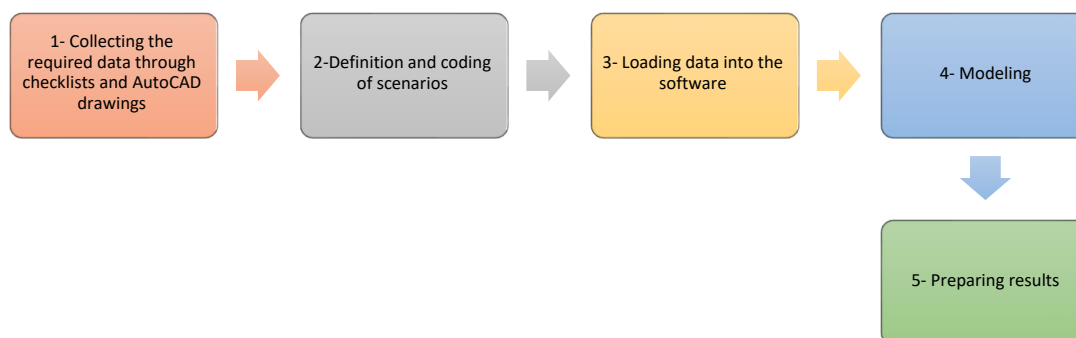


Fig. 1: Diagram of the procedure steps.

hazard, the social behaviors of occupants during emergencies, and the architectural characteristics of the affected space. Numerous investigations have been carried out in locations such as schools and classrooms, administrative and educational complexes, stadiums, and historical markets; however, this issue is also of significant importance in hospitals, which present unique conditions including the presence of individuals with varying physical abilities.

2. MATERIAL AND METHODS

In this study, an Agent Based Model was used to model emergency evacuation from a three floors, 96-bed hospital with 72 active beds and 217 staff. Fig1 depicts the Diagram of the procedure.

Data collection

Architectural information and environmental data:

The required architectural data was obtained through the hospital's AutoCAD map. Other environmental data, such as the number and type of obstacles, were obtained through a checklist prepared by the research team and completed over a week through field visits and discussions with ward officials.

Demographic data

To collect this data, such as the number and density of healthy and sick people, a second checklist was prepared by the research team and various information about the number of healthy people (staff and patient companions) and the number of patients in each ward was collected in this way, separated by their ability to move in an emergency situation by wheelchair or stretcher. This data was completed for one week by visiting the wards and checking the condition of the patients. The types of obstacles on the emergency

exits or routes were also examined in the field and recorded through photographs. The location of the obstacles was also determined on a map and their size was recorded.

Five types of behavior were considered for the people in the building, and for each, different movement speeds were considered according to the type of behavior, as shown in Table 1. The time before evacuation for patients is 8-63 seconds and for employees is 8-141 seconds, and the software randomly selects a time from this time range.

Scenario Definition and Coding

After collecting the required data, scenarios were defined for each of the specific objectives and entered into the software. For the aforementioned three-story building, 10 scenarios (Table 2) were defined, which included examining the existing situation, increasing and decreasing the dimensions of the door and emergency exit by 10%, and removing or considering obstacle. Each scenario was defined by specific codes.

Loading into the software, modeling and preparation of results

After defining the scenarios, the data was loaded into the software and modeling was performed. After modeling, the resulting outputs, which showed the duration of the evacuation in each scenario, were compared with each other.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Determining the effect of horizontal emergency exit route width on hospital evacuation time

There is a direct relationship between increasing the width of horizontal exit routes and reducing the evacuation time of users in times of crisis. With a 10% increase in the width of the exit route in the C2D1O1 scenario, the evacuation time was reduced

Table 1: Types of behaviors examined

ALONE	STAFF	SCORT	WHEELCHAIR	BED	Behavior
1.19	1.19	1.19	0.7	0.5	Speed of movement (m/s)

Table 2: Defined scenarios

Moving with a wheelchair or stretcher	Number of healthy and sick people	O	C	D	Ground floor
Fixed in scenarios		O ₁	C ₁	D ₁	Scenario 1
		O ₁	C ₁	D ₂	Scenario 2
		O ₁	C ₁	D ₃	Scenario 3
		O ₁	C ₂	D ₁	Scenario 4
		O ₁	C ₃	D ₁	Scenario 5
		O ₂	C ₁	D ₁	Scenario 6
		O ₂	C ₁	D ₂	Scenario 7
		O ₂	C ₁	D ₃	Scenario 8
		O ₂	C ₂	D ₁	Scenario 9
		O ₂	C ₃	D ₁	Scenario10

by 25 seconds compared to the C1D1O1 scenario, which corresponded to the existing state. In other words, the reduction in evacuation time was 2.85%.

By reducing the width of the path by 10% in the C3D1O1 scenario, the evacuation time increased by 117 seconds compared to the C1D1O1 scenario. In fact, the evacuation time increased by 13.32%. Reducing the width of exit pathways tends to cause crowding, which leads to collisions among people or with patient transport equipment, and consequently increases overall evacuation time.

By increasing the width of emergency exit routes, factors such as the absence of high congestion in front of doors, fluidity of movement, and the easier passage of personal transport equipment such as wheelchairs and stretchers will cause the impact of the C2D1O1 scenario to become apparent.

Determining the effect of emergency exit door dimensions on hospital evacuation time

Three scenarios were examined to determine the effect of emergency exit dimensions on evacuation time. The obtained numbers showed that by increasing the dimensions of the emergency exits, such as the case examined in the C1D2O1 scenario, compared to the existing C1D1O1 case, the evacuation time was reduced from 878 seconds to 805. It can be said that the reduction in evacuation time by increasing the dimensions of the emergency exits is 8.31 percent. In fact, it can be said that as the door becomes larger, the compression effect disappears quickly [20].

In the C1D3O1 scenario, where the dimensions of the emergency exit door are considered to be 10% smaller than the existing one, the evacuation time is increased by 300 seconds compared to the existing one, that is, 34.16%. This increase in evacuation time can occur due to problems related to the passage of patient transport equipment that has dimensions larger than the dimensions of the emergency exit door.

Determining the impact of obstacles in common emergency exit routes on hospital evacuation time

Considering the results obtained from modeling five scenarios in two modes without obstacles and by placing obstacles that were previously measured and their locations were marked on the map, it can be seen that the maximum evacuation time in the scenarios without obstacles decreased, compared to the scenarios in which the obstacles on the routes were removed.

Obstacles in the path make it more difficult for patient transport equipment such as wheelchairs and stretchers to pass and move, and by reducing the width of the path, the capacity of the path for this equipment and people to pass is reduced. Therefore, these obstacles increase evacuation time.

4. CONCLUSIONS

What affects the evacuation time in a building are three factors: the width of the horizontal emergency exit routes, the dimensions of the exit doors, and the obstacles in the common

exit routes. According to the results, although a general relationship between these parameters and evacuation time cannot be imagined but the results showed that by increasing the width of horizontal paths and the dimensions of emergency exit doors and removing obstacles in the paths, the maximum evacuation time in emergency situations is reduced, with the greatest reduction in evacuation time related to the scenario of increasing the dimensions of the exit doors. Also,

reducing the width of horizontal paths and the dimensions of emergency exit doors and adding obstacles increased the maximum evacuation time, with the largest increase related to the scenario of reducing the dimensions of exit doors. Therefore, it can also be concluded that the effect of changing the dimensions of emergency exit doors on the maximum evacuation time in emergency situations was greater than the other two modeled parameter.

تأثیر ویژگی‌های مسیر خروج بر زمان تخلیه بیمارستان (مطالعه موردی: بیمارستان شهید مدنی آذرشهر)

بیتا عطائیان^۱، سید شمس الدین علیزاده^۲، رسول احمدپور^۳، مهدی ریسمانیان^{۳*}

^۱گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.

^۲گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.

^۳دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۰

چکیده

مقدمه: تخلیه سریع و ایمن بیمارستان‌ها در شرایط اضطراری اهمیت حیاتی دارد. هدف از این مطالعه، بررسی روند تخلیه اضطراری یک بیمارستان سه طبقه و ارزیابی تأثیر عوامل فیزیکی مسیرهای خروج بر زمان کلی تخلیه بود.

روش کار: در این مطالعه توصیفی-تحلیلی، از مدلسازی کامپیوتری مبتنی بر عامل برای شبیه‌سازی فرآیند تخلیه یک بیمارستان با مساحت ۸۷۶۲ متر مربع و ۲۱۷ نفر کادر استفاده شد. تأثیر متغیرهای عرض مسیرهای افقی خروج، ابعاد درب‌های خروج و موانع موجود در مسیرهای مشترک خروج بر زمان تخلیه کامل افراد در ده سناریوی مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که افزایش عرض مسیرهای افقی و ابعاد درب‌های خروج اضطراری، همراه با حذف موانع موجود در مسیرها، منجر به کاهش حداکثر زمان تخلیه در شرایط اضطراری می‌شود. تحلیل بیشتر مشخص کرد که بیشترین تأثیر در کاهش زمان تخلیه، مربوط به سناریوی افزایش ابعاد درب‌های مسیر خروج بود.

نتیجه‌گیری: بهینه‌سازی مشخصات هندسی مسیرهای خروج اضطراری، به‌ویژه افزایش ابعاد درب‌ها و رفع موانع، نقش کلیدی در کاهش زمان مورد نیاز برای تخلیه کامل بیمارستان در شرایط اضطراری دارد و می‌تواند ایمنی افراد را در این شرایط بهبود بخشد.

