

**AGH**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ

Rozprawa doktorska

*Metody modelowania dynamiki tłumy bazujące na niehomogenicznych automatach komórkowych.*

Autor: *mgr inż. Robert Lubaś*  
Dziedzina: *Nauki techniczne*  
Dyscyplina: *Informatyka*  
Promotor: *Dr hab. inż. Jarosław Wąs, Prof. nadzw. AGH*

Kraków, 2018

*Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.*

*Serdecznie dziękuję moim rodzicom za ich cierpliwość i wsparcie.*

*Dziękuję promotorowi PROF. JAROSŁAWOWI WĄSOWI za nieustającą motywację i pomoc w dążeniu do celu.*

*Dziękuję zespołowi, MARCINOWI MYCKOWI i JAKUBOWI PORZYCKIEMU za wspólną pracę, dyskusje i atmosferę w pracy.*

*Na koniec chciałbym podziękować i dedykować tę pracę mojej pięknej żonie ANZHELICE i synowi LEONOWI, którzy mnie inspirowali i wspierali podczas mojej działalności badawczej.*



## Spis treści

<b>1. Wstęp</b> .....	7
1.1. Przesłanki podjęcia tematu .....	7
1.2. Cele pracy .....	9
1.3. Zawartość pracy.....	10
<b>2. Podstawy teoretyczne Automatów Komórkowych i dyskretnych metod modelowania tłumu</b>	<b>11</b>
2.1. Klasyczny automat komórkowy .....	11
2.1.1. Homogeniczne i niehomogeniczne automaty komórkowe .....	12
2.1.2. Automaty komórkowe synchroniczne i asynchroniczne.....	13
2.1.3. Podział ze względu na rodzaj siatki .....	13
2.1.4. Podział ze względu na definicje sąsiedztwa.....	14
2.2. Symulacje tłumu ludzi .....	15
2.2.1. Klasyfikacja modeli dynamiki tłumu .....	15
2.2.2. Przykłady modeli symulujących tłum ludzi.....	17
<b>3. Propozycja rozbudowy metodologii modelowania dynamiki tłumu</b> .....	<b>21</b>
3.1. Model Social Distances - modelu podstawowy .....	21
3.2. Propozycja rozszerzenia .....	23
3.2.1. Reprezentacja pieszego .....	23
3.2.2. Proces podejmowania decyzji i algorytm ruchu .....	25
3.2.3. Modelowanie zachowań strategicznych .....	25
3.2.4. Poziom taktyczny i operacyjny .....	27
<b>4. Propozycje metodologii procedur weryfikacji i walidacji modeli CA</b> .....	<b>33</b>
4.1. Weryfikacja modeli opartych na automatach komórkowych.....	33
4.1.1. Efekty dyskretyzacji przestrzeni .....	34
4.1.2. Penetracja ścian.....	34
4.1.3. Weryfikacja geometrii wejściowej .....	35
4.1.4. Utrzymanie pożądanej prędkości .....	35
4.1.5. Niepełnosprawni piesi.....	36

4.1.6.	Efekty zbiorowe .....	38
4.1.7.	Testy weryfikacyjne opisane w literaturze wraz z propozycjami modyfikacji .....	39
4.2.	Rozszerzenie zestawu testów weryfikacyjnych i propozycja nowych testów .....	42
4.2.1.	Relacja gęstości do prędkości .....	43
4.2.2.	Spójność grup.....	43
4.2.3.	Błędy dyskretyzacji.....	44
4.3.	Diagram Fundamentalny w walidacji ilościowej modeli opartych na automatach komórkowych.....	45
4.3.1.	Walidacja ilościowa z danymi empirycznymi.....	46
<b>5.</b>	<b>Praktyczna implementacja metodologii dynamiki tłumu .....</b>	<b>51</b>
5.1.	Symulator ruchu pieszych .....	51
5.1.1.	Architektura aplikacji.....	51
5.1.2.	Warstwa logiki i danych.....	51
5.1.3.	Warstwa kontrolera .....	52
5.1.4.	Warstwa prezentacji .....	55
5.1.5.	Test wydajnościowy symulatora .....	56
<b>6.</b>	<b>Praktyczne zastosowania metodologii dynamiki tłumu .....</b>	<b>59</b>
6.1.	Analiza danych z symulacji komputerowych .....	59
6.1.1.	Przetwarzanie końcowe.....	59
6.1.2.	Fenomeny samoorganizacji w tłumie.....	60
6.1.3.	Wybór wyjścia ewakuacyjnego .....	62
6.1.4.	Wzorce zachowań agentów w różnych klasach sytuacji.....	63
6.2.	Zastosowania modelu do rzeczywistych przypadków.....	66
6.2.1.	Sala ćwiczeniowa.....	67
6.2.2.	Sala wykładowa B1 H24 AGH .....	69
6.2.3.	Wschodnia trybuna stadionu Wisły Kraków.....	73
6.2.4.	Stadion Wisły Kraków .....	74
6.2.5.	Stadion Allianz Arena.....	74
<b>7.</b>	<b>Podsumowanie.....</b>	<b>79</b>

