

Systematic Study of Researches on Building Fire Evacuation Modelling and an Explanation of Safe Architecture Framework from the Point of View of Evacuation

Atefeh Omidkhah, PhD

Faculty of Art and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Mohammad Reza Bemanian, PhD* 

Professor, Faculty of Art and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Mohammad Reza Hafezi, PhD

Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: December 3, 2019

Accepted: January 9, 2021

(Pages: 67-86)

Omidkhah, A., Bemanian, M.R., and Hafezi, M.R., 2023. Systematic Study of Researches on Building Fire Evacuation Modelling and an Explanation of Safe Architecture Framework from the Point of View of Evacuation. *Soffeh*. 102 (3): 67-86.

DOI: [10.48308/sofeh.2023.232080.1266](https://doi.org/10.48308/sofeh.2023.232080.1266)

Abstract:

Evacuation modelling is a tool for measuring the performance of building design for safe evacuation of occupants during emergencies such as fires. The first evacuation modelling efforts date back to the mid-70s. To date, a wide range of evacuation models have been developed, with numerous problems having been studied in various scientific disciplines. In the present study, a database of 152 original papers was developed through a systematic search in the field of evacuation modelling, and

Keywords:

Evacuation modelling,
Architectural design,
Performance, Fire Safety.



SOFFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 33, Issue 3, No. 102, 2023  ISSN: 1683-870X

*. Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*. Corresponding Author: Email Address. bemanian@modares.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/sofeh.2023.232080.1266>
<http://dori.net/dor/20.1001.1.1683870.1402.33.3.6.2>

their data was used to answer three key questions. The first question was that of the role of architectural design in the entire body of research. Architectural design issues are one of the five fields in evacuation modelling research being considered in a variety of scales in the design process. The second question was that of important elements of evacuation modelling. This was answered by data analysis. From the perspective of variables and their relationship, it was found that several elements have been considered as independent variables in evacuation modelling, with their design features being considered as measures to explain other dependent parameters. The third question was that of the relationship between architectural elements and other modelling parameters. When a modelling is aimed at evaluation of a design, the results can cause significant changes in the original design.

Modelling methods are also relevant to the levels of design development. In early stages, macroscopic modelling can lead to the rejection or acceptance of a design alternative or schema, or demonstrate whether or not the design conforms to the required performance criteria. In more advanced stages, microscopic modelling is applied as a tool to make fine tunings of dimensions, configuration details and layouts of columns and furniture. The results showed that the swarm intelligence-based methods are the emerging field among microscopic models that can result in lower computational cost and more accurate results.

بررسی سیستماتیک پژوهش‌های حوزه مدل‌سازی تخلیه از ساختمان در هنگام حریق و تبیین چارچوب معماری ایمن از منظر تخلیه^۱

محمدرضا حافظی^۲

دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی،
تهران، ایران

عاطفه امیدخواه^۲

محمدرضا بمانیان^{۳*} 

استاد دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

دریافت: ۱۲ آذر ۱۳۹۸
پذیرش: ۲۰ دی ۱۳۹۹
(صفحه ۸۶ - ۶۷)

امیدخواه، ع.، م.ر. بمانیان و م.ر. حافظی. ۱۴۰۲. بررسی سیستماتیک پژوهش‌های حوزه مدل‌سازی تخلیه از ساختمان در هنگام حریق و تبیین چارچوب معماری ایمن از منظر تخلیه. فصلنامه علمی معماری و شهرسازی ص ۶۷-۸۶. ۱۰۲ (۳): ۶۷-۸۶.
کلیدواژگان: مدل‌سازی تخلیه، طراحی معماری، عملکرد، ایمنی حریق.

چکیده

طراحی مسیرهای خروج برای تخلیه اضطراری به‌هنگام رخداد حریق یکی از موضوع‌های عملکردی طراحی معماری است. امروزه می‌توان عملکرد ساختمان در خروج ایمن افراد به‌هنگام شرایط اضطراری حریق را با ابزار «مدل‌سازی تخلیه» سنجید. پژوهش حاضر با هدف بررسی سیستماتیک پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مدل‌سازی تخلیه از ساختمان در هنگام حریق انجام گرفته است. با جستجوی ادبیات تخصصی، پایگاه داده‌ای متشکل از ۱۵۲ مقاله ساخته شدند و داده‌های حاصل از آن برای پاسخ به سه پرسش اصلی بررسی گردیدند. در پرسش اول «جایگاه طراحی معماری در کل پژوهش‌های حوزه مدل‌سازی تخلیه حریق» مورد سؤال قرار گرفت. مسائل طراحی معماری یک دسته در انواع پنج‌گانه پژوهش‌های مدل‌سازی تخلیه هستند و در نمونه‌های مدل‌سازی‌شده نیز تنوعی از مقیاس‌های مختلف در فرایند طراحی ملاحظه می‌شود. همچنین کیفیتی تحت عنوان «معماری ایمن» تعریف شد و شاخص‌های مربوطه پنج رویکرد زمان‌محور، پیکره‌بندی‌محور، ظرفیت‌محور، ازدحام‌محور و ریسک‌محور طبقه‌بندی شدند. پرسش دوم در مورد «عناصر معماری واجد اهمیت در مسائل

مدل‌سازی تخلیه» بود. با بررسی متغیرها در پژوهش‌های مختلف و رابطه میان آنها دریافت شد که عناصر متعددی از معماری متغیر مستقل در مسائل مدل‌سازی تخلیه قلمداد می‌شوند و ویژگی‌های طراحی آنها با عنوان سنجه‌هایی برای تبیین متغیرهای وابسته دیگر لحاظ شده‌اند. در پرسش سوم در خصوص «رابطه عناصر معماری با دیگر پارامترهای مدل‌سازی تخلیه» بود. در مواردی که هدف از مدل‌سازی ارزیابی یک طرح است؛ نتایج می‌تواند منجر به اعمال تغییرات زیادی در طرح شود. مدل‌های تخلیه می‌توانند از حیث ویژگی‌های متعددی همچون مقیاس، رویکرد مدل برای نمایش انسان و فضا، و الگوریتم‌های مسیریابی متنوع و متفاوت باشند. روش‌های مدل‌سازی با پیشرفت طراحی رابطه‌ای متناظر دارند. در مراحل اولیه، فرایند معماری مدل‌سازی در مقیاس کلان می‌تواند منجر به رد یا پذیرش یک گزینه طراحی شود، یا همخوانی یا ناهمخوانی طرح را با حدود عملکردی الزامی نشان دهد. در طرح‌های توسعه‌یافته‌تر، مدل‌سازی در مقیاس خرد به‌منابۀ ابزاری برای تصمیم‌گیری نهایی در مورد ابعاد، جزئیات پیکره‌بندی‌ها، و جانمایی ستون‌ها و مبلمان فضا کارکرد دارد. همچنین تلفیق رویکردهای پنج‌گانه معماری ایمن امکان تدوین چارچوب‌های عملیاتی برای ارزیابی عملکرد ایمنی تخلیه طرح معماری را فراهم می‌آورد.

۱. این مقاله برگرفته از رساله دکتری معماری نگارنده اول است با عنوان معماری ایمن از منظر تخلیه در حریق؛ نمونه موردی: پلان‌های تجاری پیچیده که به راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم در دانشکده هنر و معماری دانشگاه تربیت مدرس تهران در اسفندماه سال ۱۴۰۰ دفاع شده است.

۲. دکتری معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. نویسنده مسئول
atemfe_omidkhan@modares.ac.ir
bemanian@modares.ac.ir
4. mr-hafezi@sbu.ac.ir



پرسش‌های تحقیق

۱. طراحی معماری چه جایگاهی در پژوهش‌های مدل‌سازی تخلیه حریق دارد؟
۲. در مسائل مدل‌سازی تخلیه حریق چه عناصری از طراحی معماری واجد اهمیت هستند؟
۳. رابطه عناصر طراحی معماری با دیگر پارامترهای مورد بررسی در مدل‌سازی تخلیه حریق چیست؟

5. A.H. Maslow, *A Theory of Human Motivation*.

۶ دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان، مبحث سوم حفاظت ساختمان‌ها در مقابل حریق، ص ۱۶.

7. G. Berseth, et al, "Environment Optimization for Crowd Evacuation", p. 377.

8. R.M. Tavares & E.R. Galea, "Evacuation Modelling Analysis within the Operational Research Context", p. 1005.

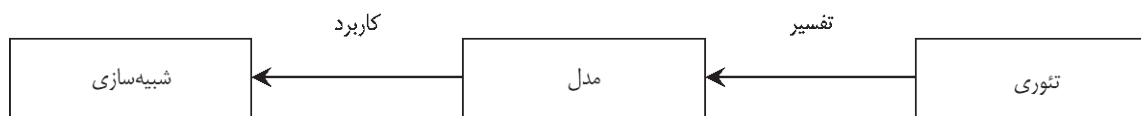
9. P.E. Teague & R.R. Farr, "Case Histories: Fires Influencing the Life Safety Code", p. 1147.

10. V. Beck, "Performance-based Fire Engineering Design and Its Application in Australia", p. 24.

ت ۱. ساختار دانش در یک حوزه علمی، مأخذ: Klüpfel, "Crowd Dynamics Phenomena, Methodology, and Simulation", p. 216.

مقدمه

بر اساس آنچه آبراهام مازلو در سلسله‌مراتب نیازها در مقاله «تئوری انگیزه‌های انسان» در سال ۱۹۴۳ بیان کرده است، نیاز به ایمنی جزو دسته نیازهای اساسی و بنیادین زندگی انسان قرار می‌گیرد.^۵ امروزه تبلور این نیاز را در زندگی انسان می‌توان در آیین‌نامه‌ها و مقررات ساخت‌وساز، که تعیین‌کننده حداقل الزامات برای حفظ جان و ایمنی در محیط مصنوع هستند، مشاهده کرد. در مبحث سوم مقررات ملی ساختمان، در تبیین انتظارات عملکردی ایمنی در برابر آتش آمده است: «ساختمان باید به نحوی طراحی و ساخته شود که در صورت وقوع آتش‌سوزی، مسیرهای امن کافی برای فرار از ساختمان به یک محل ایمن در خارج از آن وجود داشته باشد».^۶ پیچیده‌تر شدن طراحی‌های معماری (به لحاظ تلفیق تصرف‌ها و وجود تصرف‌های چندگانه در یک ساختمان، افزایش بار تصرف، افزایش زیربنا و تعداد طبقات، وجود فضاهای انعطاف‌پذیر، و ...) باعث به چالش کشیده شدن مقررات و راهکارهای تجویزی طراحی برای تأمین ایمنی حریق شده است. در چنین شرایطی نمی‌توان تنها به راه حل‌های توصیفی یا محاسبات دستی اکتفا کرد؛^۷ بلکه لازم است تا محاسبات کمی و تحلیل‌های بیشتری بر روی طرح پیشنهادی یک ساختمان پیچیده انجام شود تا اطمینان یه‌دست آید که طراحی الزامات ایمنی را در عمل برآورده می‌کند.^۸ مقررات ایمنی نیز باید اسنادی زنده باشند و بر اساس تجارب و مشاهدات و پژوهش‌ها و با توجه به ماهیت متغیر جهان، باید روزآمد شوند.^۹ در دهه ۱۹۷۰ گروهی از متخصصان ایمنی در برابر آتش تلاش کردند که با استفاده از رویکردهای مهندسی و ابزار سنجش علمی (که در طی سالیان تجربه و درس‌آموزی از سوانح آتش‌سوزی آنها را کسب کرده بودند) کارایی الزامات بیان‌شده در قوانین تجویزی را در طراحی ساختمان‌ها بسنجند.^{۱۰} نتایج پژوهش آنها، با نشان دادن ضعف‌های موجود متأثر از ساده‌سازی و کلی‌گویی‌ها در مقررات تجویزی، سرمنشأ تحول عظیمی گردید که به گذار از قوانین تجویزی شامل بایدها و نبایدها به وضع قوانین مبتنی بر عملکرد، که به ارزیابی راهکارهای مختلف با روش علمی برای دستیابی به نتیجه مطلوب اختصاص دارند، منتهی



جمعیت معمولاً بررسی‌ها با مدل‌ها آغاز می‌شوند.

پژوهش حاضر با هدف شناخت رابطه «طراحی معماری» با حوزه علمی «مدل‌سازی تخلیه» در ذیل روش مبتنی بر عملکرد در تأمین ایمنی حریق در ساختمان‌ها انجام گرفته است. بدین منظور یک بررسی سیستماتیک بر روی پایگاه داده‌ای متشکل از ۱۵۲ مقاله پژوهشی انجام گرفته و نتایج آماری توصیفی و تحلیلی آن عرضه و مطالعه گردیده است تا به پرسش‌های اساسی تحقیق پاسخ داده شود.

