

kpt. mgr inż. **Mariusz Barański**¹
dr hab. inż. **Tadeusz Maciak**, prof. PB²

Przyjęty/Accepted/Принята: 27.12.2015;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 28.04.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

Automaty komórkowe w modelowaniu ewakuacji³

Cellular Automata in Evacuation Modelling

Клеточные автоматы при моделировании эвакуации

ABSTRAKT

Cel: Przedstawienie i omówienie modeli automatów komórkowych wykorzystywanych w oprogramowaniu do modelowania ewakuacji i zjawisk jej towarzyszących.

Wprowadzenie: Bezpieczeństwo w budynkach i obiektach budowlanych obejmuje wiele zagadnień. Jednym z nich jest zapewnienie procesu bezpiecznej ewakuacji z zagrożonych budowli. W obliczeniach symulacyjnych ewakuacji szerokie zastosowanie znalazło specjalistyczne oprogramowanie pozwalające na przybliżenie rzeczywistych zjawisk panujących podczas ewakuacji. Programy te pozwalają również na oszacowanie czasu ewakuacji. Obliczenia czasu ewakuacji dokonuje się według określonych algorytmów i modeli. W pracy zaprezentowano możliwości zastosowania jednej z gałęzi informatyki jaką są automaty komórkowe do projektowania modeli pozwalających odwzorowywać ewakuację. Na wstępie zostały zawarte założenia niezbędne do prawidłowej budowy modelu. Następnie przedstawiono rozwój modeli wykorzystujących automaty komórkowe. Autorzy przedstawili również niedoskonałości modeli oraz problemy, które mogą występować podczas implementacji algorytmów opartych na automatach komórkowych. Zaprezentowany materiał w sposób syntetyczny przedstawia elementy, które mogą posłużyć do budowy programów modelujących ewakuację na bazie automatów komórkowych. Jednym z najważniejszych w tym obszarze jest model Floor Field. Model ten podlega ciągłym modyfikacjom i udoskonaleniom. Zastosowanie automatów komórkowych pozwala na modelowanie ewakuacji przy wykorzystaniu znacznie mniejszych zasobów obliczeniowych niż w przypadku modeli agentowych czy Social Force, a dokładność wykonanych obliczeń jest porównywalna. Zrozumienie własności automatów komórkowych ma ogromne znaczenie we właściwym odwzorowaniu procesu ewakuacji przy zastosowaniu tego typu modeli.

Metodologia: Przegląd publikacji, analiza poszczególnych modeli.

Wnioski: W wyniku analizy literatury przedstawiono rozwój modeli na przestrzeni ostatnich lat. Wykazano, że proste modele bazujące na automatach komórkowych mają niską złożoność obliczeniową, co pozwala na modelowanie ewakuacji dla dużej grupy osób przy niewielkiej mocy obliczeniowej komputerów. Prawidłowo zweryfikowany model można stosować do dokładnego szacowania czasu ewakuacji osób z budynków i obiektów budowlanych.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo pożarowe, ewakuacja ludności, modelowanie ewakuacji, automaty komórkowe

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

ABSTRACT

Aim: Presentation and discourse of issues associated with cellular automata models used in evacuation modelling software and accompanying events.

Introduction: Security in buildings and construction works covers many issues. One of these addresses the matter of ensuring a process for the safe evacuation of endangered buildings. Specialized simulation software for approximation of real events, which prevail during an evacuation, was used in calculations. Such software also allows for the estimation of evacuation time. Evacuation time calculations are performed according to specific algorithms and models. This paper reveals the potential use of one branch of computer science, namely cellular automata, to design models, which facilitate the mapping of evacuations. At the outset it was necessary to make essential assumptions for a proper construction of the model. These were followed by the development of models using cellular automata. The authors described the model imperfections and problems, which can occur during implementation of algorithms based on cellular automata. Material revealed by the study shows in a synthetic way the elements, which can be used to build evacuation modelling programmes using cellular automata. One of the most important models in this area is known as Floor Field. This model is exposed to continuous modifications and improvements. The use of cellular automata allows for the modelling of evacuations using much less computational resources than in the case of agent models or Social Force and the accuracy of calculations is comparable. Understanding the properties of cellular automata is of great importance for the correct mapping of the evacuation process when using such models.

Methodology: Review of publications and analysis of individual models.

¹ Komenda Powiatowa Państwowej Straży Pożarnej w Oławie / District Headquarters of the State Fire Service, Oława, Poland; mariusz.baranski@straz.olawa.pl;

² Politechnika Białostocka / Białystok University of Technology, Poland;

³ Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu / The authors contributed equally to this article;

Conclusions: An analysis of literature reveals advances made in the development of models during recent years. It is revealed that simple models based on cellular automata have low computational complexity, which permits the modelling of evacuation for a large group of people with low computing power. A properly validated model can be used to estimate the time to evacuate people from buildings and construction works with great accuracy.

Keywords: fire safety, people evacuation, evacuation modelling, cellular automata

Type of article: review article

АННОТАЦИЯ

Цель: Представление и обсуждение моделей клеточных автоматов, используемых в программном моделировании эвакуации и сопровождающих ее явлений.

Введение: Безопасность в зданиях и на строительных объектах включает в себя множество вопросов. Одним из них является обеспечение процесса безопасной эвакуации из опасных зданий. При моделировании эвакуации широко используется специализированное программное обеспечение, позволяющее приблизить реальные явления, присутствующие во время эвакуации. Эти программы позволяют также оценить время эвакуации. Расчет времени эвакуации осуществляется в соответствии с конкретными алгоритмами и моделями. В статье были представлены возможности использования одной из отраслей информатики, которой являются клеточные автоматы для разработки моделей, изображающих эвакуацию. Первоначально были определены предположения, необходимые для правильного построения модели. Далее представлено развитие моделей, использующих клеточные автоматы. Авторы представили также недостатки моделей и проблемы, которые могут возникнуть в ходе внедрения алгоритмов, основанных на клеточных автоматах. Представленный материал синтетическим путем показывает элементы, которые могут быть использованы для создания программ моделирования эвакуации на основе клеточных автоматов. Одной из самых важных в этой области является модель Floor Field. Эта модель все еще подвергается постоянным изменениям и усовершенствованиям. Применение клеточных автоматов позволяет моделировать эвакуацию, используя гораздо меньше вычислительных ресурсов, чем агентные модели или Social Force, а точность их расчетов сопоставима. Понимание характеристик клеточных автоматов имеет большое значение в надлежащем отображении процесса эвакуации с использованием таких моделей.

Методология: Обзор публикаций, анализ отдельных моделей.

Выводы: На основе анализа литературы показано развитие моделей на протяжении последних лет. Было показано, что простые модели, основанные на клеточных автоматах, характеризуются низкой вычислительной сложностью, которая позволяет моделировать эвакуации большой группы людей с низкой вычислительной мощностью компьютеров. Должным образом подтвержденная модель может быть использована для точной оценки времени эвакуации людей из зданий и строительных объектов.

Ключевые слова: пожарная безопасность, эвакуация населения, моделирование эвакуации, клеточные автоматы

Вид статьи: обзорная статья

1. Wprowadzenie

Powstanie komputera na początku dwudziestego wieku otworzyło nowe perspektywy w rozwoju wielu dziedzin nauki. Nowy wynalazek wpłynął także na postęp w dziedzinie bezpieczeństwa pożarowego – umożliwił m.in. modelowanie ewakuacji osób z zagrożonych obiektów. Coraz częściej wyniki specjalistycznych symulacji stanowią ważne źródło wiedzy dla architekta projektującego drogi ewakuacyjne w obiektach użyteczności publicznej.

Zachowanie tłumu i strumienia przemieszczających się osób jest złożonym zjawiskiem będącym wypadkową ruchu jednostek. Pojedyncza osoba w tłumie może reagować na pewne wydarzenia w różny sposób, nieraz zupełnie odmienny, w zależności od jej stanu psychicznego i zewnętrznego uwarunkowania [1]. Awaryjna sytuacja może zmienić zachowanie jednostek w sposób zasadniczy np. w przypadku zagrożenia osoby starające się wydostać z pomieszczenia najbliższymi drzwiami nie zwracają uwagi, że mogą być również dostępne drzwi mniej zatłoczone, przez które ewakuacja byłaby szybsza.

Ogólnie można wyodrębnić dwa główne podejścia do modelowania komputerowego zachowania tłumu: makroskopowe i mikroskopowe. Wśród podejścia makroskopowego można wyróżnić modele bazujące na zasadach hydrodynamiki traktujące tłum jak płyn o laminarnym przepływie [2] oraz potraktowanie osób w zbiorowości jak cząsteczek wykazujących moment dipolowy i poddających się siłom pola magnetycznego [3]. Podejście mikroskopowe, rozwijane od pewnego czasu, polega na modelowaniu pojedynczych osób w tłumie, którym przypisuje się pewien sposób podejmowania decyzji i zachowania zgodnie z określonymi regułami. Można wymienić wśród nich modele oparte na metodach dynamiki molekularnej (Social Force Model) [4-6], sztucznej inteligencji [7], automatach komórkowych (Cellular Automata CA) [8-11] oraz systemach agentowych [9], [12-14].

Obecnie największe zainteresowanie skupia się na rozwijaniu metod mikroskopowych. Za pomocą mikroskopowych modeli zaprezentowano wiele zjawisk charakterystycznych dla przepływu strumieni pieszych, takich jak tworzenie strug ruchu pieszych [15-16], przejście tłumu przez wąskie gardło (*bottleneck*) [17], czy przecinanie się dwóch strumieni przemieszczających się osób [18]. Takie samoorganizujące się wzorce ruchu pieszych mogą być powielane do pewnego stopnia w innych okolicznościach, gdzie występuje oddziaływanie wzajemne pieszych i brane są pod uwagę warunki otoczenia. Piesi podczas ruchu wzdłuż ścieżki odbierają wzrokowo otoczenie i odpowiednio reagują na zaistniałą sytuację [19-20]. Percepcja wzrokowa i interakcje wynikające z odbioru bodźców środowiskowych są to dwie ważne kwestie wpływające na zachowania ludzi podczas ruchu.

W przypadku automatów komórkowych, każda pojedyncza osoba jest reprezentowana jako węzeł, który zajmuje regularną komórkę siatki [11], [21-22]. W modelu CA czas jest również podzielony na wiele przedziałów, a aktualny stan komórki jest określony przez stany komórek sąsiednich w danym kroku czasowym. Opisując awaryjną ewakuację tłumu w modelu, przyjmuje się szereg fizycznych atrybutów, które obejmują cechy fizyczne, takie jak widoczność znaków ewakuacyjnych, drzwi, okien, oraz bierze się pod uwagę zjawiska psychologiczne występujące przy przemieszczaniu się grupy osób, gdzie piesi mają tendencje do postępowania jeden za drugim (*flow with stream*) [22].

Automaty komórkowe pozwalają na tworzenie modeli i algorytmów o niskiej złożoności obliczeniowej [23]. Modelowanie ewakuacji z obiektów, w których równocześnie może przebywać wiele tysięcy osób jest problematyczne w przypadku stosowania modelu Social Force, który z założenia porównuje parametry każdej ewakuowanej osoby ze wszystkimi pozostałymi uczestnikami. Sytuacja z zastosowaniem modeli

agentowych jest podobna dlatego, że modele agentowe mogą z założenia również dokonywać porównania każdego agenta z każdym innym w danym kroku czasowym. Obniżenie złożoności obliczeniowej i jednocześnie skrócenie czasu obliczenia ewakuacji dla dużych grup ludzi można uzyskać poprzez wzajemne porównywanie tylko najbliższych zlokalizowanych względem siebie jednostek ludzkich [24–26].

Automaty komórkowe wykorzystuje szereg programów służących do symulacji ewakuacji jak np.: PedGo, EGRESS 2002, SGEM [27], SimWalk, BYPASS, Exodus, AlpSim, AENEAS [11], Simulex, Steps, [28] oraz Pathfinder i TIM-TEX [29]. Ciekawym przykładem wykorzystania automatów komórkowych w modelowaniu ewakuacji jest praca [30]. Autor prezentuje w niej możliwość modelowania ewakuacji stadionu piłkarskiego w programie PedGo.

Modelowanie ewakuacji wykonuje się niejednokrotnie na potrzeby ekspertyz technicznych w przypadku stosowania rozwiązań zamiennych zapewniających nie pogorszenie warunków ochrony przeciwpożarowych w budynkach i obiektach budowlanych [31–33].