# 1. Wstęp

## 1.1. Przesłanki podjęcia tematu

Niemal każdy z nas przebywał niejednokrotnie w bardzo gęstym tłumie - być może było to oczekiwanie przed wejściem na koncert lub wydarzenie sportowe czy być może udział w jakiejś procesji czy manifestacji. Często w takich sytuacjach czujemy się niepewnie, nasz wpływ na możliwość swobodnego przemieszczania się jest ograniczony, czasami wręcz nie mamy żadnej kontroli nad naszym ruchem, jesteśmy wówczas niejako „niesieni” w tłumie. W takich sytuacjach szczególnie doceniamy jak wielką wartością jest bezpieczeństwo i zapewnienie dobrej organizacji w miejscach zgromadzeń.

Dynamika tłumu ludzi to bardzo interesujące i zarazem skomplikowane zagadnienie naukowe. Z punktu widzenia przepływu osób możemy mieć do czynienia z uporządkowaną organizacją struktury ruchu, kiedy obserwujemy stan równowagi i laminarnego przepływu strug ludzi, aż do gwałtownych, turbulentnych przepływów ludzi, które mogą w skrajnych przypadkach prowadzić do katastroficznych w skutkach wypadków. W ciągu ostatnich kilku lat środowisko naukowe, ale również inżynierskie znacznie poszerzyło wiedzę i zrozumienie natury dynamiki ludzkiego tłumu. Współczesne badania naukowe na temat dynamiki tłumu są prowadzone już od ponad 50 lat i mają bezpośredni wpływ na poprawę bezpieczeństwa w nowo powstających budynkach użyteczności publicznej. Już w latach pięćdziesiątych dwudziestego wieku przeprowadzono pierwsze, szeroko nakreślone badania nad optymalizacją przepływu pieszych w obiektach użyteczności publicznej [1]. Od samego początku badania skupiały na poprawie ruchu pieszego i miały duży wymiar użyteczny odwołując się często do konkretnych sytuacji jak przepływ osób w obiektach sieci metra [2] czy strumieni osób w warunkach miejskich [3].

Należy podkreślić, że w sytuacjach realnego lub silnie subiektywnie postrzeganego zagrożenia życia, ludzie często wpadają w panikę. Sytuacje paniki mają tragiczne skutki szczególnie w miejscach, gdzie nie położono należytego nacisku na kwestie bezpieczeństwa i optymalizację przepływu ludzi. W przedstawionej poniżej tabeli 1.1 zostało wymienione kilkanaście największych katastrof z udziałem wielkich tłumów w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat.

Rok	Lokalizacja	Miejsce wypadku	Ofiary	Powód
1971	Ibrox, UK	Stadion	66	Uszkodzenie barierek
1974	Kair, Egipt	Stadion	49	Uszkodzenie barierek

1982	Moskwa, USSR	Stadion	340	Ponowne wejście fanów po голу w ostatniej minucie
1990	Nowy Jork	Bronx	87	Nielegalny klub towarzyski
1998	Mena, Arabia Saudyjska		118	Przeludnienie
1990	Mena, Arabia Saudyjska	Tunel dla pieszych	1426	Przeludnienie
1994	Mena, Arabia Saudyjska	Most Jamarat	266	Przeludnienie
1999	Mińsk, Białoruś	Metro	53	Mocny deszcz podczas koncertu
2000	São Januário, Brazylia	Stadion	> 200	Przeludnienie, zamieszki i uszkodzenie trybuny
2001	Mena, Arabia Saudyjska	Most Jamarat	35	Obrzęd ukamienowania
2004	Mena, Arabia Saudyjska	Most Jamarat	251	Przeludnienie, ofiary zostały zdeptane na śmierć
2005	Bagdad, Irak	Procesja religijna	> 640	Plotki dotyczące zamachowca-samobójcy
2006	Mena, Arabia Saudyjska	Most Jamarat	363	Utrata kontroli spowodowana przeludnieniem
2008	Jodhpur, Indie	Świątynia Hinduistyczna	147	Wybuch paniki na skutek uszkodzenia budynku
2009	Kuwejt	Ceremonia zaślubin	41	Wybuch paniki spowodowany pożarem
2010	Duisburg, Niemcy	Tunel	21	Przeludnienie, wybuch paniki
2010	Kambodża	Festiwal, Most	375	Przeludnienie na moście i wybuch paniki
2013	Porto Algre, Brazylia	Klub nocny	> 200	Pożar, wybuch paniki i przeludnienie
2015	Andhra Pradesh, Indie	Święta Rzeka	27	Przeludnienie podczas rytualnych kąpielii
2016	Lucknow, Indie	Most na rzece	> 24	Przeludnienie na moście
2017	Amiens, Francja	Stadion	> 25 rannych	Uszkodzenie barierki