۱. روش‌شناسی: ساخت پایگاه داده

به‌منظور دریافتن رابطه موضوعات مربوط با طراحی معماری در میان پژوهش‌هایی که در حوزه مدل‌سازی تخلیه حریق انجام می‌گیرد، یک جستجوی سیستماتیک در ادبیات مربوطه انجام گرفت. در این جستجو به مقالات پایگاه علمی ساینس دایرکت^{۱۷} استناد شد. بر اساس بررسی اولیه در ادبیات تخصصی، مقالات هدف برای این پژوهش می‌بایست فصل مشترکی از سه حوزه معماری، تخلیه اضطراری، و حریق را در بر می‌داشتند. بنابراین کلیدواژه‌های جستجو در پایگاه ساینس دایرکت به سه

شد. قوانین مبتنی بر عملکرد دارای پویایی و انعطاف‌پذیری بیشتری هستند؛ چراکه همان‌گونه که از نامشان برمی‌آید، بر مبنای عملکرد جنبه‌های اصلی (مانند آتش، فضا، افراد) و اثرات متقابل آنها وضع شده‌اند. با توجه به این کنش‌ها و واکنش‌ها برای شرایط هر ساختمان، معیار نوع طراحی ایمن در برابر آتش از سوی طراحان و مهندسان متخصص تعیین می‌شود.^{۱۱} روش مبتنی بر عملکرد در تطابق با پیچیدگی روبه‌رشد طراحی‌های معماری در زمانه حاضر است و، برخلاف روش تجویزی، امکان تطبیق با گزینه‌های طراحی نوآورانه و انعطاف‌پذیرتر را دارد.^{۱۲} این خود یکی از اصلی‌ترین دلایل سطح بالای توسعه‌یافتگی کشورهای همچون برخی کشورهای اروپایی (از قبیل انگلستان و سوئد)، استرالیا، نیوزلند، ایالات متحده، کانادا، و ژاپن است، این کشورها به چنین رویکردی و متعاقباً پژوهش در حوزه ایمنی حریق در ساخت‌وسازها گرایش یافته‌اند. لازم به ذکر است که همه آنها تجربه سوانح سنگین آتش‌سوزی را در تاریخ خود و در دوران حاضر دارند.^{۱۳} بنابراین به‌درستی می‌توان سطح ایمنی در برابر آتش‌سوزی و حفاظت از ساختمان‌ها را معیار منعکس‌کننده شرایط کلی اقتصادی، اجتماعی، و ویژگی‌های فرهنگی یک جامعه در نظر گرفت.^{۱۴} در روش تأمین ایمنی حریق، بر اساس ضوابط مبتنی بر عملکرد، انجام دو نوع مدل‌سازی با «مدل‌های حریق (توسعه آتش و دود در ساختمان)» و «مدل‌های تخلیه» ضروری هستند. کار با مدل‌های تخلیه می‌تواند هم‌پوشانی زیادی با حوزه فعالیت معماران داشته باشد، که در کشور ما کمتر به آن پرداخته شده است. حوزه علمی مطالعه حرکت جمعیت و تخلیه نسبتاً جوان و درعین‌حال پیچیده است. اگر ساختار دانش در یک حوزه علمی، در سلسله‌مراتبی به‌مثابه «ت ۱» خلاصه شود، می‌توان اظهار داشت که هنوز تقریباً یک تئوری جامع مورد توافق برای «حرکت جمعیت» و یا تئوری «رفتار در هنگام حریق و تخلیه اضطراری»^{۱۵} وجود ندارد.^{۱۶} به همین دلیل است که در ادبیات مربوط به مطالعه حرکت

11. B.J. Meacham & J.R. Thomas, "20 Years of Performance-based Fire Protection Design" p. 250.
 12. G. Chu, "Decision Analysis on Fire Safety Design Based on Evaluating Building Fire Risk to Life", p. 1125.
 13. R.M. Tavares, "An Analysis of the Fire Safety Codes in Brazil", p. 751.
 14. A. Hasofer, et al, *Risk analysis in building fire safety engineering*, p. 2.

۲. شمایی از پایگاه داده متشکل از ۱۵۲ مقاله و کدگذاری متغیرهای مورد بررسی در نرم‌افزار SPSS، پژوهش و تدوین: نگارندگان.

Case	year	Type	MethodScale	Model	Case	Field	JointResearch	Continent
129	2018	1	1	2	3	3	1	1
130	2018	1	1	1	4	2	1	5
131	2018	7	1	2	3	5	1	1
132	2019	6	1	3	3	3	1	1
133	2017	5	3	0	2	3	1	1
134	2018	1	1	1	3	4	1	5
135	2017	1	1	1	3	2	1	1
136	2017	9	2	0	5	4	0	1
137	2018	7	1	1	6	4	1	1
138	2019	6	1	1	4	2	1	3
139	2017	1	2	0	6	5	1	1
140	2019	1	1	3	3	5	0	2
141	2017	1	1	1	2	3	1	4
142	2019	6	1	2	3	1	1	1
143	2019	1	1	1	2	4	1	1
144	2019	9	2	0	6	4	0	1
145	2018	7	1	3	3	5	0	1
146	2018	1	1	3	3	5	0	1
147	2016	6	1	1	2	4	0	3
148	2017	1	1	3	3	5	0	3
149	2017	9	2	0	1	4	0	1
150	2018	1	1	1	2	3	1	1
151	2018	1	1	1	2	4	1	1
152	2012	1	2	0	3	5	1	1

15. E. Kuligowski, "Predicting Human Behavior During Fires", p. 103.
16. H. Klüpfel, "Crowd Dynamics Phenomena, Methodology and Simulation", p. 216.
17. <https://www.sciencedirect.com>
18. architecture
19. design
20. geometry
21. layout, plan
22. path
23. route, way
24. configuration
25. evacuation
26. egress
27. escape

ت ۳. ساختار روش‌شناسی پژوهش، پژوهش و تدوین: نگارندگان.

دسته تقسیم شدند: کلیدواژگان مرتبط با «معماری» که شامل واژه‌های معماری^{۱۸}، طراحی^{۱۹}، هندسه^{۲۰}، نقشه^{۲۱}، مسیر^{۲۲}، راه^{۲۳}، و پیکره‌بندی^{۲۴} بودند؛ کلیدواژه‌های مربوط به مبحث «تخلیه اضطراری» که شامل تخلیه^{۲۵}، خروج^{۲۶}، و فرار^{۲۷} بودند و بسته به رویکرد پژوهشگران مختلف به ماهیت فرایند نجات از خطر به کار گرفته می‌شدند؛ و کلیدواژگان محدودکننده نوع شرایط اضطراری که با توجه به هدف پژوهش حاضر که در آن سانه «حریق» مورد نظر بود، آتش‌سوزی^{۲۸}، ایمنی حریق^{۲۹}، و حفاظت در برابر حریق^{۳۰} در نظر گرفته شدند. کلیدواژگان با کلمات ربطی «و»^{۳۱} - «یا»^{۳۲} به هم ارتباط یافتند. همچنین برای محدود کردن تعداد مقالات و تدقیق حوزه جستجو، فقط مقالات بعد از سال ۲۰۰۰ گزیده شدند. در جستجوی اولیه بیش از ۳۰۰ مقاله یافت شد، اما تعداد زیادی از این مقالات، که خارج از چارچوب پژوهش حاضر بودند، از نتایج نهایی حذف گردیدند. مقالات حذف‌شده عمدتاً در دو دسته قرار داشتند:

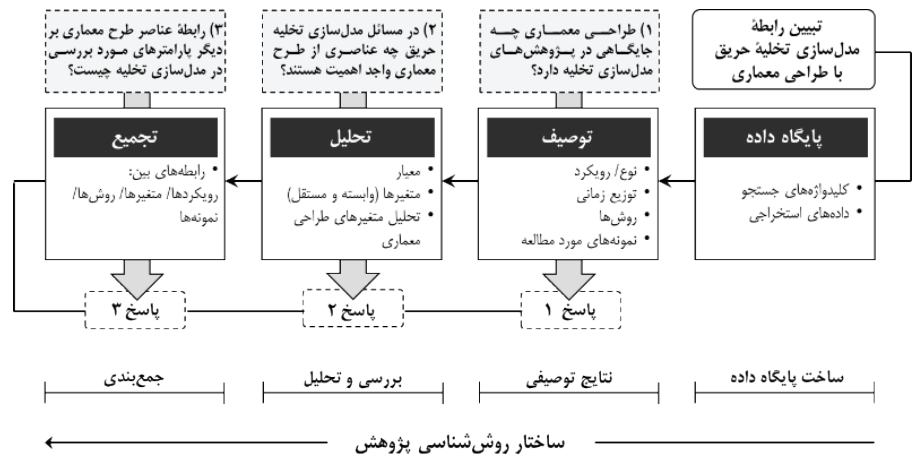
(۱) مسئله تخلیه مورد نظر در آنها به تخلیه شهری و منطقه‌ای (مقیاسی کلان) و یا وسایل حمل‌ونقل مانند قطار، کشتی، و هواپیما (مقیاس خرد) مربوط بود. این دسته پژوهش‌ها به لحاظ مقیاس مطالعه به ترتیب در سطوحی کلان‌تر و خردتر از

دامنه پژوهش حاضر قرار می‌گرفتند و در نتیجه طبعاً رویکردها و روش‌های به‌کار گرفته‌شده در آنها نیز منجر به استفاده از مدل‌های خاص برای تخلیه می‌شد که قابل توصیف و تعمیم در حوزه طراحی ساختمان نیست.^{۳۳}

(۲) مسئله آتش‌سوزی در آنها به آتش‌سوزی جنگل‌ها و بی‌شمارهاها مربوط بود و با توجه به نوع متفاوت سانه حریق، استراتژی‌های اثرگذار بر تخلیه نیز دارای تفاوت بنیادین با حوزه پژوهش مقاله حاضر است.

با حذف مقالات خارج از چارچوب، نهایتاً پایگاه داده‌ای از ۱۵۲ مقاله شکل گرفت. هریک از مقالات در یک ردیف از جدول پایگاه داده و اطلاعات آن در ستون‌های سال انتشار، نوع (رویکرد) پژوهش، مقیاس مدل‌سازی، روش مدل‌سازی، نوع نمونه موردی، زمینه علمی پژوهشگران، میان‌رشته‌ای بودن پژوهش، هدف اصلی (معیار یا متغیر وابسته)، متغیرهای مستقل، و شناسه DOI وارد گردید. «ت ۲» شمایی از پایگاه داده و کدگذاری‌های انجام‌شده را در محیط نرم‌افزار SPSS نشان می‌دهد. نتایج آماری از تحلیل اطلاعات این پایگاه داده حاصل شد که در ادامه شرح داده می‌شود.

پژوهش حاضر به‌لحاظ ماهیت بسیار مشابه پژوهش‌های از نوع فراتحلیل^{۳۴} است. در روش فراتحلیل تحقیقات انجام‌شده ارزیابی می‌شود و این با ترکیب مطالعات آماری با روش جستجوی سیستماتیک انجام می‌شود.^{۳۵} در واقع فراتحلیل به تحلیل آماری بسیاری از مطالعات و تحقیقات منفرد در حوزه‌های معین به‌منظور ترکیب و یکپارچه‌سازی نتایج آنها گفته می‌شود. در این روش از مجموع همه پژوهش‌های موجود تحلیل دیگری عرضه می‌گردد تا به‌منظور علمی بهره‌برداری شود. از آنجاکه تعداد بسیاری از مدل‌ها و روش‌ها در حوزه مدل‌سازی تخلیه حریق مشاهده می‌شود، برای تشخیص دستیابی به مناسب‌ترین چارچوب تبیین‌کننده رابطه مدل‌سازی با معماری، این روش توجیه‌پذیر و مقتضی است. در «ت ۳» گام‌های اصلی این



28. fire
 29. fire safety
 30. fire protection
 31. and, &
 32. or
 33. A. Cuesta, et al, "Future Challenges in Evacuation Modelling", p. 103.
 34. meta-analysis
 35. D. Makowski, et al, From Experimental Network to Meta-analysis, p. 105.
 36. simulation
 37. optimization
 38. planning
 39. M. Zawidzki, et al, "Crowd-Z: The User-friendly Framework for Crowd Simulation on an Architectural Floor Plan", p. 88.
 ۴۰. نک:
 Y. Qu, et al, "Modeling Detour Behavior of Pedestrian Dynamics under Different Conditions".

جدول ۱. آمار توصیفی نوع پژوهش‌ها در پایگاه داده، پژوهش و تدوین: نگارندگان.

