

Research Paper

Simulation of the Evacuation of Disabled People and War Veterans From Crowded Religious Places Using the Particle Swarm Optimization Algorithm



Shahrooz Soroush¹ , *Seyed Morteza Ghayoor Baghbani¹ 

1. Department of Management of Sacred and Religious Sites, Imam Reza International University (PBUH), Mashhad, Iran.



Citation Soroush, Sh., & Ghayoor Baghbani, S. M. (2026). Simulation of the Evacuation of Disabled People and War Veterans From Crowded Religious Places Using the Particle Swarm Optimization Algorithm. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 16(1):154-173. <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.938.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.938.1>

ABSTRACT

Background and objective Emergency evacuation management in buildings, especially crowded religious places, plays an important role in reducing potential casualties and injuries when a disaster occurs. Simulating people's behavior and crowd movement is an effective factor in the safe design of these places. In this regard, paying attention to the mobility conditions and needs of people with disabilities and war veterans is of particular importance in planning for their emergency evacuation. This study aimed to use the particle swarm optimization (PSO) algorithm to simulate and improve the evacuation process of pilgrims, especially people with disabilities and veterans, from Imam Reza Shrine, Mashhad, Iran.

Method In designing the evacuation model using the PSO algorithm, factors such as the conditions and mobility limitations of people with disabilities and veterans, the arrangement of environmental elements and equipment, obstacles on exit routes, and route guidance markers were considered. Then, the effect of changing the arrangement of environmental elements and adding lights to guide and evacuate people was examined.

Results The simulation showed that appropriate changes in the arrangement of environmental elements and the use of directional lighting could facilitate people's evacuation. The proposed model also enabled the examination of different evacuation scenarios, accounting for environmental characteristics and variations in people's movement. The PSO algorithm had suitable potential for modeling crowd behavior and identifying optimal evacuation routes in crowded religious places.

Conclusion The PSO algorithm can be used as a practical approach in simulating emergency evacuation and evaluating the design of religious spaces. Simultaneous consideration of the conditions of disabled people and veterans, environmental obstacles, and route guidance equipment can help evacuate people more quickly and safely and improve crisis management planning. The proposed model can be used in the design, assessment, and renovation of other crowded urban areas in Iran.

Keywords Particle swarm optimization (PSO), Behavioral simulation, Emergency evacuation, Disaster management

Article Info:

Received: 05 Mar 2025

Accepted: 06 May 2025

Available Online: 01 Apr 2026

* Corresponding Author:

Seyed Morteza Ghayoor Baghbani, Assistant Professor.

Address: Department of Management of Sacred and Religious Sites, Imam Reza International University (PBUH), Mashhad, Iran.

E-mail: ghayoor@ImamReza.ac.ir



Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Emergency evacuation simulation in buildings, especially in public and high-density spaces, plays a vital role in safety planning and building design assessment. The development of evacuation simulation models for various applications has been a key focus of recent research. Many of these models have utilized evolutionary computation methods, such as genetic algorithms (GA), estimation of distribution algorithms (EDA), and ant colony optimization (ACO). For example, [Garrett et al. \(2006\)](#) employed GA and EDA for the optimal placement of exits, while [Zong et al. \(2010\)](#) used ACO to model evacuation routes in mixed traffic. Among these approaches, particle swarm optimization (PSO) has garnered significant attention from researchers due to its simple structure and high efficiency. First introduced by [Kennedy and Eberhart \(1995\)](#), PSO is inspired by the collective behavior of birds and possesses the capability to accurately simulate human movement across various scenarios. This algorithm has been utilized to analyze human behavior, prevent crowd collisions, and optimize the interior design of buildings. In this study, a PSO-based framework was proposed for simulating emergency evacuation in high-traffic religious sites. By considering the specific needs of individuals with disabilities and veterans, this framework incorporates factors, such as environmental obstacles and collision avoidance mechanisms as objective functions within the model. The objective was to provide a solution for optimizing interior space design and enhancing safety under both normal and emergency conditions. This paper is organized as follows: section 2 reviews the details of the PSO algorithm and previous research; section 3 explains the proposed framework improvements and simulation scenarios, while the results are presented in section 4, and finally, section 5 provides a summary and suggestions for future research.

Materials and Methods

PSO-based simulation scheme

In line with recognizing the role and status of individuals with disabilities and veterans in the tourism industry, there is a critical need to provide specialized facilities and services for this demographic. With the increasing presence of disabled pilgrims and worshippers in the country's religious and holy sites, the necessity of addressing their specific needs is more apparent than ever; therefore, meeting the requirements of disabled tourists in these venues must

be prioritized. When designing spaces and facilities for individuals with disabilities and veterans, criteria, such as comfort, rapid and safe evacuation, and ensuring their security must be considered. Conventional design of spaces and buildings is primarily tailored to the majority of the population, which often leads to significant accessibility barriers for people with disabilities. This social group exhibits greater vulnerability, particularly during emergencies, such as earthquakes or fires; therefore, it is essential to provide appropriate strategies for their safe evacuation. Empirical estimates indicate that as a location becomes more crowded and enclosed, accessibility for individuals with disabilities and their ability to exit the premises become increasingly difficult. In this context, the social group of individuals with disabilities and veterans has a greater need for presence in religious sites, especially the Holy Shrine of Imam Reza (AS), to benefit from the tranquility of such spaces. Given the teachings of the Imams regarding the importance of the shrines' serenity for pilgrims, access for those in need must be facilitated. In recent research, scholars in the field of building design have proposed various criteria and standards to evaluate and measure the level of accessibility for people with disabilities.

Although issues related to accessible tourism have been researched in developed countries, accessible tourism for people with disabilities and the elderly has not yet been extensively explored in Iran ([Qobadian, 2016](#)). The central aim of this research is the use of artificial intelligence, specifically the PSO algorithm, to improve the pilgrimage experience of individuals with disabilities and veterans and to reduce potential risks during emergency situations. The PSO algorithm, introduced in 1995 by [Kennedy and Eberhart \(1995\)](#), formulates each potential solution as a particle in a multi-dimensional space and is recognized as an effective tool for solving optimization problems. This research aimed to provide strategies for the safe and optimal evacuation of individuals with disabilities and veterans in religious sites using this algorithm ([Equation 1](#)).

$$1. \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_D]^T$$

Each particle possesses its own position, velocity, and objective value, which is determined by the objective function. The new position of a particle is determined by leveraging its own experience and communication with other particles to move toward the desired solution. Before determining the new position, the velocity is first calculated; the particle's velocity at p_i at time $t+1$ is determined by [Equation 2](#).

$$2. v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 r_1 (p_{iBLS} - p_i(t)) + c_2 r_2 (p_{iBGS} - p_i(t))$$

Where, v_i and p_i represent the velocity and position of the i -th particle, respectively. w is the inertia weight of the previous velocity, p_{iBLS} is the best position based on personal experience (local best), and p_{BGS} is the global best position obtained by the swarm. c_1 and c_2 are parameters to control the influence of p_{BGS} and p_{iBLS} . r_1 and r_2 are random numbers selected from (0, 1) to provide diversity to the velocity. After calculating the velocity, the new position of the particle can be determined using Equation 3.

$$3. p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t+1)$$

In each iteration, every particle updates its velocity and position, and subsequently evaluates its objective value based on the objective function. Among all new objective values, p_{iBLS} and p_{BGS} may also be updated to steer the swarm toward the optimal solution. Since a particle is free to move in any possible direction, modifications must be implemented to ensure the simulation of human behavior is conducted successfully and realistically. Based on previous studies in the papers by Lin and Chen titled “Controlling crowd motions in computer graphics using the PSO mechanism” (Lin & Chen, 2007) and “Crowd control using swarm intelligence,” three primary factors must be adjusted: the first is applying constraints to particle movement to simulate human trajectory; the second is the simulation of obstacles; and the third is collision avoidance between obstacles and particles.

Particle movement

Referring to Figure 1, given that the evacuation simulation is conducted in a 2D space, we restrict the position and velocity of the particles to a 2D space, as Equation 4:

$$4. p_i = [p_{ix}, p_{iz}]^T, v_i = [v_{ix}, v_{iz}]^T.$$

In order to simulate human space and prevent particles from jumping beyond the reality of human movement, the velocity was divided into a direction component and a speed component; the direction component was used for decision-making regarding the particle's path, and the speed component was used to control the distance of each particle step. The update equation for the direction component is similar to the velocity update equation (Equation 5).

$$5. D_i(t+1) = wD_i(t) + c_1r_1(p_{iBLS} - p_i(t)) + c_2r_2(p_{BGS} - p_i(t))$$

In this equation, $p_{iBLS} - p_i(t)$, $p_{BGS} - p_i(t)$, are represented as unit vectors to indicate direction only. The other parameters are determined as in the standard PSO. By selecting the particles' direction, the new position of each particle can be determined by Equation 6.

$$6. p_i(t+1) = p_i(t) + S_i(t+1) \times D_i(t+1)$$

$S_i(t+1)$ is the speed component within the interval $[0, V_{max}]$. The maximum speed can be selected as the size of a single step or by other defined parameters. To simulate particle movement as human movement, the speed can be updated proportionally to the inverse of the particle's objective function value. This is derived from the reality that humans decrease their speed when approaching an obstacle. Because PSO searches for minima in the surrounding environment, the value of the objective function must increase when a particle approaches an obstacle so that the particle's speed decreases.