Poniższa praca prezentuje możliwości zastosowania modeli automatów komórkowych do modelowania ewakuacji tłumu. Zawarto w niej informacje niezbędne do zrozumienia zasady działania automatu komórkowego oraz przedstawiono rozwój modeli wykorzystujących automaty komórkowe w zakresie ewakuacji. Autorzy zwrócili również uwagę na niedoskonałości modeli komórkowych oraz problemy mogące występować podczas implementacji algorytmów opartych o automaty komórkowe. Szczególną uwagę zwrócono na model Floor Field, szeroko wykorzystywany w procesie symulacji ewakuacji pieszych.

2. Definicja automatu komórkowego

W literaturze występuje kilka definicji automatu komórkowego proponowanych między innymi przez Ferbera [34], Wolframa [35], Weimara [36], czy Fredkina [37].

Przykładowo jako miarodajne określenia można przywołać:

- Definicję Ferbera: „Automat komórkowy jest dyskretnym, dynamicznym systemem, którego zachowanie jest całkowicie określone w warunkach lokalnych relacji”.
- Definicję Wolframa: „Automat jest zbiorem „barwnych” komórek na rastrze o określonym kształcie, który rozwija się w wielu dyskretnych krokach czasowych według określonych reguł w oparciu o stan sąsiednich komórek. Zasady są następnie stosowane poprzez wielokrotne iteracje aż do osiągnięcia żądanego czasu”.

Klasyczne automaty komórkowe są to tzw. automaty homogeniczne (jednorodne). Aby możliwe było modelowanie systemów złożonych i tym samym ewakuacji, niezbędne jest odejście od klasycznej definicji automatu komórkowego i posłużenie się automatem niehomogenicznym [11]. W rozprawie doktorskiej [11] zaproponowano nową definicję automatu komórkowego ze stałą siatką (CAL_{const}) oraz rozszerzonego automatu komórkowego ($ECAL_{const}$).

Automat komórkowy niehomogeniczny ze stałą siatką definiuje siedem parametrów:

$$CAL_{const} = (C, R_p, \eta, S, CON, r, f) \quad (1)$$

gdzie:

- C – zbiór komórek siatki,
- R_p – relacja przyległości,
- η – funkcja sąsiedztwa,
- S – zbiór stanów komórek,
- CON – zbiór konfiguracji komórek,
- r – lokalna reguła,
- f – funkcja przejścia.

Rozszerzony automat komórkowy został zaproponowany w celu modelowania inteligentnych zachowań jednostek poruszających się w tłumie. Regułami uwzględniającymi inteligentne zachowania może być wybór wyjścia ewakuacyjnego w oparciu o analizę zatłoczenia przy poszczególnych wyjściach ewakuacyjnych czy odległość od poszczególnych wyjść. Rozszerzony automat komórkowy niehomogeniczny autor pracy [11] definiuje jako:

$$ECAL_{const} = (C, R_p, \eta, S, CON, r_{ext}, f) \quad (2)$$

gdzie:

- C, R_p , η , S, CON – oznaczenia identyczne jak przy CAL_{const} ,
- r_{ext} – lokalna reguła,
- f – funkcja przejścia (w której jest istotna kolejność aktualizacji stanów komórek).

Istotną kwestią jest sposób reprezentacji ludzi, pieszych w modelach. Podstawowym sposobem reprezentacji pieszego w automacie komórkowym jest przypisanie osoby do geometrycznych wymiarów komórki automatu. W takim przypadku osoba zajmuje jedną komórkę automatu [10]. Założenie takie bardzo upraszcza odwzorowywaną w modelu rzeczywistość. Efektem tego jest dyskretyzacja gęstości rozmieszczenia osób podczas ewakuacji. Kolejnym sposobem reprezentacji pieszego w modelu jest przedstawienie rzutu pionowego człowieka jako wieloboku zajmującego kilka komórek automatu [38–39]. Alternatywą dla dwóch poprzednich reprezentacji jest użycie elipsy [11] lub okręgu [40]. Założenie takie skutkuje koniecznością rozbudowy reguł przejść i możliwych kombinacji ustawień pieszych na przestrzeni automatu. Część modeli pozwala na reprezentowanie osoby jako punktów na siatce [41].

Modelowane w automacie osoby muszą przemieszczać się w określonej przestrzeni. Podstawowym sposobem podziału przestrzeni ewakuacji jest jego podział na kwadraty [10]. Pojedynczy kwadrat lub ich zbiór [38–39] może odzwierciedlać przestrzeń zajmowaną przez jedną osobę. Przestrzeń ewakuacji dzielona jest również przy użyciu siatki jak w przypadku modelu omówionego w punkcie 4.7.

Realizacja ruchu osób w automacie opiera się o reguły przejść. Podstawowym sposobem jest przemieszczanie osób w oparciu o prawdopodobieństwo obliczeniowe [10]. Mechanizmy ruchu są zagadnieniem złożonym i wiążą się z rozwiązaniem wielu problemów omówionych w rozdziale 5. Występuje wiele wariantów ruchu, które szerzej omówione zostaną podczas prezentacji poszczególnych modeli.

3. Klasyfikacja automatów komórkowych

Automaty można podzielić według wielu kryteriów. Podstawowe kryteria klasyfikacji klasycznych automatów komórkowych to m.in.: typ siatki, struktura komórek, sąsiedztwo komórek, reguły przejścia czy też reguły aktualizacji automatu. Aby modelować proces ewakuacji niezbędne jest rozszerzenie klasycznej definicji automatu komórkowego. Niehomogeniczne automaty komórkowe mogą zawierać takie elementy jak dodatkowe reguły przejść obejmujące inne komórki niż bezpośrednio sąsiadujące lub dodatkowe siatki wykorzystywane podczas określania warunków przejścia.

3.1. Typ siatki, struktura komórek i sąsiedztwo

Jednym z podstawowych elementów charakteryzujących automat jest typ siatki. Siatka składająca się z komórek może zostać zorganizowana w jednym, w dwóch lub trzech wymiarach. Automaty jednowymiarowe składają się z sąsiadujących ze sobą komórek tworzących linię. Jest to najdokładniej zbadana grupa automatów [42]. Przykładem wykorzystania

automatów jednowymiarowych są prace Nagela i Schreckenberga [43-44]. Zaproponowali oni model ruchu pojazdów na autostradzie oparty na jednowymiarowym automacie komórkowym.

Kolejną grupą są automaty dwuwymiarowe. Ten typ siatki jest najczęściej stosowany do symulacji ewakuacji. Większość analizowanych przypadków bazuje na rzucie dwuwymiarowym pomieszczeń budynku z którego ewakuują się zagrożone osoby. Wstęp do symulacji ewakuacji z wykorzystaniem automatów dwuwymiarowych przedstawiono w publikacji [10].

Wyróżnić należy również automaty trójwymiarowe. Są one niezastąpione w badaniach wymagających analizy zjawisk w przestrzeni. W [45] zwrócono uwagę na konieczność stosowania automatów trójwymiarowych w przypadku symulacji ewakuacji z pomieszczeń, w których względna wysokość podłoża jest zmienna. Zastosowanie tego typu siatki przedstawiono w pracy [46-47].

W automatach komórkowych jedno- i dwuwymiarowych stosuje się siatki kwadratowe [10], [48], sześciokątne [49-50] i trójkątne [51]. Analogicznie automaty trójwymiarowe zbudowane mogą być z brył foremnych. Podstawową bryłą jest sześcian [52].

W automatach dwu- i trójwymiarowych wyróżnia się następujące rodzaje sąsiedztwa [53]:

- sąsiedztwo von Neumanna,
- sąsiedztwo Moore'a,
- sąsiedztwo Margolusa [54].

3.2. Reguły przejść

Do właściwego zastosowania automatu niezbędne jest określenie reguł przejść, które pozwalają na zmianę pozycji zajętej komórki w kolejnym kroku czasowym. Reguły za [55] można podzielić na stochastyczne i deterministyczne.

Reguły stochastyczne opierają się w całości na teorii prawdopodobieństwa. Docelowa komórka, do której przejdzie osoba wybierana jest po obliczeniu największego prawdopodobieństwa spośród wszystkich sąsiadów. W przypadku postania sytuacji kolizyjnej tworzona jest nowa macierz tzw. macierz kolizyjnej (*collision matrix*), dla której również obliczane jest prawdopodobieństwo odnoszące się do poszczególnych pól. Prawdopodobieństwa w ramach danej macierzy poddawane są normalizacji w taki sposób, że ich suma zawsze jest równa 1.

Deterministyczne reguły przejść w przeciwieństwie do stochastycznych nie opierają się na prawdopodobieństwie. Dlatego też są całkowicie przewidywalne, a co za tym idzie dla danego układu wejściowego wynik będzie taki sam.

3.3. Metody aktualizacji automatu

Zakres oraz kolejność aktualizacji poszczególnych komórek w automacie może odbywać się w oparciu o odmienne reguły. Analizując reguły aktualizacji automatu komórkowego, możemy wyróżnić dwa rodzaje [11]:

- synchroniczny – automat, w którym cała siatka automatu komórkowego aktualizowana jest równocześnie;
- asynchroniczny – automat, w którym aktualizacja siatki automatu odbywa się w określonej kolejności. Do tej grupy automatów komórkowych należą:
 - automat aktualizowany krokowo – gdzie aktualizacja poszczególnych komórek automatu dokonywana jest w określonym porządku,
 - automat aktualizowany czasowo – gdzie aktualizacja poszczególnych komórek następuje w określonej chwili czasowej. W danym kroku czasowym może być wykonana aktualizacja tylko części wybranych komórek.

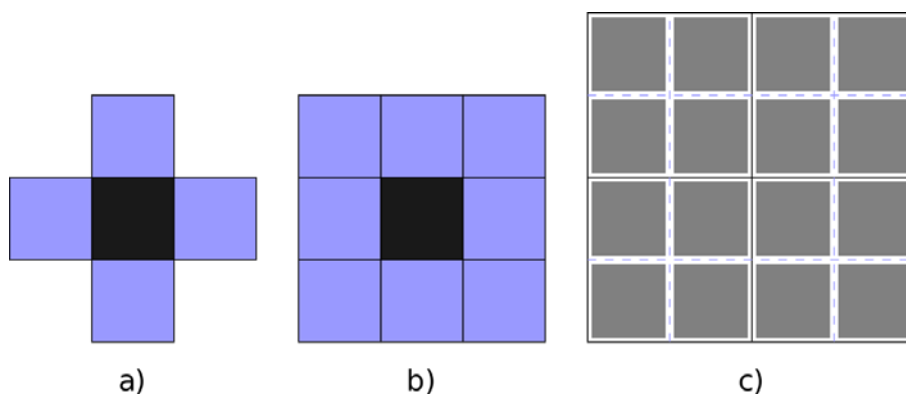
Na etapie implementacji modelu możliwe jest zastosowanie tablicy, którą aktualizuje się według przedstawionych reguł aktualizacji lub zastosowanie abstrakcyjnego typu danych – kolejki priorytetowej [56-57].

4. Modele

Wstęp do modeli ewakuacji stanowią wspomniane już prace Nagela i Schreckenberga [43-44], którzy przy wykorzystaniu automatów jednowymiarowych badali ruch pojazdów na autostradzie i ruch dwutorowy. Jedną z pierwszych prac z zastosowaniem automatu komórkowego do symulacji dwukierunkowego ruchu pieszych jest publikacja Blue i Adler [58]. Autorzy opatrzyli swój model nazwą CA-Ped. Pozwala on na modelowanie trzech trybów ruchu:

- a) odseparowanych kierunków ruchu,
- b) przeplatanych kierunków ruchu,
- c) dynamicznego wielotorowego ruchu (*dynamic multi-lane*).

Kolejny model, który pozwala na odwzorowanie ewakuacji ludzi przy zastosowaniu dwuwymiarowego automatu komórkowego, został przedstawiony w [10]. Jest to podstawowy model Floor Field. Na bazie automatów komórkowych rozwinął się również model gazu sieciowego Lattice Gas [59-60]. Powstały także prace badające ruch dwukierunkowy [61]. Inni autorzy [25] do modelowania ewakuacji zainspirowali się bioniką, interdyscyplinarną nauką badającą budowę i zasady działania organizmów oraz ich adaptowanie w technice. Koncepty na przestrzeni kilku lat powstało bardzo wiele [62-68].