نوع پژوهش					برنامه‌ریزی	بهینه‌سازی	طراحی	شبیه‌سازی
تلفیقی								
شبیه‌سازی - طراحی	شبیه‌سازی - برنامه‌ریزی	شبیه‌سازی - طراحی	شبیه‌سازی - برنامه‌ریزی	شبیه‌سازی - طراحی				
۲٪	۱۱٪	۶٪	۵۲٪	۷۳٪	۹۲٪	۱۲٪	۶٪	۴۰٪
۳۱٪								

ورونوئی اصلاح شده است تا بتوان حرکت‌های انحرافی افراد از مسیرهای مستقیم را به هنگام تخلیه بازتولید کرد.^{۴۰} نکته مهم در زمینه پژوهش‌های شبیه‌سازی این است که اگر نتایج کسب‌شده از یک مدل جدید با داده‌های آزمایش‌های میدانی و یا مدل‌های قابل‌اعتماد موجود اعتبارسنجی نشود، به لحاظ علمی مورد اطمینان و کاربردی نخواهند بود.^{۴۱}

در پژوهش‌های «طراحی»، با انتخاب یک مدل تخلیه مورد اطمینان، پارامترهای مربوط به مدل ثابت نگه داشته می‌شوند و با تغییرات پارامترهای مربوط به طرح کالبدی ساختمان، تأثیرات بر نتایج مدل‌سازی بررسی می‌شوند. مثلاً لوی و همکاران بررسی کرده‌اند که چگونه دو عامل شکل طبقه و مقطع ساختمان بر زمان تخلیه اثرگذار هستند.^{۴۲} تیان اثر استراتژی‌های مختلف طراحی را بر تخلیه، یعنی میزان اثر تغییر تعداد خروج‌ها، عرض راهروها، و جانمایی مکان ایمن بر زمان تخلیه را مطالعه و بررسی کرده است.^{۴۳} شیواکوتی و همکاران تأثیر زاویه تقاطع دو مسیر مخالف (۶۰، ۹۰، و ۱۸۰ درجه) را بر جریان حرکتی تخلیه مطالعه کرده‌اند.^{۴۴} لیاو و همکاران بررسی کرده‌اند که چگونه آرایش محدب یا مقعر درگاه‌های خروجی یک استادیوم بر تخلیه جمعیت در شرایط اضطراری اثرگذار است.^{۴۵}

در پژوهش‌های «بهینه‌سازی»، که محبوب‌ترین گرایش حوزه مدل‌سازی تخلیه در سال‌های اخیر هستند، تعامل و هم‌پوشانی زیادی با سایر انواع پژوهش‌های شبیه‌سازی،

پژوهش و مباحث هر گام بر اساس پرسش‌های طرح‌شده نشان داده شده است.

۲. توصیف نتایج بررسی پایگاه داده

۱.۲. نوع پژوهش‌ها

مقاله‌ها از منظر نوع پژوهش در پنج گروه قرار گرفته‌اند (جدول ۱): شبیه‌سازی^{۳۶}، طراحی، بهینه‌سازی^{۳۷}، برنامه‌ریزی^{۳۸}، و رویکرد تلفیقی (یا دوگانه‌های شبیه‌سازی - طراحی، شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، شبیه‌سازی - برنامه‌ریزی، طراحی - بهینه‌سازی، بهینه‌سازی - برنامه‌ریزی). با در نظر داشتن این پیش‌فرض که در پژوهش‌های مدل‌سازی تخلیه دو دسته پارامترهای مربوط به برنامه رایانه‌ای مدل (شیوه‌بازنمایی افراد، رفتارها، و الگوهای مسیریابی) و محیط کالبدی ساختمان در نتایج هر سناریوی مدل‌سازی اثرگذار هستند، می‌توان انواع پنج‌گانه پژوهش‌های فوق را از هم متمایز کرد و به‌طور مجزا توضیح داد.

در میان همه انواع پژوهش‌ها، «شبیه‌سازی» بیشترین فراوانی را دارد (۴۰٪). در پژوهش‌های شبیه‌سازی هدف اصلی دستیابی به برنامه رایانه‌ای و تنظیماتی برای مدل تخلیه است که بتواند شرایط یک سناریوی تخلیه را در ساختمانی خاص تا حد ممکن نزدیک به شرایط واقعی بازتولید کند. بنابراین مشخصه اصلی این نوع پژوهش‌ها «معرفی یک روش جدید» برای مدل‌سازی تخلیه است. محققان در پژوهش‌های شبیه‌سازی یا به معرفی روش‌ها و مدل‌های جدید برای تخلیه می‌پردازند، مانند کار زاویدسکی برای معرفی مدل موسوم به Crowd-Z برای شبیه‌سازی و مطالعه تخلیه جمعیت از یک پلان معماری^{۳۹} و یا اینکه اصلاحاتی را بر مدل‌های موجود اعمال می‌کنند تا نتایج مدل را به‌منظور بهره‌برداری برای کاربرد خاصی مناسب‌سازی کنند، مانند پژوهش کو و همکاران که در آن مدل نیروی اجتماعی با تلفیق با یک دیگرام

41. V.J. Cassol, et al, *Simulating Crowds in Egress Scenarios*, p. 36.
42. C.H. Lui, et al, "Constructural Design of Evacuation from a Three-dimensional Living Space", p. 47.
43. J. Tian, "The Physics and Simulation of Occupant Traffic Flow in the Case of Evacuating Public Building Area", p. 76.
44. N. Shiwakoti, et al, "Examining Influence of Merging Architectural Features on Pedestrian Crowd Movement", p. 15.
45. W. Liao, et al, "Layout Effects of Multi-exit Ticket-inspectors on Pedestrian Evacuation", p. 1.
46. J. Wu, et al, "The Position of a Door Can Significantly Impact on Pedestrians' Evacuation Time in an Emergency", p. 29.
47. Q.M. Xie, et al, "The Optimization for Location of Building Evacuation Exits ...", p. 818.
48. Y. Zhao, et al, "Optimal Layout Design of Obstacles for Panic Evacuation Using Differential Evolution", p. 175.
۴۹. نک: H. Liu, et al, "A Path Planning Approach for Crowd Evacuation in Buildings Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm".

طراحی، و برنامه‌ریزی مورد نظر است. به‌طور مثال در تبیین رابطه آنها با پژوهش‌های طراحی می‌توان گفت، برخلاف پژوهش‌های حوزه طراحی که در آنها نتایج شرایط مختلف صرفاً گزارش می‌شوند و یا اینکه در بهترین حالت یک گزینه از میان گزینه‌های موجود انتخاب می‌شود، در نتایج پژوهش‌های بهینه‌سازی «بهینه‌ترین پاسخ برای یک مسئله از میان همه راهکارهای ممکن» را جستجو می‌کنند. به بیان دیگر، در پژوهش‌های بهینه‌سازی روشی «پویا» در دستیابی به نتایج مطلوب با ابزار مدل‌سازی تخلیه اتخاذ می‌گردد. به‌طور مثال وو و همکاران بررسی کردند که بهترین موقعیت برای جانمایی «در» یک اتاق مستطیل‌شکل در چه بخشی از دیوار است. آنها نتیجه گرفتند که صرف‌نظر از اندازه اتاق و تعداد متصرفان، بهینه‌ترین موقعیت جای‌گذاری در همواره وسط بزرگ‌ترین دیوار است.^{۴۶} زی و همکاران نیز در پژوهشی مشابه، بهینه‌ترین حالت جانمایی دو خروج را برای یک فضای مربع شکل برای به حداقل رساندن زمان تخلیه بررسی کرده‌اند.^{۴۷} ژائو و همکاران نیز نشان دادند، که در صورت قرارگیری هوشمندانه یک مانع جلوی خروجی یک فضا، می‌توان جریان خروج افراد را سرعت بخشید. ایشان در پژوهش خود به یافتن مطلوب‌ترین ویژگی‌های هندسی شکل مانع و نیز بهینه‌سازی موقعیت قرارگیری آن پرداختند.^{۴۸} در پژوهش‌های بهینه‌سازی امکان مطالعه هر دو دسته پارامترهای مربوط به مدل و یا پارامترهای مربوط به ساختمان وجود دارد.

پژوهش‌های «برنامه‌ریزی» غالباً با هدف آمادگی برای مدیریت جمعیت در شرایط اضطراری تخلیه انجام می‌شوند و در آنها به زمان‌بندی‌های حرکت گروه‌های مختلف متصرفان و نیز توزیع جمعیت در فضاها پرداخته می‌شود. لیو و همکاران استراتژی مسیریابی تخلیه را برای گروه‌های متصرفان بر اساس فاصله از خروج‌ها و تراکم افراد معرفی کرده‌اند.^{۴۹} لی و ژو برای انتخاب مسیر مناسب برای تخلیه متصرفان

از ساختمان، چارچوبی مبتنی بر ارزیابی ریسک سناریوهای مختلف تخلیه را پیشنهاد دادند تا در نهایت کوتاه‌ترین مسیرها با کمترین خطر انتخاب شوند.^{۵۰} به غیر از ضرورت وجود آمادگی پیش از سانحه برای مدیریت تخلیه، امکان‌پذیر بودن انجام تحلیل‌های هم‌زمان با شرایط اضطراری نیز دغدغه بزرگی در این نوع پژوهش‌ها است و نمونه آن را می‌توان در کار دسمت و گلنبر برای برآورد سریع وضعیت مسیرها در حین تخلیه مشاهده کرد.^{۵۱}

پژوهش‌های «تلفیقی» رتبه دوم فراوانی را در بین همه انواع پژوهش‌ها دارند (۳۱/۶٪). در این پژوهش‌ها از دو نوع از روش‌های مذکور در ترکیب با هم برای پاسخ به پرسش‌های پژوهش استفاده می‌شود. به‌طور مثال اصلاح مدل نیروی اجتماعی برای تخصیص مسیر به متصرفان در حین تخلیه بر اساس ظرفیت مسیرها و نقاط ازدحام، نوعی پژوهش تلفیقی شبیه‌سازی - برنامه‌ریزی است که سانگ و همکاران انجام داده‌اند.^{۵۲} مثالی از تلفیق پژوهش‌های شبیه‌سازی - طراحی را می‌توان در مقاله لیان و همکاران مشاهده کرد. در این کار ابتدا یک سری آزمایش میدانی با حضور ۲۹۵ نفر برای تقاطع دو راهرو با زاویه ۴۵ درجه انجام گرفت و نتایج به‌صورت یک مدل کمی درآمد. سپس اثر عرض‌های مختلف راهرو بر جریان حرکتی تخلیه با ثابت نگاه داشتن عرض راهروی اصلی به میزان ۳/۲ متر و تغییر عرض راهرو فرعی به ۰/۸ ، ۱/۶ و ۲/۴ مطالعه شد.^{۵۳}

۲.۲. توزیع زمانی پژوهش‌ها

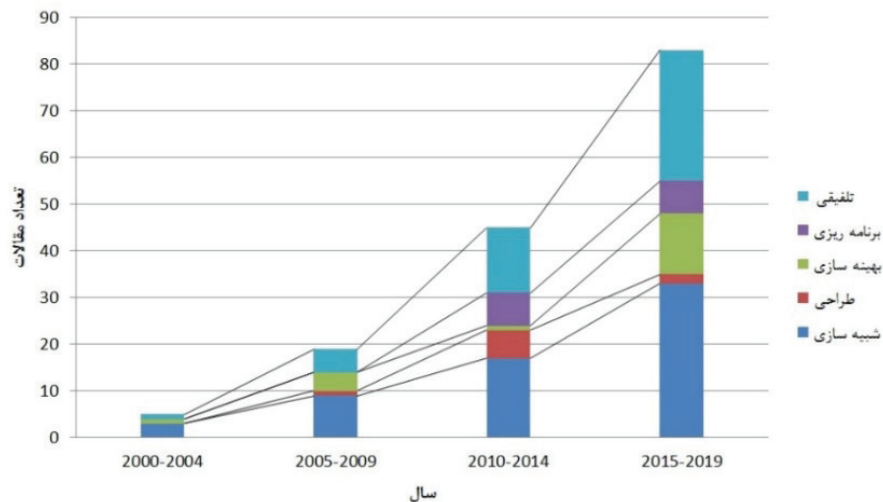
به‌منظور تشخیص سیر رشد انواع پنج‌گانه رویکردهای پژوهشی، نمودار توزیع زمانی مقالات در بازه‌های پنج‌ساله ترسیم گردید (ت ۴). بر اساس این نمودار دریافت می‌شود که رویکردهای شبیه‌سازی و رویکرد تلفیقی در طی زمان همواره رشد و توسعه یافته‌اند. رویکرد طراحی نیز رشد چشمگیری را طی سال‌های

50. J.J. Li & H.Y. Zhu, "A Risk-based Model of Evacuation Route Optimization under Fire", p. 365.

۵۱. نک:

A. Desmet & E. Gelenbe, "Graph and Analytical Models

ت ۴. توزیع زمانی گروه‌های پنج‌گانه پژوهش‌های مدل‌سازی تخلیه از سال ۲۰۰۰ به بعد، پژوهش و تدوین: نگارندگان. جدول ۲. آمار زمینه علمی نگارندگان بر اساس نویسنده اول، پژوهش و تدوین: نگارندگان.