کلمات کلیدی: مسیر خروج، زمان تخلیه، تخلیه اضطراری، شرایط اضطراری، شبیه‌سازی، بیمارستان،

عرض راهرو، مدل‌سازی عامل‌مبنا

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: m.rismanian@malayeru.ac.ir

مقدمه

حوادث و بلایا اتفاقاتی به قدمت زندگی بشر هستند و برای کلیه جوامع در طول تاریخ آشنا بوده‌اند (۱). امروزه، یکی از مشکلات موجود در راه حفظ منابع انسانی و مادی و توسعه کشورها، وقوع حوادث طبیعی و یا غیرطبیعی است که ضعف مدیریت صحیح جهت کنترل و مقابله با آن‌ها، موجب افزایش دامنه و میزان خسارات ناشی از بحران‌ها می‌شود (۲). در سال‌های اخیر، وقوع بحران‌ها و بلایای طبیعی نظیر سیل، زلزله، آتش‌سوزی و حوادث فنی، موجب افزایش توجه به مقوله تخلیه اضطراری بیمارستان‌ها شده است. در طی سه دهه گذشته در کشور هلند، ۶۷ مورد تخلیه بیمارستانی ثبت شده که ۱۹ درصد آنها به دلیل آتش‌سوزی داخلی و ۲۱ درصد به دلیل نقص فنی در ساختمان یا سیستم‌ها بوده است. نکته قابل توجه این است که در حدود ۳۷ درصد موارد، علت تخلیه به صورت زنجیره‌ای (یعنی شروع با یک مشکل و منتهی به مشکلات دیگر) گزارش شده است (۳). در جریان سیل سال ۲۰۲۱ در شهر ژنگژو چین، بیش از ۱۱۳۵۰ بیمار از یک مجموعه بیمارستانی تخلیه شدند. این عملیات به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تخلیه‌های بیمارستانی ثبت شده و نشان‌دهنده ابعاد لجستیکی سنگین چنین شرایطی است (۴). بررسی تخلیه‌های بیمارستانی در ایالات متحده آمریکا طی بازه سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که حدود ۷۲ درصد این تخلیه‌ها ناشی از بلایای طبیعی مانند طوفان و سیل بوده و سهم مشکلات فنی یا زیرساختی داخلی حدود ۱۹ درصد بوده است (۵). در صورت وقوع بلایا و نیاز به تخلیه بیماران از بخش‌های مختلف بیمارستان‌ها نیازمند داشتن برنامه واکنش اضطراری از پیش تعیین شده می‌باشند. از همین رو می‌توان گفت برنامه تخلیه یکی از مهم‌ترین قسمت‌های مدیریت بحران در بیمارستان‌هاست (۶). در صورت وقوع بلایا، ساختمان، پرسنل مشغول به کار، بیماران و همراهان آنها به‌صورت مستقیم و غیر مستقیم تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند (۷). مسئله‌ی برنامه‌ریزی برای تخلیه اضطراری، ناشی از نیاز به جابه‌جایی آسیب دیدگان /

نجات یافتگان از مناطق آسیب دیده یا در معرض آسیب به مناطق امن است. این موضوع دارای چالش‌های متعددی می‌باشد که مهمترین آن جابه‌جایی افراد به یک منطقه امن در کمترین زمان ممکن می‌باشد (۸، ۹).

در مطالعات گذشته از روش‌های مختلفی برای تدوین برنامه‌های واکنش‌های اضطراری استفاده شده است. برای نمونه مطالعه اسماعیل ضرغامی و مهدی ریسمنیان با هدف بررسی تأثیر متغیرهای معماری عرض درب خروجی، تعداد درب‌های خروج و جهت کشیدگی در یک کلاس درس بر زمان تخلیه کامل افراد از اتاق با یکدیگر در دوازده سناریوی مختلف انجام شده است (۱۰). گلا دیو فلاسیانی^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مطالعه خود یافته‌های یک آزمایش تخلیه را شامل جمعیت مخلوطی از عابران پیاده توانا در راه رفتن و کاربران ویلچر ارائه نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که زمانی که سه کاربر ویلچر (از ۵۲ شرکت‌کننده) از محل خروج و ماهیت مطلع می‌شوند، زمان تخلیه تا حد زیادی کاهش می‌یابد (۱۱). زو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در مطالعه خود شبیه‌سازی‌هایی را برای یک بیمارستان بر اساس اتوماتای سلولی اصلاح‌شده انجام دادند. عابران پیاده در این مطالعه به کاربران ویلچر، بیماران عمومی و افراد عادی تقسیم شدند. نتایج نشان داد که مسیر ویلچرها، زمان انتظار و زمان تخلیه به دلیل اولویت بندی صورت گرفته به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (۱۲). در مطالعه ژوکونگجین و همکاران در سال ۲۰۱۶، تخلیه یک کلاس درس مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه برای آشکارکردن پویایی تخلیه از اتاق دارای چند مانع و همچنین ارائه توصیه‌هایی در مورد مدیریت جمعیت مفید است (۱۳).

برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر تمرکز خود را بر تخلیه جمعیت از بیمارستان‌ها متمرکز کرده‌اند. وانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۵ نقش کمک‌های اجتماعی جامعه، مانند بازدیدکنندگان یا مراقبان، را در بهبود کارایی تخلیه در ساختمان‌های بستری بیمارستان‌های مرتفع بررسی کردند. آن‌ها با

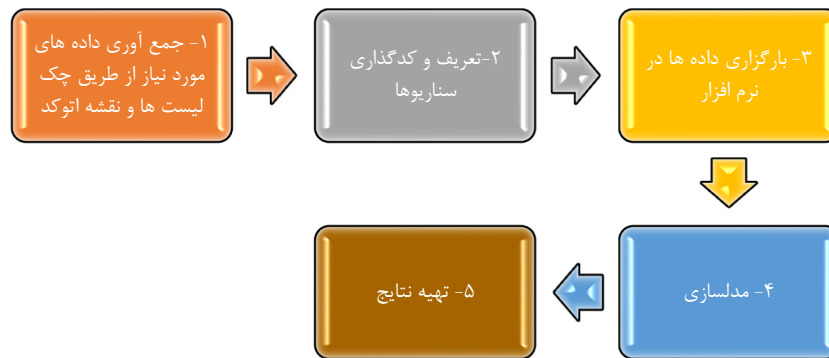
1. Claudio feliciani
2. Baobao zou

زمان تخلیه را در محیط شبیه‌سازی شده ۲۸.۸٪ کاهش می‌دهد (۱۷).

با وجود انجام مطالعات مختلف با استفاده از روش‌های مدل‌سازی شده، تحقیقات جدید در زمینه شبیه‌سازی حرکت بیماران و تجهیزات حمل در مسیرهای خروج نشان می‌دهند که زمان واقعی تخلیه، اغلب ۲۰ تا ۴۰ درصد بیشتر از زمان تخمین زده‌شده در مدل‌های ساده‌سازی شده است. یکی از دلایل اصلی این اختلاف، وجود موانع فیزیکی، پیچ‌ها و نقاط گلوگاهی در طراحی مسیرهای خروج است (۱۸). رعایت استانداردهای بین‌المللی نظیر NFPA 101، ISO 23601 و IBC از اهمیت ویژه‌ای در این حوزه برخوردار است (۱۹-۲۱). این استانداردها بر طراحی مسیرهای خروج ایمن، نصب علائم راهنما و نقشه‌های تخلیه، تأمین نور اضطراری و دسترسی‌پذیری مسیرها برای تمامی افراد از جمله بیماران و افراد دارای محدودیت حرکتی تأکید دارند. بر اساس این الزامات، وجود حداقل دو مسیر خروج مستقل، جانمایی مناسب خروجی‌ها و استفاده از علائم قابل‌مشاهده در شرایط کم‌نور از اصول اساسی ایمنی محسوب می‌شود. هم‌سویی طراحی فضاهای بیمارستانی با این استانداردها می‌تواند نقش مؤثری در کاهش زمان تخلیه و ارتقای ایمنی بیماران و کارکنان در شرایط بحرانی داشته باشد.

مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر برخی ویژگی‌های فیزیکی و معماری مسیرهای خروج در بیمارستان، از جمله عرض مسیرها، ابعاد و تعداد درب‌های خروج و نوع و موقعیت موانع موجود در این مسیرها، بر زمان تخلیه در شرایط اضطراری انجام شد. در این پژوهش تلاش شده است تا با تحلیل کمی و شبیه‌سازی وضعیت‌های مختلف، نقش هر یک از این عوامل در تسریع یا تأخیر فرآیند خروج ایمن بیماران و کارکنان مورد ارزیابی قرار گیرد. یافته‌های حاصل می‌تواند به درک دقیق‌تری از رفتار جمعیت در هنگام تخلیه، شناسایی گلوگاه‌های حرکتی و بهینه‌سازی طراحی مسیرهای فرار در بیمارستان‌ها منجر شود. نتایج این مطالعه می‌تواند برای طراحان معماری، مهندسان ایمنی، مدیران بیمارستانی و شرکت‌های

ارزیابی استراتژی‌های کمک‌رسانی، تأثیر نسبت‌های مختلف کمک‌رسانی و حالت‌های کمک‌رسانی (مبتنی بر نزدیکی در مقابل مبتنی بر اولویت) را بر زمان تخلیه کامل با استفاده از شبیه‌سازی‌های مبتنی بر عامل ارزیابی کردند و دستورالعمل‌های عملی برای بهینه‌سازی پروتکل‌های تخلیه بیمارستان با تأکید بر استراتژی‌های تطبیقی، از جمله نظارت بر وضعیت زیرساخت‌ها در زمان واقعی و تخصیص پویای کمک‌رسانی ارائه نمودند (۱۴). در مطالعه‌ای دیگر کیم و همکارانش در سال ۲۰۲۴ با استفاده از شبیه‌سازی به ارزیابی خطر آتش‌سوزی و مقایسه کمی زمان خروج ایمن موجود (ASET) و زمان خروج ایمن مورد نیاز (RSET) برای مراکز درمانی پرداختند. آن‌ها تأثیر نسبت پرستار به بیمار را بر ایمنی تخلیه، به ویژه مراکز دارای بخش‌های مراقبت‌های ویژه و بخش‌های عمومی، ارزیابی کردند و توصیه‌هایی در مورد نسبت ایمنی ارائه دادند که تعیین می‌کند نسبت بیمار به پرستار کمتر از ۱:۱ برای تضمین ایمنی تخلیه مؤثر است و نشان می‌دهد که تجاوز از نسبت ۱:۶ منجر به مرگ و میر بالای بیماران بستری می‌شود (۱۵). وایو و همکارانش نیز در بررسی‌های خود در سال ۲۰۲۴ یک چارچوب برنامه‌ریزی مسیر تخلیه بهینه‌سازی پویا را بر اساس نظریه فضای جریان برای بهبود کارایی کلی تخلیه بیمارستان معرفی کردند. آن‌ها فضای بیمارستان را به عنوان یک جریان شبکه پویا مدل‌سازی کرده و زمان تخلیه را با در نظر گرفتن زمان پیاده‌روی و صف‌بندی، تجزیه و تحلیل کردند و دریافتند که بهینه‌سازی مسیر، میانگین زمان تخلیه را ۵۸.۱٪ کاهش داده و زمان انتظار را در مناطق با تراکم بالا کوتاه می‌کند (۱۶). در پژوهشی دیگر لین و همکارانش در سال ۲۰۲۴ با استفاده از شبیه‌سازی عددی یک ساختمان بلند بیمارستان سالمندان را برای شبیه‌سازی و ارزیابی اثربخشی سازماندهی سلسله‌مراتبی تخلیه جمعیت، اصلاح پهنه‌بندی عملکردی عمودی و اقدامات خاص کاهش ازدحام به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود از توسعه یک استراتژی تخلیه یکپارچه خبر می‌دهد که با موفقیت