Objective function

In the papers by Cheng et al. titled “Controlling crowd motions in computer graphics using the PSO mechanism and crowd control using swarm intelligence” (Cheng et al., 2008), a cost function has been defined to evaluate the relationship between particles and other targets present in the search space. The cost value of particle p with target q is obtained by Equation 7.

$$7. Cost(p, q) = \exp \left(- \left(\frac{(p_x - q_x)^2}{(\delta_{px} + \delta_{qx})^2} + \frac{(p_z - q_z)^2}{(\delta_{pz} + \delta_{qz})^2} \right) \right) \quad (1)$$

In this equation, p_x and p_z represent the position of particle p . q_x and q_z represent the position of target q , and the range of particle p and object q denotes the area covered by the target. Since the target can be an obstacle, a destination, or other particles, the range will differ. For example, the range of a target measuring 20×40 is equivalent to the set $(\delta_{qx}, \delta_{qz}) = (10, 20)$. To represent the target, the range might encompass the entire search space. Among these modifiable parameters, the target is readily adjustable and controllable to fulfill diverse user needs, essentially defining the spatial structure of a religious venue or the arrangement of elements within a space. By establishing a cost function, the search space with minimum positions as targets can be achieved through the superposition of these exponential functions with similar or varied parameters. Consequently, the objective function is determined by Equation 8.

$$8. F_{obj}(p) = c_{obs} \times \max_{o \in O} (Cost(p, o)) + \frac{1}{Cost(p, q)}$$

O is the set of all obstacles, including structural obstacles of the space and other individuals present in the crowd, g represents a destination for the particle's forward movement, and cobs is a constant for the user to control the relative importance between obstacles and the destination. By observing the definition of the objective function, it can be seen that a particle will have a lower objective value when approaching destinations. On the other hand, when a particle approaches an obstacle, it makes no difference to the particle whether it encounters a wall or another individual in the crowd; in this case, the objective value increases. Under this cost function, PSO can be used to simulate an evacuation model from a building. Safe exits or safe zones can be modeled as destinations, while walls, furniture, and elements present in the space can be modeled as obstacles.

Another advantage of the scheme is that there is no need to add an additional model to incorporate new objects, and by controlling the introduced parameters, all objects can be modeled with other types of particles such as moving vehicles or larger entities. With appropriate parameter settings, the PSO-based simulation scheme can achieve its design objective, and particles can converge to the intended destination with a high probability along a reasonable path.

Collision avoidance

Although the objective function is designed to guide the particle around obstacles, there is still a possibility of the particle crossing obstacle boundaries or colliding with other particles or obstacles. To prevent this, the new particle position must be evaluated at each update to verify the feasibility of its occurrence; for this purpose, a validation mechanism has been described. An exponential function was used for the position validation mechanism, although other function families can be used depending on user preference.

The reason for selecting the exponential function is its ease of calculation and modification. The validation mechanism uses probabilities to determine the acceptance of a particle's newly calculated position (Equation 9).

$$9. Prob(f) = 1 - \frac{f}{e^{-k}} \quad (2)$$

In Equation 9, f is the cost of the newly calculated position, and k is a constant that allows the user to determine the validity of a particle near an obstacle.

Based on the validity probability function, a hard boundary is created when k=1 is chosen, because the probability of accepting the particle's position is zero if f=e-1, which means the particle and the obstacle will remain adjacent to each other based on the definition of Equation 1; therefore, collision with obstacles is avoided through the validation mechanism. Assuming the radii of the particle and the obstacle are 5 and 20, respectively, Figure 1 shows the probability of accepting the particle's position while it is near the obstacle. If the new position is not validated, a new direction—such as adding a random degree between -20 and +20—is added to the original goal, and the new position is tested again for validity; however, the position with the lower cost is selected as the particle's new position.

Improvements to the PSO-based evacuation framework

While the proposed simulation approach has addressed many challenges related to crowds in real-world spaces and particles in free space, several key issues remain that require further investigation. Among these challenges are the potential for a particle to become trapped and problems related to exiting the sight line. To resolve these challenges, two main solutions are proposed.

Local search

By examining the collision avoidance mechanism introduced by Lin and Chen in their papers titled "Controlling crowd movements in computer graphics using the PSO Mechanism and "Crowd Control with Swarm Intelligence" (Chen & Lin, 2009), a particle may be positioned very close to an obstacle and, when encountering non-circular obstacles, may become trapped and unable to find a suitable exit position. In this state, the particle might reach a specific location and remain there until the end of the simulation. To resolve this, improvements have been made to the local search. Local search is a common mechanism in PSO, which has also been utilized in the works of Lin and Chen to avoid collisions. However, the current search range is limited to between -20 and +20 degrees; while sufficient for circular obstacles, particles cannot find acceptable positions within this constraint when facing obstacles with sharp edges. Therefore, the local search range is gradually expanded to find a suitable path for continued movement. After calculating the DS via the original PSO, a direction is randomly selected from the ±20-degree range, and its validity is checked. If this direction is also ineffective, the process is repeated up to 20 more times. Finally, if all sampled directions are not acceptable, the search position will be evaluated

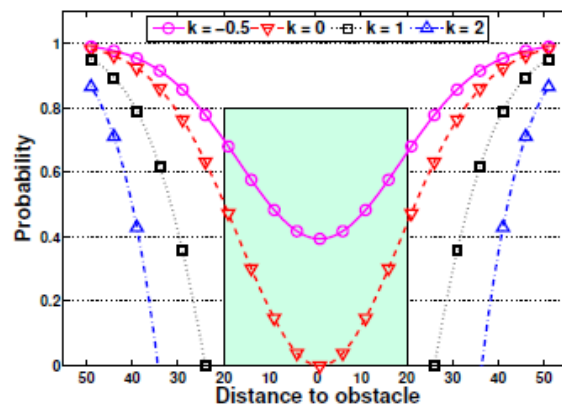


Figure 1. Schematic view of path optimization using the PSO algorithm, considering obstacle detection and collision probability analysis in urban environment

by adding the angle θ , or in other words, θ_2 and θ_3 . The search mechanism is designed to mimic human behavior toward obstacles, where a human attempts to find a way to continue movement, such as moving parallel to a wall until reaching a door or an exit. Consequently, the movement of trapped particles, based on this stepwise search, ultimately takes the form of movement along the edges of obstacles. As a result, the expanded local search space and the random sampling mechanism can provide particles with the opportunity to move and prevent oscillation between two points in the target space. These improvements in the local search can enhance the efficiency of the PSO-based evacuation framework and lead to significant improvements in future simulations.

Global best value update mechanism in the PSO algorithm

In the PSO algorithm, one of the key concepts is the updating of the global best information. In the original version of this algorithm, there are no obstacles in the search space, and particles can always update the global best information regardless of their spatial position. However, in the real world, the presence of various obstacles can lead to an inability to access accurate information. For example, if an obstacle is placed between a particle (human) and the position with the best objective value, they will be unable to perceive the position of the best particle. This phenomenon, known as the line-of-sight obstruction effect, necessitates modifying the update mechanism in PSO to align with real-world conditions. To model the line-of-sight obstruction effect in PSO, instead of directly sharing the global best information, each particle must retain only the best position that has appeared within its field of view up to that moment. In other words, information is updated only if a particle with a better target value

comes into the line of sight of another particle; that is, there must be no obstacle between them.

Figure 2 illustrates an example of the modified update mechanism. The description for Figure 2 assumes that the objective value of particle p1 is better than all other particles, such as p2 and p3; since p2 and p3 can see particle p1, they can maintain the position of p1 as the global best information. After particle p1 moves to a new position with a better objective value, only particle p2 can receive the new global best information, as p1p1 is still within its field of view. However, particle p3 cannot access the new information from p1. This mechanism is designed to simulate a situation in which individuals are unaware of the movement of a person located behind an obstacle. The modified computational steps for each particle in each iteration are as follows:

- 1- Finding a new acceptable position,
- 2- Calculating the objective value,
- 3- Updating the local best and global best information if necessary,
- 4- Updating the global best information of all particles within their sight line.

By implementing these significant improvements, the simulation framework can easily simulate human behaviors. To better understand the capabilities and efficiency of this framework, several practical examples will also be presented, demonstrating the new functionalities and increased accuracy in the simulations.

Consideration of individuals with disabilities

Identifying the specific needs of disabled pilgrims in the Razavi Holy Shrine can significantly improve the quality of services and facilitate this group's access to re-

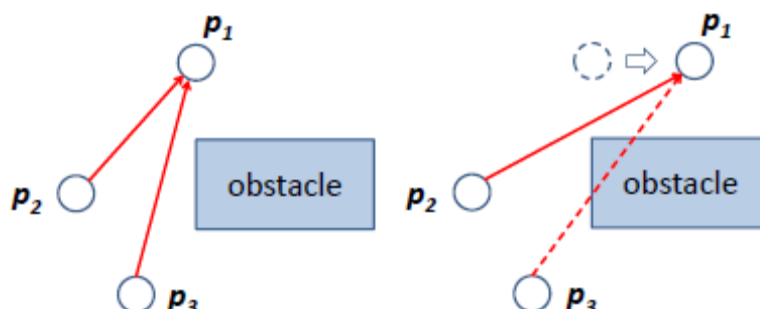


Figure 2. Modeling optimal path movement in urban spaces with obstacles: Application of the PSO algorithm in analyzing and predicting optimal passage while considering potential collisions

ligious facilities, positively and meaningfully impacting the pilgrims' mental health and quality of life (Basouli & Derakhsh, 2022), especially for those facing mobility challenges (Hosseini & Yazdani, 2021). Investigations and observations conducted in the Goharshad Mosque courtyard within the Razavi Holy Shrine and other sacred sites indicate that approximately 3% of the population present in these locations have some form of disability. Of these individuals, about 33% suffer from physical disabilities, 33% have visual impairments, and the remaining 33% suffer from both types of limitations. These statistics underscore the necessity of addressing the specific needs of these individuals when designing and optimizing public spaces. PSO, considering the percentage of individuals with disabilities: in the optimization of the Particle Swarm model, the speed of 2% of this population is considered at 40% of normal speed, and the vision of 2% of the community is considered at 50% of the vision of a normal individual. These assumptions are applied to simulate the behavior of these individuals in the defined environment more accurately, and the speed and line of sight of each particle are proportionally reduced according to these limitations.