زمینه علمی نگارندگان بر اساس نویسنده اول

معماری، عمران، و علوم ساختمان	رایانه و فناوری اطلاعات (IT)	ایمنی حریق و HSE	ترافیک و حمل‌ونقل	سایر رشته‌های مهندسی	سایر علوم
٪۲۱/۱	٪۲۰/۴	٪۱۲/۵	٪۷/۹	٪۲۳/۷	٪۱۴/۵

مربوط به طراحی ساختمان را طرح، متخصصان حوزه ایمنی حریق سطوح محافظتی مورد انتظار را در شرایط اضطراری تبیین، و متخصصان حوزه رایانه، بر اساس مسائل طراحی ایمنی، پارامترهای مدل‌سازی را تنظیم و یا همگام‌سازی کنند. نمونه‌ای از پژوهش‌های تلفیقی را می‌توان در کار چن و همکاران و با تلفیق سه حوزه مهندسی ایمنی حریق، مهندسی ترافیک، و معماری برای توسعه یک مدل حرکت متصرفان مبتنی بر محدودیت هندسی در راه‌پله‌ها مشاهده کرد.^{۵۵}

۴.۲. انواع مدل‌ها

در ادبیات موضوع، دسته‌بندی‌هایی مختلف از منظرهای گوناگونی برای مدل‌های تخلیه وجود دارد. یکی از رایج‌ترین دسته‌بندی‌ها بر اساس «مقیاس»، پرداختن به مؤلفه‌های اصلی مدل‌سازی از قبیل نحوه بازنمایی انسان در مدل و نمایش هندسه

۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ داشته است، اما در سال‌های اخیر (۲۰۱۵ تا کنون) توجه بیشتری به بهینه‌سازی نسبت به طراحی معطوف شده است.

۳.۲. زمینه علمی نگارندگان

یکی از موضوعات دیگر مورد بررسی در پایگاه داده، زمینه علمی نگارندگان بوده است. از آنجاکه اکثریت قریب به اتفاق مقالات دارای بیش از یک نگارنده بودند، تنها زمینه علمی نفر اول در فهرست نگارندگان مورد استناد قرار گرفت. با بررسی و دسته‌بندی زمینه‌های علمی، می‌توان شش زمینه اصلی را به شرح زیر مشخص کرد (جدول ۲):

- معماری، عمران، و علوم ساختمان
 - رایانه و فناوری اطلاعات
 - ایمنی حریق و HSE
 - ترافیک و حمل‌ونقل
 - سایر رشته‌های مهندسی (مکانیک، الکترونیک، صنایع، نفت، معدن، شهرسازی، مهندسی فناوری‌های پیشرفته)
 - سایر علوم (فیزیک، ریاضیات کاربردی، جغرافی، مدیریت منابع و محیط، مدیریت بحران، علوم انسانی، پلیس)
- همچنین فهمیده شد که ۵۹/۲٪ از پژوهش‌ها به صورت میان‌رشته‌ای و توسط گروه‌های متشکل از متخصصان با زمینه‌های علمی متفاوت انجام شده‌اند و ۴۰/۸٪ پژوهش‌ها به صورت تک‌رشته‌ای و توسط نگارندگان دارای زمینه علمی مشترک انجام شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده پیچیدگی ذاتی مسائل مربوط به حوزه تخلیه^{۵۴} و تنوع عوامل مؤثری است که در یک پژوهش مدل‌سازی تخلیه باید مورد توجه باشد و از این‌رو بهتر است مسائل مختلف در این حوزه در زمینه‌ای میان‌رشته‌ای طرح شود تا به پاسخ‌هایی دقیق‌تر و همه‌جانبه‌تر به‌دست آید؛ به‌طور مثال در یک ساختار پژوهشی سه‌جانبه، متخصصان می‌توانند حوزه معماری و علوم ساختمان مسائل

for Emergency Evacuation".
52.. X. Song, et al,
"Characteristic Time
Based Social Force Model
Improvement and Exit
Assignment Strategy for
Pedestrian Evacuation", p. 530.
۵۳. نک:

L. Lian, et al, "Pedestrian
Merging Behavior Analysis:
An Experimental Study".
54. H. Vermuyten, et al, "A
Review of Optimisation
Models for Pedestrian
Evacuation and Design
Problems", p. 168.
55. J. Chen, et al, "Geometric
Constraint Based Pedestrian
Movement Model on
Stairways", p. 1212.
56. macroscopic
57. mesoscopic
58. microscopic
59. coarse network
60. particles

جدول ۳. آمار توصیفی روش‌های
پژوهش مدل‌سازی در پایگاه داده،
پژوهش و تدوین: نگارندگان.

فضا انجام می‌شود. بر اساس معیار مقیاس، می‌توان مدل‌های
تخلیه را در سه مقیاس اصلی ماکروسکوپی^{۵۶} (کلان‌نگر)،
مزوسکوپی^{۵۷} (میان‌نگر) و میکروسکوپی^{۵۸} (خردنگر)
طبقه‌بندی کرد.

در رویکرد ماکروسکوپی، افراد به‌طور جداگانه در مدل
نشان داده نمی‌شوند و فقط رفتار جمعی در نظر هستند و
محققان تمایزی بین اجزا قائل نمی‌شوند، بلکه از روشی مشابه
با جریان سیالات استفاده می‌کنند. افراد معمولاً به‌صورت یک
سیال مصنوعی دوبعدی نشان داده می‌شوند که در هندسه فضا
جریان می‌یابند. در مدل‌های ماکروسکوپی حرکت جمعیت را
به‌مثابه یک سیال در نظر می‌گیرند و فضای کالبدی را نیز در
قالب یک شبکه سخت^{۵۹} (گراف) ساده‌سازی می‌کنند. گرچه
این مدل‌ها به‌لحاظ محاسباتی بهره‌وری بالایی دارند، اما
قابلیت بازنمایی تعاملات و عدم‌تجانس‌ها در میان افراد و نیز
ظرافت‌های طرح کالبدی فضا را ندارند. باوجود این، کاربرد این
مدل‌ها برای شبیه‌سازی جمعیت انبوه، که در آن جریان حرکتی
متراکم می‌شود، مناسب است.

در مدل‌های مزوسکوپی (یا ترکیبی از مدل‌های خرد
و کلان‌نگر) جمعیت به‌مثابه یک گاز تراکم‌پذیر شکل‌گرفته
از ذرات^{۶۰} مبین‌کننده افراد در نظر گرفته می‌شوند. با اصلاح
و مناسب‌سازی تئوری دینامیک گازها، یک مدل آماری از
جمعیت به‌دست می‌آید که توزیع موقعیت‌ها و سرعت‌های افراد
را به‌صورت احتمالی نشان می‌دهد.^{۶۱}

در مدل‌های میکروسکوپی افراد به‌صورت مجزا و منفرد
در نظر گرفته می‌شوند و جمعیت به‌مثابه یک سیستم متشکل
از مجموعه افراد شکل می‌گیرد. این رویکرد در مقایسه با روش
ماکروسکوپی، به واقعیت نزدیک‌تر است؛ چراکه در واقعیت
نیز ازدحام افراد در تخلیه در اثر حرکت افراد در گروه‌های بزرگ
است.^{۶۲} در مدل‌های میکروسکوپی هندسه فضا می‌تواند
به‌صورت یک شبکه نرم^{۶۳} گسسته‌سازی شود و یا اینکه فضایی
پیوسته باشد (جدول ۳).

در مقاله‌های بررسی‌شده از روش‌های مختلفی برای انجام
مدل‌سازی در جهت رسیدن به هدف پژوهش استفاده شده
است. با توجه به پیشرفت‌ها در حوزه مدل‌سازی میکروسکوپی
و مزیت‌های این مدل‌ها در پوشش مسائل مختلف پژوهشی،
مشاهده می‌شود که اکثریت روش‌ها در این دسته قرار
می‌گیرند. مدل‌های میکروسکوپی خود شامل این چهار روش
می‌شوند: مدل‌های اتوماتای سلولی^{۶۴}، نیروی اجتماعی^{۶۵}، مبتنی
بر عامل^{۶۶}، و سیستم‌های چندین‌عاملی^{۶۷}، و مدل‌های هوش
ازدحامی^{۶۸}.

ایده مدل‌های موسوم به «اتوماتای سلولی» را در دهه
۱۹۵۰ فن‌نویسن^{۶۹} معرفی کرد که، برخلاف بسیاری از مدل‌ها،
با فرمول‌های فیزیکی ثابت یا توابع مشخص تعریف نمی‌شود،
بلکه مجموعه‌ای از «قانون‌ها» است. مدل‌های اتوماتای سلولی
سیستم پویایی است که در فضای گسسته‌ای متشکل از
سلول‌هایی با شرایط محدود تعریف می‌شود.^{۷۰} در مدل‌های
ابتدایی عموماً افراد تحت عنوان «ذره» نام برده می‌شدند، اما
با معرفی مدل‌های جدیدتر و تعیین قوانین پیچیده‌تر رفتاری
می‌توان آنها را تحت عنوان «عامل»^{۷۱} نیز نام برد. در این
مدل‌ها پلان از طریق تبدیل به یک شبکه سلولی گسسته‌سازی
می‌شود^{۷۲} و سلول‌ها می‌توانند دارای اشکال مختلفی باشند
(مربع، شش‌ضلعی، و ...). بر اساس مطالعات میدانی انجام‌شده،
عموماً فضایی که هر انسان ایستاده اشغال می‌کند حداقل به

روش پژوهش						
نامعلوم	ترکیبی یا مزوسکوپی (میان‌نگر)	میکروسکوپی (خردنگر)				ماکروسکوپی (کلان‌نگر)
		هوش ازدحامی (SI)	مبتنی بر عامل چندین‌عاملی (MAS و ABM)	نیروی اجتماعی (SFM)	اتوماتای سلولی (CA)	
٪۱،۳	٪۱۲،۵	٪۵،۳	٪۳۰،۳	٪۱۳،۱	٪۱۶،۴	٪۲۱،۱
٪۶۵،۱						

ملاحظات مربوط به تعیین جهت مسیر. این نیروها هر یک به صورت «بردار» بر عامل اثر می‌گذارند و نیروی اثر کلی که حرکت عامل را در هر گام زمانی تعیین می‌کند، ماحصل جمع جبری زیر خواهد بود^۶:

نیروی اثر کلی = اثر خواست عابر برای حرکت به سمت هدف + دافعه سایر عامل‌ها + دافعه موانع و مرزها + اثر جاذبه گروه.

مدل‌های «مبتنی بر عامل» پیشرفته‌ترین نوع مدل‌های محاسباتی میکروسکوپی هستند که در سال‌های اخیر برای مطالعه تخلیه جمعیت بسیار به آنها اقبال شده است. گرچه این مدل‌ها نسبت به دو نوع دیگر مدل‌های میکروسکوپی به لحاظ محاسباتی سنگین و پرهزینه هستند، اما توانایی آنها برای امکان‌پذیر کردن اینکه هر عامل رفتار منحصر به خود را داشته باشد، کاربرد آن را برای شبیه‌سازی جمعیت‌های ناهمگون توجیه‌پذیر کرده است. مدل‌های مبتنی بر عامل بر مبنای عامل‌های دارای هوش توسعه یافته‌اند و قواعد روان‌شناختی، فرهنگی، توان حرکتی، و اثرات هندسه محیط (مانند میدان دید) را می‌توان برای عامل‌ها تعریف کرد. در نتیجه این مدل‌ها می‌توانند توصیفی طبیعی‌تر از سیستم جمعیتی را فراهم کنند و حتی قادر به بازتولید پدیده‌های رفتاری در جمعیت از قبیل شکل‌گیری مسیرها، آرایش قوسی شکل عامل‌ها در خروجی‌ها، اثر کاهش سرعت، اصل تلاش حداقلی، و مواردی از این دست هستند. هرچند مدل‌های مبتنی بر عامل قابلیت بهره‌گیری از پیشرفت‌های علم شناختی را دارند، اما مدل کردن رفتار عامل‌های انسانی در آنها مستلزم طی کردن فرایندی پیچیده است.