شکل ۱: نمودار مراحل روش کار

نسخه 2021.3.0901 v استفاده شده است. با استفاده از این نرم افزار هر فرد بر اساس مجموعه ای از پارامترها و خصوصیات فردی خاص خود (مثل سرعت حرکت، ابعاد ویژگی های ظاهری، محدودیت های حرکتی و ...) در محیط شبیه سازی تعریف شده و مطالعات حرکت و جابه جایی، تخلیه و ازدحام افراد امکان پذیر می شود. تصویر ۱ ترتیب مراحل روش کار پژوهش را نشان می دهد

مشاور در زمینه برنامه ریزی واکنش اضطراری سودمند باشد و مبنایی علمی برای تدوین و بازنگری مقررات ملی ساختمان، دستورالعمل های طراحی فضاهای درمانی و استانداردهای ایمنی بیمارستان ها فراهم آورد. در نهایت، بهره گیری از این یافته ها می تواند گامی مؤثر در جهت افزایش تاب آوری مراکز درمانی و کاهش خسارات انسانی در شرایط بحرانی محسوب شود.

روش کار

۱- کلیات

در این پژوهش از یک مدل عامل محور جهت مدل سازی خروج اضطراری از یک بیمارستان سه طبقه ۹۶ تخت خوابی با ۷۲ تخت فعال و ۲۱۷ نفر کادر استفاده شد. سیستم های عامل محور که در سطح مدل های خردنگر قرار دارند به اختصار ^۱ ABM نامیده شده و برای شبیه سازی موقعیت هایی که شامل عوامل و عناصر پویا هستند مورد استفاده قرار می گیرد. در مدل های عامل محور کلیه عوامل هوشمند بر اساس مجموعه ای از قوانین سامان یافته شبیه سازی توانایی ادراک و ارزیابی محیط را داشته و می توانند تصمیم گیری های مستقل و معقوله در خصوص انتخاب مسیرهای کوتاه تر و کاهش زمان تخلیه، متناسب با موقعیت های موجود اتخاذ نمایند.

در این مطالعه، برای مدل سازی عامل محور حرکت انسان ها در فضای معماری از نرم افزار Pathfinder

1. Agent based model

۲- جمع آوری داده ها

۲-۱- اطلاعات معماری و داده های محیطی

داده های معماری مورد نیاز که در واقع اطلاعات ابعاد و اندازه ی معماری ساختمان هستند، مثل عرض راه های فرار، ابعاد درها و ... از طریق نقشه اتوکد بیمارستان به دست می آیند. برای سایر داده های محیطی مثل تعداد و نوع موانع از طریق چک لیستی که توسط تیم تحقیق تهیه و به مدت یک هفته از طریق بازدیدهای میدانی و گفتگو با مسئولین بخش ها تکمیل شد به دست آمدند. چک لیست مربوطه در جدول ۱ آمده است.

۲-۲- داده های جمعیتی

برای جمع آوری این داده ها مثل تعداد و تراکم افراد سالم و بیمار چک لیست دومی (جدول ۲) توسط تیم تحقیق تهیه و اطلاعات مختلف درباره تعداد افراد سالم (کادر و همراهان بیمار) و تعداد بیمار در هر بخش را به تفکیک

جدول ۱: چک لیست جمع آوری داده های معماری بیمارستان

داده‌های معماری											
	داخلی	کودکان	جراحی عمومی	اتاق عمل	L.D.R	ICU	رادیولوژی	اورژانس	آزمایشگاه	دیالیز	داروخانه
عرض درب											
طول راهرو											
عرض راهرو											
موانع ثابت	تخت										
	سایر										
موانع متحرک											

جدول ۲: چک لیست جمع آوری داده های جمعیتی

رفتارها و مشخصات انسانی											
	داخلی	کودکان	جراحی عمومی	اتاق عمل	L.D.R ^۱	ICU	رادیولوژی	اورژانس	آزمایشگاه	دیالیز	داروخانه
تعداد افراد سالم (کادر + همراهان بیمار)											
تعداد بیمار	حمل با ویلچر										
	حمل با برانکارد										

در تصویر ۲ قابل مشاهده است. بر اساس بررسی های میدانی افراد ساکن در بیمارستان به پنج گروه اصلی تقسیم شدند که دارای زمان پیش از تخلیه، سرعت، ابعاد فیزیکی و رفتارهای متفاوت در زمان حادثه هستند که این تقسیم بندی در جدول ۳ نمایش داده شده است. ابعاد و زمان حرکت افراد در گروه های مختلف بر اساس مطالعات ریسمانیان و ضرغامی منظور شده است (۲۲). زمان پیش از تخلیه برای بیماران ۶۳-۸ ثانیه و برای کارمندان و همراهان ۱۴۱-۸ ثانیه لحاظ شده است که نرم افزار به صورت رندوم در هر سناریو با استفاده از روش مونت کارلو یک زمان از این بازه زمانی انتخاب می کند و هر سناریو ده بار تکرار می شود. گام زمانی

توانایی جابه جایی آنها در شرایط اضطراری به وسیله ویلچر یا برانکارد از این طریق جمع آوری شد. این داده ها به مدت یک هفته و از طریق حضور در بخش ها و بررسی وضعیت بیماران تکمیل شد. از این طریق نسبت گروه های مختلف برای مدل سازی بدست آمد. همچنین برای تراکم افراد در هر مترمربع بیمارستان از استانداردهای موجود در مبحث سوم مقررات ملی ساختمان ایران استفاده شد. انواع موانع موجود در مسیرها یا درب های خروج اضطراری هم به صورت میدانی بررسی و از طریق عکس ثبت شد. همچنین محل موانع روی نقشه مشخص و اندازه آنها ثبت گردید. برای مثال کارتن های انبار شده در مسیر، استند گل-استیشن نگهبانی- ترالی حمل که



شکل ۲: موانع موجود در مسیرهای خروج

جدول ۳: ویژگی‌های فیزیکی، رفتاری و حرکتی افراد

بیمارانی که توانایی فرار دارند (Alone)	کارمندان (Staff)	همراه بیماران	ویلچر	حمل با تخت (Bed)	سرعت حرکت (m/s)
۱/۱۹	۱/۱۹	۱/۱۹	۰/۷	۰/۵	۲/۱۵±۱
استوانه به قطر ۰/۴۶	استوانه به قطر ۰/۴۶	استوانه به قطر ۰/۴۶	۰/۶±۱/۱	۰/۶±۱/۱	۰/۶±۱/۱
در زمان وقوع حادثه از نزدیکترین خروجی خارج می‌شوند.	در زمان وقوع حادثه به خروج برانکاردها و ویلچرها کمک می‌کنند. برای جابجایی هر برانکار دو نفر کارمند که در نزدیکترین موقعیت قرار دارند اقدام می‌کنند.	در زمان وقوع حادثه به حمل ویلچر کمک می‌کنند و در صورت نبود ویلچر به تنهایی فرار می‌کنند.	در زمان وقوع حادثه منتظر می‌مانند که کارمندان یا همراهان به خروج آنها کمک کنند.	در زمان وقوع حادثه منتظر می‌مانند تا دو نفر کارمند آنها را از ساختمان خارج کنند.	رفتار
۸-۶۳	۸-۱۴۱	۸-۱۴۱	---	---	زمان پیش از تخلیه (s)

جدول ۴: توزیع‌های آماری مورد استفاده برای داده‌های شبیه‌سازی

متغیر	توزیع آماری	توضیحات
سرعت حرکت	لگ‌نرمال	بر اساس داده‌های SFPE و NFPA، توصیه شده برای شرایط بحرانی
زمان واکنش	لگ‌نرمال	توصیه شده برای شرایط بحرانی
انتخاب مسیر	فرآیند تصادفی مبتنی بر نمونه‌کارلو	مسیر خروج می‌تواند بر اساس احتمالات و شرایط لحظه‌ای انتخاب شود.
عرض موثر استفاده شده	توزیع یکنواخت	افراد به‌طور تصادفی در عرض‌درب‌ها/راهروها پخش شوند.
اولویت در برخورد‌ها	شبه تصادفی	وقتی دو عامل هم‌زمان به یک نقطه می‌رسند، انتخاب مسیر بر اساس احتمال انجام می‌شود.

۳- تعریف سناریوها و کدگذاری

پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، برای هریک از اهداف اختصاصی سناریوهایی تعریف و وارد نرم‌افزار شد. برای ساختمان سه طبقه مذکور ۱۰ سناریو (جدول ۵) که شامل بررسی در وضعیت موجود و افزایش و کاهش ۱۰ درصد ابعاد درب و مسیر خروج اضطراری و حذف یا در نظرگرفتن موانع بود (شکل ۲) تعریف شد. هر سناریو توسط کدهای مشخص تعریف شد.