Results

In this section, the Goharshad Mosque area is investigated and simulated. The designed map is presented in Figure 3. The overall area of the mosque is defined with dimensions of 700×400 square meters, and the coordinates of this space are specified in the same figure. Each particle is considered as a circle with a radius of 5 units and a maximum velocity ($V_{max}=5$). The parameters used in the PSO algorithm are provided in Table 1. Furthermore, this research assumes that particles tend to move toward the global best objective value with higher priority than the observed local best position. For a more precise investigation, 50 particles are placed in each simulation

round, and the number of iterations required to reach the target is recorded. For each figure, one thousand simulation rounds are performed, and the average results are displayed in Table 2.

The standard deviation indicates the dispersion of iterations across all simulation rounds and assists in analyzing particle performance. Additionally, the paths generated by each particle during the simulation are shown in Figure 3. This visualization enables users to identify and improve the weaknesses of the area. The conclusions of these simulations can assist designers and public space administrators in designing and implementing better environments by taking into account the specific needs of individuals with disabilities. Moreover, the ability to record the simulation provides the possibility for a more detailed analysis and examination of particle behavior under various conditions.

Comparison of the impact of exit indicator lights

The simulation framework presented in this research allows for modifications to the internal courtyard obstacles as well as the exit doors. Furthermore, the capability to add exit indicator lights is available within this simulation environment. These lights provide valuable information regarding exit locations to individuals and play an essential role in facilitating the safe evacuation of people from hazardous areas. The indicator lights must be designed to clearly indicate the exit path. However, it is crucial that the placement of these lights is precisely determined; installing lights in locations that are not visible to individuals can render them effectively useless.

Simulation and results in the performed simulation

The location of the lights is modified to investigate their impact on evacuation speed. The indicator light is modeled as a stationary particle with a defined target value.

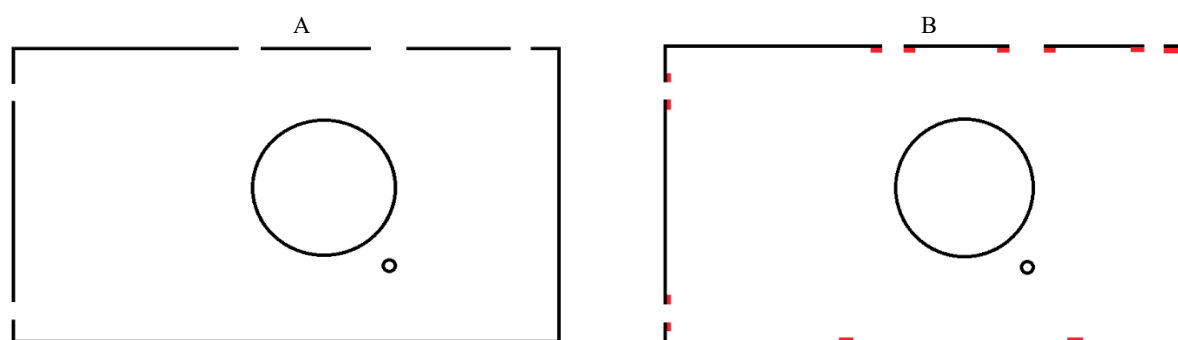


Figure 3. Simplified model of the holy courtyard including indicator lights

Any particle that enters the indicator light's field of view moves toward the light by improving its information regarding the best objective value. The simulation results clearly demonstrate the advantages of utilizing indicator lights. The average and worst-case iterations are observable in Figure 3, requiring approximately 100,000 iterations on average and 280,000 iterations in the worst case. By observing the paths generated during the evacuation process, it is evident that particles are attracted by the indicator lights and evacuate at a higher speed. Particles move toward the nearest light by following the evacuation indicators, which positively impacts the correct exit path. This experiment shows that the proposed framework is capable of simulating the presence of indicator lights without complicating the code structure.

Discussion

Given that validating evacuation maps in the real world is highly difficult and costly, evacuation simulation systems have become an important and irreplaceable tool for evaluating and testing these plans. Numerous studies have been conducted on the development and implementation of various evacuation scenarios, and evolutionary algorithms are typically used to obtain optimal solutions

for exits assignment, identify egress routes, and design building interior layouts. Human-behavior simulation, which is a critical topic in all related research, has been widely investigated, and many studies have employed PSO. One of the reasons for using PSO is the algorithm's ability to simulate human motion and avoid obstacles. However, PSO algorithms in prior research have often been complex and only suitable for specific, non-adaptive conditions without flexibility to accommodate changes in building structures. The research framework proposed in this study is capable of examining all necessary factors for simulating human evacuation scenarios.

These factors include human movement, obstacles, exit signage, and—particularly—individuals with mobility or visual impairments who have lower speed and reduced visibility compared with persons without such limitations. In the field observations conducted, one of the doors had been closed due to construction activities, and a scaffolding structure was installed within the mosque courtyard. The proposed framework in this study is able to account for these specific conditions and can provide appropriate evacuation solutions for users in different scenarios. To demonstrate the framework's capabilities, the courtyard of the Goharshad Mosque was selected as the case study site. The obtained

Table 1. PSO algorithm parameters

Parameter	ω	c_1	c_2	k	C_{obs}	V_{max}
Value	0.1	0.2	1.0	1.0	0.1	5

Table 2. Comparison of evacuation time with and without traffic lights

Figure	3a	3b
Average iterations	100870	70405
Worst-case iterations	280899	240542
Standard deviation	11200	9054

results indicate the effective performance of this framework under various conditions and its ability to provide evacuation routes for users, thereby improving the evacuation process and enabling appropriate measures to accelerate egress.

It should be noted that the challenges of simulating human behavior due to its high complexity require further research. Human behavior is influenced by various factors, such as psychological and physical stressors. For example, researchers have examined the impact of individuals' mental states on how they move. Persons with disabilities, injured individuals, or older adults exhibit movement behavior that differs from that of others; therefore, this study employs different PSO variants to achieve a more accurate simulation. Nevertheless, the correct simulation of collective human movement remains a challenging issue and will require further research in the future.

Conclusion

The proposed framework successfully modeled human behavior and the needs of persons with disabilities in the evacuation simulation of the Imam Reza holy shrine. The results demonstrated the significant impact of guidance lamps and the importance of algorithm adaptability in the presence of complex obstacles.

By providing an advanced simulation framework, this study has taken an effective step toward improving safe evacuation management in urban spaces and public buildings. The findings highlight the importance of this research in enhancing the efficiency of evacuation processes and increasing overall public safety. By analyzing the effects of multiple factors, such as exit guidance lamps and potential obstacles, this study enables designers and planners to support greater speed and safety in emergency conditions through the use of appropriate operational solutions.

Paying attention to the specific needs of individuals in crisis conditions, alongside an emphasis on human behavior and the role of psychological factors in decision-making, is another important aspect of this study. Examining the effects of the diversity of needs—particularly for vulnerable groups—can lead to the design of coherent and comprehensive approaches to improve evacuation conditions in public spaces.

Finally, it is recommended that future research focus on more accurate simulations and on validating this framework using real-world data. In addition, considering the role of human and social factors in evacuation processes can result in the development of more effective crisis management solutions. This study can serve not only as a pioneering reference

in the field of evacuation simulation, but also as a suitable foundation for future research in urban design and planning.

However, limitations, such as the lack of consideration of the psychological stress experienced by individuals with needs require further research. It is suggested that the effects of human factors such as anxiety and group behavior be examined in future PSO versions.

Research limitations and future recommendations

The limitations of this study include snowball sampling (with the possibility of sample homogeneity), limited access to senior managers of the holy shrine, and self-reporting bias in the questionnaire responses by experts, managers, faculty members, and individuals with disabilities. In addition, the geographic focus on Astan Qods Razavi and the holy shrine of the Eighth Imam requires caution when generalizing these findings to other regions. Future studies can reduce these challenges by using stratified sampling, combining quantitative and qualitative methods, and expanding the geographic scope.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were observed in this study. Since the research did not include any experiments on human or animal samples, no ethics approval code was required.

Funding

This article was extracted from the PhD dissertation of Shahrooz Soroush, approved by the Department of Management of Sacred and Religious Sites, [Imam Reza International University \(PBUH\)](#), Mashhad, Iran. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

All authors contributed equally to the conception and design of the study, data collection and analysis, interpretation of the results, and drafting of the manuscript. Each author approved the final version of the manuscript for submission.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

This Page Intentionally Left Blank



مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی تخلیه ایمن افراد دارای معلولیت و محدودیت حرکتی در اماکن مذهبی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

شهرز سروش^۱، مرتضی غیور باغبانی^۱

۱. گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه بین‌المللی امام رضا (علیه‌السلام)، مشهد، ایران.

**Citation** Soroush, Sh., & Ghayoor Baghbani, S. M. (2026). Simulation of the Evacuation of Disabled People and War Veterans From Crowded Religious Places Using the Particle Swarm Optimization Algorithm. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 16(1):154-173. <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.938.1>**doi** <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.938.1>

چکیده

زمینه و هدف: مدیریت تخلیه اضطراری در ساختمان‌ها، به‌ویژه اماکن مذهبی پرتردد، نقش مهمی در کاهش تلفات و آسیب‌های احتمالی هنگام وقوع بحران دارد. شبیه‌سازی رفتار افراد و حرکت جمعیت از عوامل مؤثر در طراحی ایمن این اماکن محسوب می‌شود. در این میان، توجه به شرایط حرکتی و نیازهای افراد دارای معلولیت و جانبازان در طراحی مسیرها و برنامه‌ریزی تخلیه اضطراری اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف پژوهش حاضر، ارائه چارچوبی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای شبیه‌سازی و بهبود فرایند تخلیه زائران، به‌ویژه افراد دارای معلولیت و جانبازان، از حرم مطهر رضوی بود.