دسته آخر مدل‌های میکروسکوپی مدل‌های «هوش ازدحامی» در «سیستم‌های چندعاملی» هستند. استفاده از سیستم‌های ازدحامی که از موجودات دارای زندگی گروهی الهام گرفته است، از اوایل دهه ۱۹۹۰ آغاز شد. در ابتدا

اندازه 40×40 سانتی‌متر است که از این فضا به‌منزله مبنایی برای تعیین اندازه سلول استفاده می‌شود. از محدود بودن ابعاد سلول می‌توان دریافت که در این نوع مدل‌ها سقف حداکثر تراکم در محیط نیز محدود است. هر سلول می‌تواند دارای سه حالت باشد: (۱) خالی باشد، (۲) توسط یک عامل (ذره) اشغال شده باشد، (۳) به‌وسیله مانعی مسدود شده باشد. سلول‌های مسدود نمایانگر دیوارها و موانع هستند و عامل‌ها فقط می‌توانند در سلول‌های خالی که عامل دیگری آنها را اشغال نکرده‌اند، حرکت کنند. قانون حرکت در مدل اتوماتای سلولی ساده است، عامل‌ها در میان این شبکه سلولی بر اساس محاسبه احتمال انتقال به سلول‌های همسایه حرکت می‌کنند. محاسبه احتمال انتقال با در نظر گرفتن (۱) کوتاه‌ترین اتصال با سلول همسایه، (۲) تعاملات با دیگر عامل‌ها، و (۳) برهم‌کنش با محیط انجام می‌شود. امروزه مدل‌های پیشرفته‌تر اتوماتای سلولی بر مبنای کاربرد میدان‌های زمینه‌ای^{۷۳}، که درحقیقت گرانش وارد شده از طرف محیط کالبدی و اجتماعی اطراف بر حرکت عامل است، توسعه یافته‌اند و رواج دارند.^{۷۴}

مدل‌های «نیروی اجتماعی» دسته‌ای دیگر از مدل‌های میکروسکوپی هستند. نسخه اولیه این مدل‌ها را در سال ۱۹۹۵ هلبینگ و مولنار^{۷۵} عرضه کردند و تا به امروز اصلاحیه‌ها و بهبودهای فراوانی برای آن در پژوهش‌های مختلف عرضه شده است. در مدل نیروی اجتماعی از فرمول‌های ریاضی ساده‌ای برای توصیف فرایند حرکت عامل استفاده می‌شود. در این مدل فرض بر آن است که هر عامل (در جمعیتی متشکل از چندین عامل) این توانایی را دارد که محیط اطراف را ادراک کند و به آن واکنش دهد. تعاملات بین عامل و محیط از طریق «نیروها» تعریف می‌شود. این مدل شامل این نیروها و ملاحظات است: (۱) نیروی محرک پیشبرد به سمت هدف، (۲) نیروهای دافعه دیگر عامل‌ها، (۳) نیروهای دافعه موانع و مرزها، (۴) نیروهای جاذبه دوستان و گروه‌های آشنایان، و (۵) دیگر

61. Y. Li, et al, "A Review of Cellular Automata Models for Crowd Evacuation", p. 120753.
62. D. Nilsson & C. Uhr, "Complex Systems – A Holistic Approach for Understanding and Modelling Fire Evacuation Behaviour", p. 526.
63. fine network
64. CA: Cellular Automata
65. SFM: Social Force Models
66. ABM: Agent-based Models
67. MAS: Multi Agent Systems
68. SI: Swarm Intelligence
69. Von Neumann
70. Li, et al, ibid.
71. agent
72. E. Ronchi & D. Nilsson, "Basic Concepts and Modelling Methods", p. 13.
73. floor fields
74. A. Schadschneider, et al, Stochastic Transport in Complex Systems, p. 430.
75. Helbing and Molnar
76. X. Chen, et al, "Social Force Models for Pedestrian Traffic-state of the Art", p. 632.

نیز در طی زمان از رویکرد شبیه‌سازی به سمت پژوهش‌های بهینه‌سازی گرویده است. این موضوع نشان می‌دهد که گرچه سیستم‌های مبتنی بر عامل دقیق‌ترند، اما پرهزینه و زمان‌بر هستند. بنابراین سیستم‌های هوش ازدحامی میان‌بری خواهند بود تا ضمن برخورداری از مزایای وجود عامل‌های هوشمند و اثر تعاملات رفتاری بر تخلیه، در زمان و هزینه مدل‌سازی صرفه‌جویی شود.

۵.۲. نمونه‌های موردی مدل‌سازی شده

مجموعه متنوعی از نمونه‌های موردی با عنوان بستر کالبدی شبیه‌سازی تخلیه در مقاله‌های بررسی‌شده مشاهده گردیدند. نمونه‌های موردی در هفت گروهی، که در ادامه شرح داده می‌شوند، طبقه‌بندی شدند و فراوانی آنها نیز در «جدول ۴» نشان داده شده است.

نوع اول نمونه‌های موردی مدل‌سازی شده «شبکه‌ها و گراف‌ها» هستند. در این گروه، فضای کالبدی به صورت یک گراف یا شبکه سخت منتزع شده و یا اینکه صرفاً یک گراف به‌منزله بیانی از روابط فضایی و سیرکولاسیون تحلیل شده است.

در گروه دوم «مواضعی در پلان» مدل‌سازی شده است یعنی مدل‌سازی صرفاً برای مواضع و گوشه‌هایی از ساختمان انجام شده است؛ مانند تقاطع دو راهرو، محل گیشه فروش بلیط، و ...

در گروه سوم نمونه‌های موردی برای مدل‌سازی به «یک اتاق یا یک فضای منفرد» اختصاص دارد و مدل‌سازی تخلیه افراد از یک اتاق یا یک فضای منفرد در یک طبقه انجام گرفته است. در چنین نمونه‌هایی معمولاً رابطه تعداد درهای خروج نسبت به بار تصرف و جانمایی خروج‌ها نسبت به هندسه اتاق و نیز تأثیر عواملی همچون عناصر معماری (مثل ستون‌ها) و مبلمان، به‌مثابه موانع موجود در فضا بر روند تخلیه و ازدحام در

مطالعات در این حوزه بر فهم چگونگی همانندسازی رفتار انسان با رفتار حیوانات در شرایط اضطراری متمرکز بوده است. این ایده منجر به شکل‌گیری روش‌های محاسباتی مختلفی موسوم به الگوریتم‌های کلونی مورچگان^{۷۷}، روش بهینه‌سازی ذرات ازدحامی^{۷۸}، کلونی زنبورها^{۷۹} و ماهی‌ها^{۸۰} شد؛ اما به‌طور خاص دو الگوریتم ACO و PSO در پژوهش‌های تخلیه رایج‌تر هستند.

در الگوریتم ACO از رفتار مورچه‌ها به‌هنگام جستجو برای غذا الهام گرفته شده است و به‌طور خاص توانایی مورچه‌ها را برای یافتن کوتاه‌ترین راه بین لانه و منبع غذا به‌واسطه ترشح ماده‌ای به نام فرومون^{۸۱} می‌نمایاند.

در الگوریتم PSO از رفتار طبیعی دسته ماهی‌ها و دسته پرندگان الهام گرفته شده است. گرچه در ابتدا ایده اصلی شبیه‌سازی رفتار دسته پرندگان در تلاش برای رسیدن به مقصد نامعلوم بود، اما با پی بردن با حقایق همچون انتخاب رهبر در هر گام زمانی و اشتراک اطلاعات بین افراد گروه، امکان مدل‌سازی فرایند تخلیه با وجود در نظر گرفتن جنبه‌های رفتاری جمعیت انسان‌ها در واقعیت خودسازمان‌دهی و روان‌شناسی جمعیت و گروه‌ها و زیرگروه‌ها نیز فراهم شد.^{۸۲}

همان‌گونه که در «جدول ۳» نشان داده شده است، در میان مقالات تحلیل‌شده در پایگاه داده، مدل‌های مبتنی بر عامل دارای بیشترین فراوانی هستند. مدل‌های هوش ازدحامی گرچه فراوانی کمتری نسبت به سایر روش‌های میکروسکوپیک دارند، اما به لحاظ قدمت جدیدترین روش مدل‌سازی عرضه‌شده برای تخلیه هستند (اولین مقاله مربوط به سال ۲۰۰۹ است). نوع پژوهش‌های انجام‌شده با استفاده از روش هوش ازدحامی

- 77. ACO: Ant Colony
- 78. PSO: Particle Swarm Optimization
- 79. bee colony
- 80. fish colony
- 81. pheromone
- 82. G. Guizzi, et al, "Swarm Intelligence in Evacuation Problems: A Review", p. 334.

جدول ۴. آمار توصیفی نمونه‌های موردی مدل‌سازی شده در پژوهش‌های پایگاه داده، پژوهش و تدوین: نگارندگان.

نمونه‌های موردی مدل‌سازی شده						
شبکه یا گراف	مواضعی در پلان	یک اتاق / یک فضا	پلان طبقه	کل ساختمان	ساختمان پیچیده	تلفیقی
۲٪	۱۳٫۸٪	۱۱٫۲٪	۲۳٫۷٪	۳۶٫۲٪	۹٫۸٪	۳٫۳٪

با هدف ارزیابی قابلیت‌های یک مدل در حل مسائل طرح‌شده، دو یا چند نمونه از دسته‌های پیشین مدل‌سازی شده‌اند.

۳. بررسی و تحلیل

۱.۳. رابطه تخلیه و طرح معماری: معماری ایمن، معیاری برای تعریف طرح مطلوب از منظر تخلیه

با بررسی شاخص‌های فراوانی ماحصل از آمار توصیفی مقالات پایگاه داده و دسته‌بندی یافته‌ها، به پرسش اول مقاله حاضر در مورد «جایگاه طراحی معماری در پژوهش‌های مدل‌سازی تخلیه» پاسخ داده شد. برای پاسخ به پرسش‌های بعدی که «عناصر طراحی معماری واجد اهمیت در مسائل مدل‌سازی تخلیه حریق» و «رابطه آنها با دیگر پارامترهای مدل‌سازی تخلیه حریق» مورد سؤال هستند، لازم است تا تحلیلی بر روی فرایند علمی طی شده در مقالات جمع‌آوری شده انجام گردد. با توجه به اینکه هدف اصلی ایمنی حریق تأمین ایمنی متصرفان در هنگام شرایط آتش‌سوزی و به‌ویژه در تخلیه اضطراری ساختمان است، این هدف در مقالات مختلف با عباراتی نظیر «ایمنی تخلیه»، «عملکرد تخلیه/ خروج»، «تخلیه بهینه»، «موفقیت تخلیه»، «تخلیه مطلوب»، و «عملکرد ایمنی» بیان شده است. نکته حایز اهمیت دیگر اینکه معیارهای کالبدی و مرتبط با طرح معماری ساختمان بخشی انکارناپذیر و جدانشدنی برای مطالعه در همه انواع پنج‌گانه پژوهش‌های مربوط به تخلیه در شرایط اضطراری حریق هستند. هرچند در پژوهش‌های گوناگون از ادبیات متفاوتی برای اشاره به مؤلفه طراحی معماری استفاده شده است، تعدادی از شاخص‌ترین و پرتکرارترین عباراتی که در میان مقالات پایگاه داده ساخته شده برای اشاره به مطلوبیت معیار طراحی معماری در خصوص تخلیه به کار گرفته شده‌اند، چنین هستند:

– گزینه‌های طراحی ایمن^{۸۳}

– سیر کولاسیون بهینه/ سیر کولاسیون ایمن^{۸۴}

خروجی‌ها، مطالعه شده است.

در گروه چهارم مدل‌سازی «پلان طبقه» مورد توجه بوده است. با استناد به این اصل که اگر راه‌های خروج ساختمان به‌درستی طراحی و ساخته شده باشند، به محض رسیدن افراد به دستگاه پله و ورود به آن، ایمنی تا رسیدن به فضای باز بیرونی تأمین شده در نظر گرفته می‌شود، در پژوهش‌های بسیاری صرفاً حرکت افراد در سطح یک طبقه از ساختمان برای رسیدن به خروج‌های تأمین شده برای آن طبقه مدل‌سازی شده‌اند.

در گروه پنجم «کل ساختمان» مدل‌سازی می‌شود. در این نوع نمونه‌ها تخلیه یک ساختمان به‌طور کامل مدل‌سازی شده است و موارد مربوط به حرکت بین طبقات و دسترسی به فضای ایمن خارج از ساختمان نیز محاسبه گردیده است. در این نمونه‌ها بیشتر به ساختمان‌های اداری و یا آموزشی پرداخته شده است.