Ryc. 1. Sąsiedztwo w automatach komórkowych: a) sąsiedztwo von Neumanna, b) sąsiedztwo Moore'a, c) sąsiedztwo Margolusa – linią ciągłą bloki komórek w czasie t_n , linią przerywaną bloki komórek w czasie t_{n+1}

Fig. 1. The neighborhood of the cellular automata: a) von Neumann neighborhood, b) Moore neighborhood, c) Margolus neighborhood – cell blocks along the continuous line at the time t_n , cell blocks along the broken line at the time t_{n+1}

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Zastosowanie automatów komórkowych do modelowania ewakuacji znalazło szerokie uznanie.

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną wybrane modele, które są przedmiotem badań na przestrzeni ostatnich lat.

4.1 Podstawowy model Floor Field

Autorzy publikacji [10] wprowadzili dodatkowe założenia do opisu automatu komórkowego, uzupełniając podstawową warstwę o dwie dodatkowe tj. warstwę pola statycznego (*static floor field*) oraz warstwę pola dynamicznego (*dynamic floor field*). Na podstawie wartości pól tych warstw określany jest ruch osób na płaszczyźnie automatu komórkowego. Wprowadzone do modelu założenia powodują, że automat komórkowy staje się automatem niehomogenicznym. Reguły aktualizacji automatu komórkowego różnią się w zależności od miejsca na siatce. Spowodowane jest to zmienną wartością pola statycznego w stosunku do odległości od wyjść ewakuacyjnych.

Model Floor Field podlega ciągłym modyfikacjom i przekształceniom w celu jak najlepszego odwzorowania rzeczywistości. Kolejno wzbogacono wspomniane założenia o dalsze dodatkowe warstwy. W pracy [69] wprowadzono warstwę pola pożaru (*fire floor field*). Ewakuowani muszą unikać pożaru, dlatego wybór komórek blisko pożaru jest mniej prawdopodobny niż zlokalizowanych daleko. Wartości komórek warstwy pożaru muszą w związku z tym być odwrotnie proporcjonalne do wartości prawdopodobieństwa zajęcia tej komórki przez osobę. W innym wariantcie modelu Floor Field oprócz warstwy statycznej i dynamicznej wprowadzono

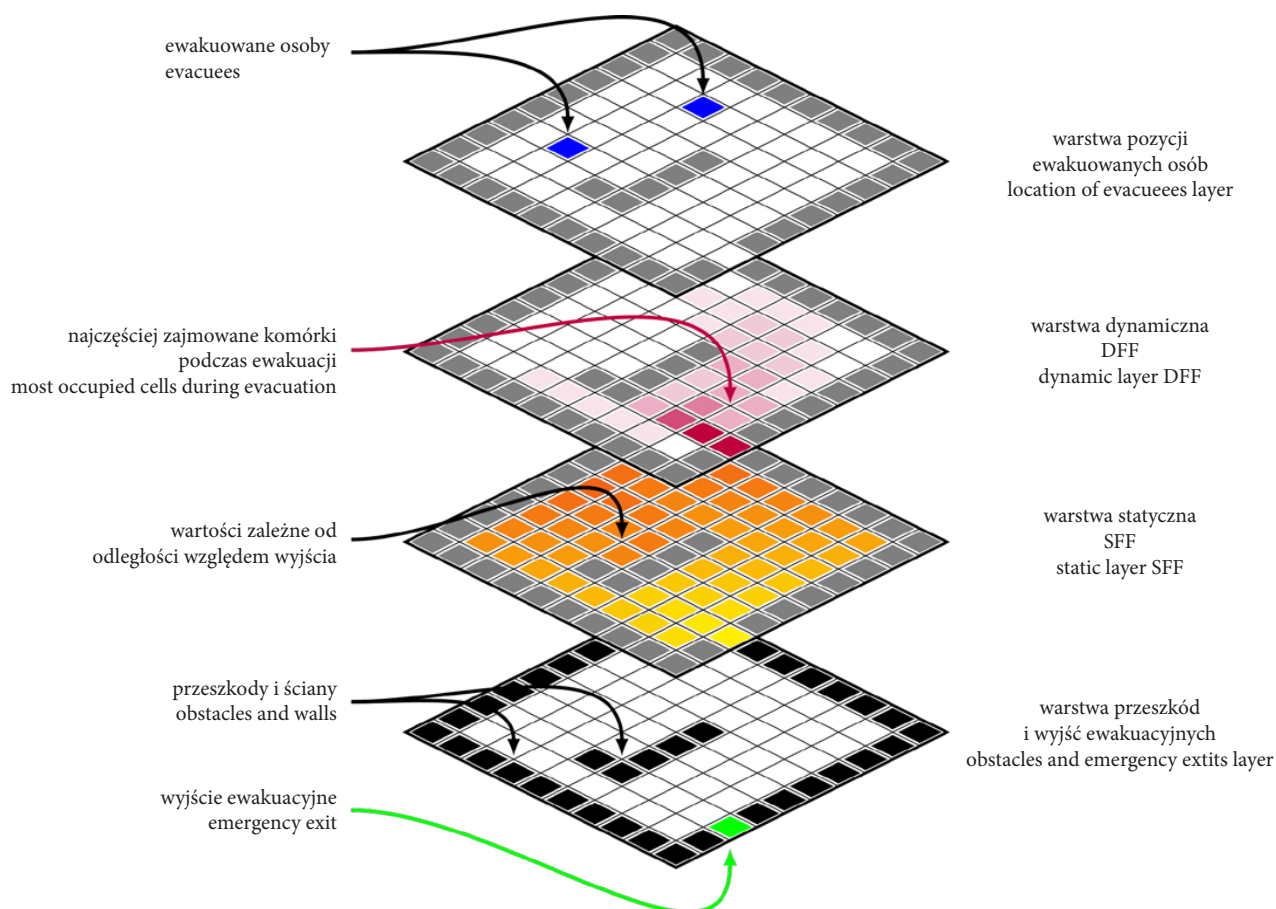
warstwę sił odpychających pomiędzy ewakuowanymi osobami (*repulsive force of occupants*) i warstwę sił przyciągających pomiędzy osobami (*attraction of occupants*) [22]. Dodatkowe warstwy pozwalają na dokładniejsze odwzorowanie ewakuacji podczas zagrożenia. Rozszerzając wpływ pożaru na ewakuujące się osoby, można w automacie komórkowym zadeklarować dowolną warstwę zawierającą parametry pożaru wpływające na ewakuujące się osoby. W [70] autorzy rozbudowali model automatu komórkowego do symulacji ewakuacji o warstwę przechowującą temperaturę (*temperature floor field*) i widzialność (*visibility floor field*).

Warstwa statyczna przechowuje wartości niezmiennące się wraz z działaniem automatu. Są to wartości odległości danej komórki od najbliższego wyjścia ewakuacyjnego. W procesie określania wartości pól warstwy statycznej powstało wiele koncepcji, propozycji, metryk. Jedną z podstawowych metryk przy ustalaniu wartości jest metryka Manhattan [71] – rycina 3a. Podczas określania wartości sumuje się różnice współrzędnych komórki wyjścia ewakuacyjnego oraz komórki, dla której wartość jest obliczana.

$$S_{xy} = |x_{exit} - x| + |y_{exit} - y| \quad (3)$$

gdzie:

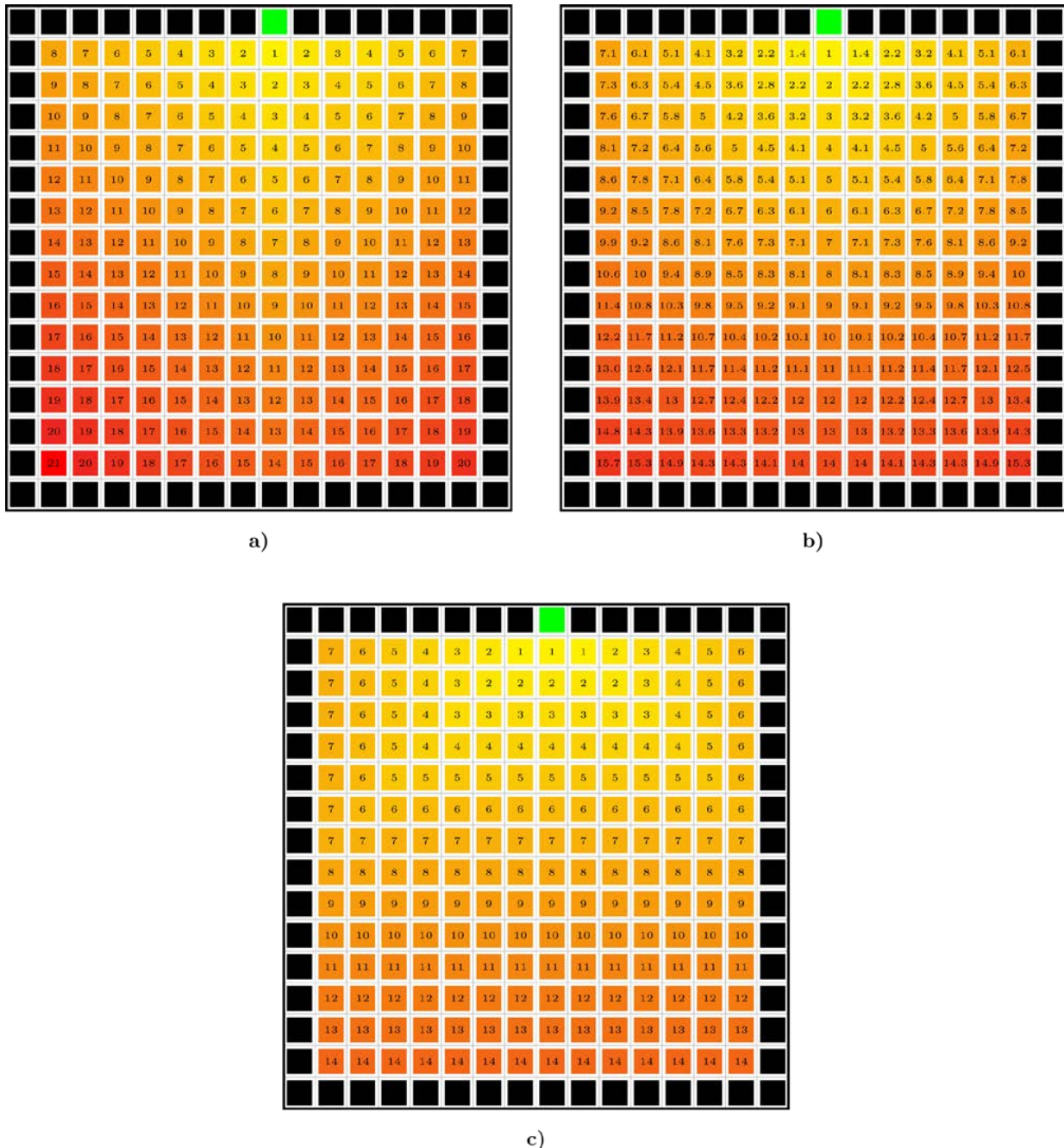
S_{xy} – wartość pola statycznego o współrzędnych xy ,
 x_{exit} – współrzędna x wyjścia ewakuacyjnego,
 y_{exit} – współrzędna y wyjścia ewakuacyjnego,
 x, y – współrzędne pola, dla którego obliczana jest wartość.