روش: در این پژوهش، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای مدل‌سازی حرکت جمعی زائران و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تخلیه استفاده شد. در طراحی مدل، عواملی مانند شرایط و محدودیت‌های حرکتی افراد دارای معلولیت و جانبازان، نحوه چینش عناصر و تجهیزات محیطی، موانع موجود در مسیرهای خروج و نشانگرهای هدایت مسیر در نظر گرفته شد. سپس تأثیر تغییر در آرایش عناصر محیطی و افزودن چراغ‌های نشانگر جهت بر فرایند هدایت و تخلیه افراد بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی نشان داد تغییر مناسب در چینش عناصر محیطی و استفاده از چراغ‌های نشانگر مسیر می‌تواند موجب تسهیل حرکت افراد به‌سوی خروجی‌ها و بهبود فرایند تخلیه شود. چارچوب پیشنهادی همچنین امکان بررسی سناریوهای مختلف تخلیه را با در نظر گرفتن ویژگی‌های محیط و تفاوت‌های حرکتی زائران فراهم کرد. نتایج حاکی از آن بود که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از ظرفیت مناسبی برای مدل‌سازی رفتار جمعیت و شناسایی مسیرهای مطلوب تخلیه در اماکن مذهبی پرتردد برخوردار است.

نتیجه‌گیری: استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌تواند به‌عنوان رویکردی کاربردی در شبیه‌سازی تخلیه اضطراری و ارزیابی طراحی فضاهای مذهبی مورد استفاده قرار گیرد. توجه هم‌زمان به شرایط افراد دارای معلولیت و جانبازان، موانع محیطی و تجهیزات هدایت مسیر می‌تواند به تخلیه سریع‌تر و ایمن‌تر جمعیت و ارتقای برنامه‌ریزی مدیریت بحران کمک کند. چارچوب پیشنهادی قابلیت استفاده در طراحی، ارزیابی و بازسازی سایر اماکن شهری پرتردد را نیز دارد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم بهینه‌سازی ذرات، طراحی فضاهای امن، افراد دارای معلولیت، شبیه‌سازی رفتاری، تخلیه اضطراری، مدیریت بحران، اماکن متبرکه مذهبی

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۵ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۲ فروردین ۱۴۰۵

* نویسنده مسئول:

دکتر سید مرتضی غیور باغبانی

نشانی: مشهد، دانشگاه بین‌المللی امام رضا (علیه‌السلام)، دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت.

پست الکترونیکی: ghayoor@ImamReza.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode/en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

و مذهبی کشور، ضرورت پاسخگویی به نیازهای خاص این افراد بیش از پیش احساس می‌شود؛ بنابراین، تأمین نیازهای گردشگران معلول در این اماکن به صورت ویژه باید در دستور کار قرار گیرد. به هنگام طراحی فضاهای و امکانات برای معلولان و جانبازان، لازم است معیاری همچون راحتی، تخلیه سریع و امن و تأمین امنیت آن‌ها مدنظر قرار گیرد. طراحی متداول فضاهای و ساختمان‌ها عمدتاً برای اکثریت جامعه صورت می‌گیرد و این موضوع موجب می‌شود دسترسی معلولان به این مکان‌ها با مشکلات فراوانی مواجه شود. به خصوص در شرایط بحرانی، مانند زلزله و آتش‌سوزی، این گروه اجتماعی آسیب‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند؛ لذا ضروری است راهکارهای مناسبی برای تخلیه ایمن این افراد ارائه گردد. برآوردهای تجربی نشان می‌دهد هرچه یک مکان از نظر جمعیتی شلوغ‌تر و بسته‌تر باشد، دسترسی معلولان و خروج آن‌ها از آن مکان سخت‌تر می‌شود. در این راستا، گروه اجتماعی معلولان و جانبازان نیاز بیشتری به حضور در اماکن مذهبی، به ویژه حرم مطهر رضوی دارند تا از آرامش این مکان بهره‌مند شوند. با توجه به فرمایشات ائمه اطهار در مورد اهمیت آرامش حرم‌ها برای زائران، باید دسترسی افراد نیازمند به این اماکن تسهیل گردد.

در تحقیقات اخیر، پژوهشگران حوزه طراحی ساختمان‌ها، معیارها و استانداردهای مختلفی برای ارزیابی و سنجش میزان دسترسی معلولان به فضاهای ارائه کرده‌اند. اگرچه مباحث مربوط به گردشگری معلولان در کشورهای توسعه‌یافته مورد توجه و تحقیق قرار گرفته است، اما گردشگری قابل دسترسی برای معلولان و سالمندان هنوز در ایران چندان مورد بررسی قرار نگرفته است (قبادیان، ۲۰۱۶). مسئله اصلی این پژوهش استفاده از هوش مصنوعی، به ویژه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، برای بهبود تجربه زیارتی معلولان و جانبازان و کاهش خطرات احتمالی در شرایط غیرمترقبه است. الگوریتم PSO که در سال ۱۹۹۵ توسط (کندی و ابراهارت، ۱۹۹۵) ارائه شد، هر راه‌حل ممکن را به عنوان یک ذره در فضای چندبعدی^۱ فرموله می‌کند و به عنوان ابزاری مؤثر در حل مسائل بهینه‌سازی شناخته می‌شود. هدف پژوهش حاضر این است که با استفاده از این الگوریتم، راهکارهایی برای تخلیه ایمن و بهینه معلولان و جانبازان در مکان‌های مذهبی ارائه دهد (فرمول شماره ۱).

$$1. x = [x_1, x_2, \dots, x_D]^T$$

هر ذره دارای موقعیت و سرعت و مقدار هدف خود است که توسط تابع هدف تعیین می‌شود. موقعیت جدید ذره با استفاده از تجربه و ارتباط با دیگر ذرات تعیین می‌شود تا به سمت راه‌حل مورد انتظار حرکت کند. قبل از تعیین موقعیت جدید سرعت ابتدا محاسبه می‌شود، سرعت ذره در p_i در زمان $t+1$ توسط فرمول شماره ۲ تعیین می‌گردد.

شبیه‌سازی تخلیه^۱ اضطراری در ساختمان‌ها، به ویژه در فضاهای عمومی و پرجمعیت، نقشی حیاتی در برنامه‌ریزی ایمنی و ارزیابی طراحی ساختمان‌ها ایفا می‌کند. توسعه مدل‌های شبیه‌سازی تخلیه، به منظور کاربرد در موقعیت‌های گوناگون، از موضوعات کلیدی تحقیقات اخیر بوده است. بسیاری از این مدل‌ها از روش‌های محاسبات تکاملی، نظیر الگوریتم‌های ژنتیک^۲ (GA)، تخمین توزیع (EDA)^۳ و کلونی مورچه‌ها (ACO)^۴ بهره برده‌اند. به عنوان نمونه، (گرت و همکاران ۲۰۰۶)، از GA و EDA برای جابجایی بهینه موقعیت‌های خروجی استفاده کردند و (زونگ و همکاران، ۲۰۱۰)، با استفاده از ACO، به مدل‌سازی مسیرهای تخلیه در ترافیک مختلط پرداختند.

از میان این رویکردها، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۵ (PSO) به دلیل ساختار ساده و کارایی بالا، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. PSO که نخستین بار توسط (کندی و ابراهارت، ۱۹۹۵) معرفی شد، از رفتار جمعی پرندگان الهام گرفته و قابلیت شبیه‌سازی دقیق حرکت انسان‌ها در سناریوهای مختلف را دارد. این الگوریتم برای تحلیل رفتار انسانی، جلوگیری از برخورد جمعیت‌ها و بهینه‌سازی طراحی داخلی ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، چارچوبی مبتنی بر PSO برای شبیه‌سازی تخلیه افراد در اماکن پر تردد متبرکه مذهبی ارائه شده است. این چارچوب، با در نظر گرفتن نیازهای ویژه معلولان و جانبازان، عواملی همچون موانع محیطی و مکانیسم‌های اجتناب از برخورد را به عنوان توابع هدف در مدل گنجانده است. هدف، ارائه راهکاری برای طراحی بهینه فضاهای داخلی و افزایش ایمنی در شرایط عادی و بحرانی است. مقاله حاضر سازمان‌دهی بدین قرار شده است: بخش اول مقدمه و خلاصه کوتاهی از الگوریتم PSO ارائه شده است و در ادامه در بخش دوم، جزئیات الگوریتم PSO و تحقیقات پیشین بررسی می‌شود. در بخش سوم، بهبودهای پیشنهادی در چارچوب و سناریوهای شبیه‌سازی توضیح داده شده و نتایج در بخش چهارم ارائه می‌شود. در نهایت، در بخش پنجم، جمع‌بندی و پیشنهادات آتی مطرح شده است.