بر همین اساس سه هدف مختلف تعریف شد و مدل سازی بر این اساس صورت گرفت، جزئیات در جدول ۵ و شکل ۳ نشان داده شده است:

هدف ۱: تعیین تأثیر عرض مسیرهای افقی خروج اضطراری بر زمان تخلیه در بیمارستان

هدف ۲: تعیین تأثیر ابعاد درب‌های خروج اضطراری بر زمان تخلیه در بیمارستان

هدف ۳: تعیین تأثیر موانع موجود در مسیرهای مشترک خروج اضطراری بر زمان تخلیه در بیمارستان

برای کدگذاری سناریوهای تأثیر عرض مسیر (CORRIDOR) از سه کد C_1 برای اندازه عرض مسیر در حالت موجود، C_2 ۱۰ درصد بیشتر از حالت موجود و C_3 ۱۰ درصد کمتر، برای کدگذاری سناریوهای ابعاد درب مسیرهای خروج از حرف D (حرف اول DOOR)

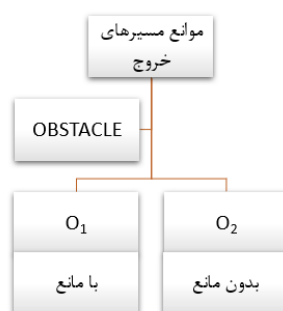
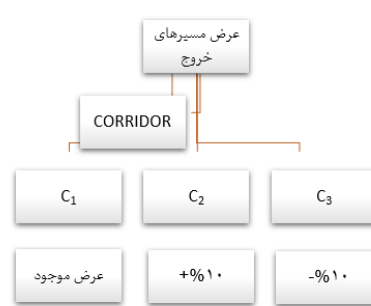
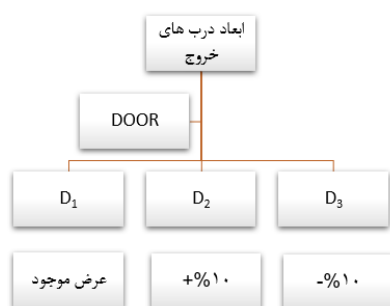
محاسبات ۰,۰۲ ثانیه در نظر گرفته شده است تا پایداری و دقت حرکت افراد حفظ شود و نرخ نمونه‌برداری ۰,۱ ثانیه لحاظ شده است. توزیع‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش مطابق جدول ۴ لحاظ شده است.

تست حساسیت برای پارامترهای عرض مسیرهای خروج و عرض درب‌های خروج با دو روش خط به خط OAT (One-at-a-time) و ترکیبی Full factorial انجام شد که نتایج آن مشخص نمود هر دوی عرض راهرو و عرض درب مهم هستند اما با ضرایب نمونه‌ای ما درب‌ها حساسیت بیشتری دارند یعنی تغییر در عرض درب تأثیر زمانی بزرگتری نسبت به تغییر در راهرو دارد. با این حال اثر ترکیبی مشخص نمود که افزایش هر دو با هم بیشترین کاهش زمان را می‌دهد و کاهش هر دو با هم بیشترین آسیب را خواهد رساند.

اعتبارسنجی با داده‌های واقعی از مانور در بیمارستان با جمعیت ۶۰ نفر و به نسبت‌های مورد بحث در پژوهش انجام شد که نتایج آن مشخص کرد مدل قابل اعتماد است اما زمان پیش از تخلیه کمی بالاتر تنظیم شد تا دقیق‌تر با واقعیت مطابقت داشته باشد. درمجموع نتایج نشان داد که مدل سازی توانسته با اختلاف کمتر از ۱۰٪ نتایج مانور واقعی را بازتولید کند و می‌توان به پیش‌بینی‌های آن اعتماد کرد.

جدول ۵: سناریوهای تعریف شده

طبقه همکف	D	C	O	تعداد افراد سالم و بیمار	جابه جایی با ویلچر یا برانکار
سناریو ۱:	D ₁	C ₁	O ₁	ثابت در سناریو ها	
سناریو ۲:	D ₂	C ₁	O ₁		
سناریو ۳:	D ₃	C ₁	O ₁		
سناریو ۴:	D ₁	C ₂	O ₁		
سناریو ۵:	D ₁	C ₃	O ₁		
سناریو ۶:	D ₁	C ₁	O ₂		
سناریو ۷:	D ₂	C ₁	O ₂		
سناریو ۸:	D ₃	C ₁	O ₂		
سناریو ۹:	D ₁	C ₂	O ₂		
سناریو ۱۰:	D ₁	C ₃	O ₂		

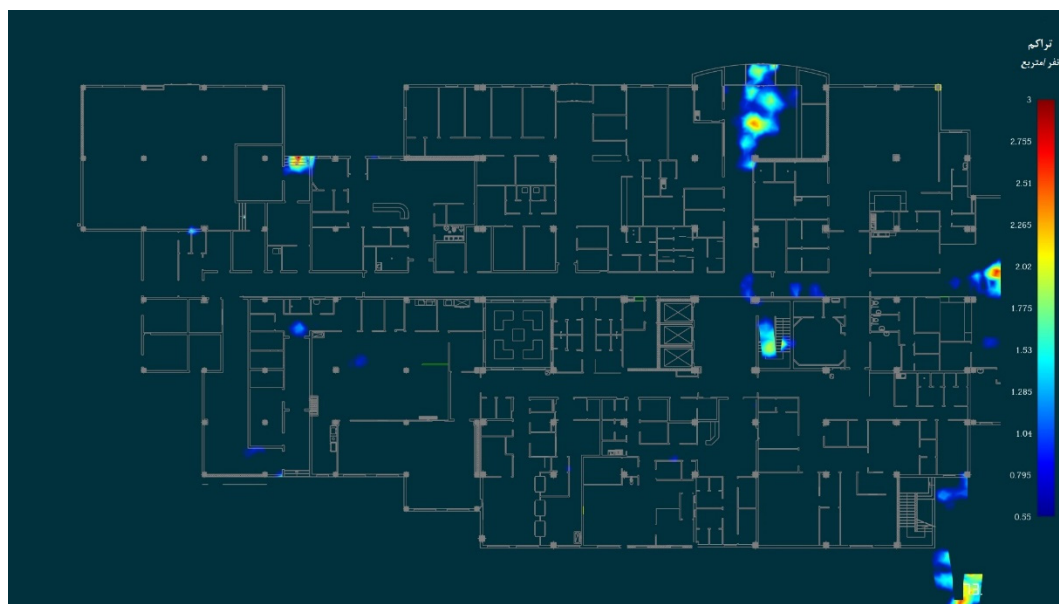


شکل ۳: کدگذاری سناریوها، C اندازه عرض مسیر، D ابعاد درب مسیر خروج و O موانع

۴- مدلسازی و تهیه نتایج

بعد از تعریف سناریوها داده ها در نرم افزار بارگذاری و مدلسازی انجام شد. بعد از مدلسازی ، می توان خروجی حاصل که مدت زمان تخلیه در هر سناریو را نشان می دهد را با یکدیگر مقایسه کرد.

در سه حالت D₁ و D₂ و D₃ که ابعاد درب را به ترتیب در حالت موجود، ۱۰ درصد بیشتر و ۱۰ درصد کمتر نشان می دهد استفاده شد. در کدگذاری سناریوهای بررسی تاثیر موانع (OBSTACLE) حالت O₁ سناریوهای بامانع و O₂ سناریوهای بدون مانع بررسی شد.



شکل ۴: نقشه حرارتی تراکم افراد (نفر/متر مربع) در طبقه همکف در ثانیه ۱۲۵ از شروع تخلیه در سناریوی C1D1O2

یافته ها

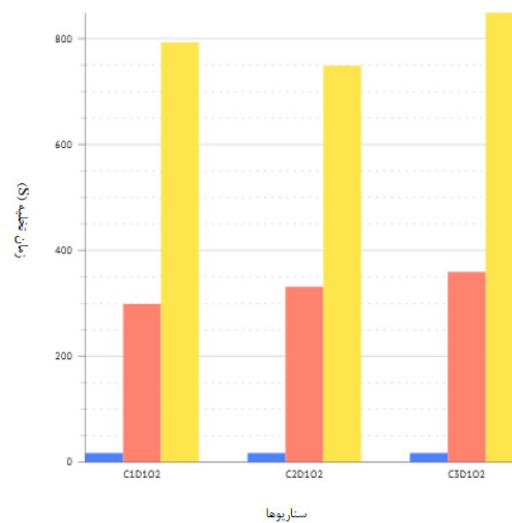
بعلت عرض نامناسب راه‌پله و درب خروجی آن و کمترین زمان تراکم در این میان به خروجی شمال غربی متعلق بود. طبق سناریوهای مدلسازی شده برای هر هدف، نتایج زیر به دست آمد:

هدف ۱: تعیین تأثیر عرض مسیرهای افقی خروج اضطراری بر زمان تخلیه در بیمارستان

جهت بررسی تأثیر عرض مسیرهای افقی خروج اضطراری، سه سناریو تدوین و کدگذاری شد. سناریوها و زمان‌های تخلیه مربوط به هریک به شرح جدول زیر می‌باشد. برای هر سناریو سه زمان مربوط به خروج اولین نفر، آخرین نفر و میانگین زمان خروج به دست می‌آید. در مورد هر رفتار، ستون اول زمان خروج اولین نفر در مواقع بحران (حداقل زمان تخلیه)، ستون دوم زمان خروج آخرین نفر (حداکثر زمان تخلیه) و ستون سوم میانگین زمان تخلیه مربوطه را نشان می‌دهد که بر اساس نتایج به‌دست آمده در سناریوهای مختلف افراد سالم و تنها (ALONE) کمترین میانگین زمان تخلیه

در این مطالعه تأثیر ویژگی‌های معماری مسیرهای خروج اضطراری و موانع موجود در مسیر بر زمان تخلیه بیمارستان بررسی شد. در این پژوهش میانگین نتایج هر سناریو از ۱۰ تکرار گزارش شده است. به‌عنوان نمونه میانگین زمان تخلیه کامل در سناریوی C1D1O2 مقدار ۷۹۳ ثانیه به‌دست آمد. پراکندگی داده‌ها با انحراف معیار نمونه $SD = ۱۲$ و خطای معیار میانگین $SE = ۳,۷۹$ بود که نشان‌دهنده دقت برآورد نمونه است و فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین آزمون برابر با تقریباً ۷۸۵,۵۶ ثانیه تا ۸۰۰,۴۴ ثانیه است. انحراف معیار و خطای معیار در سایر سناریوها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی‌های اولیه نقشه‌های حرارتی تراکم (متر/ثانیه) مشخص نمود بیشترین ازدحام و گرفتگی‌ها در خروجی درب شمال شرقی ساختمان، خروجی شرقی ساختمان، راه‌پله مرکزی ساختمان، خروجی جنوب شرقی ساختمان و به میزان کمتر از لحاظ زمانی خروجی شمال غربی ساختمان است. (تصویر ۴) بیشترین زمان تراکم در این میان مربوط به راه‌پله و خروجی جنوب شرقی بود که



شکل ۵: نمودار مقایسه زمان‌های خروج اولین نفر، آخرین نفر و میانگین زمان خروج در سناریوهایی با عرض مسیرهای افقی خروج متفاوت

این ابعاد زمان خروج افزایش می‌یابد. سناریوها و زمان‌های تخلیه مربوط به هریک از سناریوها به شرح جدول زیر می‌باشد. نمودار تصویر ۶ زمان‌های خروج اولین نفر، آخرین نفر و میانگین زمان خروج در سناریوهایی با ابعاد درب‌های خروج متفاوت را نشان می‌دهد.