Ryc. 2. Przykładowe warstwy pól automatu komórkowego służącego do symulacji ewakuacji
 Fig. 2. Examples of cellular automaton field layers used to simulate an evacuation

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 3. Wartości pól warstwy statycznej ustalone zgodnie z metryką: a) Manhattan, b) euklidesową, c) Czebyszewa.
 Fig. 3. Static field layer values determined in accordance with the metric: a) Manhattan, b) Euclidean c) Chebyshev

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [71]
 Source: Own elaboration based on [71]

Kolejny sposób określania odległości poszczególnych pól warstwy statycznej od wyjścia ewakuacyjnego opiera się o metrykę euklidesową [71]. Pozwala ona na dokładniejsze odwzorowanie odległości pomiędzy poszczególnymi komórkami a wyjściami ewakuacyjnymi. Metryka ta bazuje na twierdzeniu Pitagorasa do określania wartości pól.

$$S_{xy} = \sqrt{(x_{exit} - x)^2 + (y_{exit} - y)^2} \quad (4)$$

gdzie:
 S_{xy} – wartość pola statycznego o współrzędnych x, y ,
 x_{exit} – współrzędna x wyjścia ewakuacyjnego,

y_{exit} – współrzędna y wyjścia ewakuacyjnego,
 x, y – współrzędne pola, dla którego obliczana jest wartość,

Możliwości określania wartości pól warstwy statycznej na tym się nie kończą. W pracy [71] autorzy wprowadzają ogólny wzór dla określania dystansu w dwuwymiarowych automatach:

$$S_{xy} = \sqrt[p]{(x_{exit} - x)^p + (y_{exit} - y)^p}, p \in R_+ \quad (5)$$

gdzie:
 S_{xy} – wartość pola statycznego o współrzędnych x, y ,
 x_{exit} – współrzędna x wyjścia ewakuacyjnego,

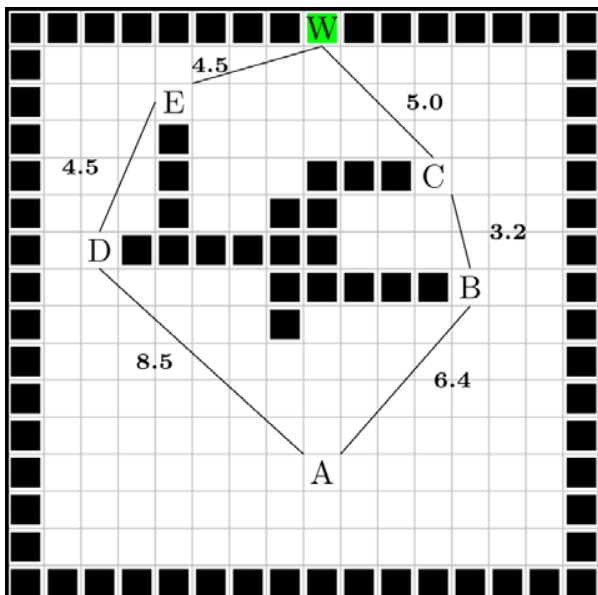
y_{exit} – współrzędna y wyjścia ewakuacyjnego,
 x, y – współrzędne pola, dla którego obliczana jest wartość,
 Dla zmiennej $p=1$ otrzymujemy metrykę Manhattan,
 a dla wartości $p=2$ metrykę euklidesową. Zmienna p może
 przyjmować kolejne wartości dążące do nieskończoności
 w zależności od potrzeb przy budowaniu automatu komór-
 kowego. Graniczną wartością odległości S_{xy} przy założeniu
 zmiennej p dążącej do nieskończoności jest wartość maksy-
 malna różnicy współrzędnych pola i wyjścia ewakuacyjnego.
 Ten sposób definiowania wartości komórek warstwy statycz-
 nej jest nazywany metryką Czebyszewa:

$$S_{xy} = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{p} \sqrt[p]{(x_{exit} - x)^p + (y_{exit} - y)^p} \right) = \max(|x_{exit} - x|, |y_{exit} - y|) \quad (6)$$

Wszystkie wspomniane metryki można łatwo stosować
 w prostych pomieszczeniach niezawierających przeszkód.
 Przedstawione powyżej sposoby definiowania wartości pól
 warstwy statycznej nie są jedyne. Autorzy [72] w swoim opra-
 cowaniu założyli metodę bazującą na procentowym udziale
 wartości pól określonych dla sąsiedztwa Moore’a oraz von
 Neumanna.

Dla pomieszczeń, w których występują przeszkody, ko-
 nieczne jest stosowanie algorytmów wyboru najkrótszej drogi.
 Jeden z takich algorytmów zaproponował Dijkstra [73].
 Podstawą algorytmu jest teoria grafów. Określenie najkrótszej
 drogi do wyjścia polega na porównaniu wartości wszystkich
 możliwych przejść w grafie pomiędzy polem, z którego pro-
 wadzimy ewakuację a wyjściem ewakuacyjnym.

Graficznie sposób określania najkrótszej drogi przedsta-
 wia rycina 4. Punkty (A, B, C, D, E, W) w teorii grafów są
 wierzchołkami grafu, natomiast odległości węzłami. Z punktu
 A do wyjścia ewakuacyjnego (W) prowadzą dwie drogi.
 Jedna przechodzi przez punkty A-B-C-W druga A-D-E-W.
 Pomiędzy punktami określono najmniejsze odległości. Naj-
 krótsza droga to ta, dla której suma wszystkich odległości jest

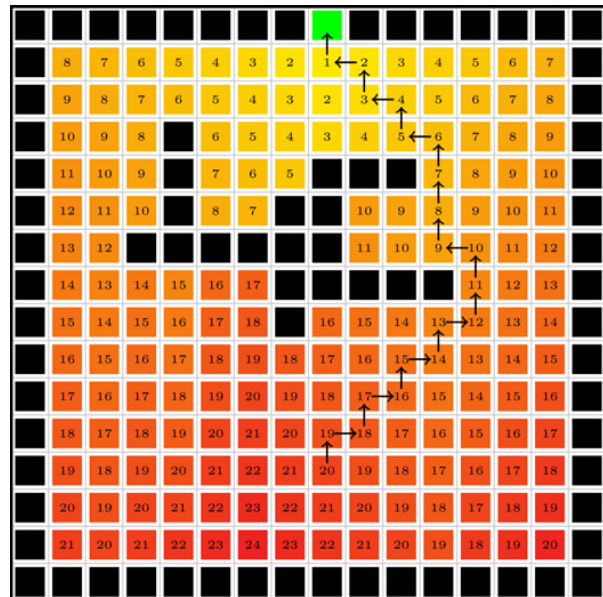


Ryc. 4. Graficzna prezentacja zastosowania algorytmu Dijkstra do określania najkrótszej drogi do wyjścia ewakuacyjnego.

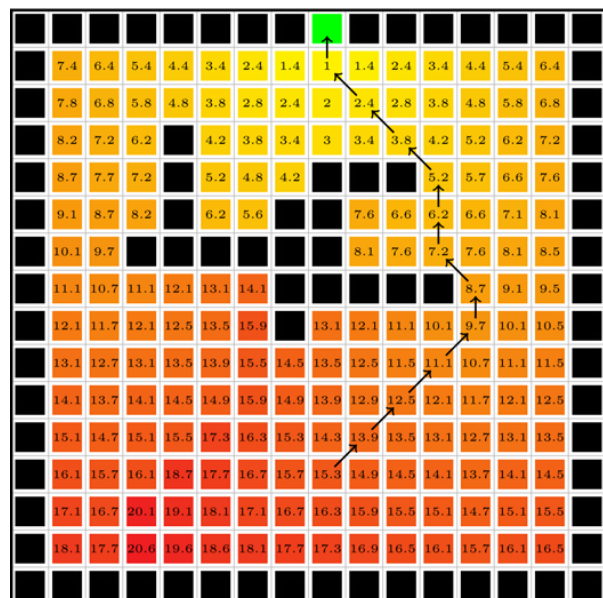
Fig. 4. Graphical representation of the Dijkstra algorithm application used to determine the shortest route to an emergency exit

Źródło: Opracowanie własne.
 Source: Own elaboration

najmniejsza. W prezentowanym przykładzie odległość A-B-C-W wynosi 14,6, natomiast dla drogi A-D-E-W wynosi 17,5. W tej sytuacji osoba ewakuująca się z pola A powinna przebyć drogę A-B-C-W prowadzącą do wyjścia ewakuacyjnego. Rycina 4 przedstawia ogólną zasadę określania najkrótszej drogi. Na rycinie 5 przedstawiono warstwę statyczną obliczoną z wykorzystaniem algorytmu Dijkstra dla pomieszczenia z ryciny 4. Przy uwzględnieniu sąsiedztwa von Neumanna (ryc. 5a) wartości pól są wartościami całkowitymi ze względu na przejścia tylko w dwóch kierunkach. Przedstawiono na niej również drogę, jaką musi przebyć ewakuowana osoba. Natomiast przy uwzględnieniu sąsiedztwa Moore’a wartości są zależne od tego, czy pokonujemy odległość pomiędzy ko-



a)



b)

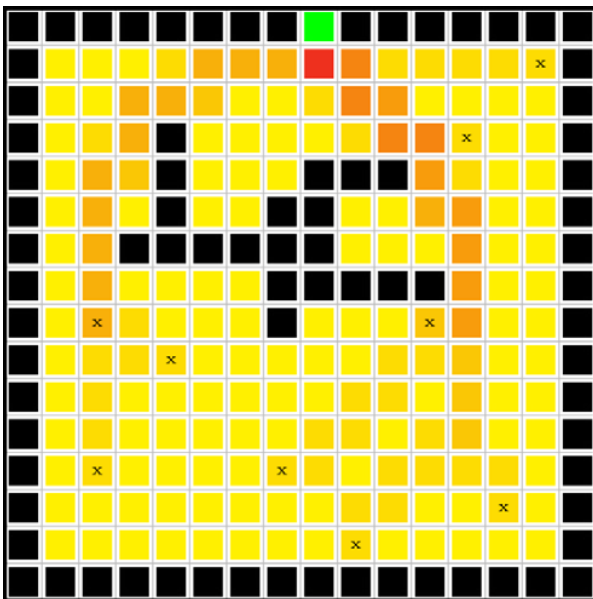
Ryc. 5. Wartości pól warstwy statycznej przy zastosowaniu algorytmu Dijkstra (a – dla sąsiedztwa von Neumanna, b – dla sąsiedztwa Moore’a)

Fig. 5. Static layer field values using the algorithm Dijkstra (a - for von Neumann neighborhood, b - for Moore neighborhood)

Źródło: Opracowanie własne.
 Source: Own elaboration

mórkami w pionie i w poziomie, czy na ukos. W przypadku przejść pionowych i poziomych wartość odległości jest równa 1. Natomiast przy przejściach skośnych wartość jest równa $\sqrt{2}$. Podczas obliczania zawsze przyjmuje się mniejszą z otrzymanych wartości. Ze względu na zastosowanie sąsiedztwa Moore'a przy przemieszczaniu się osoby uwzględnia się przejścia po ukosie. Liczba przejść w tym przypadku (ryc. 5b) będzie mniejsza niż w przypadku zastosowania sąsiedztwa von Neumanna (ryc. 5a).

Warstwa dynamiczna podlega ciągłej aktualizacji w każdym kolejnym kroku czasowym pracy automatu komórkowego. Wartość komórek warstwy dynamicznej w chwili inicjacji automatu wynosi 0. W przypadku każdego przejścia do komórki osoby ewakuowanej jej wartość jest zwiększana o 1. W ten sposób powstaje swego rodzaju warstwa przechowująca ślady przemieszczania się poszczególnych osób na płaszczyźnie automatu – rycina 6. Komórka bezpośrednio przed wyjściem ewakuacyjnym będzie miała największą wartość z tego względu, że wszystkie ewakuowane osoby przez nią przechodzą zwiększając za każdym razem jej wartość. Na rysunku gwiazdką zaznaczono miejsca, z których ewakuowano poszczególne osoby. Natomiast odcienie komórek od żółtego do czerwonego wskazują na wzrost wartości poszczególnych komórek od 0 do 9, gdyż przez komórkę naprzeciw wyjścia ewakuacyjnego przeszło 9 ewakuujących się osób.



Ryc. 6. Przykład warstwy dynamicznej po ewakuacji dziewięciu osób z komórek oznaczonych literą x

Fig. 6. An example of a dynamic layer after the evacuation of nine people from cells marked by letter x

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Aby model *Floor Field* działał prawidłowo niezbędne jest określenie w formie oddzielnej warstwy przeszkód, ścian i wyjść ewakuacyjnych (ryc. 2). Wartości z tej warstwy są wykorzystywane w celu przeciwdziałania zajęcia komórki, dla której zadeklarowano przeszkodę. Zabezpiecza to przed sytuacją niemożliwą do wystąpienia w rzeczywistości, czyli wejście osoby w przestrzeń zajmowaną przez ścianę lub inną przeszkodę na drodze ewakuacyjnej.