طرح شبیه‌سازی مبتنی بر PSO

در راستای توجه به نقش و جایگاه معلولان و جانبازان در صنعت گردشگری، نیاز به ارائه تسهیلات و خدمات ویژه برای این قشر حیاتی است. با افزایش حضور زائران و نمازگزاران معلول در اماکن متبرکه

1. Evacuation simulation
2. Genetic algorithm
3. Estimation of Distribution Algorithm
4. Ant colony
5. Particle Swarm Optimization (PSO)

6. D dimension



به روزرسانی سرعت است (فرمول شماره ۵).

$$5. D_i(t+1) = wD_i(t) + c_1 r_1 (p_{iBLS} - p_i(t)) + c_2 r_2 (p_{BGS} - p_i(t))$$

فرمول شماره ۵، $p_{iBLS} - p_i(t)$ و $p_{BGS} - p_i(t)$ به صورت واحد بردار نمایش داده شده است تا تنها جهت را نمایش دهند. متغیرهای دیگر همانند PSO اصلی تعیین شده اند. انتخاب جهت ذرات موقعیت جدید هر ذره می تواند توسط فرمول شماره ۶ تعیین شود.

$$6. p_i(t+1) = p_i(t) + S_i(t+1) \times D_i(t+1)$$

در فرمول شماره ۶، $S_i(t+1)$ جزء سرعت در میان بازه $[V_{max}, 0]$ می باشد. حداکثر سرعت^{۱۳} می تواند به اندازه یک گام یا توسط دیگر متغیرهای تعیین شده انتخاب شود. برای شبیه سازی حرکت ذرات به صورت حرکت انسانی، سرعت می تواند متناسب با معکوس مقدار تابع هدف ذره به روزرسانی شود. این موضوع از این واقعیت که انسان ها در هنگام نزدیک شدن به مانع سرعت خود را کم می کنند، برگرفته شده است. به علت اینکه PSO به جست و جوی حداقل ها در محیط اطراف می پردازد، مقدار تابع هدف زمانی که ذره نزدیک به یک مانع می شود باید افزایش پیدا کند تا سرعت ذره کاهش یابد.

تابع هدف

در مقالات لین و چن با نام کنترل حرکات جمعیت در گرافیک رایانه با استفاده از مکانیسم PSO (چنگ و همکاران، ۲۰۰۸) و کنترل جمعیت با هوش تجمیعی یک تابع، هزینه برای ارزیابی رابطه بین ذرات و دیگر اهداف موجود در فضای جست و جو تعیین شده است؛ ارزش هزینه^{۱۴} ذره p با هدف q توسط فرمول شماره ۷ به دست می آید.

$$7. Cost(p, q) = \exp \left(- \left(\frac{(p_x - q_x)^2}{(\delta_{p_x} + \delta_{q_x})^2} + \frac{(p_z - q_z)^2}{(\delta_{p_z} + \delta_{q_z})^2} \right) \right) \quad (1)$$

در فرمول شماره ۷، p^x و p^z موقعیت ذره p است. q_x و q_z موقعیت هدف q و محدوده ذره p و جسم q است. محدوده نشان دهنده ناحیه تحت پوشش هدف است. به علت اینکه هدف می تواند مانع یا هدف یا دیگر ذرات باشد، محدوده متفاوت خواهد بود؛ برای مثال محدوده یک هدف با ۲۰ در ۴۰ برابر با دسته

$$2. v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 r_1 (p_{iBLS} - p_i(t)) + c_2 r_2 (p_{BGS} - p_i(t))$$

در فرمول شماره ۲، v_i و p_i به ترتیب سرعت و موقعیت i امین ذره می باشند. w وزن سرعت قبلی است و p_{iBLS} بهترین موقعیت براساس تجربیات پیشین و p_{BGS} بهترین موقعیت جهانی^{۱۵} است که توسط ازدحام^{۱۶} به دست آمده است. c_1 و c_2 متغیرهایی برای کنترل اثر p_{iBLS} و p_{BGS} می باشد. r_1 و r_2 اعداد تصادفی هستند که از میان (۰) و (۱) انتخاب شده اند تا سرعت را متنوع تر کنند. پس از محاسبه سرعت، موقعیت جدید ذره را می توان با استفاده از فرمول شماره ۳ حساب کرد.

$$3. p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t+1)$$

در هر تکرار، هر ذره سرعت و موقعیت خود را به روزرسانی می کند و سپس مقدار هدف خود را با توجه به تابع هدف^{۱۷} ارزیابی می کند. در میان تمام مقادیر هدف جدید، p_{iBLS} و p_{BGS} نیز ممکن است به روز^{۱۸} شود تا از ازدحام به سمت راه حل بهینه^{۱۹} سوق داده شود. از آنجایی که ذره آزاد است تا به هر سمت ممکن حرکت کند، تغییراتی باید ایجاد شود تا شبیه سازی رفتار انسان با موفقیت و نزدیکی به واقعیت انجام شود. براساس کارهای گذشته و مطالعات انجام شده در مقالات (لین و چن، ۲۰۰۷) با نام «کنترل حرکات جمعیت در گرافیک کامپیوتر با استفاده از مکانیسم و کنترل جمعیت با هوش تجمیعی» سه عامل اصلی باید تغییر پیدا کند؛ مورد اول اعمال محدودیت بر حرکت ذرات برای شبیه سازی مسیر حرکت انسان می باشد، عامل دوم شبیه سازی موانع می باشد و عامل سوم نیز پرهیز از برخورد بین موانع و ذرات است.

حرکت ذرات

باتوجه به تصویر شماره ۱، در ابتدا توجه به اینکه شبیه سازی تخلیه در یک فضای دوبعدی^{۲۰} انجام می شود ما موقعیت و سرعت ذرات را به یک فضای دوبعدی محدود می کنیم؛ این عمل محدود سازی به فضای دو بعدی به منظور شبیه سازی فضای انسانی و جلوگیری از پرس ذرات به نقاط خیلی دورتر می باشد. (فرمول شماره ۴).

$$4. p_i = [p_{ix}, p_{iz}]^T \text{ و } v_i = [v_{ix}, v_{iz}]^T$$

در حقیقت حرکت انسان به دو جزء، یکی جزء جهت و دیگری جزء سرعت تقسیم شده است؛ جزء جهت برای تصمیم گیری در رابطه با مسیر ذره و جزء سرعت برای کنترل فاصله هر گام ذره استفاده شده است. معادله به روزرسانی جزء جهت مشابه معادله

7. Global best
8. Swarm
9. Objective function
10. Update
11. Optimal solution
12. Two dimensional

13. Maximum velocity
14. Cost value



این منظور مکانیسم بررسی تشریح شده است. در این مقاله از یک تابع‌نمایی برای مکانیسم بررسی صحت موقعیت جدید ذره استفاده شده که البته بسته به ترجیح کاربر می‌توان از دیگر خانواده‌های تابع استفاده کرد.

علت انتخاب تابع‌نمایی محاسبه و تغییر آسان آن است که مکانیسم صحت از احتمالات به‌عنوان تعیین قبولی موقعیت محاسبه‌شده جدید یک‌ذره استفاده می‌کند (فرمول شماره ۹).

$$9. Prob(f) = 1 - \frac{f}{e^{-k}} \quad (2)$$

در فرمول شماره ۹، f هزینه موقعیت محاسبه‌شده جدید است و k یک ثابت می‌باشد که به کاربر این امکان را می‌دهد تا قبولی^{۱۹} یک‌ذره را در اطراف مانع تعیین کند.

برطبق تابع احتمال قبولی یک مرز سخت در هنگامی که $k=1$ انتخاب شود به وجود می‌آید؛ زیرا احتمال قبولی موقعیت ذره برابر با صفر است؛ اگر $f=e^{-1}$ باشد که به این معناست که ذره و مانع در کنار هم خواهند ماند. این موضوع براساس تعیین معادله یک می‌باشد؛ بنابراین از تصادف با موانع براساس مکانیسم صحت پرهیز می‌شود. با فرض اینکه شعاع ذره و مانع به ترتیب ۵ و ۲۰ باشند. تصویر شماره ۱ احتمال پذیرش موقعیت ذره را درحالی که نزدیک به مانع است نشان می‌دهد. اگر موقعیت جدید تأیید نگردد جهت جدیدی همچون اضافه کردن یک درجه رندم بین ۲۰- و ۲۰+ به هدف اصلی اضافه می‌شود و دوباره برای صحت موقعیت جدید آزمایش می‌گردد؛ ولی موقعیت با هزینه کمتر به‌عنوان موقعیت جدید ذره انتخاب می‌شود.

بهبودهای صورت گرفته بر روی چهارچوب تخلیه براساس PSO

درحالی که شیوه شبیه‌سازی پیشنهادی به حل بسیاری از چالش‌ها میان جمعیت در فضای واقعی و ذرات در فضای آزاد پرداخته است، چندین نکته کلیدی باقی مانده است که به بررسی دقیق‌تری نیاز دارند، ازجمله این مسائل، می‌توان به احتمال گیرافتادن یک‌ذره و مشکلات مربوط به خروج از خط دید^{۲۰} اشاره کرد. برای رفع این چالش‌ها، دو راهکار اصلی پیشنهاد شده است.