هدف ۳: تعیین تأثیر موانع موجود در مسیرهای مشترک خروج اضطراری بر زمان تخلیه در بیمارستان

جهت تعیین تأثیر موانع موجود در مسیرها، همه سناریوهایی که تا کنون مدل‌سازی شده بودند یک‌بار دیگر بعد از چیدمان موانع بر روی نقشه اتوکد نرم‌افزار مدل‌سازی و زمان تخلیه محاسبه شد. جدول زیر مقادیر زمان تخلیه برای اولین نفر، آخرین نفر و میانگین زمان تخلیه مربوط به این سناریوها را در حالت‌های بدن موانع (O_1) و (O_2) و بعد از چیدمان موانع (O_1) نشان می‌دهد.

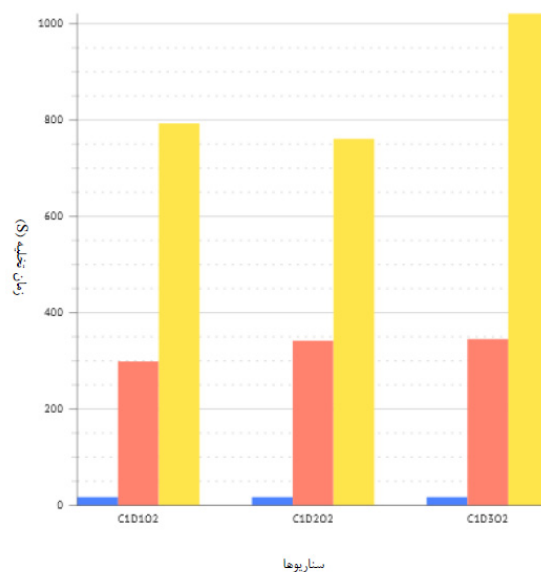
نتایج به دست آمده در جدول ۸ حاکی از آن است که در همه ی سناریوهای مدل‌سازی شده، زمان تخلیه در سناریوهای با مانع بیشتر از زمان تخلیه این سناریوها در صورت حذف موانع می‌باشد.

یعنی ۱۳۷,۷ ثانیه را دارند و بیشترین زمان میانگین تخلیه مربوط به کارمندان با ۶۰۰,۸ ثانیه در سناریوی C3D1O2 است. واحد همه‌ی زمان‌ها برحسب ثانیه است در بررسی کلی رفتارها مشاهده می‌شود با افزایش عرض مسیر در سناریوی C2D1O2 زمان تخلیه نسبت به حالت موجود کاهش و با کاهش عرض مسیر در سناریوی C3D1O2 زمان تخلیه افزایش یافته است.

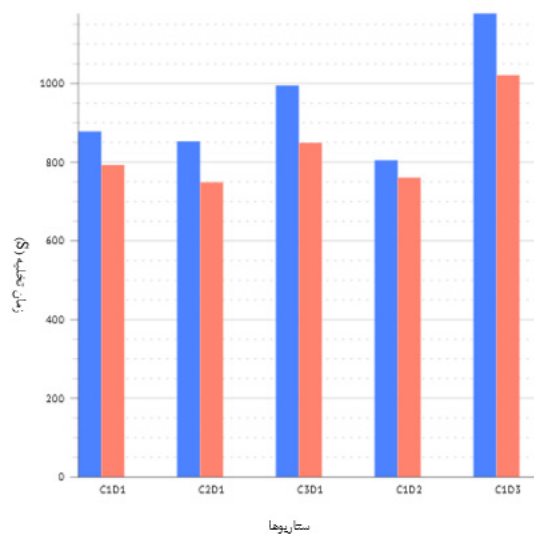
نمودار تصویر ۵ به منظور مقایسه ی بهتر زمان‌های بدست آمده ی سناریوهای تدوین شده برای تأثیر عرض مسیر خروج اضطراری ترسیم شده، ستون آبی‌رنگ نشان دهنده ی حداقل زمان تخلیه، ستون نارنجی رنگ نشان دهنده ی میانگین زمان تخلیه و رنگ زرد نشان دهنده ی حداکثر زمان می‌باشد. محور افقی سناریوهای مدل‌سازی شده و محور عمودی زمان تخلیه بر حسب ثانیه می‌باشد.

هدف ۴: تعیین تأثیر ابعاد درب‌های خروج اضطراری بر زمان تخلیه در بیمارستان

با افزایش ابعاد درب زمان خروج آخرین نفر که نشان دهنده پایان تخلیه ساختمان می‌باشد کاهش و با کاهش



شکل ۶: نمودار مقایسه‌ی زمان‌های خروج اولین نفر، آخرین نفر و میانگین زمان خروج در سناریوهایی با ابعاد درب‌های خروج متفاوت



شکل ۷: نمودار مقایسه زمان تخلیه در سناریوها در وجود یا عدم وجود موانع برحسب ثانیه

مربوط به مدلسازی بعد از چیدمان موانع نشان می‌دهد.

بحث

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر برخی ویژگی‌های

تصویر ۷ نمودارهای حداکثر زمان تخلیه در سناریوهای تعریف شده را در صورت وجود و عدم وجود موانع را مقایسه می‌کند. که در آن رنگ نارنجی مدل سازی سناریوها در حالت مسیرهای بدون مانع و رنگ آبی

جدول ۱: زمان تخلیه در سناریوهایی با عرض مسیر متفاوت برحسب ثانیه

تغییر نسبت به CID102 (%)	زمان خروج بر حسب رفتار WHEELCHAIR				زمان خروج بر حسب STAFF رفتار				زمان خروج بر حسب SCORT رفتار				زمان خروج بر حسب BED رفتار				زمان خروج بر حسب ALONE رفتار		میانگین زمان خروج	زمان خروج اولین نفر	زمان خروج آخرین نفر	سناریو
	۲۴۶.۴	۵۶۹	۴۲	۵۴۴	۷۹۳	۴۷۴	۳۳۸.۸	۵۸۵	۲۱۶	۴۲۸.۵	۷۹۱	۷۸	۱۳۳.۱	۴۴۹	۱۷	۲۹۸.۷	۷۹۳	۱۷	CID102			
% ۹.۸	۲۴۱	۶۲۳	۴۲	۵۵۳.۵	۷۴۹	۴۷۹	۴۱۴.۷	۶۶۷	۳۱۱	۴۵۱.۸	۷۴۶	۷۹	۱۳۵.۱	۳۹۹	۱۷	۳۳۱.۲	۷۴۹	۱۷	C2D102			
% ۱۷.۹	۲۵۲.۶	۶۸۸	۴۲	۶۰۰.۸	۸۴۹	۵۲۸	۴۶۲.۴	۶۹۱	۳۴۳	۴۶۴.۴	۸۴۶	۷۹	۱۳۷.۷	۴۶۹	۱۷	۳۵۹.۴	۸۴۹	۱۷	C3D102			

جدول ۷: زمان تخلیه در سناریوهایی با ابعاد درب مسیر متفاوت برحسب ثانیه

تغییر نسبت به CID102 (%)	WHEELCHAIR			STAFF			SCORT			BED			ALONE			میانگین زمان خروج	زمان خروج آخرین نفر	زمان خروج اولین نفر	سناریو
-	۲۴۶.۴	۵۶۹	۴۲	۵۴۴	۷۹۳	۴۷۴	۳۲۸.۸	۵۸۵	۲۱۶	۴۲۸.۵	۷۹۱	۷۸	۱۳۳.۱	۴۴۹	۱۷	۲۹۸.۷	۷۹۳	۱۷	CID102
%14.4	۲۳۰	۶۵۷	۴۲	۵۰۸	۷۶۱	۴۲۲	۴۶۵.۲	۶۶۱	۳۷۵	۴۲۴.۲	۷۵۷	۸۳	۱۳۳.۸	۴۱۹	۱۷	۳۴۱.۸	۷۶۱	۱۷	CID202
%15.6	۲۴۷	۶۲۳	۴۲	۵۸۳.۱	۱۰۱۶	۴۲۵	۴۳۰.۴	۷۲۴	۳۱۰	۵۱۷.۶	۱۰۲۱	۸۲	۱۳۳.۱	۴۱۷	۱۷	۳۴۵.۲	۱۰۲۱	۱۷	CID302