گروه ششم به مدل‌سازی «موارد پیچیده» اختصاص دارد. برخی ساختمان‌ها به‌لحاظ ویژگی‌های کالبدی دارای شرایط ویژه‌تری هستند؛ مثلاً دارای ارتفاع زیاد و یا تعدد طبقات هستند (ساختمان‌های بلندمرتبه)، عمیق هستند و در زیر زمین احداث می‌شوند (مانند ایستگاه‌های زیرزمینی مترو)، زیربنای زیادی دارند و بار تصرف و تعداد متصرفان در آنها بالاست (فرودگاه‌ها، استادیوم‌ها)، تلفیق تصرف‌های متنوع در آنها وجود دارد (مراکز جمعی و ساختمان‌های تجاری)، و یا اینکه متصرفان آنها دارای شرایط خاص و منحصربه‌فردی هستند (مانند بیمارستان‌ها، آسایشگاه‌ها، و زندان‌ها). تخلیه در چنین ساختمان‌هایی بسیار چالش‌انگیز است. به‌همین دلیل، در پژوهش‌های زیادی به مطالعه جنبه‌های مختلف خروج اضطراری در چنین ساختمان‌هایی پرداخته شده است.

در نهایت، در گروه هفتم بررسی نمونه‌های موردی «تلفیقی» مشاهده شد. در این پژوهش‌ها در نمونه‌هایی معمولاً

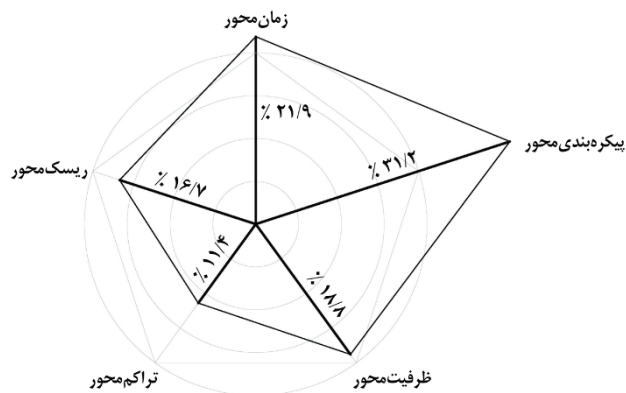
83. safe design options
84. optimum circulation/ safe circulation

در رویکرد زمان محور «زمان تخلیه» اصلی ترین شاخص تعیین کننده ایمن بودن طرح معماری ساختمان است. در این رویکرد مدل سازی تخلیه بر اساس تئوری معروف خط - زمان تخلیه انجام می شود^{۸۵} که بر اساس آن «زمان ایمن مورد نیاز برای خروج»^{۸۶} موسوم به RSET محاسبه می شود تا اطمینان حاصل شود از «زمان ایمن در دسترس برای خروج»^{۸۷}، که ASET نام دارد، کمتر است و حاشیه ایمنی، که «تفاضل ASET و RSET» است، به میزان کافی فراهم باشد.

در رویکرد پیکره بندی محور نیز زمان تخلیه را یک عامل مهم در ایمنی تخلیه در نظر می گیرند، اما در این رویکرد اثر طرح معماری ساختمان بر زمان تخلیه بررسی می شود. به بیان دیگر، در رویکرد پیکره بندی محور زمان تخلیه متغیری وابسته و متأثر از شکل پلان، جانمایی خروج های ساختمان، چیدمان مسیر دسترس خروج (شبکه سیر کولاسیون ساختمان)، زون بندی ها، وجود موانع کالبدی، و فاصله های پیمایش است. در رویکرد ظرفیت محور از شاخص «جریان» برای تعیین ایمن بودن طرح معماری ساختمان و به طور خاص مسیر تخلیه استفاده می شود. جریان^{۸۸} تعداد افرادی تعریف می شود که در هر واحد زمانی از یک نقطه از مسیر خروج عبور می کنند. اتخاذ جریان به منزله شاخصی برای تعیین شرایط تخلیه، مستلزم کاربرد دو مقدار «عرض مؤثر خروج» یعنی پهنای قابل استفاده در مسیر خروج برای عبور افراد و «واحد عرض خروج» به معنی سرانه عرض مؤثر خروج به ازای هر متصرف است.^{۸۹} بنابراین طرح معماری ایمن از منظر ظرفیت جریان تخلیه باید حداقل عرض مؤثر خروج و واحد عرض خروج را، که در مقررات ساختمانی تعیین می شوند و یا از تحلیل نتایج مدل سازی جریان تخلیه به دست می آیند، تأمین کند.

رویکرد تراکم محور رویکردی نوآورانه تر است ولی متخصصان کمتر به آن پرداخته اند. در این رویکرد ایمنی طرح معماری از منظر تخلیه با نبود گره های ازدحامی در طول مسیر

- قابلیت خروج / خروج پذیری^{۸۵}
 - طراحی آگاه به مسئله خروج / تخلیه^{۸۶}
 - نیمرخ تخلیه مناسب در ساختمان^{۸۷}
 معماری دارای اهداف و فرایندهایی است و به دستاوردی می رسد که همانا محیط مصنوع و ساختمان است.^{۸۸} با در نظر گرفتن مسئله تخلیه که ذیل هدف ایمنی حریق در طراحی ساختمان قرار می گیرد، می توان کیفیتی از معماری، که این هدف را برآورده می کند، تحت عنوان «معماری ایمن»^{۸۹} نامید. هنگامی که یک گزینه طراحی با عبور از فیلتر مدل سازی تخلیه بتواند معیارهای عملکردی مورد انتظار برای ایمنی تخلیه را برآورده کند، می توان آن معماری را از منظر خروج ایمن برشمرد. در میان مقالات بررسی شده برای پرداختن به معیار مطلوبیت طرح معماری از منظر تخلیه، که تحت عنوان «معماری ایمن» معرفی گردید، شاخص های متفاوتی تعریف و بررسی شده اند. با دسته بندی این شاخص ها، پنج رویکرد اصلی را نگارندگان تشخیص دادند: (۱) رویکرد زمان محور^{۹۰}، (۲) رویکرد پیکره بندی محور^{۹۱}، (۳) رویکرد ظرفیت محور^{۹۲}، (۴) رویکرد ازدحام محور^{۹۳}، و (۵) رویکرد ریسک محور^{۹۴}. توزیع فراوانی هریک از این رویکردها در «ت ۵» نمایش داده شده است.



- 85. exitability
- 86. evacuation/ egress aware design
- 87. appropriate evacuation profile
- 88. H.J. Park, *Development of A Holistic Approach to Integrate Fire Safety Performance with Building Design*, p. 6.
- 89. Safe Architecture
- 90. time-based
- 91. configuration-based
- 92. capacity-based
- 93. congestion-based
- 94. risk-based
- 95. Ronchi & Nilsson, *ibid*, p. 5.
- 96. Required Safe Egress Time
- 97. Available Safe Egress Time
- 98. flow

۹۹. عاطفه امیدخواه، مدیریت ایمنی و کاهش تلفات در برج های مسکونی تهران (سانحه آتش سوزی)، ص ۶۸.

ت ۵. رویکردهای پنج گانه معماری ایمن و توزیع آنها در پایگاه داده مقالات، پژوهش و تدوین: نگارندگان.

۱۰۰. در اینجا صرفاً زمان حرکت مورد نظر است و به زمان تأخیر پیش از حرکت پرداخته نمی‌شود.

ت ۶ رویکردهای پنج‌گانه به معماری ایمن می‌توانند نسبت به هم موضعی پسینی یا پیشینی داشته باشند، که متأثر از روش تجویزی یا مبتنی بر عملکرد برای تأمین ایمنی حریق است، پژوهش و تدوین: نگارندگان.

الزام قید شده است که، از طریق ارزیابی ریسک حریق، حاشیبه ایمنی مناسبی برای متصرفان تأمین شود. ساختار مبتنی بر عملکرد منعطف‌تر است و نتایج سناریوها در آن اهمیت فراوان دارد. بنابراین می‌توان دریافت که چگونه اتخاذ رویکردی در تبیین معماری ایمن از منظر تخلیه می‌تواند متأثر از روش مواجهه با مسئله ایمنی حریق باشد (ت ۶).

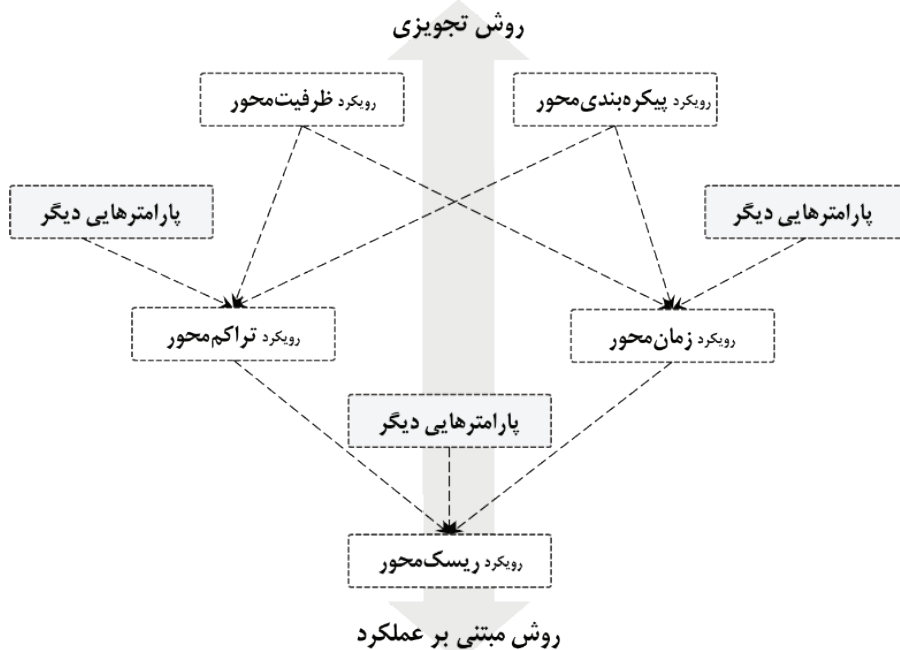
۲.۳. متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل

هرچند رویکرد اصلی هر پژوهش در مواجهه با معیار «معماری ایمن» قابل تشخیص است و شاخص‌های اصلی مرتبط با آن نیز مشخصند، اما متغیرهای به‌کاررفته در هر رویکرد دارای تنوع فراوانی است و پژوهشگران بر اساس نوع روش مدل‌سازی مورد استفاده و یا نمونه مورد مطالعه شده به تحقیق در مورد آرایشی از متغیرها پرداخته‌اند. در «ت ۷» فهرستی از متغیرهای وابسته، متغیرهای مستقل، و سنج‌های مستخرج از پایگاه داده

خروج، که منجر به انسداد جریان تخلیه شوند و متعاقباً زمان تخلیه را افزایش دهند، مترادف دانسته می‌شود. هرچند به شاخص «تراکم»، به‌مثابه یکی از خروجی‌های مدل‌های تخلیه، در پژوهش‌های بسیاری اشاره شده است، اما تاکنون توجه به مسئله ازدحام عمدتاً به سناریوهای تخلیه بزرگ مقیاس جمعیتی غالباً از نوع موارد پیچیده (آن‌طور که در شرح نمونه‌های موردی مدل‌سازی شده توضیح داده شد) محدود شده است.

آخرین رویکرد ریسک‌محور است که عمدتاً بر مبنای محاسبه شاخص «ریسک» در تخلیه ساختمان تعریف می‌شود. در این رویکرد سطح خطر برای سناریوهای مختلف محاسبه می‌شود، تا کم‌خطرترین و پرخطرترین سناریوها شناسایی شوند. شرایط آنها می‌تواند دربرگیرنده تغییرات در طرح معماری ساختمان و یا استراتژی‌های تخلیه شود. در این رویکرد یا به «تعداد افراد خارج شده از ساختمان طی بازه زمانی محدود یا نجات‌یافتگان» استناد می‌گردد و یا درختواره احتمالاتی شکست‌ها و خطاها در اثر شرایط و استراتژی‌های مختلف ترسیم و تحلیل‌ها بر اساس آن انجام می‌شود.

برخی از این رویکردها نسبت به یکدیگر حالتی پسینی یا پیشینی دارند؛ به‌طور مثال از آنجاکه خروجی اولیه بسیاری مدل‌های تخلیه «زمان تخلیه» است، در بسیاری پژوهش‌ها تلفیق رویکردهای پیکره‌بندی محور و ظرفیت‌محور باعث تعریف رویکرد زمان‌محور می‌شود. از طرف دیگر، تلفیق رویکردهای زمان‌محور و تراکم‌محور می‌تواند موجب تعریف رویکردهای ریسک‌محور گردد. همچنین بر اساس تحلیل این رویکردها می‌توان دریافت که دو دسته پیکره‌بندی محور و ظرفیت‌محور رویکردهای اصلی اتخاذشده در مقررات ایمنی از نوع تجویزی و در نتیجه مقررات ملی ساختمانی ایران در مبحث سوم هستند. روش تجویزی باید‌ها و نباید‌ها را در ساختاری محدودکننده تعیین می‌کند. از دیگر سو، در مقررات ایمنی از نوع مبتنی بر عملکرد، که بر تأمین معیارهای عملکردی تمرکز دارند، این



101. LoD: Level of Development
 102. H.W. Hamacher & S.A. Tjandra, "Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of Art", p. 1.