جست‌وجوی محلی^{۲۱}

با بررسی مکانیسم اجتناب از برخورد معرفی شده توسط لین و چن در مقاله‌ای با عنوان «کنترل حرکات جمعیت در گرافیک رایانه‌ای با استفاده از مکانیسم PSO و کنترل جمعیت با هوش تجمیعی» (چن و لین، ۲۰۰۹)، شاهد آن هستیم که یک‌ذره

$(\delta^{qx}, \delta^{qz}) = (10, 20)$ است. برای نمایش دادن هدف محدوده ممکن است کل فضای جست‌وجو^{۱۵} باشد. در میان این متغیرهای قابل تغییر، هدف به‌راحتی قابل تنظیم و کنترل برای برطرف کردن انواع نیازهای استفاده‌کننده که در اصل همان ساختار فضای مکان مذهبی یا چیدمان المان‌های موجود در فضا است، کافی می‌باشد. به‌وسیله تعیین تابع هزینه فضای جست‌وجو با حداقل موقعیت به‌عنوان هدف می‌تواند توسط روی هم قرار دادن این توابع نمایی با متغیرهای مشابه یا مختلف به دست آید. بنابراین تابع هدف به‌صورت فرمول شماره ۸ تعیین می‌شود.

$$8. F_{obj}(p) = c_{obs} \times \max_{o \in O} (Cost(p, o)) + \frac{1}{Cost(p, q)}$$

در فرمول شماره ۸، « O » دسته تمامی موانع شامل موانع ساختاری فضا و دیگر انسان‌های موجود در جمعیت است. « g » هدفی برای حرکت روبه‌جلوی ذره و یک ثابت برای کاربر جهت کنترل اهمیت بین موانع و هدف می‌باشد. با مشاهده تعریف تابع هدف می‌توان دریافت که یک ذره در هنگام نزدیک شدن به اهداف دارای ارزش هدف کمتری خواهد شد. ازطرف دیگر، وقتی یک ذره به یک مانع نزدیک می‌شود، برای ذره تفاوتی نمی‌کند که با دیوار یا ذره دیگر در میان جمعیت مواجه می‌گردد؛ در این هنگام ارزش هدف افزایش می‌یابد. تحت این تابع هزینه^{۱۶} بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌تواند برای شبیه‌سازی مدل تخلیه افراد^{۱۷} از ساختمان استفاده شود. خروجی‌های امن یا مناطق امن را می‌توان به‌عنوان هدف و دیوارها مبلمان و المان‌ها موجود در فضا را می‌توان به‌عنوان موانع مدل‌سازی کرد.

مزیت دیگر طرح آن است که نیازی به اضافه کردن مدل اضافی برای گنجاندن اشیای جدید نیست و با کنترل متغیرهای معرفی شده می‌توان تمامی اجسام را با انواع دیگر ذرات مانند ماشین‌های متحرک یا بزرگ‌تر مدل‌سازی کرد. با تنظیمات مناسب متغیرها طرح شبیه‌سازی مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌تواند به هدف طراحی خود رسیده و ذرات با یک مسیر معقول با احتمال بالا به هدف موردنظر همگرا شوند.

اجتناب از برخورد^{۱۸}

اگرچه تابع هدف به‌گونه‌ای طراحی شده است که ذره را در اطراف موانع گردش دهد، با این حال احتمال عبور ذره از مرز موانع یا برخورد با دیگر ذرات یا موانع دیگر وجود دارد. به‌منظور جلوگیری از این احتمال، در هر به‌روزرسانی موقعیت جدید ذره باید بررسی شود و صحت امکان وقوع آن را تأیید کرد. برای

19. Validate

20. Sight line

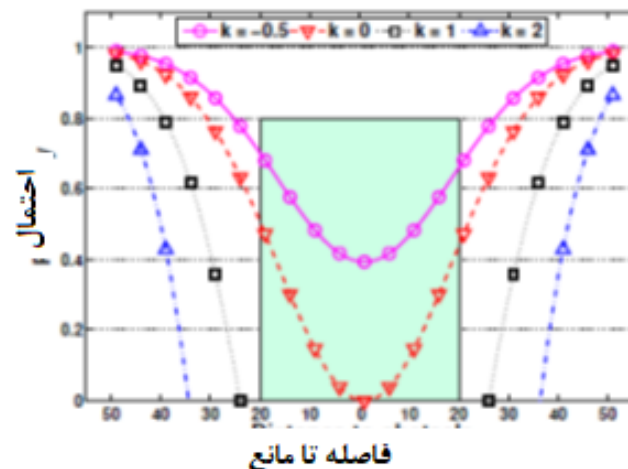
21. Local search

15. Search space

16. Loss function

17. Evacuation simulation

18. Collision evasion



تصویر ۱. نمای شماتیک بهینه‌سازی مسیر حرکت با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) با در نظر گرفتن مانع‌یابی و تحلیل احتمال برخورد در محیط‌های شهری

فضای موردنظر را فراهم کند. این بهبودها در جست‌وجوی محلی، می‌تواند به کارایی بیشتر چهارچوب تخلیه مبتنی بر PSO کمک کند و بهبود قابل توجهی در شبیه‌سازی‌های آتی ایجاد نماید.

مکانیسم به‌روزرسانی بهترین ارزش جهانی در الگوریتم PSO

در الگوریتم PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات)، یکی از مفاهیم کلیدی به‌روزرسانی بهترین اطلاعات جهانی^{۲۳} است. در نسخه اصلی این الگوریتم، هیچ مانعی در فضای جست‌وجو وجود ندارد و ذرات می‌توانند همواره بهترین اطلاعات جهانی را بدون توجه به موقعیت مکانی خود به‌روز نمایند. اما در دنیای واقعی، وجود موانع مختلف می‌تواند موجب عدم دسترسی به اطلاعات دقیق شود. به‌عنوان مثال، اگر یک ذره (انسان) بین خود و موقعیت با بهترین ارزش عینی مانعی قرار گیرد، آن‌ها قادر به درک موقعیت بهترین ذره نخواهند بود. این پدیده که به اثر شکست خط دید معروف است، مستلزم اصلاح مکانیسم به‌روزرسانی در PSO برای مطابقت با شرایط واقعی است. برای مدل‌سازی اثر شکست خط دید در PSO، لازم است هر ذره به‌جای به‌اشتراک‌گذاری بهترین اطلاعات جهانی به‌صورت مستقیم، بهترین موقعیتی را که تا آن لحظه در میدان دید آن‌ها ظاهر شده، حفظ کند. به‌عبارتی، اطلاعات فقط در صورتی به‌روز می‌شوند که ذره‌ای با ارزش هدف بهتر در معرض دید ذره دیگری قرار گیرد؛ به‌عبارت دیگر، هیچ مانعی نباید بین آن‌ها وجود داشته باشد.

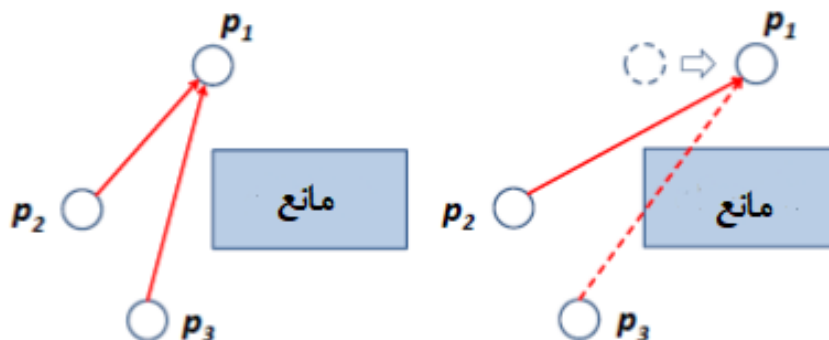
تصویر شماره ۲، نمونه‌ای از مکانیسم به‌روزرسانی اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. توضیحات تصویر شماره ۲ در یک مثال که مقدار تابع هدف ذره p_1 از مقدار تابع هدف ذرات دیگر مانند p_2 و p_3 بهتر است، به‌دلیل آنکه p_2 و p_3 می‌توانند ذره p_1 را

ممکن است در موقعیتی بسیار نزدیک به یک مانع قرار گیرد و در برخورد با موانع غیر گرد، گیر افتاده و نتواند موقعیت مناسب برای خروج پیدا کند. در این حالت، ذره ممکن است به یک موقعیت خاص برسد و در آنجا تا پایان شبیه‌سازی باقی بماند. برای حل این مشکل، بهبودهایی در جست‌وجوی محلی صورت گرفته است. جست‌وجوی محلی، یک مکانیسم متداول در PSO است که در مقالات لین و چن نیز برای جلوگیری از برخورد به کار گرفته شده است. با این حال، منطقه جست‌وجوی فعلی به‌طور محدود بین ۲۰- درجه تا ۲۰+ درجه قرار دارد که برای موانع گرد کافی است، اما در مواجهه با موانع با لبه‌های تیز، ذرات نمی‌توانند موقعیت‌های قابل قبول را در این محدودیت پیدا کنند؛ بنابراین، منطقه جست‌وجوی محلی به تدریج گسترش یافته تا راهی مناسب برای ادامه حرکت پیدا شود.

پس از محاسبه DS از طریق PSO اصلی، یک‌جهت به‌صورت تصادفی از محدوده ± 20 درجه انتخاب می‌شود و اعتبار آن بررسی می‌گردد. اگر این جهت نیز به کار نیامد، این فرایند تا ۲۰ بار دیگر تکرار می‌شود. در نهایت، اگر تمامی جهات نمونه قابل قبول نبودند، موقعیت جست‌وجو با اضافه کردن زاویه به‌عبارت دیگر θ_2 و θ_3 بررسی خواهد شد. مکانیسم جست‌وجو شبیه به رفتار انسان در برابر موانع طراحی شده است، به‌طوری که انسان سعی می‌کند راهی برای ادامه حرکت پیدا کند، چه با حرکت موازی با دیوار تا رسیدن به یک در یا خروج از آن. حرکت ذرات گیرافتاده نیز براساس این جست‌وجوی پلکانی نهایتاً به‌عنوان حرکتی بر روی لبه موانع شکل می‌گیرد. در نتیجه، فضای گسترش‌یافته جست‌وجوی محلی و مکانیسم نمونه‌برداری تصادفی^{۲۴} می‌تواند به ذرات فرصتی برای حرکت و جلوگیری از نوسان بین دو نقطه از

23. Global best information

22. Random sampling



تصویر ۲. مدل سازی بهینه مسیر حرکت در فضای شهری با موانع:

کاربرد الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) در تحلیل و پیش‌بینی عبور بهینه با در نظر گرفتن برخورد احتمالی

و دیگر اماکن متبرکه، تقریباً ۳ درصد از جمعیت حاضر در این مکان‌ها دارای نوعی معلولیت هستند. از این افراد، حدود ۳۳ درصد دچار معلولیت حرکتی، ۳۳ درصد دارای محدودیت در بینایی و ۳۳ درصد باقیمانده به هر دو نوع محدودیت مبتلا هستند. این آمار نشان‌دهنده لزوم توجه به نیازهای خاص این افراد در طراحی و بهینه‌سازی فضاهای عمومی است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات باتوجه به درصد افراد دارای معلولیت، در بهینه‌سازی مدل ازدحام ذرات، سرعت ۲ درصد از این جمعیت به میزان ۴۰ درصد سرعت عادی و دید ۲ درصد از جامعه به ۵۰ درصد بینایی یک فرد عادی لحاظ شده است. این فرضیات به‌منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار این افراد در محیط تعریف‌شده به‌کارگرفته شده و سرعت و خط دید هر ذره باتوجه به این محدودیت‌ها به‌طور متناسب کاهش یافته است.