جدول ۸: زمان تخلیه در سناریوهای بدون مانع و دارای مانع بر حسب ثانیه

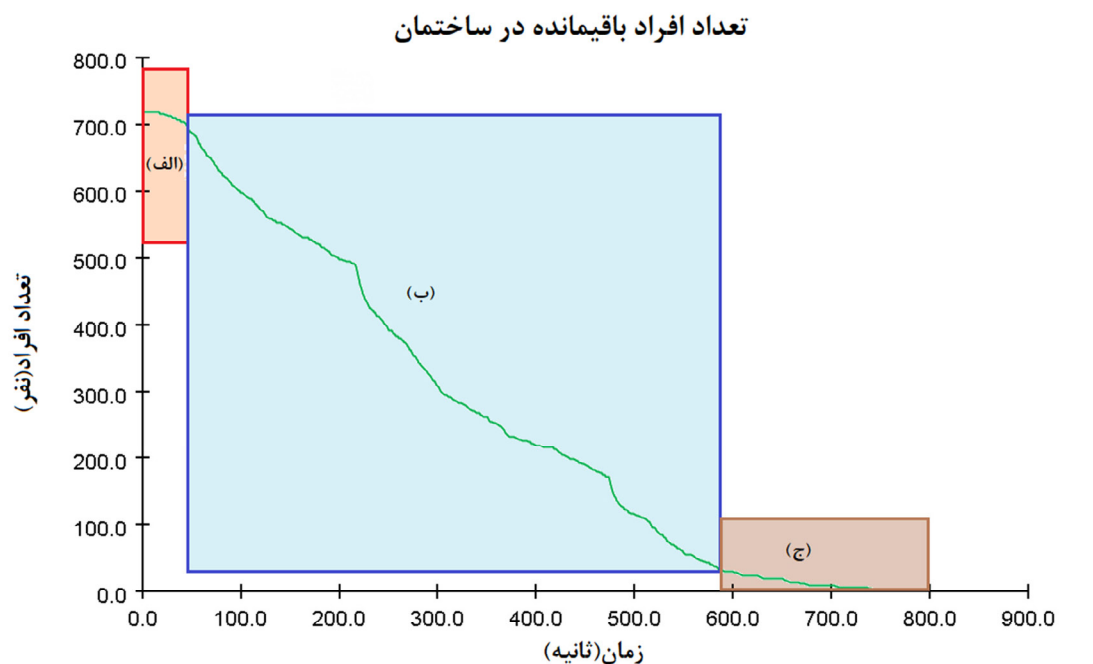
تغییر نسبت CIDI01 به (%)	میانگین زمان خروج (ثانیه)	WHEELCHAIR			STAFF			زمان خروج بر حسب رفتار			SCORT			BED			زمان خروج بر حسب رفتار			ALONE			میانگین زمان خروج	زمان خروج اولین نفر	سناریو
		زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار	زمان خروج بر حسب رفتار					
-	۳۴۷	۲۶۸٫۷	۷۳۱	۴۱	۵۹۸٫۵	۸۵۲	۴۷۶	۴۲۰٫۹	۷۴۳	۲۶۷	۵۰۷٫۱	۸۷۸	۷۸	۱۴۱	۴۶۰	۱۷	۳۴۷٫۷	۸۷۸	۱۷	CIDI01					
%-۱۴	۲۹۸٫۷	۲۶۶٫۴	۵۶۹	۴۲	۵۴۴	۷۹۳	۴۷۴	۳۲۸٫۸	۵۸۵	۲۱۶	۴۲۸٫۵	۷۹۱	۷۸	۱۳۳٫۱	۴۴۹	۱۷	۲۹۸٫۷	۷۹۳	۱۷	CIDI02					
%-۶٫۶	۳۲۴	۲۷۶٫۸	۷۱۷	۴۲	۵۵۷	۸۲۹	۴۱۶	۳۷۳٫۶	۷۴۴	۲۱۵	۴۹۶٫۹	۸۵۳	۷۹	۱۴۲٫۸	۴۵۲	۱۷	۳۲۴٫۳	۸۵۳	۱۷	C2DI01					
%-۴٫۶	۳۳۱٫۲	۲۴۱	۶۲۳	۴۲	۵۵۲٫۵	۷۴۹	۴۷۹	۴۱۴٫۷	۶۶۷	۳۱۱	۴۵۱٫۸	۷۴۶	۷۹	۱۳۵٫۱	۳۹۹	۱۷	۳۳۱٫۲	۷۴۹	۱۷	C2DI02					
% ۱٫۷	۳۵۳	۳۰۰٫۱	۷۹۳	۴۳	۶۲۲٫۵	۹۷۳	۴۵۸	۴۰۷٫۵	۸۵۳	۲۱۲	۵۵۴٫۱	۹۹۵	۷۹	۱۴۷٫۸	۴۹۰	۱۷	۳۵۳٫۸	۹۹۵	۱۷	C3DI01					
% ۳٫۶	۳۵۹٫۴	۲۵۲٫۶	۶۸۸	۴۲	۶۰۰٫۸	۸۴۹	۵۲۸	۴۶۲٫۴	۶۹۱	۳۴۳	۶۶۴٫۴	۸۴۶	۷۹	۱۳۷٫۷	۴۶۹	۱۷	۳۵۹٫۴	۸۴۹	۱۷	C3DI02					
% ۸٫۴	۳۱۷٫۷	۲۶۵٫۱	۷۱۸	۴۲	۵۴۳٫۷	۷۹۵	۴۱۳	۳۶۸٫۳	۷۳۲	۲۱۹	۴۷۳٫۲	۸۰۵	۸۳	۱۴۲٫۵	۵۸۷	۱۷	۳۱۷٫۷	۸۰۵	۱۷	CID201					
%-۱٫۵	۳۴۱٫۸	۳۳۰	۶۵۷	۴۲	۵۰۸	۷۶۱	۴۲۲	۴۶۵٫۲	۶۶۱	۳۷۵	۴۲۲٫۲	۷۵۷	۸۳	۱۳۳٫۸	۴۱۹	۱۷	۳۴۱٫۸	۷۶۱	۱۷	CID202					
% ۱۵٫۳	۴۰۰٫۲	۲۶۵٫۸	۷۱۴	۴۲	۹۶۹٫۸	۱۱۴۷	۴۷۹	۵۰۵٫۴	۸۷۹	۳۶۰	۶۱۵٫۸	۱۱۷۸	۸۲	۱۴۱٫۸	۴۵۶	۱۷	۴۰۰٫۲	۱۱۷۸	۱۷	CID301					
%-۰٫۵	۳۴۵٫۲	۲۴۷	۶۲۳	۴۲	۵۸۳٫۱	۱۰۱۶	۴۲۵	۴۲۰٫۴	۷۲۴	۳۱۰	۵۱۷٫۶	۱۰۲۱	۸۲	۱۳۳٫۱	۴۱۷	۱۷	۳۴۵٫۲	۱۰۲۱	۱۷	CID302					

نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش یا افزایش زمان کلی تخلیه دارد. بنابراین طراحی مناسب مسیرهای خروج و مدیریت آن در حین بهره‌برداری به‌طور معنی‌داری زمان تخلیه را بهبود می‌بخشد و می‌تواند ایمنی کاربران فضا را افزایش دهد. آزمون تعقیبی Tukey هم اختلاف معنادار بین سناریوها را تایید کرد. این نتایج بیانگر آن است که عرض درب و وجود موانع نقش بیشتری در زمان تخلیه کامل دارند و سناریوهایی با باریک‌ترین درب‌ها بیشترین زمان تخلیه را تجربه می‌کنند.

در یک نمودار کلی ارتباط تعداد افراد خارج شده از ساختمان از زمان شروع تخلیه می‌توان کل روند تخلیه را به سه زمان مختلف تقسیم نمود (تصویر ۸). در مراحل اولیه تخلیه (الف) که با رنگ قرمز مشخص شده است نمودار از یک شیب بسیار کم برخوردار است به این معنی که تعداد افراد خارج شده نسبت زمان از مقدار اندکی برخوردار است. دلیل این موضوع می‌تواند زمان پیش از تخلیه برای افراد و طولانی بودن راهروها از موقعیت اولیه قرارگیری افراد تا خروجی نهایی و رسیدن به نقاط ایمن (خارج از ساختمان) باشد. بخش دوم روند تخلیه (ب) که با رنگ

مسیرهای خروج یک بیمارستان شامل عرض مسیرها، ابعاد درب‌های مسیر خروج و موانع موجود در آن‌ها بر زمان تخلیه در شرایط اضطراری انجام شد. در این بخش به تجزیه و تحلیل زمان تخلیه در ده سناریوی مدل‌سازی شده از ساختمان یک بیمارستان سه طبقه تمرکز می‌شود و تأثیر سه پارامتر مهم معماری یعنی ابعاد درب‌های خروج، عرض مسیرهای خروج و موانع موجود مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای هر سناریو سه زمان مربوط به زمان خروج اولین نفر، میانگین زمان خروج و زمان خروج آخرین نفر که نشان‌دهنده اتمام فرایند تخلیه می‌باشد به دست آمد. زمان خروج اولین نفر برای همه‌ی سناریوها مقدار ثابتی به دست آمد و معیار سناریوها زمان خروج آخرین نفر می‌باشد. برای بررسی معنی‌داری تفاوت میانگین زمان تخلیه در سناریوهای مختلف، آزمون ANOVA یک‌طرفه بر اساس ۱۰ تکرار برای هر سناریو انجام شد. نتایج نشان داد اختلاف بین سناریوها بسیار معنی‌دار است ($p < 0.001$). این یافته بیانگر آن است که تغییر در شرایط طراحی (از جمله عرض درب‌ها، مسیرهای خروج و موانع)



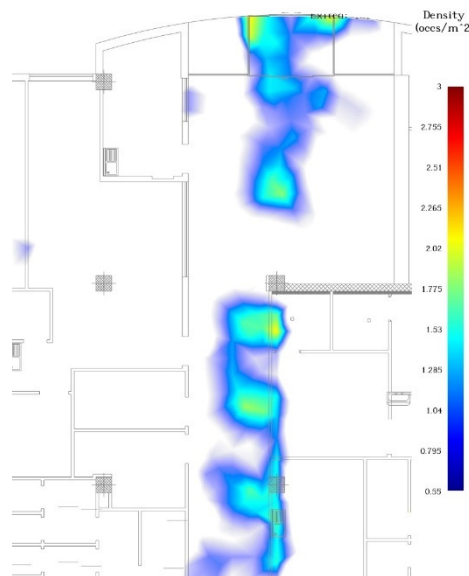
شکل ۸: نمودار تعداد افراد خارج شده از ساختمان نسبت به زمان (نفر/ثانیه)

رابطه مستقیمی بین افزایش عرض مسیرهای افقی خروج و کاهش زمان تخلیه کامل کاربران در مواقع بحران وجود دارد. با افزایش ۱۰ درصد عرض مسیر خروج در سناریوی C1D1O1 زمان تخلیه نسبت به سناریوی C1D1O1 که مربوط به حالت موجود می‌باشد، ۲۵ ثانیه کمتر شده است. به عبارت دیگر کاهش زمان تخلیه ۲۸۵ درصد می‌باشد. با کاهش ۱۰ درصد عرض مسیر در سناریوی C3D1O1، زمان تخلیه نسبت به سناریوی C1D1O1، ۱۱۷ ثانیه افزایش یافته است. در واقع زمان تخلیه ۱۳۳۲ درصد افزایش یافته است. بررسی نقشه‌های حرارتی تراکم افراد در راهروها نیز تایید می‌کند که افزایش عرض راهروها تاثیر فراوانی در کاهش تراکم دارد و این موجب می‌گردد که حرکت روان‌تر و عاری از برخورد و فشار بوده و موجب کاهش استرس و وحشت گردد. تصاویر شماره ۹ و ۱۰ به ترتیب مربوط به سناریوهای C2D1O2 و C3D1O2 در ثانیه ۱۳۷ از شروع تخلیه را نشان می‌دهد. در این تصاویر که نقشه حرارتی تراکم جمعیت در راهروی منتهی به خروجی شمالی بیمارستان در یک زمان واحد را نشان می‌دهند، افزایش تراکم و ازدحام متناسب با کاهش عرض راهرو مشهود است. در این دو سناریو سایر پارامترها یکسان هستند.