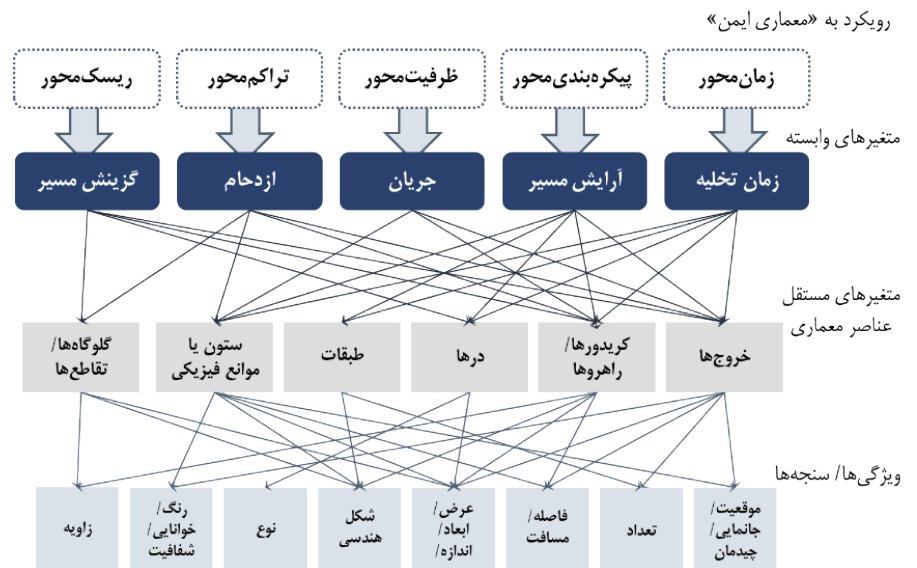
ت ۷. رابطه عناصر رویکرد معماری ایمن با متغیرهای وابسته، مستقل، و سنجه‌ها، پژوهش و تدوین: نگارندگان.

ساخته و ارائه شده است. در ردیف اول رویکرد به معماری ایمن نشان داده شده و در ردیف دوم متغیرهای وابسته مورد بررسی در پژوهش‌ها آورده شده‌اند که متأثر از رویکرد آن مقاله به معماری ایمن هستند و شامل زمان تخلیه، آرایش مسیر، جریان، ازدحام (تراکم زیاد)، و گزینش مسیر هستند. گفتنی است که متغیری همچون «زمان تخلیه» می‌تواند در پژوهشی با رویکرد پیکره‌بندی محور به‌مثابه متغیری وابسته در نظر گرفته شده باشد و بر اساس تعدادی از متغیرهای دیگر تبیین شود و در پژوهشی با رویکرد زمان محور متغیری مستقل برای ارزیابی متغیر وابسته‌ای چون «گزینش خروج» استفاده شده باشد. باوجوداین، در اینجا صرفاً متغیرهای وابسته مرتبط با عناصر معماری آورده شده‌اند که شامل خروج‌ها، کریدورها یا راهروها، درها، طبقات، ستون‌ها، یا موانع فیزیکی و گلوگاه‌ها یا تقاطع‌ها می‌شوند. ویژگی‌هایی از این عناصر معماری، که در پژوهش مدل‌سازی تخلیه بررسی شده‌اند، تحت عنوان سنجه‌ها در ردیف آخر نشان داده شده‌اند. ذکر این نکته ضروری است که ممکن است در پژوهشی صرفاً به یک متغیر مستقل از فهرست

شکل یادشده برای تبیین متغیر وابسته توجه گردیده و متعاقباً متغیر مستقل توسط تعداد محدودی از سنجه‌های مربوطه بررسی شده باشد، بنابراین لزوماً لحاظ کردن همه متغیرهای وابسته و سنجه‌ها در آن پژوهش دیده نشده است.

۳.۳. تحلیل پژوهش‌های مربوط به حوزه طراحی

لازم است بر پژوهش‌هایی که ماهیت «طراحی» دارند (یعنی در میان انواع پنج‌گانه پژوهش‌ها از نوع طراحی و یا تلفیقی با طراحی هستند) تدقیق بیشتری انجام شود، ولو اینکه تعداد این پژوهش‌ها کمتر هست (تعداد ۲۰ مقاله)، اما مرتبط‌ترین دسته به هدف مقاله حاضر هستند. از منظر مقیاس مدل‌سازی ۱۳ مقاله در مقیاس میکروسکوپی، ۴ مقاله ماکروسکوپی و ۲ مقاله ترکیبی هستند و در یک مورد نیز مقیاس مدل‌سازی نامعلوم و دقیقاً اشاره نشده است. انتخاب مقیاس مدل‌سازی تخلیه ارتباط مستقیمی با هدف از انجام آن دارد. به لحاظ روش مدل‌سازی می‌توان رابطه‌ای میان روش‌های مناسب مدل‌سازی با درجه توسعه و پیشرفت طراحی^{۱۰۱} تشخیص داد. معمولاً شبیه‌سازی‌های ابتدایی ساده، به‌ویژه با استفاده از مدل‌هایی که دقت کمتری در بیان انفرادی متصرفان دارند و هندسه فضا را به‌صورت یک گراف منتزِع و گسسته‌سازی می‌کنند (مانند مدل‌های ماکروسکوپی)، برای تعیین آستانه‌های پایینی زمان تخلیه و ارزیابی و انتخاب میان گزینه‌های طراحی در مراحل اولیه فرایند طراحی معماری مناسب هستند.^{۱۰۲} همچنین در ارزیابی کلی معیارهای مربوط به «قابلیت خروج از ساختمان»، که به معنی سهولت دسترسی به راه‌های خروج و بیرون رفتن از ساختمان از هر نقطه در داخل آن است و بیشتر بر ساختار فضایی محیط کالبدی استوار هستند (شامل ساختار توپولوژیک ساختمان، ساختار معنایی، هندسه، و نیز توزیع افراد در واحدهای فضایی مختلف ساختمان) و تأثیر عوامل خاص لحظه‌ای بر حرکت متصرفان در آن فضاها در نظر گرفته نمی‌شود، مدل‌های



تبیین گردید، مدل سازی تخلیه ابزاری کارآمد در سنجش طرح است. با تحلیل پایگاه داده‌ای متشکل از ۱۵۲ مقاله که بر اساس جستجوی سیستماتیک در میان ادبیات تخصصی گزینش شده بودند، ملاحظه شد که مجموعه متنوعی از رشته‌های علمی در زمینه مدل سازی تخلیه فعالیت می‌کنند.

در این پژوهش بر یافتن پاسخ برای سه پرسش اصلی اهتمام شد. پاسخ به پرسش اول در مورد جایگاه طراحی معماری در پژوهش‌های مدل سازی تخلیه حریق، را می‌توان در داده‌های توصیفی این پایگاه داده یافت. مسائل طراحی معماری یک دسته قابل تشخیص را در انواع پنج‌گانه پژوهش‌های مدل سازی تخلیه شکل می‌دهند. سیر رشد این دسته در طی زمان قابل تشخیص است، ولو اینکه در سال‌های اخیر رویکردهایی همچون بهینه‌سازی رایج‌تر شده‌اند (هرچند رویکرد بهینه‌سازی خود می‌تواند در مورد مسائل طراحی طرح شود). اما از جنبه دیگر ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های موردی مدل سازی شده تنوعی از مقیاس‌های مختلف در فرایند طراحی قابل تشخیص است.

در پرسش دوم یافتن عناصر طراحی واجد اهمیت در مسائل مدل سازی تخلیه حریق دنبال می‌شود. پاسخ به این

ماکروسکوپیک مناسب‌تر هستند.^{۱۰۳} شبیه‌سازی‌های پیچیده‌تر به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر عامل، که با آنها هم رفتار انفرادی متصرفان را با درجه هوشمندی بالاتری پیش‌بینی می‌کنند و هم هندسه فضا را به‌صورت پیوسته و با جزئیات بیشتری بازنمایی می‌کنند، برای ارزیابی طرح انتخاب‌شده و توسعه‌یافته از میان گزینه‌های اولیه بر اساس معیارهای عملکردی مناسب هستند.^{۱۰۴} از آنجا که در این مدل‌ها داده‌های کمی برای ارزیابی معیارهای عملکردی عرضه می‌شود، ابزاری برای تصمیم‌گیری نهایی در مورد ابعاد، جزئیات پیکره‌بندی‌ها، و حتی جانمایی عناصری چون ستون‌ها و مبلمان فضا هستند.

تنوع زیادی از نمونه‌های مدل سازی شده در این نوع پژوهش‌ها دیده می‌شود: گراف‌های سیرکولاسیون و دسترسی، راهرو و لابی، تقاطع چند راهرو، اتاق مربع یا مستطیل شکل با دو الی چند خروج، کلاس درس، پلان‌های تجاری و پلان ساختمان‌های عمومی، پلان فضای انتظار و نمایش در سالن تئاتر، پلان ترمینال‌های فرودگاه، ساختمان‌های اداری و آموزشی ۳ یا ۴ طبقه، ساختمان بلندمرتبه، مرکز تجاری، استادیوم. این موضوع قابلیت طرح شدن مسائل متنوع را در سطوح مختلف طراحی برای مدل سازی تخلیه نشان می‌دهد؛ درحالی‌که به‌طور مثال در رویکرد بهینه‌سازی یا برنامه‌ریزی چنین تنوعی از نمونه‌های موردی دیده نمی‌شود.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تخلیه از نوع موضوعات عملکردی در طراحی معماری و به‌ویژه طراحی پلان است. در مبحث سوم مقررات ملی ساختمان این الزام آمده است که طراحی هر بنا و راه‌های خروج آن به‌گونه‌ای صورت گیرد، که در صورت بروز آتش‌سوزی، متصرفان و بهره‌برداران در حد قابل قبول فرصت کافی برای خروج ایمن داشته باشند. برای دستیابی به چنین هدفی که در پژوهش حاضر تحت عنوان تحقق «معماری ایمن از منظر تخلیه»

103. A. Vancloster, et al, "Measuring the Exitability of Buildings: A New Perspective on Indoor Accessibility", p. 509.
104. G. Smedresman, *Crowd Simulation and Evolutionary Algorithms in Floor Plan Design*, p. 2.

ت ۸. دستیابی به معماری ایمن با ابزار مدل سازی تخلیه، پژوهش و تدوین: نگارندگان.



پرسش با تحلیل داده‌های حاصل از پایگاه اطلاعاتی امکان‌پذیر گردید. رویکردهای زمان‌محور، پیکره‌بندی‌محور، ظرفیت‌محور، ازدحام‌محور، و ریسک‌محور پنج رویکرد اصلی به معماری ایمن قلمداد شدند و به ترتیب متغیرهای زمان تخلیه، آرایش مسیر، جریان حرکت، ازدحام، و گزینش مسیر متغیرهای وابسته اصلی متناظر این رویکردها تعریف شدند. همچنین دریافت شد که عناصر متعددی از معماری (که شامل خروج‌ها، کریدورها یا راهروها، درها، طبقات، ستون‌ها یا موانع فیزیکی و گلوگاه‌ها یا تقاطع‌ها) با عنوان متغیر مستقل در مسائل مختلف مطرح و برای مدل‌سازی تخلیه مورد توجه قرار گرفته‌اند و ویژگی‌های طراحی آنها سنجه‌هایی برای تبیین متغیرهای وابسته‌ای که لزوماً از جنس معماری نیستند، قلمداد شده‌اند. در «ت ۸» نشان داده شده است که چگونه یک گزینه طراحی با عبور از فیلتر مدل‌سازی تخلیه می‌تواند معماری ایمن را نتیجه دهد و در این فرایند چه مؤلفه‌هایی باید مورد توجه باشند.