یافته‌ها

در این بخش، به بررسی و شبیه‌سازی محوطه مسجد گوهرشاد پرداخته می‌شود. نقشه طراحی‌شده در تصویر شماره ۳ ارائه شده است. فضای کلی مسجد به ابعاد ۷۰۰ در ۴۰۰ مترمربع تعریف شده و مختصات این فضا نیز در همان شکل مشخص گردیده است. هر ذره به‌عنوان یک دایره با شعاع ۵ واحد و حداکثر سرعت ($V_{max}=5$) مورد توجه قرار گرفته است. متغیرهای استفاده‌شده در الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی (PSO) در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همچنین، این پژوهش فرض می‌کند ذرات تمایل دارند به سمت بهترین ارزش هدف کلی با اولویت بیشتر نسبت به بهترین موقعیت محلی مشاهده‌شده حرکت کنند. برای بررسی دقیق‌تر، ۵۰ ذره در هر دور شبیه‌سازی قرار داده شد و تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به هدف ذخیره‌سازی شده است. برای هر شکل، هزار دور شبیه‌سازی انجام شده و نتایج متوسط در جدول شماره ۲ نمایش داده شده است. انحراف‌معیار نشان‌دهنده پراکندگی تکرارها در تمامی دورهای شبیه‌سازی است و به تحلیل عملکرد ذرات کمک می‌کند. همچنین، مسیرهای تولیدشده

بینند، آن‌ها می‌توانند موقعیت p_1 را به‌عنوان بهترین اطلاعات جهانی حفظ نمایند. پس از حرکت ذره p_1 به موقعیت جدید با ارزش هدف بهتر، تنها ذره p_2 می‌تواند بهترین اطلاعات جهانی جدید را دریافت کند، زیرا p_1 هنوز در محدوده دید آن قرار دارد. باین حال، ذره p_3 نمی‌تواند به اطلاعات جدید از p_1 دست یابد. این مکانیسم به‌منظور شبیه‌سازی موقعیتی طراحی شده که در آن افراد از حرکت شخصی که پشت یک مانع قرار دارد، بی‌اطلاع هستند. مراحل محاسبات تغییر یافته هر ذره در هر تکرار به شرح زیر است.

۱. پیدا کردن یک موقعیت جدید قابل قبول،
۲. محاسبه ارزش هدف،
۳. به‌روزرسانی بهترین اطلاعات محلی و بهترین اطلاعات جهانی در صورت نیاز،
۴. به‌روزرسانی بهترین اطلاعات جهانی تمامی ذرات در مسیر دید آن‌ها.

با اعمال این بهبودهای مهم، چهارچوب شبیه‌سازی می‌تواند رفتارهای انسانی را به‌راحتی شبیه‌سازی کند. برای درک بهتر قابلیت‌ها و کارایی این چهارچوب، چندین نمونه عملی نیز ارائه خواهد شد که نمایانگر توانمندی‌های جدید و افزایش دقت در شبیه‌سازی‌ها هستند.

در نظر گرفتن افراد دارای معلولیت

شناسایی نیازهای خاص زائران معلول در حرم مطهر رضوی، می‌تواند در بهبود کیفیت خدمات و تسهیل دسترسی این گروه به امکانات مذهبی در تجربه زیارت، تأثیر مثبت و معناداری بر سلامت روان و کیفیت زندگی زائران داشته باشد (باصولی و درخش ۲۴، ۲۰۲۲)؛ به‌ویژه برای افرادی که با چالش‌های حرکتی مواجه هستند (حسینی و یزدانی، ۲۰۲۱). با بررسی و مشاهدات انجام‌شده در صحن مطهر مسجد گوهرشاد در حرم امن رضوی



جدول ۱. متغیرهای الگوریتم PSO

متغیر	ω	c_1	c_2	k	C_{OBS}	V_{max}
مقدار	۰/۱	۰/۲	۱/۰	۱/۰	۰/۱	۵

جدول ۲. مقایسه زمان تخلیه با و بدون چراغ راهنما

شکل	۲a	۲b
متوسط تکرار	۱۰۰۸۷۰	۷۰۴۰۵
بدترین تکرار	۲۸۰۸۹۹	۲۴۰۵۴۲
انحراف معیار	۱۱۲۰۰	۹۰۵۴

توسط هر ذره در شبیه‌سازی در تصویر شماره ۳ نمایش داده شده است. این نمایش به کاربران امکان می‌دهد نقاط ضعف محوطه را شناسایی و آن‌ها را بهبود بخشند. نتیجه‌گیری این شبیه‌سازی‌ها می‌تواند به طراحان و مسئولان فضاهای عمومی کمک کنند تا با در نظر گرفتن نیازهای خاص افراد دارای معلولیت، محیط‌های بهتری را طراحی و اجرا کنند. افزون‌براین، قابلیت ضبط شبیه‌سازی نیز امکان تحلیل و بررسی دقیق‌تری از رفتار ذرات در شرایط مختلف را فراهم می‌آورد.

مقایسه تأثیر چراغ‌های راهنما برای خروج

چهارچوب^{۲۵} شبیه‌سازی ارائه‌شده در این تحقیق امکان تغییر در موانع داخلی صحن و همچنین درهای خروجی را فراهم می‌آورد. علاوه‌براین، قابلیت افزودن چراغ‌های راهنمای خروج نیز در این محیط شبیه‌سازی وجود دارد. این چراغ‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره موقعیت‌های خروجی به افراد ارائه می‌کنند و در تسهیل خروج امن مردم از مناطق خطرناک نقش اساسی دارند. چراغ‌های راهنما باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که به‌وضوح مسیر خروج را نشان دهند. باین‌حال، مهم است که موقعیت قرارگیری این چراغ‌ها به‌دقت تعیین شود؛ چراکه نصب چراغ‌ها در مکان‌هایی که توسط افراد قابل‌دیدن نیستند، می‌تواند عملاً موجب بی‌فایده شدن آن‌ها شود.

شبیه‌سازی و نتایج در شبیه‌سازی انجام‌شده

مکان چراغ‌ها تغییر داده می‌شود تا تأثیر آن‌ها بر سرعت تخلیه مورد بررسی قرار گیرد. چراغ‌راهنما به‌عنوان یک‌ذره ثابت با ارزش هدف تعیین‌شده مدل‌سازی می‌شود. هر ذره‌ای که در میدان دید چراغ‌راهنما قرار می‌گیرد، با بهبود اطلاعات خود درباره بهترین ارزش هدف، به سمت چراغ حرکت می‌کند. نتایج شبیه‌سازی به‌طور واضح نشان‌دهنده مزایای به‌کارگیری چراغ‌های راهنما است. میانگین و بدترین تکرارها در تصویر شماره ۳ قابل‌مشاهده

است که نیازمند حدود ۱۰۰ هزار تکرار به‌عنوان میانگین و ۲۸۰ هزار تکرار در بدترین حالت است. با مشاهده مسیر تولیدشده در فرایند تخلیه (از طریق تصویر شماره ۳)، مشخص می‌شود که ذرات به‌وسیله چراغ‌های راهنما جذب می‌شوند و با سرعت بیشتری تخلیه می‌گردند. ذرات با پیروی از نشانگرهای تخلیه به سمت نزدیک‌ترین چراغ حرکت کرده و بر مسیر خروج صحیح تأثیر مثبت می‌گذارند. این آزمایش نشان می‌دهد چهارچوب ارائه‌شده قادر به شبیه‌سازی حضور چراغ‌های راهنما بدون پیچیده کردن ساختار کد است.