Kalkulacja przejść odbywa się w oparciu o powyższe warstwy. W celu określenia komórki, do której ma nastąpić przejście obliczane jest prawdopodobieństwo p_{ij} . Obliczenia w zależności od założeń autorów mogą być różnorodne. Najbardziej powszechną regułą przejść zaprezentował Burstedde w pracy [10]:

$$p_{ij} = NM_{ij} \exp(\alpha D_{ij}) \exp(\beta S_{ij}) (1 - n_{ij}) d_{ij} \quad (7)$$

gdzie:

p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia do komórki o współrzędnych (i, j) ,

N – współczynnik normalizacji pozwalający na proporcjonalne sprowadzenie prawdopodobieństw do takich wartości przy których $\Sigma(p_{ij}) = 1$,

M_{ij} – macierz dla komórki podstawowej wraz z jej sąsiadami,

D_{ij} – wartości warstwy dynamicznej,

S_{ij} – wartości warstwy statycznej,

n_{ij} – dodatkowe wartości określające czy komórka nie jest zajęta przez przeszkodę,

α – współczynnik wpływu wartości pola statycznego na wartość prawdopodobieństwa przejścia,

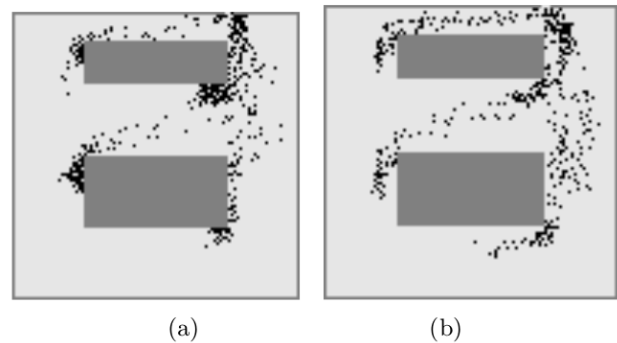
β – współczynnik wpływu pola dynamicznego na wartość prawdopodobieństwa przejścia,

d_{ij} – zmienna określająca czy dana komórka nie jest zajęta przez inną osobę.

Analogicznie dla modeli posiadających dodatkowe warstwy kalkulacja prawdopodobieństwa przejścia uwzględnia wszystkie pozostałe warstwy, nie tylko warstwę statyczną i dynamiczną.

4.2 Rozszerzony model Floor Field

Model wprowadzony przez Nishinari [62] w głównych założeniach opiera się na modelu Floor Field. Autorzy przeanalizowali podstawowe właściwości metryk pola statycznego oraz zaproponowali dodatkową regułę uwzględniającą wpływ ścian i przeszkód na ewakuujące się osoby. Wprowadzili również efekt bezwładności określający tendencję pieszych do zachowania preferowanego kierunku ruchu i prędkości przemieszczania.



Ryc. 7. Etap ewakuacji pomieszczenia przy zastosowaniu modelu *Extended Floor Field* (a – brak wpływu ścian na ewakuujące się osoby, b – wpływ ścian na ewakuujące się osoby) [62].

Fig. 7. Area evacuation phase using the *Extended Floor Field* model (a – lack of impact from walls on evacuated people, b – an impact of walls on evacuated people) [62]

Uwzględnienie wpływu ścian i przeszkód pozwala na bardziej realistyczne odwzorowanie zachowań ludzi w pobliżu narożników i zwężeń drogi ewakuacyjnej. Prawdopodobieństwo przejścia w tym modelu obliczane jest na podstawie równania:

$$p_{ij} = N \exp(k_D D_{ij}) \exp(k_S S_{ij}) p_I(i, j) p_W \quad (8)$$

gdzie:

N – współczynnik normalizacji,

k_S – współczynnik wpływu wartości pola statycznego,

k_D – współczynnik wpływu wartości pola dynamicznego,

S_{ij} – wartości warstwy statycznej,

D_{ij} – wartości warstwy dynamicznej,
 p_I – współczynnik efektu bezwładności,
 p_w – wartości warstwy potencjału ścian i przeszkód.

Uwzględnienie przez autorów wpływu ścian na ewakuujące się osoby zwiększyło dokładność odzwierciedlenia procesu ewakuacji. Graficzne porównanie efektu przedstawia ryc. 7.

4.3. Zmodyfikowany model Floor Field

W przypadku wielu wyjść ewakuacyjnych oraz przeszkód wewnątrz pomieszczenia wśród osób ewakuowanych można obserwować niepewność odnośnie odnalezienia wyjścia ewakuacyjnego. Huang [63] i inni wprowadzili modyfikację modelu Floor Field, która uwzględnia niepewność wyboru i odnalezienia wyjścia ewakuacyjnego. Niepewność ta jest szacowana przy użyciu równania:

$$Q_{i,j}^m = \frac{\exp(\Theta S_{i,j}^m)}{\sum_i \exp(\Theta S_{i,j}^l)} \quad (9)$$

gdzie:

$Q_{i,j}^m$ – prawdopodobieństwo wyboru wyjścia ewakuacyjnego m przez osobę zajmującą komórkę (i,j) ,

Θ – parametr percepcji wyjścia ewakuacyjnego,

$S_{i,j}^m$ – wartość warstwy statycznej dla pola ij względem wyjścia m ,

$S_{i,j}^l$ – wartość warstwy statycznej dla najczęściej wybieranego wyjścia,

Autorzy modelu wykazali, że znajomość wyjść ewakuacyjnych oraz ich rozmieszczenie ma decydujący wpływ na czas ewakuacji. Ponadto równomierne rozmieszczenie drzwi ewakuacyjnych wpływa na skrócenie czasu ewakuacji niezależnie od wiedzy ewakuujących się osób o ich odległości.

4.4. Model Proxemic Floor Field (PFF)

Wzajemny wpływ relacji przestrzennych między ewakuującymi się osobami ma bardzo duże znaczenie w procesie ewakuacji. Dystanse i oddziaływania społeczne są podstawowym elementem modelu Social Force. Autorzy [64,-65] rozbudowując model Floor Field, uzupełnili go o elementy proksymiki. W pracy [64] wprowadzono nową warstwę uzależnioną od odległości względem innej osoby nazwaną Proxemic Floor Field. Kalkulacja pola PFF odbywa się w oparciu o równania:

$$P_{i,j}^k = \frac{1}{(r_{ij}^k)^2} \quad (10)$$

$$P_{i,j} = \sum_k P_{i,j}^k \quad (11)$$

gdzie:

r_{ij}^k – promień odległości od osoby k ,

$P_{i,j}^k$ – wartość pola PFF dla osoby k ,

$P_{i,j}$ – wartość pola PFF dla komórki (i,j) wyznaczonej przez wszystkie osoby

Pola o małej wartości są bardziej preferowane przez ewakuujące się osoby. Dla przykładu z ryciny 8 pola o wartości 2 nie są atrakcyjne, a ich zajęcie przez osoby w kolejnym kroku czasowym będzie mało prawdopodobne. Przejście osób do pól o wartości 2 wiązałoby się z naruszeniem strefy intymnej. Przejście takie jest możliwe jedynie przy występowaniu tłumu o dużej gęstości.

$$\sum_{k=1}^2 P_{ij}^k$$

3/10	9/20	6/5	9/8	14/13
10/9	5/4	2	6/5	11/10
11/10	6/5	2	5/4	10/9
14/13	9/8	6/5	9/20	3/10
23/90	17/52	3/10	17/72	23/130

Ryc. 8. Wartość warstwy Proxemic Floor Field utworzonej przez dwie osoby (osoby oznaczone okręgami) [64]

Fig. 8. Proxemic Floor Field layer value generated by two people (people marked with circles) [64]

4.5. Model F.A.S.T

W roku 2007 Kretz sformułował model F.A.S.T (Floor field and Agentbased Simulation Tool) [74]. Bazuje on na modelu Floor Field. Klasyfikowany jest jako model probabilistyczny (losowy) z rozszerzeniem o rzeczywiste zachowania ludzi. W modelu istnieją trzy poziomy podejmowania decyzji:

- 1) wybór wyjścia ewakuacyjnego,
- 2) wybór komórki docelowej,
- 3) wybór drogi pomiędzy obecną a docelową komórką.

Dwa pierwsze poziomy są procesami probabilistycznymi, natomiast trzeci jest procesem deterministycznym. Wybór wyjścia ewakuacyjnego odbywa się w oparciu o równanie:

$$p_E^A = N(1 + \delta_{AE} k_E(A)) / S(A, E)^2 \quad (12)$$

gdzie:

N – współczynnik normalizacji sprowadzający proporcjonalnie prawdopodobieństwa wyboru danego wyjścia ewakuacyjnego przez określonych agentów, $\sum_E p_E = 1$,

δ_{AE} – współczynnik określający które wyjście ewakuacyjne wybrał agent w poprzednim kroku czasowym,

$k_E(A)$ – współczynnik trwałości wyboru wyjścia ewakuacyjnego,

$S(A, E)$ – odległość agenta A od wyjścia ewakuacyjnego E ,

Dla modelu określono dyskretny czas wynoszący 1 s, który odpowiada czasowi typowej reakcji. Powoduje to następstwa polegające na możliwości pokonania przez osobę od trzech do sześciu komórek w czasie jednego kroku czasowego w zależności od maksymalnej prędkości danej osoby oraz od tego czy komórki są wolne czy zajęte. W celu realizacji procesu wyboru komórki docelowej niezbędne jest posługiwanie się sąsiedztwem o promieniu większym niż jeden i opisanym szczegółowo w pracy [75]. Wybór komórki docelowej odbywa się zgodnie z równaniem:

$$p_{ij} = Np_{xy}^S + p_{xy}^D + p_{xy}^I + p_{xy}^W + p_{xy}^P, \quad (13)$$

gdzie:

- p_{xy}^S – wpływ pola statycznego,
- p_{xy}^D – wpływ pola dynamicznego,
- p_{xy}^f – wpływ efektu bezwładności,
- p_{xy}^w – wpływ bliskości ścian,
- p_{xy}^g – wpływ gęstości tłumu.

4.6. Model Varasa pola statycznego i interakcji pomiędzy uczestnikami

Varas opracował model korzystający z pola statycznego i zależności pomiędzy ewakuowanymi osobami [48]. Warstwa pola statycznego budowana jest w ten sposób, że każde przejście wertykalne powoduje wzrost wartości pola o 1, natomiast każde przejście skośnie o 1,5. Do określania wartości przyjmuje się sąsiedztwo Moore’a. Dla ścian i przeszkód przydzielana jest bardzo duża wartość znacznie przekraczająca wartości pola statycznego. W publikacji autor przyjął wartość 500.

Jeśli dla danej komórki dwóch lub więcej sąsiadów ma tą samą wartość, to wybór komórki, do której przemieści się ewakuowana osoba wybierany jest losowo. Losowo odbywa się również przydział komórki w przypadku, jeśli dwie lub więcej osób chce się do niej przemieścić. Pozostałe niewylosowane osoby nie zmieniają pozycji. Ponadto określono odsetek osób, które nie zmieniają w danym kroku czasowym swojej pozycji mimo występowania wolnych pól, do których mogłyby się przemieścić. Ma to na celu odwzorowanie występowania zjawiska paniki. W omawianym modelu autor zakłada odsetek 5% osób pod wpływem paniki.

4.7. Model pola dynamicznego

Wzoruując się na poprzednio opisanym modelu Varasa, Alizadeh [76] zaproponował wprowadzenie do niego warstwy pola dynamicznego obliczanego z wykorzystaniem pola statycznego oraz dynamicznej odległości osób od wyjść ewakuacyjnych. Wartości pola dynamicznego obliczane są za pomocą równania:

$$W_i^A(x) = W_{static}^A(x) + \alpha T_i^A(x) \tag{14}$$

$W_{static}^A(x)$ są wartościami pola statycznego określonego zgodnie z przyjętą metryką, natomiast $T_i^A(x)$ określa liczbę osób, które znajdują się bliżej wyjścia A w i -tym kroku czasowym od komórki x . Współczynnik α określa stopień wpływu $T_i^A(x)$ na wartość pola dynamicznego $W_i^A(x)$.

Przy wyborze komórki, do której przemieszcza się osoba, bierze się pod uwagę wartość pola dynamicznego. W przypadku konfliktu dokonuje się losowania. Pozostali uczestnicy w tym czasie oczekują. Autor wprowadza również odsetek 5% osób, które nie wykonują ruchu w danym kroku czasowym pomimo występowania wolnych komórek o mniejszej wartości niż zajmowana.