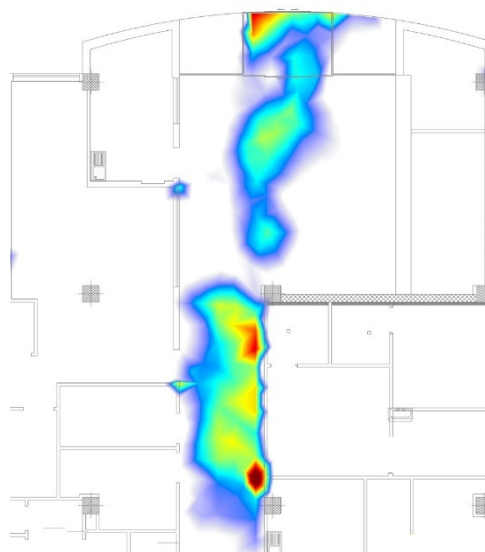
آبی مشخص شده است همه خروجی‌ها تقریباً با حداکثر ظرفیت خود کار می‌کنند. در این مرحله تراکم در پشت خروجی‌ها شکل گرفته است و افراد زیادی متناسب با موقعیت اولیه قرارگیری‌شان به خروجی مربوطه رسیده‌اند و شیب نمودار تعداد افراد خارج شده از ساختمان نسبت به زمان در حدود ۱۰٪ است. مرحله سوم (ج) روند تخلیه که با رنگ قهوه‌ای مشخص شده است نیز از یک شیب نسبتاً کم برخوردار است. بررسی نقشه‌های حرارتی تراکم افراد در زمان‌های مختلف نشان داد که دلیل وجود این مرحله در روند تخلیه عرض نامناسب راه‌پله و خروجی جنوب‌شرقی بنا و فاصله زیاد سایر خروجی‌ها از آن است که باعث ازدحام زیاد افراد شده است این درحالی است که سایر خروجی‌ها عملاً در این محدوده زمانی بلااستفاده هستند و افراد گیرافتاده در خروجی جنوب‌شرقی به علت فاصله زیاد تا خروجی‌های دیگر تمایلی به تغییر مسیر خود ندارند.

عرض مسیرهای افقی خروج

نتایج شبیه‌سازی سه سناریو مدل‌سازی شده جهت تعیین تأثیر عرض مسیرهای افقی خروج اضطراری بر زمان تخلیه فرضیه اصلی را تأیید می‌کند. به این صورت که



شکل ۹:



شکل ۱۰:

تخلیه را به همراه دارد. با افزایش عرض مسیرهای خروج اضطراری، عواملی از قبیل عدم وجود تراکم زیاد در جلوی درب‌ها، روانی حرکت و امکان عبور آسان‌تر تجهیزات حمل افراد مثل ویلچر و برانکارد سبب خواهد شد تا تأثیر سناریوی C2D1O1 نمایان گردد.

ابعاد درب‌های خروج

اعداد به‌دست آمده نشان داد با افزایش ابعاد درب‌های خروج اضطراری مثل حالت بررسی شده در سناریوی C1D2O1 نسبت به حالت موجود C1D1O1، زمان تخلیه از ۸۷۸ ثانیه به ۸۰۵ کاهش یافته است. می‌توان گفت کاهش زمان تخلیه با افزایش ابعاد درب‌های خروج اضطراری ۸۳۱ درصد می‌باشد (۲۳). در سناریوی C1D3O1 که ابعاد درب خروج اضطراری ۱۰ درصد کمتر از حالت موجود در نظر گرفته شده است، زمان تخلیه نسبت به حالت موجود ۳۰۰ ثانیه افزایش یافته است، یعنی ۳۴۱۶ درصد.

وی‌ها^۱ و جورج لیکوترافیتیس^۲ در مطالعه خود از

در مطالعه اسماعیل ضرغامی و مهدی ریسمانیان با هدف بررسی تأثیر متغیرهای معماری بر زمان تخلیه کلاس درس نیز نتایجی مشابهی به دست آمده بود با این تفاوت که در این پژوهش با توجه به مقررات ملی ساختمان ایران، عرض خروج در سه حالت ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت که همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، افزایش عرض مسیر خروج باعث کاهش زمان تخلیه شده بود. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر همپوشانی زیادی با مطالعه وایو و همکارانش دارد (۱۶). آن‌ها در بررسی‌های خود متوجه شدند که بهینه‌سازی مسیر، زمان تخلیه را ۱۰٫۵۸ درصد کاهش داده و زمان انتظار را در مناطق با تراکم بالا کوتاه می‌کند.

کاهش عرض مسیرهای خروج می‌تواند موجب محدودیت و ایجاد مشکلاتی در حرکت دستگاه‌های کمکی حمل بیماران و در نتیجه افزایش زمان تخلیه شود. در حالی که در حالت افزایش عرض مسیر امکان حرکت این دستگاه‌های کمکی و متصدی مربوط به آن‌ها آسان‌تر و سریع‌تر خواهد بود. کاهش عرض مسیرهای خروج سبب تراکم و ازدحام جمعیت در آن مسیر و برخورد افراد با یکدیگر و یا تجهیزات حمل بیمار شده و افزایش زمان

1. Vi Ha
2. George lykotrafitis

مدلسازی مبتنی بر عامل برای تأثیر معماری پیچیده ساختمان بر حرکت ناهم‌هنگام جمعیت در طول تخلیه فوری یک ساختمان چند طبقه چند اتاقه را بررسی کردند. تفاوت این مطالعه با پژوهش حاضر در نظر نگرفتن دسته‌بندی رفتارها برای افراد ساختمان بود. با افزایش ابعاد درب‌های خروج اضطراری زمان تخلیه کاهش می‌یابد و علت آن افزایش فشار در خروجی و افزایش اصطکاک بین عابران پیاده است که باعث اختلال در تحرک جمعیت و مسدود شدن خروجی‌ها می‌شود. همچنین، افزایش زمان تخلیه می‌تواند به دلیل مشکلات مربوط به عبور تجهیزات حمل بیمار که ابعاد بزرگتری نسبت به ابعاد درب خروج اضطراری دارند، اتفاق بیفتد (۲۴).

موانع موجود در مسیرهای مشترک خروج

یکی از نوآوری‌های این مطالعه نسبت به مطالعات قبلی، بررسی تأثیر موانع موجود در مسیرهای مشترک خروج بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی پنج سناریو در دو حالت بدون مانع و با جاگذاری موانع که قبلاً اندازه‌گیری و محل آن‌ها روی نقشه مشخص شده بود، می‌توان دریافت که حداکثر زمان تخلیه در سناریوهای بدون مانع نسبت به سناریوهایی که موانع مسیرها حذف شده بود کاهش یافته است. موانع موجود در مسیر امکان عبور و حرکت تجهیزات حمل بیمار مثل ویلچر و برانکارد را سخت‌تر و با کاهش عرض مسیر، ظرفیت مسیر را برای عبور این تجهیزات و افراد کمتر می‌کند. بنابراین این موانع باعث افزایش زمان تخلیه می‌شوند.

موضوع موانع موجود در مسیرهای تخلیه نه تنها مرتبط با مرحله طراحی معماری است بلکه ارتباط مستقیم با مدیریت و بهره‌برداری پروژه‌ها را دارد. پژوهش حاضر که تأثیر موانع موجود در مسیرهای مشترک خروج را بر افزایش زمان تخلیه به اثبات می‌رساند تأکید می‌کند که در راستای رفع این مشکل و با توجه به نتایج مطالعه ژو و همکاران (۴)، رهبری آینده‌نگر، مدیریت از بالا، نظارت مستمر، همکاری موثر از طریق مدیریت از بالا به پایین و آموزش پرسنل از الزامات و عوامل اصلی پایش

پایدار مسیرهای خروج خواهند بود.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعه ریسمانیان و ضرغامی نشان می‌دهد که اگرچه بهینه‌سازی ویژگی‌های هندسی مسیرهای خروج در بیمارستان می‌تواند منجر به کاهش زمان تخلیه در بازه‌ای حدود ۳ تا ۸ درصد شود اما در ساختمان‌های بلندمرتبه با جمعیت دارای توانایی حرکت متفاوت، راهکارهای صرفاً کالبدی یا مدیریتی به تنهایی اثربخشی محدودی دارند. نتایج ریسمانیان و ضرغامی نشان داد که تنها رویکردهای ترکیبی، نظیر تلفیق نصب رمپ با استراتژی‌های مدیریتی قادر به کاهش زمان تخلیه تا ۳۰ درصد هستند. این مقایسه بیانگر آن است که هرچه ناهمگونی جمعیت و پیچیدگی حرکت افزایش می‌یابد، ضرورت استفاده از راهکارهای چند بعدی در طراحی و مدیریت تخلیه اضطراری پررنگ‌تر می‌شود (۱۸).

محدودیت‌های پژوهش

اگرچه نتایج این پژوهش می‌تواند در بهبود مدیریت مسیرهای خروج بیمارستان‌ها در شرایط اضطراری مفید واقع شود، اما باید به محدودیت‌های آن نیز توجه داشت. نخست آنکه این مطالعه صرفاً بر اساس شبیه‌سازی رایانه‌ای با نرم‌افزار Pathfinder انجام گرفته است و امکان دارد رفتار واقعی افراد در شرایط بحرانی با آنچه در شبیه‌سازی فرض می‌شود، تفاوت‌هایی داشته باشد. دوم، مطالعه حاضر به‌صورت موردی بر روی بیمارستان شهید مدنی آذرشهر انجام شده است؛ بنابراین تعمیم نتایج به سایر بیمارستان‌ها با ساختار معماری و شرایط متفاوت باید با احتیاط صورت گیرد.