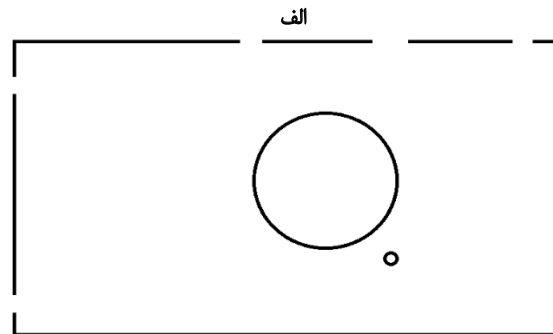
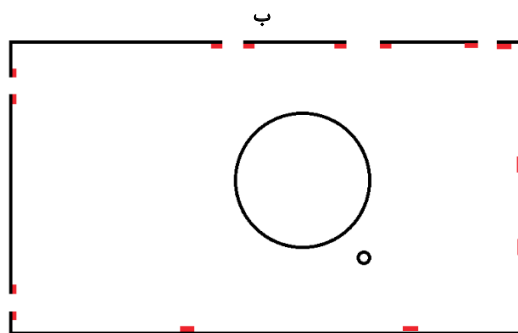
بحث

باتوجه‌به اینکه تأیید نقشه‌های تخلیه در دنیای واقعی بسیار دشوار و پرهزینه است، سیستم‌های شبیه‌سازی تخلیه به ابزاری مهم و غیرقابل‌جایگزینی برای ارزیابی و آزمایش این نقشه‌ها تبدیل شده‌اند. تحقیقات متعددی در زمینه توسعه و اجرای سناریوهای مختلف برای تخلیه افراد انجام شده است؛ و الگوریتم‌های تکاملی^{۲۶} معمولاً برای یافتن راه‌حل‌های بهینه در زمینه خروج، شناسایی مسیرهای خروج و طراحی دکوراسیون داخلی ساختمان‌ها به کار می‌روند. شبیه‌سازی رفتار انسانی که موضوعی حیاتی در تمام پژوهش‌های انجام‌شده است، به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته و بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده کرده‌اند. یکی از دلایل استفاده از PSO، توانایی این الگوریتم در شبیه‌سازی حرکت انسانی و اجتناب از موانع است. باین‌حال، الگوریتم‌های PSO در پژوهش‌های گذشته معمولاً پیچیده بوده و تنها مناسب برای حالات خاص و بدون انعطاف‌پذیری^{۲۷} برای تغییرات در ساختار ساختمان‌ها هستند. چارچوب تحقیق حاضر در این پژوهش قادر است تمامی عوامل لازم برای شبیه‌سازی سناریوهای تخلیه انسان را بررسی کند.

26. Evolutionary algorithms

27. Flexibility

25. Framework



تصویر ۳. مدل ساده‌شده صحن مطهر همراه با چراغ‌راهنما

حاکمی از اهمیت این تحقیق در ارتقای کارایی فرآیندهای تخلیه و افزایش ایمنی عمومی است. با تحلیل تأثیر عوامل متعددی نظیر چراغ‌های راهنمای خروج و موانع احتمالی، این تحقیق به طراحان و برنامه‌ریزان اجازه می‌دهد با به‌کارگیری راهکارهای عملیاتی مناسب، به افزایش سرعت و ایمنی در شرایط اضطراری کمک کنند.

توجه به نیازهای خاص افراد در شرایط بحرانی، در کنار تأکید بر رفتار انسان‌ها و نقش عوامل روانی در تصمیم‌گیری، از دیگر ابعاد مهم این پژوهش است. بررسی تأثیر تنوع نیازها، به‌ویژه در مورد گروه‌های آسیب‌پذیر، می‌تواند به طراحی رویکردهایی منسجم و جامع برای بهبود وضعیت تخلیه در فضاهای عمومی منجر شود.

محدودیت‌های مطالعه

محدودیت‌های این پژوهش شامل نمونه‌گیری گلوله برفی (احتمال همگنی نمونه)، دسترسی محدود به مدیران ارشد حرم مطهر و سوگیری‌های خوداظهاری در پرسش‌نامه توسط خبرگان، مدیران، اساتید و معلولین است. همچنین، تمرکز جغرافیایی این مطالعه بر آستان قدس رضوی و حرم مطهر امام هاشم، تعمیم این نتایج به سایر مناطق نیازمند احتیاط و دقت است. مطالعات آتی می‌توانند با به‌کارگیری نمونه‌گیری طبقه‌ای، ترکیب روش‌های کمی و کیفی، و گسترش محدوده جغرافیایی، این چالش‌ها را کاهش دهند.

با این حال، محدودیت‌هایی نظیر عدم در نظرگیری استرس روانی افراد نیازمند پژوهش‌های آینده است. پیشنهاد می‌شود اثر عوامل انسانی نظیر اضطراب و رفتار گروهی در نسخه‌های آتی PSO بررسی گردد.

پیشنهادهای آتی

پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر و اعتبارسنجی این چهارچوب با داده‌های واقعی تمرکز یابد. همچنین، توجه به نقش عوامل انسانی و اجتماعی در فرآیندهای

این عوامل شامل حرکت انسان‌ها، موانع، نشانگرهای خروج و به‌ویژه افرادی با محدودیت و معلولیت‌های حرکتی یا بینایی است که سرعت و دید کمتری نسبت به افراد بدون این محدودیت‌ها دارند. در مشاهدات میدانی انجام‌شده، یکی از درها به‌دلیل فعالیت‌های عمرانی بسته شده بود و دारبستی در محوطه مسجد نصب شده بود. چهارچوب ارائه‌شده در این تحقیق توانایی پوشش این موارد خاص را دارد و می‌تواند راهکارهای مناسبی برای خروج افراد در شرایط مختلف ارائه دهد. به‌منظور نمایش توانایی چهارچوب، صحن مسجد گوهرشاد به‌عنوان محل مطالعه انتخاب شد و نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد مؤثر این چهارچوب در شرایط مختلف و توانایی ارائه مسیرهای تخلیه برای کاربران جهت بهبود فرایند تخلیه و انجام تمهیدات مناسب برای تسریع در خروج است.

چالش‌های شبیه‌سازی رفتار انسانی به‌دلیل پیچیدگی بالا به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. رفتار انسان تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر استرس‌های روحی و فیزیکی قرار می‌گیرد؛ برای مثال، پژوهشگران در مقالات خود به تأثیر حالات روحی افراد بر نحوه حرکت آن‌ها پرداخته‌اند. افراد معلول، مجروح یا کهن سال رفتار حرکتی متفاوتی نسبت به دیگران دارند؛ به همین دلیل در این مقاله از انواع مختلف PSO برای شبیه‌سازی بهتر استفاده شده است. با این وجود، شبیه‌سازی صحیح حرکت جمعی انسان همچنان یک موضوع چالش‌برانگیز و نیازمند تحقیقات بیشتر در آینده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

چهارچوب پیشنهادی با موفقیت رفتار انسانی و نیازهای معلولان را در شبیه‌سازی تخلیه حرم رضوی مدل‌سازی کرد. نتایج گویای تأثیر چشمگیر چراغ‌های راهنما و اهمیت تطبیق‌پذیری الگوریتم با موانع پیچیده است.

این پژوهش با ارائه یک چهارچوب شبیه‌سازی پیشرفته، توانسته است گامی مؤثر در بهبود مدیریت تخلیه ایمن در فضاهای شهری و ساختمان‌های عمومی بردارد. نتایج به‌دست‌آمده



تخلیه می‌تواند به تدوین راهکارهای مؤثرتری در مدیریت بحران بینجامد. این پژوهش نه تنها می‌تواند به عنوان یک مطالعه پیشرو در حوزه شبیه سازی تخلیه مورد استناد قرار گیرد، بلکه بستر مناسبی برای آینده پژوهی در زمینه طراحی و برنامه ریزی شهری خواهد بود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

تمام اصول اخلاقی در این مطالعه رعایت شد. از آنجایی که این تحقیق شامل هیچ آزمایشی بر روی نمونه های انسانی یا حیوانی نبود، نیازی به کد تأیید اخلاق نبود.

حامی مالی

این مقاله برگرفته از پایان نامه شهرز سرورش مقطع دکترا، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه بین المللی امام رضا (علیه السلام)، مشهد می باشد. این پژوهش هیچ گونه کمک مالی از سازمانی های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور یکسان در مفهوم و طراحی مطالعه، جمع آوری و تجزیه و تحلیل داده ها، تفسیر نتایج و تهیه پیش نویس مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.



References

- Basouli, M., & Derakhsh, S. (2022). [Investigating the needs of disabled pilgrims in religious places (Case Study: Razavi Shrine) (Persian)]. *Journal of Razavi Culture*, 9(35), 37-61. [DOI:10.22034/FARZV.2020.236874.1540]
- Cheng, W., Bo, Y., Lijun, L., & Hua, H. (2008). *A modified particle swarm optimization-based human behavior modeling for emergency evacuation simulation system*. Paper presented at 2008 International Conference on Information and Automation, Changsha, 20-23 June 2008. [DOI:10.1109/ICINFA.2008.4607962]
- Chen, Y. P., & Lin, Y. Y. (2009). Controlling the movement of crowds in computer graphics by using the mechanism of particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 9(3), 1170-1176. [DOI:10.1016/j.asoc.2009.03.004]
- Garrett, A., Carnahan, B., Muhdi, R., Davis, J., Dozier, G., & Sansoucie, M. P., et al. (2006). *Evacuation planning via evolutionary computation*. Paper presented at 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Vancouver, BC, Canada, 16-21 July 2006. [DOI:10.1109/CEC.2006.1688303]
- Hosseini, R., & Yazdani, Sh. (2021). The role of pilgrimage to Imam Reza's shrine in quality of life. *Journal of Religious and Cultural Research*, 8(2), 105-118.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. Paper presented at Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 27 November 1995 - 01 December 1995. [DOI:10.1109/ICNN.1995.488968]
- Lin, Y. Y., & Chen, Y. P. (2007). *Crowd control with swarm intelligence*. Paper presented at 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Singapore, 25-28 September 2007. [DOI:10.1109/CEC.2007.4424900]
- Qobadian, B. (2016). [The degree of compatibility of Iran's tourism accommodation facilities with the needs of the physically disabled (Case study: Hotels in Zanjan province) (Persian)]. *Applied Studies in Management Sciences and Development*, 2(5), 78-92. [Link]
- Zong, X., Xiong, S., Fang, Z., & Li, Q. (2010). *Multi-ant colony system for evacuation routing problem with mixed traffic flow*. Paper presented at IEEE Congress on Evolutionary Computation, Barcelona, Spain, 18-23 July 2010. [DOI:10.1109/CEC.2010.5586326]

This Page Intentionally Left Blank