4.8. Model Real Coded Cellular Automata

Przy definiowaniu modelu wykorzystano teorię gazu sieciowego (*ang.* Real-coded lattice gas) [41]. Do określania kierunku przejść wykorzystywana jest rzeczywista odległość osoby od wyjścia ewakuacyjnego oraz algorytm Dijkstra. Model zawiera cztery reguły aktualizacji:

1. Każde przemieszczenie ewakuowanej osoby jest równe sumie pozycji początkowej oraz wektora prędkości:

$$x_i' = x_i + v_i \tag{15}$$

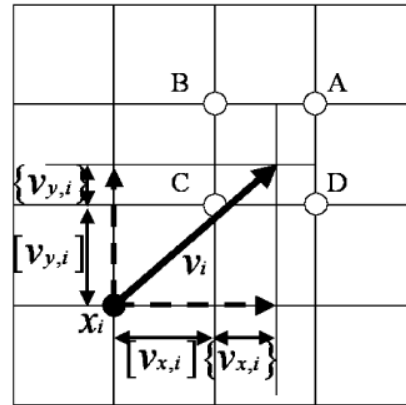
gdzie:

- x_i – pozycja początkowa,
- v_i – wektor prędkości

2. Aby utrzymać pozycje ewakuowanych osób zgodną z zadeklarowaną siatką każda osoba jest przyciągana do najbliższego punktu siatki. Przykładową kalkulację prawdopodobieństwa przedstawia rycina 9.

$$v_{x,i} = [v_{x,i}] \Delta / \Delta_i + \{v_{x,i}\} \Delta / \Delta_i \tag{16}$$

$$v_{y,i} = [v_{y,i}] \Delta / \Delta_i + \{v_{y,i}\} \Delta / \Delta_i$$



Ryc. 9. Graficzna reprezentacja drugiego kroku algorytmu *real-coded* [41]

Fig. 9. A graphical representation of the second step for the *real-coded* algorithm [41]

$$\begin{aligned} p_A &= \{v_{x,i}\} \cdot \{v_{y,i}\} \\ p_B &= (1 - \{v_{x,i}\}) \cdot \{v_{y,i}\} \\ p_C &= \{v_{x,i}\} \cdot (1 - \{v_{y,i}\}) \\ p_D &= (1 - \{v_{x,i}\}) \cdot (1 - \{v_{y,i}\}) \end{aligned} \tag{17}$$

3. Gdy ewakuująca się osoba chce przejść do już zajętego punktu siatki, zostaje zmieniony kierunek ruchu osoby od $+45^\circ$ do -45° w zależności od tego gdzie znajduje się najbliższy wolny punkt siatki.
4. W każdym kroku czasowym jest określany kierunek ruchu ewakuowanej osoby prowadzący bezpośrednio do wyjścia ewakuacyjnego.

Przedstawione koncepcje, modele nie są jedynymi. Na przestrzeni ostatnich lat powstało ich bardzo wiele. Często stanowią modyfikacje już istniejących i omówionych w powyższych sekcjach.

5. Problemy występujące w modelowaniu przemieszczania osób

Podczas modelowania ewakuacji przy zastosowaniu automatów komórkowych występuje wiele problemów wynikających m.in. z dyskretyzacji czasu i przestrzeni. Jednym z nich jest próba zajęcia przez dwie lub więcej osób tej samej komórki w trakcie ewakuacji (konflikt). W rzeczywistości sytuacja taka jest niemożliwa, dlatego algorytmy aktualizacji pozycji ewakuowanych osób muszą zawierać założenia do rozwiązywania konfliktów. Jednym z najprostszych rozwiązań w tym przypadku jest przydzielenie komórki dla losowo wybranej osoby [48]. Innym sposobem jest utworzenie nowej macierzy z komórką, dla której występuje konflikt, a następnie dokonanie szeregu obliczeń, które mają na celu wskazać, która osoba ma największe prawdopodobieństwo zajęcia komórki [77].

Kolejnym problemem są kolizje. Występują podczas stosowania sąsiedztwa Moore’a. Problem kolizji przedstawiono na rycinie 10b,c. Pierwszą z kolizji (ryc. 10b) jest chęć przejścia przez dwie osoby równocześnie przed sobą. Podczas ewakuacji z udziałem ludzi jedna z tych osób musiałaby po-

czekać, aż druga przed nią przejdzie. Równoczesne przejście nie byłoby możliwe. Drugi problem kolizji jak na rys. 10c to próba przejścia pomiędzy dwiema osobami znajdującymi się blisko siebie. W realnej ewakuacji przejście takie byłoby trudne lub nawet niemożliwe.

Kolejnym problemem jest zmiana prędkości przemieszczania się osób w zależności od zastosowanego sąsiedztwa. Używając do symulacji sąsiedztwo von Neumanna ewakuowane osoby mają możliwość przemieszczania się o komórkę w pionie lub poziomie. Przy założeniu wymiarów komórki 0,4 m x 0,4 m w każdym kroku czasowym osoba pokonuje 0,4 m. Natomiast stosując sąsiedztwo Moore'a występują sytuacje, w których ewakuowana osoba może w danym kroku czasowym przemieścić się po skosie. Wtedy przebyta droga jest dłuższa i wynosi ok. 0,57 m. Wpływa to znacząco na prędkość przemieszczania się ewakuowanych osób. Osoba pokonująca pomieszczenie po skosie przy zastosowaniu sąsiedztwa von Neumanna będzie przemieszczała się znacznie wolniej niż przy zastosowaniu sąsiedztwa Moore'a.

Innym problemem jest odwzorowanie maksymalnej gęstości zatłoczenia. Przy zastosowaniu komórek automatu o wymiarach 0,4 m x 0,4 m maksymalna gęstość rozmieszczenia ludzi wynosi 6,25 os./m². Natomiast rzeczywiste obserwacje oraz liczne dane statystyczne w publikacjach naukowych dotyczących bezpieczeństwa ewakuacji wskazują, że w sytuacjach zagrożenia i paniki gęstość ta może osiągać wartość nawet 8 os./m² [78].

Zagadnienie dyskretyzacji przestrzeni, prędkości przemieszczania i ich wpływ na modelowanie ewakuacji podjął Kirchner [79]. Natomiast problemem odwzorowania szerokiego zakresu gęstości rozmieszczenia osób przy wykorzystaniu automatów komórkowych wraz z walidacją wyników podjęto w publikacji [80]. Istotne znaczenie ma proces walidacji i weryfikacji poprawności przyjętych założeń w rozwiązywaniu ograniczeń spowodowanych zastosowaniem automatów komórkowych. Elementy weryfikacji i walidacji omówiono w rozdziale 7.

6. Podstawowe założenia do przeprowadzenia prawidłowej symulacji

Symulacje ewakuacji to obraz rzeczywistego przemieszczania się ludzi odwzorowany przy wykorzystaniu oprogramowania komputerowego. Oprogramowanie wykorzystujące automaty komórkowe musi odwzorowywać ewakuację w jak najbardziej wiarygodny sposób. Powierzchnia pomieszczenia odwzorowana przy wykorzystaniu automatu komórkowego musi zostać podzielona na dyskretne części, komórki. Bardzo powszechnym odwzorowaniem są kwadraty o wymiarach 0,4

m x 0,4 m. Jak już wspomniano wcześniej, taki wymiar komórki przy założeniu maksymalnej gęstości rozmieszczenia ludzi pozwala na odwzorowanie ok. 6,25 os./m² [81]. Nie jest to jedyny rozmiar komórki. W modelach stosuje się również komórki o bokach 0,5 m, a także i mniejsze od 0,4 m.

Kolejnym parametrem niezbędnym do określenia jest czas odpowiadający jednemu krokowi aktualizacji stanu automatu. Przyjmując, że ewakuujące osoby przemieszczają się ze średnią prędkością 1 m/s i znając wymiar komórki automatu (0,4 m) jeden krok w działaniu automatu będzie odpowiadał czasowi równemu 0,4 s. W znacznej części opracowań autorzy za prędkość ewakuacji przyjmują 1,3 m/s (średnia prędkość przemieszczania się ludzi podczas ewakuacji).

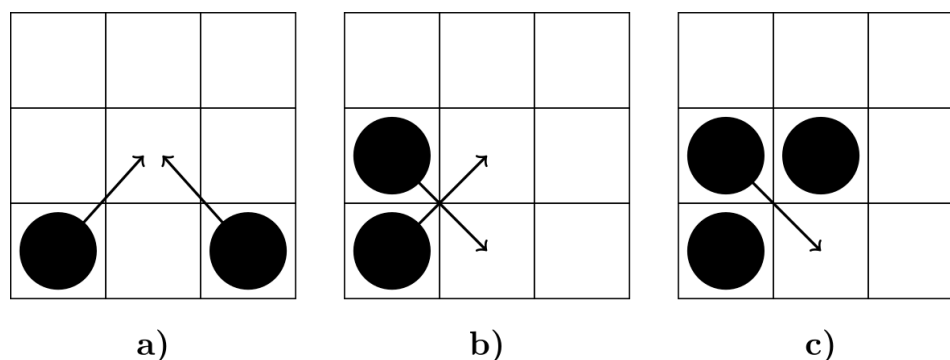
7. Weryfikacja i walidacja symulacji

Model do symulacji ewakuacji musi przejść proces walidacji oraz weryfikacji. Walidacja realizowana jest na etapie tworzenia oprogramowania do symulacji. Jest to proces mający na celu wierne odwzorowanie podstawowych założeń modelu. Określane na tym etapie są takie elementy jak:

- właściwy dobór siatki automatu,
- wybór odpowiedniego rozmiaru siatki,
- rodzaj sąsiedztwa,
- właściwe odwzorowanie założonych w modelu reguł przejść, itp.

Weryfikacja natomiast jest procesem polegającym na porównaniu wyników symulacji z rzeczywistą realizacją ewakuacji. Im wyższej jakości oprogramowanie do symulacji ewakuacji, tym bardziej dokładne jest odwzorowanie procesu ewakuacji. Autorzy niejednokrotnie wykonują określoną liczbę prób ewakuacji z udziałem ludzi. Następnie identyczne warunki odtwarzają przy wykorzystaniu badanego modelu. Porównanie wyników pozwala na skalibrowanie modelu w taki sposób, aby oprogramowanie bazujące na automacie komórkowym odwzorowywało rzeczywistą ewakuację możliwie najwierniej. Porównania takiego dokonuje się w stosunku do prostych układów pomieszczeń.

Proces walidacji i weryfikacji wykonuje się m.in. w oparciu o instrukcję Międzynarodowej Organizacji Morskiej MSC/Circ.1238 - *Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships* [82], MSC/Circ.1033 - *Interim guidelines for evacuation analyses for new and existing passenger ships* [83], instrukcję RiMEA - *Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen* [84], prace Rogscha [85], wytyczne NIST [86] oraz standardy ISO/TR 16738:2009 - *Fire Safety Engineering - Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people*, ISO/TR 13387-8:1999 - *Fire safety engineering - Part 8 Life safety - Occupant behaviour*,



Ryc. 10. Konflikty i kolizje ewakuowanych osób podczas symulacji przy zastosowaniu automatu komórkowego

Fig. 10. Evacuee discord and collisions during stimulation, using cellular automaton

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [10] i [55]

Source: Own elaboration based on [10] and [55]

location and condition [87–88]. Szczególne znaczenie podczas walidacji ma również podstawowy diagram przepływu [89]. Rozszerzenie procesu walidacji i weryfikacji zaproponował Lubaś [90], a w najnowszej pracy [91] autorzy prezentują wybrane problemy, które należy uwzględnić podczas budowania oprogramowania do symulacji ewakuacji. Problem właściwej walidacji i weryfikacji przepływu tłumy podejmuje również Dridi [92].

Proces weryfikacji obejmuje szereg elementów, takich jak [90]:

1. Rozkład czasu wstępnej ewakuacji,
2. Prędkość przemieszczania się na korytarzach i schodach,
3. Ruch na zakrętach,
4. Parametry demograficzne użytkowników,
5. Zależność widzialności i prędkości przemieszczania,
6. Wpływ użycia wind,
7. Przepływ na poziomych drogach ewakuacyjnych,
8. Zachowania grup ludzi,
9. Niepełnosprawność ruchowa ludzi,
10. Wybór wyjść ewakuacyjnych,
11. Oddziaływania społeczne i przynależności,
12. Dynamiczna dostępność wyjść,
13. Przeludnienie,
14. Maksymalny przepływ,

Dokument weryfikacji jest nierozłącznie związany z analizowanymi przypadkami i pozwala na określenie, w jakim stopniu model odzwierciedla ewentualną rzeczywistość ewakuację.

8. Złożoność obliczeniowa automatów komórkowych

Czas działania algorytmu można opisać funkcją zależną od ilości danych wejściowych n . W zależności od algorytmu czas działania może zostać wyrażony określoną funkcją $f(n)$ [93]. I tak np.:

1. Gdy czas działania zależy liniowo od ilości danych wejściowych, funkcja opisująca złożoność obliczeniową będzie miała postać $f(n) = n$.
2. Dla czasu działania rosnącego wykładniczo w stosunku do ilości danych wejściowych $f(n) = n^2$.