از سوی دیگر، عوامل انسانی و روان‌شناختی مانند اضطراب، ترس، ازدحام یا رفتارهای پیش‌بینی‌ناپذیر افراد در شرایط واقعی، در مدل شبیه‌سازی لحاظ نشده است. همچنین، پژوهش حاضر شرایط محیطی را به‌صورت ایستا و بدون ملاحظات بحران‌های ثانویه (مانند قطع برق، مسدود شدن مسیرها یا آسیب ناشی از زلزله و آتش‌سوزی) در نظر گرفته است که می‌تواند بر نتایج

خروج و ابعاد درب‌های خروج اضطراری به طور قابل توجهی زمان تخلیه را کاهش می‌دهد. به طوری که با افزایش ۱۰ درصدی این پارامترها زمان تخلیه به ترتیب ۲٫۸۵ درصد و ۸٫۳۱ درصد کاهش یافت. همچنین، حذف موانع موجود در مسیرهای خروج نیز نقش مهمی در کاهش زمان تخلیه دارد. از سوی دیگر، کاهش عرض مسیرها و ابعاد درب‌ها و وجود موانع منجر به افزایش زمان تخلیه می‌شوند که می‌تواند در شرایط اضطراری تأثیر منفی بر ایمنی و کارایی تخلیه داشته باشد. در این مطالعه اعتبار سنجی با داده‌های واقعی از مانور در بیمارستان با جمعیت ۶۰ نفر و به نسبت‌های مورد بحث در پژوهش انجام شد و نتایج نشان داد که مدل‌سازی توانسته با اختلاف کمتر از ۱۰٪ نتایج مانور واقعی را بازتولید کند و می‌توان به نتایج پژوهش اعتماد کرد.

یافته‌های این مطالعه علاوه بر ارائه شواهد علمی در زمینه مدیریت بحران، می‌تواند به‌طور مستقیم در طراحی معماری بیمارستان‌ها و همچنین بازنگری استانداردهای ایمنی و بهداشتی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد و عرض مسیرهای خروج تأثیر معناداری بر کاهش زمان تخلیه اضطراری دارد؛ بنابراین معماران و طراحان می‌توانند از این شواهد در بهینه‌سازی جانمایی خروجی‌ها، جلوگیری از ایجاد گلوگاه‌ها و طراحی راهروها و درهای اضطراری استفاده کنند.

از سوی دیگر، این پژوهش می‌تواند مبنایی برای اصلاح و ارتقای آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ملی ساختمان و دستورالعمل‌های وزارت بهداشت باشد تا حداقل الزامات عرض، تعداد و جانمایی مسیرهای خروج در طراحی بیمارستان‌ها بازنگری و تقویت شود. همچنین نتایج مطالعه در پروژه‌های بازسازی و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود نیز کاربرد دارد و می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران کمک کند تا نقاط ضعف احتمالی مسیرهای خروج را شناسایی و اصلاح نمایند.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که توجه به اصول طراحی ایمن مسیرهای خروج نه تنها موجب افزایش سطح آمادگی بیمارستان‌ها در برابر حوادث

تأثیرگذار باشد. نهایتاً، فقدان داده‌های میدانی و مانور واقعی تخلیه یکی دیگر از محدودیت‌های مطالعه به شمار می‌آید، چراکه نتایج بیشتر بر اساس داده‌های فرضی و اطلاعات ساختمانی به دست آمده‌اند.

در این پژوهش بدون توجه به کارایی مصالح در مدت زمان تخلیه اقدام به شبیه‌سازی رفتار کاربران شده است، در صورتی که برآورد زمانی دقیق زمان تخلیه کافی می‌تواند براساس هر پروژه برحسب نوع مصالح و ویژگی‌های معماری ساختمان متفاوت باشد و شایسته است در پژوهش‌های آینده به آن پرداخته شود.

برای بررسی‌های بیشتر پیشنهاد می‌شود از آزمایش‌های تجربی نیز جهت بررسی تأثیر انواع متغیرها استفاده گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود در حین مدل‌سازی، تأثیر سایر عوامل مثل میزان روشنایی مسیر و تابلوهای راهنما نیز مورد بررسی قرار گیرد. در پژوهش‌های آینده می‌توان همزمان با بررسی تأثیر این متغیرها اثر آموزش بر روی رفتار کاربران را نیز مورد بررسی قرار داد.

یکی از محدودیت‌های این پژوهش، استفاده از نسخه v2021.3.0901 نرم‌افزار Pathfinder است. هرچند این نسخه برای حفظ ثبات مدل‌سازی و تکرارپذیری نتایج در کل فرایند تحقیق ثابت نگه داشته شد، اما نسخه‌های جدیدتر نرم‌افزار شامل بهبودهای الگوریتمی و رفع برخی نواقص هستند که ممکن است بر رفتار عامل‌ها و خروجی شبیه‌سازی تأثیر بگذارند.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، مدل حاضر با نسخه‌های جدید Pathfinder بازتولید و تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات نسخه‌ای انجام شود. همچنین، مقایسه نتایج با سایر پلتفرم‌های شبیه‌سازی عامل‌محور می‌تواند به افزایش اعتبار و تعمیم‌پذیری یافته‌ها کمک کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش که با هدف بررسی تأثیر ویژگی‌های مسیرهای خروج اضطراری بیمارستان بر زمان تخلیه انجام شد و یافته‌ها نشان داد که افزایش عرض مسیرهای

تأثیر مصالح ساختمانی و عوامل اضافی مانند روشنایی مسیر و تابلوهای راهنما بپردازند و همچنین نقش آموزش کاربران در بهبود رفتار تخلیه را مورد مطالعه قرار دهند. همچنین به منظور افزایش واقع‌گرایی مدل‌ها، پیشنهاد می‌گردد که در پژوهش‌های آتی نوع و شدت خطر، نواحی بحرانی، و نقش عوامل راهنما (از جمله پرستاران، تابلوها و پیام‌های هشدار) به عنوان متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گیرد.

REFERENCES

- Aliyari S. The Study of Education Based on Animation in Patient's Performance under Hemodialysis in Emergency Evacuation Selected Hospitals of Aja. *Military Caring Sciences Journal*. 2021;8(1):22-32.
- Bailey JH, Deshazo RD. Providing healthcare to evacuees in the wake of a natural disaster: opportunities to improve disaster planning. *The American journal of the medical sciences*. 2008;336(2):124-7.
- Barten DG, Fijten MH, Gaakeer MI, Klokman VW, Mortelmans LJ, van Osch F, et al. Three decades of hospital evacuations in the Netherlands: A scoping review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022;81:103252.
- Zhou Z, Zhang Y, Gou J, Kan N, Zhao F, Yao L, Hou S. Successful large hospital evacuation with 11 350 patients transferred in the 2021 Zhengzhou flood. *Disaster medicine and public health preparedness*. 2023;17:e434.
- Phattharapornjaroen P, Carlström E, Holmqvist LD, Sittichanbuncha Y, Khorram-Manesh A. Assessing Thai hospitals' evacuation preparedness using the Flexible Surge Capacity Concept and its collaborative Tool. *International Journal of Disaster Risk Science*. 2023;14(1):52-63.
- YADAV N, VISHWAKARMA G, SODANI PR, KABBINAHITHLU P, ANCHALIA P. Understanding the Hazard Profile and Disaster Preparedness Levels of NABH Accredited Hospitals in North India: Evidence from a Cross-sectional Survey 2016. *Journal of Clinical & Diagnostic Research*. 2021;15(5).
- Tekin E, Bayramoglu A, Uzkeser M, Cakir Z. Evacuation of hospitals during disaster, establishment of a field hospital, and communication. *The Eurasian journal of medicine*. 2017;49(2):137.
- Cova TJ, Johnson JP. A network flow model for lane-based evacuation routing. *Transportation research part A: Policy and Practice*. 2003;37(7):579-604.
- Yi W, Özdamar L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European journal of operational research*. 2007;179(3):1177-93.
- Zarghami;Rismanian . The effect of architectural variables on classroom evacuation time in emergency situations. *Haft Hesar environmental studies*. 68-59:(30)8;2020.
- Feliciani C, Murakami H, Shimura K, Nishinari K. Efficiently informing crowds-Experiments and simulations on route choice and decision making in pedestrian crowds with wheelchair users. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2020;114:484-503.
- Zou B, Lu C, Li Y. Simulation of a hospital evacuation including wheelchairs based on modified cellular automata. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020;99:102018.
- Zhu K, Yang Y, Shi Q. Study on evacuation of pedestrians from a room with multi-obstacles considering the effect of aisles. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2016;69:31-42.
- Wang, J., Luo, Y., Zhou, X., Zhao, W., Lei, Y., & Xie, W. (2025). Impact of assistance behavior on evacuation efficiency in high-rise hospital inpatient buildings: An agent-based simulation study. *Journal of Building Engineering*, 113780.
- Kim, Y., Kim, J., Kim, M., & Rie, D. (2024). A Study on Nursing Personnel Operations to Ensure Evacuation

- Safety during Medical Facility Disasters. Sustainability, 16(2), 838.
16. Wu, Y., Xia, J., & Haiyirete, X. (2025). Enhancing Disaster Resilience in Hospitals Through Flow Space-Optimized Evacuation Routes. Sustainability, 17(12), 5419.
17. Lin, Y., & Zhou, B. (2024). A numerical simulation-based solution for enhancing the safety evacuation of the high-rise complex in geriatric hospital. International Journal of Disaster Risk Reduction, 107, 104487.
18. Kwak J, Lees MH, Cai W, Pourghaderi AR, Ong ME. Estimating horizontal movement performance of patient beds and the impact on emergency evacuation time. Safety science. 2021 Feb 1;134:105038.
19. Standardization IOF. ISO 23601: Safety identification — Escape and evacuation plan signs. Geneva, Switzerland: ISO; 2009.
20. Association NFP. NFPA 101: Life Safety Code. Quincy, MA, USA: NFPA; 2021.
21. Council IC. International Building Code (IBC). Washington, D.C., USA2021.
22. Rismanian M, Zarghami E. Evaluation of crowd evacuation in high-rise residential buildings with mixed-ability population: combining an architectural solution with management strategies. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2022 Jul 1;77:103068.
23. Liu S, Yang L, Fang T, Li J. Evacuation from a classroom considering the occupant density around exits. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2009;388(9):1921-8.
24. Ha V, Lykotrafitis G. Agent-based modeling of a multi-room multi-floor building emergency evacuation. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2012;391(8):2740-