در پاسخ به پرسش سوم که رابطه عناصر طراحی معماری با دیگر پارامترهای مورد بررسی در مدل‌سازی تخلیه حریق مورد نظر است، می‌توان به هدف از مدل‌سازی تخلیه استناد کرد. حوزه‌های معماری و مدل‌سازی تخلیه می‌توانند نسبت به هم اثرگذاری و اثرپذیری داشته باشند. در مواردی که هدف از مدل‌سازی ارزیابی یک طرح معماری است، نتایج مدل‌سازی می‌تواند منجر به اعمال تغییرات زیادی در طرح شود. روش‌های مدل‌سازی با درجه توسعه و پیشرفت طراحی رابطه‌ای متناظر دارند. در مراحل اولیه فرایند معماری مدل‌سازی در مقیاس ماکروسکوپی می‌تواند منجر به رد یا پذیرش یک گزینه طراحی شود، یا همخوانی یا ناهمخوانی طرح را با حدود عملکردی الزامی نشان دهد. در گام‌های بعدی و هرچه طرح بیشتر توسعه یابد، مدل‌سازی مقیاس میکروسکوپی می‌تواند به مثابه ابزاری برای تصمیم‌گیری نهایی در مورد ابعاد، جزئیات پیکره‌بندی‌ها، و حتی جانمایی عناصری چون ستون‌ها و

مبلمان فضا کارا باشد. در میان همه انواع روش‌های مدل‌سازی میکروسکوپی، مدل‌های مبتنی بر عامل و سیستم‌های چندین‌عاملی از همه رایج‌تر هستند و در پایگاه داده حاضر نیز مجموعاً قریب به نیمی از مدل‌های میکروسکوپی را تشکیل می‌دهند (۴۷٪). این روش برای مسائلی که جنبه عملکردی دارند، مناسب هستند. سیستم‌های مبتنی بر عامل و چندین‌عاملی دقیق ولی به لحاظ محاسباتی پرهزینه و زمان‌بر هستند. با توجه به این موضوع می‌توان مدل‌های هوش ازدحامی را میان‌بری محسوب کرد که هم از مزایای وجود عامل‌های منفرد در فضای پیوسته مدل‌سازی بهره برده شود و هم در زمان و هزینه محاسبات صرفه‌جویی شود. در مقیاس میکروسکوپی سه نوع مدل‌های مبتنی بر عامل و سیستم‌های چندین‌عاملی، مدل‌های اتوماتای سلولی، و مدل‌های نیروی اجتماعی به خوبی شناخته شده هستند و بر اساس نسخه‌های متعدد اصلاح‌شده آنها در میان مقالات می‌توان دریافت که کاربرد آنها رایج است. دیگر یافته‌های مهمیت در این پژوهش این است که روش هوش ازدحامی حوزه نوظهوری در میان مدل‌های میکروسکوپی است. اگر نوع پژوهش «شبیه‌سازی» به مثابه سطح اولیه و بنیادی مدل‌سازی تخلیه و «بهینه‌سازی» تکامل یافته‌ترین سطح آن در نظر گرفته شود، تغییر گرایش هر روش مدل‌سازی از مسائل شبیه‌سازی به مسائل بهینه‌سازی می‌تواند نشان‌دهنده توسعه و تکامل آن روش باشد. بر اساس نتایج حاصل از پایگاه داده، چنین تغییر گرایشی را برای روش هوش ازدحامی می‌توان در یک بازه ۱۰ ساله به وضوح تشخیص داد. از آنجاکه همه نمونه‌های مدل‌سازی شده با این روش در مقیاس یک اتاق و یک فضای منفرد و یا یک پلان طبقه قرار گرفته‌اند، می‌توان دریافت پتانسیل بالایی برای طرح مسائل طراحی پلان طبقات در این حوزه وجود دارد و می‌توان در پژوهش‌های آتی به آن بیشتر پرداخت. همچنین شایسته است با توجه به جنبه عملکردی طراحی معماری در فازهای مختلف

همچنین تعریف و تدوین چارچوب‌های عملیاتی برای ارزیابی عملکرد ایمنی تخلیه طرح معماری با تلفیق رویکردهای پنج‌گانه معماری ایمن نیز موضوعی است که می‌تواند بیشتر مورد مذاقه باشد.

پیشرفت طرح (LOD)، چالش‌های طراحی برای «تخلیه ایمن» شناسایی و فهرست شوند و با توجه به امکانات مدل‌سازی تخلیه در مقیاس‌ها و روش‌های مختلف، در پژوهش‌های آتی حوزه معماری، الگوهای مناسب حل چالش‌ها مطالعه شوند.

References

- Beck, Vaughan. "Performance-based Fire Engineering Design and Its Application in Australia". In *Fire Safety Science Proceedings of the 5th International Symposium*, 1997, pp. 23-40.
- Berseth, G. & M. Usman & B. Haworth & M. Kapadia & P. Faloutsos. "Environment Optimization for Crowd Evacuation". In *Computer Animation and Virtual Worlds*, 26(3-4) (2015), pp. 377-386.
- Bureau of National Building Regulations of Iran. *The third topic: Building Fire Protection*, Road, Housing and Urban Research Center Publications, 2016. (In Persian)
- Cassol, V.J. & S.R. Musse & C.R. Jung & N.I. Badler. *Simulating Crowds in Egress Scenarios*, Springer International Publishing, 2017.
- Chen, J. & J. Ma & S.M. Lo. "Geometric Constraint Based Pedestrian Movement Model on Stairways". In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 505 (2018), pp. 1212-1230.
- Chen, X. & M. Treiber & V. Kanagaraj & H. Li. "Social Force Models for Pedestrian Traffic—state of the Art". In *Transport Reviews*, 38(5) (2018), pp. 625-653.
- Chu, Guanquan. "Decision Analysis on Fire Safety Design Based on Evaluating Building Fire Risk to Life". In *Safety Science*, 2008, pp. 1125-1136.
- Cuesta, A. & O. Abreu & D. Alvear. "Future Challenges in Evacuation Modelling". In *Evacuation Modeling Trends*, Springer, Cham, 2016, pp. 103-129.
- Desmet, A. & E. Gelenbe. "Graph and Analytical Models for Emergency Evacuation". In *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, IEEE, March 2013, pp. 523-527.
- Fallahi, Alireza, Mohammad Reza Hafezi and Atefeh Omidkhah. "The Effect of Evacuation Time on Fire Safety Management Planning in Two High-rise Residential Buildings". In *Armanshahr Quarterly (Armanshahr Architecture & Urban Development: journal of Architecture, Urban Design & Urban Planning)*, Vol. 11, Issue 4, No. 25 (March 2019), pp. 125-136. (In Persian)
- Guizzi, G. & F. Gargiulo & L.C. Santillo & H. Fujita. "Swarm Intelligence in Evacuation Problems: A Review". In *International Conference on Intelligent Software Methodologies, Tools, and Techniques*, 2015, pp. 333-340.
- Hamacher, H.W. & S.A. Tjandra. "Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of Art", In *Berichte des Fraunhofer ITWM*, Nr. 24 (2001).
- Hasofer, A. & V.R. Beck & I.D. Bennetts. *Risk Analysis in Building Fire Safety Engineering*. Routledge, 2006.
- Kuligowski, E. "Predicting Human Behavior During Fires". In *Fire Technology*, 49(1) (2013), pp. 101-120.
- Klüpfel, H. "Crowd Dynamics Phenomena, Methodology, and Simulation". In *Pedestrian Behavior: Models, Data Collection and Applications*, Emerald Group Publishing Limited, 2009, pp. 215-244.
- Li, J.J., & H.Y. Zhu. "A Risk-based Model of Evacuation Route Optimization under Fire". In *Procedia Engineering*, 211 (2018), pp. 365-371.
- Li, Y. & M. Chen & Z. Dou & X. Zheng & Y. Cheng & A. Mebarki. "A Review of Cellular Automata Models for Crowd Evacuation". In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 526 (15 July 2019), p. 120752.
- Lian, L. & X. Mai & W. Song & Y.K.K. Richard & Y. Rui & S. Jin. "Pedestrian Merging Behavior Analysis: An Experimental Study". In *Fire Safety Journal*, 91 (2017), pp. 918-925.
- Liao, W. & X. Zheng & L. Cheng & Y. Zhao & Y. Cheng & Y. Wang. "Layout Effects of Multi-exit Ticket-inspectors on Pedestrian Evacuation". In *Safety Science*, 70 (2014), pp. 1-8.
- Liu, H. & B. Xu & D. Lu & G. Zhang. "A Path Planning Approach for Crowd Evacuation in Buildings Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm". In *Applied Soft Computing*, 68 (2018), pp. 360-376.
- Lui, C.H. & N.K. Fong & S. Lorente & A. Bejan & W.K. Chow. "Constructal Design of Evacuation from a Three-dimensional Living Space". In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 422 (2015), pp. 47-57.
- Makowski, D. & F. Piraux & F. Brun. *From Experimental Network to Meta-Analysis*. Springer, 2019.
- Maslow, A.H. "A Theory of Human Motivation". In *Psychological Review*, 50(4) (1943), pp. 370-396.
- Meacham, Brian J. & John R. Thomas. "20 Years of Performance-based Fire Protection Design: Challenges Faced

- and a Look Ahead". In *Fire Protection Engineering*, 24(4) (2013), pp. 249-267.
- Nilsson, D. & C. Uhr. "Complex Systems – A Holistic Approach for Understanding and Modelling Fire Evacuation Behaviour". In *Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Cambridge, London: Interscience Communications, 13-15 July 2009, pp. 525-530.
- Omidkhah, Atefeh. *Safety management and casualty reduction in Tehran residential towers (fire accident)*. Master's Thesis, Department of Reconstruction after the disaster, Shahid Beheshti University, Tehran, 2013. (In Persian, Unpublished)
- Park, H.J. *Development of a Holistic Approach to Integrate Fire Safety Performance with Building Design*, Doctoral dissertation, Worcester Polytechnic Institute, 2014.
- Qu, Y. & Y. Xiao & J. Wu & T. Tang & Z. Gao. "Modeling Detour Behavior of Pedestrian Dynamics under Different Conditions". In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 492 (2018), pp. 1153-1167.
- Ronchi, E. & D. Nilsson. "Basic Concepts and Modelling Methods". In *Evacuation Modeling Trends*, Springer, Cham, 2016, pp. 1-23.
- Schadschneider, A. & D. Chowdhury & K. Nishinari. *Stochastic Transport in Complex Systems: from Molecules to Vehicles*. Elsevier, 2010.
- Science Direct scientific database: <https://www.sciencedirect.com>
- Shiwakoti, N. & Y. Gong & X. Shi & Z. Ye. "Examining Influence of Merging Architectural Features on Pedestrian Crowd Movement". In *Safety Science*, 75 (2015), pp. 15-22.
- Smedresman, G. *Crowd Simulations and Evolutionary Algorithms in Floor Plan Design*. Yale University, 2006.
- Song, X. & J. Sun & H. Xie & Q. Li & Z. Wang & D. Han. "Characteristic Time Based Social Force Model Improvement and Exit Assignment Strategy for Pedestrian Evacuation". In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 505 (2018), pp. 530-548.
- Tavares, R.M. "An Analysis of the Fire Safety Codes in Brazil: Is the Performance-based Approach the best Practice?". In *Fire Safety Journal*, 44(5) (2009), pp. 749-755.
- Tavares, R.M. & E.R. Galea. "Evacuation Modelling Analysis within the Operational Research Context: A Combined Approach for Improving Enclosure Designs". In *Building and Environment*, 44(5) (2009), pp. 1005-1016.
- Teague, Paul E. & Ronald R. Farr. "Case Histories: Fires Influencing the Life Safety Code". In *Life Safety Code Handbook*, 2009, pp. 1147-1159.
- Tian, J. "The Physics and Simulation of Occupant Traffic Flow in the Case of Evacuating Public Building Area". In *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 30 (2014), pp. 76-85.
- Vanclooster, A. & T. Neutens & V. Fack & N. Van de Weghe & P. De Maeyer. "Measuring the Exitability of Buildings: A New Perspective on Indoor Accessibility". In *Applied Geography*, 34 (2012), pp. 507-518.
- Vermuyten, H. & J. Beliën & L. De Boeck & G. Reniers & T. Wauters. "A Review of Optimisation Models for Pedestrian Evacuation and Design Problems". In *Safety Science*, 87 (2016), pp. 167-178.
- Wu, J. & X. Wang & J. Chen & G. Shu & Y. Li. "The Position of a Door Can Significantly Impact on Pedestrians' Evacuation Time in an Emergency". In *Applied Mathematics and Computation*, 258 (2015), pp. 29-35.
- Xie, Q.M. & J.H. Wang & P.C. Wang & W.L. Wang & Y. Jiao & J. Guo. "The Optimization for Location of Building Evacuation Exits Considering the Uncertainty of Occupant Density Using Polynomial Chaos Expansion and Genetic Algorithm". In *Procedia Engineering*, 211 (2018), pp. 818-829.
- Zawidzki, M. & M. Chraibi & K. Nishinari. "Crowd-Z: The User-friendly Framework for Crowd Simulation on an Architectural Floor Plan". In *Pattern Recognition Letters*, 44 (2014), pp. 88-97.
- Zhao, Y. & M. Li & X. Lu & L. Tian & Z. Yu & K. Huang, ... & T. Li. "Optimal Layout Design of Obstacles for Panic Evacuation Using Differential Evolution". In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 465 (2017), pp. 175-194.