Do opisu złożoności obliczeniowej stosuje się trzy notacje:

1. Notacja Θ – w której funkcja opisująca jest asymptotycznie dokładnym oszacowaniem.
2. Notacja O – w której funkcja opisująca jest asymptotyczną górną granicą (czas wykonania algorytmu nie przekracza górnej granicy funkcji).
3. Notacja Ω – w której funkcja opisująca jest asymptotyczną dolną granicą (czas wykonania algorytmu nie jest mniejszy od dolnej granicy funkcji).

Proste modele bazujące na automatach komórkowych mają złożoność obliczeniową rzędu $O(n)$ [25]. Porównywane są tylko sąsiednie komórki, a ich liczba jest określona i stała. W drodze rozbudowy modeli na bazie automatów komórkowych wprowadzone zostały dodatkowe założenia, które wpływają na wzrost złożoności obliczeniowej. Wciąż jednak automaty te pozwalają modelować ewakuację w łatwy sposób przy wykorzystaniu niewielkiej mocy obliczeniowej. Potwierdzili to również autorzy, modelując ewakuację przy zastosowaniu automatu komórkowego i algorytmu zachłannego grupy 30 tysięcy na komputerze klasy PC z procesorem Intel i3 bez konieczności zrównoleglenia obliczeń [94]. Ze względu na niską złożoność obliczeniową modeli opartych o automaty komórkowe możliwe jest modelowanie ewakuacji wielotysięcznych grup ludzi w czasie rzeczywistym również przy zastosowaniu programu PedGo [95].

Natomiast dla modelu Social Force, w którym podczas obliczeń dokonuje się porównania każdego ewakuowanego

z każdym innym i dodatkowo ze wszystkimi przeszkodami funkcja opisująca złożoność jest potęgowa – $O(n^2)$ [25–26]. Modele agentowe, których powstanie zawdzięczamy sztucznej inteligencji, mogą w pesymistycznej konfiguracji wykonywać porównania cech każdego agenta z każdym innym, a tym samym ich złożoność obliczeniowa będzie na poziomie $O(n^2)$ [24].

Autorzy poszczególnych modeli zakładają określone parametry i rozbudowują modele o nowe własności, które w konsekwencji mają wpływ na wzrost złożoności obliczeniowej.

9. Podsumowanie

Na rynku dostępnych jest wiele narzędzi pozwalających na weryfikację bezpieczeństwa ewakuacji. Postęp w dziedzinie inżynierii oprogramowania, modelowania rzeczywistych zjawisk, wzrost mocy obliczeniowej komputerów pozwala na zastosowanie wyspecjalizowanego oprogramowania w celu analizy bezpieczeństwa ewakuacji. Automaty komórkowe znalazły szerokie zastosowanie w modelowaniu ewakuacji. Prowadzone są ciągłe badania nad jakością modeli i bazujących na nich aplikacjach. Wiedza zaprezentowana w niniejszym artykule jest niezbędna inżynierom pożarnictwa do rzetelnego analizowania zagrożeń występujących w procesie ewakuacji. Na całym świecie wykonuje się szereg symulacji ewakuacji dla różnych obiektów, głównie takich, w których może występować duża liczba osób. Podyktowane jest to potrzebą reagowania (jeszcze na etapie projektowania i budowy) na możliwe sytuacje zagrożeń podczas ewakuacji. Jednym z najmniejbezpiecznych zagrożeń jest panika. Modele ewakuacji mogą wskazać miejsca, w których może dochodzić m.in. do niechcianych zjawisk, nadmiernego zatłoczenia, niekontrolowanych interakcji pomiędzy uczestnikami, występowanie wąskich gardeł.

W artykule zaprezentowano w sposób syntetyczny podstawy automatów komórkowych, modele obecnie dostępne bazujące na automatach komórkowych oraz problemy, na jakie należy zwrócić uwagę podczas budowania modelu.

W odrębnych pracach zostaną zaprezentowane wyniki symulacji ewakuacji z wybranych obiektów wykonane na podstawie przedstawionych powyżej modeli. Pierwszą z przewidywanego cyklu publikacji jest zaprezentowana podczas konferencji naukowej „Bezpieczeństwo Przyszłości” w Szkole Głównej Służby Pożarniczej 12 kwietnia 2016 r. Autorzy zaproponowali wersję modelu Floor Field opartą na warstwie statycznej obliczanej zgodnie z metryką euklidesową. W ramach reguł aktualizacji zastosowano algorytm zachłanny w celu wyboru komórki przejścia. Dla określonych parametrów otrzymano zbierne wyniki oszacowania czasu ewakuacji wybranych konfiguracji pomieszczeń z programami Pathfinder, PedGo oraz FDS+Evac. Ponadto porównano czas pracy procesora dla zaproponowanego modelu oraz programu FDS+Evac przy zmiennej liczbie osób. Wykazano, że czas pracy procesora dla automatu komórkowego rośnie liniowo wraz ze wzrostem liczby osób, natomiast dla programu FDS+Evac wykładniczo. Oszacowanie czasu ewakuacji 1000 osób przy zastosowaniu automatu komórkowego zajęło 60 s, natomiast przy użyciu programu FDS+Evac około 20 minut. Autorzy przeprowadzili również modelowanie ewakuacji 30 000 osób na komputerze z procesorem Intel i3 oraz pamięcią RAM 4 GB. Modelowanie tak dużej grupy ludzi przy zastosowaniu programu FDS+Evac dla tego samego sprzętu komputerowego byłoby niemożliwe. Model daje możliwość przybliżonego oszacowania czasu ewakuacji w bardzo krótkim czasie dużych grup ludzi z pomieszczeń o dowolnej konfiguracji [94].

10. Wnioski

Automaty komórkowe są dziedziną informatyki, która pozwala na modelowanie ewakuacji. Rozwój modeli na prze-

strzeni ostatnich lat umożliwił bardzo dokładne odwzorowanie zjawisk towarzyszących ewakuacji przy zastosowaniu tego typu narzędzi. Modele pomimo swoich wad i ograniczeń dają perspektywę dalszego rozszerzenia swoich możliwości m.in. o zjawiska towarzyszące panice. Ponadto stosunkowo niewielka złożoność obliczeniowa tego typu modeli pozwala na analizowanie bezpieczeństwa ewakuacji już na etapie projektowania budynków i obiektów bez znaczącego wpływu na koszty.

Opracowanie wykonano w ramach realizacji pracy statutowej S/WI/1/2013 prowadzonej na Wydziale Informatyki Politechniki Białostockiej.

Literatura

- [1] Canetti E., *Crowds and power*, The Continuum Publishing Corporation [electr. doc.] http://asounder.org/resources/canetti_crowdsandpower.pdf [accessed:12.06.2016].
- [2] Helbing D., *A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians*, "Complex Systems" 1992, 6, 391-415.
- [3] Okazaki S., *A study of pedestrian movement in architectural space, part 1: Pedestrian movement by the application of magnetic models*, "Trans. of A.I.J." 1979, 283, 111-119.
- [4] Helbing D., Molnar P., *Social force model for pedestrian dynamics*, "Physical Review E" 1995, 51(5), 4282-4286.
- [5] Kwak J., Jo H.H., Luttinen T., Kosonen I., *Collective dynamics of pedestrians interacting with attractions*, "Physical Review E" 2013, 88(6), 062810.
- [6] Xu S., Duh H.B.L., *A simulation of bonding effects and their impacts on pedestrian dynamics*, Intelligent Transportation Systems, "IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems" 2010, 11(1), 153-161.
- [7] Tadeusiewicz R., *Introduction to intelligent systems*, [in:] *The Industrial Electronics Handbook, Intelligent systems*, Milanowski B.M., Irwin J.D. (eds.), Taylor & Francis Group, 2011, 1.1-1.12.
- [8] Bandini S., Federici M.L., Vizzari G., *Situated cellular agents approach to crowd modeling and simulation*, "Cybernetics and Systems: An International Journal" 2007, 38(7), 729-753.
- [9] Bandini S., Rubagotti F., Vizzari G., Shimura K., *An agent model of pedestrian and group dynamics: experiments on group cohesion*, [in:] *AI* IA 2011: Artificial Intelligence Around Man and Beyond*, R. Pirrone, F. Sorbello (eds.), Springer, Berlin Heidelberg, 2011, 104-116.
- [10] Burstedde C., Klauck K., Schadschneider A., Zittartz J., *Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional Cellular Automaton*, "Physica A" 2001, 295(3), 507-525.
- [11] Wąs J., *Algorytmy modelowania inteligentnych zachowań w zagadnieniach dynamiki pieszych z zastosowaniem niehomogenicznych automatów komórkowych*, Praca doktorska, AGH 2006, [dok. elektr.] <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9768/full9768.pdf> [dostęp: 12 czerwca 2016].
- [12] Dijkstra J., *An agent architecture for visualizing simulated human behavior to support the assessment of design performance*, [in:] *2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control & Automation*, 2008, 808-813.
- [13] Ma J., Lo S.M., Song W.G., Wang W.L., Zhang J., Liao G.X., *Modeling pedestrian space in complex building for efficient pedestrian traffic simulation*, "Automation in Construction" 2013, 30, 25-36.
- [14] Schelhorn T., O'Sullivan D., Haklay M., Thurstain-Goodwin M., *STREETS: An Agent-based Pedestrian Model*, wykład na konferencji "Computers in Urban Planning and Urban Management", Venice 1999, [electr. doc.] <http://discovery.ucl.ac.uk/150308/1/paper9.pdf> [accessed: 12.06. 2016].
- [15] Hua K., Xing-Li L., Yan-Fang W., Tao S., Shi-Qiang D., *Effect of following strength on pedestrian counter flow*, "Chinese Physics B" 2010, 19(7), 070517.
- [16] Ma J., Song W., Zhang J., Lo S., Liao G., *K-Nearest-Neighbor interaction induced self-organized pedestrian counter flow*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2010, 389(10), 2101-2117.
- [17] Dai J., Li X., Liu L., *Simulation of pedestrian counter flow through bottlenecks by using an agent-based model*, "Physica A" 2013, 392(9), 2202-2211.
- [18] Guo R.Y., Wong S.C., Huang H.J., Zhang P., Lam, W.H.K., *A microscopic pedestrian-simulation model and its application to intersecting flows*, "Physica A" 2010, 389(3), 515-526.
- [19] Zacharias J., *The impact of layout and visual stimuli on the itineraries and perceptions of pedestrians in a public market*, "Environment and Planning B: Planning and Design" 1997, 24, 23-36.
- [20] Zacharias J., *Pedestrian behavior pedestrian behavior and perception in urban walking environments*, "Journal of Planning Literature" 2001, 16(1), 3-18.
- [21] Yuan W., Tan K.H., *A model for simulation of crowd behavior in the evacuation from a smoke-filled compartment*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2011, 390, 4210-4218.
- [22] Zhao D., Yang L., Li J., *Occupants' behavior of going with the crowd based on cellular automata occupant evacuation model*, "Physica A" 2008, 387, 3708-3718.
- [23] Mitchell M., *Computation in Cellular Automata: A selected review*, Nonstandard Computation, 1996, 95-140.
- [24] Sanchez S. M., Lucas T. W., *Exploring the world of agent-based simulations: Simple models, complex analyses*, [in:] *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, Yucesan E. (eds.), San Diego 2002, [electr. doc.] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a492247.pdf> [accessed: 12.06.2016].
- [25] Kirchner A., Schadschneider A., *Simulation of evacuation process using a bionics-inspired cellular automata model for pedestrian dynamics*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2002, 312(1-2), 260-276.
- [26] Henein C., White T., *Agent-Based modeling of forces in crowd*, [in:] *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, P. Davidsson, B. Logan, K. Takadama, Joint Workshop MABS, 2004, 173-184.
- [27] Kuligowski E.D., Peacock R.D., Hoskins B.L., *A review of building evacuation model*, Technical Note 1471, NIST 2005 [elect. doc.] <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire05/PDF/f05107.pdf> [accessed: 12.06.2016].
- [28] Pelechano N., Malkawi A., *Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches*, "Automation in construction" 2008, 17(4), 377-385.
- [29] Santos G., Aguirre B.E., *A critical review of emergency evacuation simulation model*, NIST, 2004 [elect. doc.] <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire05/PDF/f05012.pdf> [accessed: 12.06.2016].
- [30] Klupfel H., Meyer-Konig T., *Simulation of the evacuation of a football stadium using the CA model PedGo*, "Traffic and Granular Flow 2005, 3, 423-428.
- [31] *Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż to określono w przepisach techniczno-budowlanych, w przypadkach wskazanych w tych przepisach, oraz stosowania rozwiązań zamiennych, zapewniających nie pogorszenie warunków ochrony przeciwpożarowej, w przypadkach wskazanych w przepisach przeciwpożarowych, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej*, Warszawa 2008 [dok. elektr.] <http://www.straz.gov.pl/download/1795> [dostęp: 12.06.2016].
- [32] Kowalczyk I., Gardiasz P., *Raport z wykonania symulacji ewakuacji*, Przedsiębiorstwo Usług Pożarniczych Techno-Poż, Opole 2012, [dok. elektr.] <http://bip.krapkowice.pl/download/attachment/25403/zalacznik-nr-12-do-siwz.pdf> [dostęp: 12.06.2016].
- [33] Seweryn K., Maciurzyńska M., *Dokumentacja projektowa. Model ruchu ludzi w sytuacji napelniania stadionu*, [dok. elektr.] <http://docplayer.pl/10737908-Model-ruchu-ludzi-w-sytuacji-napelniania-stadionu.html> [dostęp: 12.06.2016].
- [34] Ferber J., *Multi-agent systems: In An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison-Wesley 1999.

- [35] Wolfram S., *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Press, Singapore 1986.
- [36] Weimar J.R., *Simulation with Cellular Automata*, Logos-Verlag, Berlin, 1998.
- [37] Chopard B., Droz M., *Cellular automata modeling of physical systems*, Cambridge University Press, 1998.
- [38] Sarmady S., Haron F., Talib A., *Simulating crowd movements using fine grid cellular automata*, *Proceedings of the 2010 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, IEEE Computer Society Washington, DC USA 2010, 428-433.
- [39] Roan T., *Developing an agent-based evacuation simulation model based on the study of human behaviour in fire investigation reports*, Diss. UCL (University College London), 2014, [elec. doc.] <http://discovery.ucl.ac.uk/1417798/> [accessed: 12.06.2016].
- [40] Guo R., Huang H.J., *A modified floor field cellular automata model for pedestrian evacuation simulation*, "Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical" 2008, 41(38), 385104.
- [41] Yamamoto K., Kokubo S., Nishinari K., *Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA)*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2007, 379(2), 654-660.
- [42] Kulakowski K., *Automaty komórkowe*, AGH, [dok. elektr.] <http://www.ftj.agh.edu.pl/~kulakowski/AC/skrypt.pdf> [dostęp: 12.06. 2016].
- [43] Nagel K., Schreckenberg M., *A cellular automaton model for freeway traffic*, "Journal de physique I" 1992, 2(12), 2221-2229.
- [44] Rickert M., Nagel K., Schreckenberg M., Latour A., *Two lane traffic simulations using cellular automata*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 1996, 231(4), 534-550.
- [45] Hu J., You L., Wei J., Gu M., Liang Y., *The effects of group and position vacancy on pedestrian evacuation flow model*, "Physics A" 2014, 378(28), 1913-1918.
- [46] Foks K., *Zastosowanie automatów komórkowych do symulacji ruchów mas śnieżnych*, Praca magisterska, Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, 2004.
- [47] Hu J., Sun H., Gao G., Wei J., You L., *The Group Evacuation Behavior Based on Fire Effect in the Complicated Three-Dimensional Space*, "Mathematical Problems in Engineering" 2014, 949280.
- [48] Varas A., Cornejo M.D., Mainemer D., Toledo B., Rogan J., Munoz V., Valdivia J.A., *Cellular automata model for evacuation process with obstacles*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2007, 382(2), 631-642.
- [49] Biłozor, A., Czyża S., Szuniewicz K., *Modelowanie procesu ewakuacji w przypadku zagrożeń terrorystycznych*, „Acta Scientiarum Polonorum. Administratio Locorum” 2013, 12(1), 21-30.
- [50] Hartmann D., *Adaptive pedestrian dynamics based on geodesics*, "New Journal of Physics" 2010, 12(4), 043032.
- [51] Chen M., Bärwolff G., Schwandt H., *Modeling Pedestrian Dynamics on Triangular Grids*, "Transportation Research Procedia 2" 2014, 327-335.
- [52] Fang Z., Li Q., Han L.D., Shaw S.L., *A space-time efficiency model for optimizing intra-intersection vehicle-pedestrian evacuation movements*, "Transportation Research Part C: Emerging Technologies" 2013, 31, 112-130.
- [53] Kari J., *Theory of cellular automata: A survey*, "Theoretical Computer Science" 2005, 334(1), 3-33.
- [54] Margolus N., *Physics-like models of computation*, "Physica D: Nonlinear Phenomena" 1984, 10(1), 81-95.
- [55] Nitzsche C., *Cellular automata modeling for pedestrian dynamics*, Greifswald, 2013 [elect. doc.] http://www.physik.uni-greifswald.de/fileadmin/physik/ag_schneider/bachelorneu.pdf [accessed: 12.06.2016].
- [56] Lämmel G., Flötteröd G., *A CA Model for Bidirectional Pedestrian Streams*, "Procedia Computer Science" 2015, 52, 950-955.
- [57] Wąs J., Lubaś R., *Adapting Social Distances Model for Mass Evacuation Simulation*, "Journal of Cellular Automata" 2013, 8, 395-405.
- [58] Blue V.J., Adler J.L., *Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways*, "Transportation Research Part B: Methodological" 2001, 35(3), 293-312.
- [59] Muramatsu M., Irie T., Nagatani T., *Jamming transition in pedestrian counter flow*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 1999, 267(3), 487-498.
- [60] Muramatsu M., Nagatani T., *Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2000, 275(1), 281-291.
- [61] Weifeng F., Lizhong Y., Weicheng F., *Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2003, 321(3), 633-640.
- [62] Nishinari K., Kirchner A., Namazi A., Schadschneider A., *Extended floor field CA model for evacuation dynamics*, "IEICE Transactions on information and systems" 2004, 87(3), 726-732.
- [63] Huang H., Guo R.Y., *Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits*, "Physical Review E" 2008, 78(2), 021131.
- [64] Ezaki T., Yanagisawa D., Ohtsuka K., Nishinari K., *Simulation of space acquisition process of pedestrians using proxemic floor field model*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2012, 391(1), 291-299.
- [65] Wąs J., Lubaś R., Myśliwiec W., *Proxemics in discrete simulation of evacuation*, Cellular Automata, Springer Berlin Heidelberg, 2012, 768-775.
- [66] Vizzari G., Manenti L., Crociani L., *Adaptive pedestrian behaviour for the preservation of group cohesion*, "Complex Adaptive Systems Modeling" 2013, 1(1), 1-29.
- [67] Porzycki J., Lubaś R., Mycek M., Wąs J., *Dynamic data-driven simulation of pedestrian movement with automatic validation*, [in:] *Traffic and Granular Flow'13*, Springer International Publishing, 2015, 129-136.
- [68] Gwizdała T., *Some properties of the floor field cellular automata evacuation model*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" 2015, 419, 718-728.
- [69] Zheng Y., Jia B., Li X.G., Zhu N., *Evacuation dynamics with fire spreading based on cellular automaton*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 390.18, 2011, pp. 3147-3156.
- [70] Cao S., Song W., Liu X., Mu N., *Simulation of pedestrian evacuation in a room under fire emergency*, *Procedia Engineering* 71, 2014, pp. 403-409.
- [71] Kretz T., Bonisch C., Vortisch P., *Comparison of various methods for the calculation of the distance potential field*, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2008, pp. 335-346.
- [72] Li J., Wang J., Dong Y., Jia H., Li Y., *Streamline simulation and analysis of pedestrian weaving flow in large passenger terminal*, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 645989.
- [73] Dijkstra E., *A note on two problems in connexion with graphs*, "Numerische Mathematik" 1959, 1, 269-271.
- [74] Kretz T., *Pedestrian traffic-simulation and experiments*, Diss. Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Physik» Theoretische Physik, 2007.
- [75] Kretz T., Schreckenberg M., *Moore and more and symmetry*, [in:] *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, M. Schreckenberg (eds.) 2005, 297-308.
- [76] Alizadeh R., *A dynamic cellular automaton model for evacuation process with obstacles*, "Safety Science" 2011, 49(2), 315-323.
- [77] Klupfel H., *A cellular automata model for crowd movement and egress simulation*, Diss. Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Physik, 2003.
- [78] Zafar B., *Analysis of the Mataf - Ramadan 1432 AH*, Technical report, Hajj Research Institute, Umm al-Qura University, Saudi Arabia 2011.
- [79] Kirchner A., Klupfel H., Nishinari K., Schadschneider A., Schreckenberg M., *Discretization effects and the influence of walking speed in cellular automata models for pedestrian dynamics*, "Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment" 2004, 2004(10), 10011.
- [80] Feliciani C., Nishinari K., *An improved Cellular Automata model to simulate the behavior of high density crowd and validation by experimental data*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications", 2016, 451, 135-148.

- [81] Forell B., Klupfel H., Schneider V., Schelter S., *Comparison of evacuation simulation model*, [in:] *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, U. Weidmann, U. Kirsch, M. Schreckenberg (eds.), Springer International Publishing, 2012, 189-196.
- [82] MSC.1/Circ.1238, *Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships*, Technical report, International Maritime Organization.
- [83] MSC.1/Circ.1033, *Interim guidelines for evacuation analyses for new and existing passenger ships*, Technical report, International Maritime Organization.
- [84] *Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen*, ver:2.2.1, Technical report. [dok. elektr.] www.rimea.de/fileadmin/files/dok/richtlinien/r2.2.1.pdf [accessed: 12.06.2016]
- [85] Rogsch C., Klingsch W., Seyfried A., Weigel H., *Prediction accuracy of evacuation times for high-rise buildings and simple geometries by using different software-tools, Traffic and Granular Flow'07*, C. Appert-Rolland, F. Chevoir, P. Gondret, S. Lassarre, J. Lebacque, M. Schreckenberg (eds.), Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg 2009, 395-400.
- [86] Ronchi E., Kuligowski E.D., Reneke P.A., Peacock R.D., Nilsson D., *The process of verification and validation of building fire evacuation models*, NIST Technical Note 1822, 2013.
- [87] ISO/TR-16738, *Fire Safety Engineering - Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people*, Technical report.
- [88] ISO/TR-13387, *Fire safety engineering - Part 8 Life safety - Occupant behaviour, location and condition*, Technical report.
- [89] Schadschneider A., Seyfried A., *Validation of CA models of pedestrian dynamics with fundamental diagrams*, "Cybernetics and Systems: An International Journal" 2009, 40(5), 367-389.
- [90] Lubaś R., Mycek M., Porzycki J., Wąs J., *Validation and verification of eacuation models - methodology expansion proposition*, "Transportation Research Procedia" 2014, 2, 715-723.
- [91] Lubaś R., Porzycki J., Wąs J., Mycek M., *Validation and verification of CA-based pedestrian dynamics models*, "Journal of cellular automata" 2016, 11(4), 285-298.
- [92] Dridi M.H., *Pedestrian flow simulation validation and verification techniques*, arXiv:1410.0603, 2014.
- [93] Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., *Wprowadzenie do algorytmów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [94] Barański M., Maciak T., *Człowiek jako jednostka, element tłumu. Przykład zastosowania automatów komórkowych w modelowaniu ewakuacji*, Konferencja Bezpieczeństwo przyszłości, SGSP, 2016.
- [95] Sarmady S., Haron F., Talib A.Z., *Evaluation of existing software for simulating of crowd at Masjid Al-Haram*, "Jurnal Pengurusan Jabatan Wakaf Zakat & Haji" 2007, 1(1), 83-95.

* * *

kpt. mgr inż. Mariusz Barański – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej oraz Politechniki Wrocławskiej. Dowódca zmiany i administrator systemów teleinformatycznych w Komendzie Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Oławie. Programista aplikacji i autor publikacji z zakresu modelowania ewakuacji.

dr hab. inż. Tadeusz Maciak – profesor Politechniki Białostockiej, zatrudniony w Katedrze Mediów Cyfrowych i Grafiki Komputerowej Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej, profesor Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, kierownik Zakładu Informatyki i Łączności w SGSP. Autor wielu publikacji związanych z problematyką szeroko pojętej obronności wewnętrznej kraju.