2018	Antananarivo, Madagaskar	Stadion	1, 40 rannych	Zakleszczenie kibiców przy bramach wyjściowych
2018	Lunda, Angolia	Stadion	5	Wybuch paniki po otwarciu bram
2018	Corinaldo, Włochy	Klub nocny	5	Wybuch paniki w przeludnionym tłumie

**Tabela 1.1.** Wybrane katastrofy z udziałem tłumu z [4] oraz [5].

Już ze wstępnej analizy tragicznych wydarzeń z udziałem tłumu (Tabela 1.1) można wywnioskować, że dynamika tłumu dotyczy wielu aspektów ludzkiej natury. Należy podkreślić, że dynamika tłumu jest powiązana ze zjawiskami fizycznymi związanymi z przepływem cząstek, gdzie obserwuje się różne zjawiska kolektywne (jak tworzenie strug czy samoorganizacja) - czyli tworzenie modeli przepływu osób w różnych warunkach należy do kategorii badań interdyscyplinarnych z pogranicza fizyki, matematyki, nauk przyrodniczych oraz nauk technicznych.

## 1.2. Cele pracy

W ciągu ostatnich lat są prowadzone przez różne zespoły badawcze badania naukowe, które dotyczą poszukiwania skutecznych, wiarygodnych i wydajnych metod symulacji tłumu w różnych sytuacjach.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie szeregu metod i szczegółowych rozwiązań algorytmicznych dotyczących dyskretnych symulacji tłumu bazujących na niehomogenicznych automatach komórkowych. Metody te zdobywają w ostatnim czasie coraz większe uznanie, gdyż z jednej strony zapewniają wiarygodne wyniki, a z drugiej strony ich wydajność jest zdecydowanie lepsza niż metod opartych na dynamice molekularnej np. Social Force. Należy podkreślić, że modele dyskretne oparte na automatach komórkowych charakteryzują się dużą elastycznością i skalowalnością. Elastyczność jest przydatna w momencie rozszerzania modelu o nowe hipotezy czy eksplorowanie różnych możliwości odwzorowania fenomenu ludzkiego ruchu. Natomiast skalowalność okazuje się być dużą zaletą w momencie prób badawczych z implementacjami modelu dla symulacji z udziałem dużej liczby pieszych.

Celem pracy jest również zaproponowanie szeregu szczegółowych rozwiązań dotyczących walidacji i weryfikacji symulacji dynamiki tłumu. Niezwykle ważnym aspektem modelowania zjawisk jest upewnienie się, że model wiernie odwzorowuje rzeczywistość i uwzględnia warunki brzegowe. Tylko modele z pozytywnym wynikiem w zakresie walidacji i weryfikacji mogą być wykorzystane w zastosowaniach inżynierskich z zakresu projektowania wspomaganego komputerowo. Opracowanie sposobu testowania i zestawu testów daje zdecydowanie większą pewność co do opracowanego i zaimplementowanego modelu dynamiki tłumu.

### 1.3. Zawartość pracy

Niniejsza praca składa się z ośmiu rozdziałów. Bieżący rozdział stanowi wprowadzenie do pracy doktorskiej.

W drugim rozdziale pracy znajdują się podstawowe informacje, które są wprowadzeniem do dalszych części pracy. Została przedstawiona definicja automatu komórkowego (ang. cellular automaton), jako aparatu matematycznego będącego podstawą modeli dynamiki tłumu. Omówiono podział automatów komórkowych według różnych kryteriów m.in. na homogeniczne i niehomogeniczne. W kolejnych sekcjach znajdują się informacje na temat symulacji tłumu ludzi, klasyfikacji i rodzajów modeli dynamiki tłumu.

W trzecim rozdziale autor prezentuje propozycje rozbudowy metodologii modelowania dynamiki tłumu. Jest to rozdział opisujący wartość dodaną jaką autor wnosi do obszaru nauki o zachowaniach grup pieszych, sposobie ich modelowania i symulowania. Na początku rozdziału znajduje się prezentacja modelu Social Distances, który został poddany rozszerzeniu przez autora. Po przedstawieniu modelowej reprezentacji pieszego, opisywany jest proces podejmowania decyzji przez pieszego uwzględniający poziom strategiczny, taktyczny i operacyjny. Zostają zaproponowane definicje pól widzenia, przynależności do grup. Szczegółowy opis rozszerzenia algorytmu ruchu zawiera definicję funkcji kosztu i usprawnienie w sposobie rozwiązywania konfliktów.

W czwartym rozdziale autor przedstawia propozycje szczegółowych metod weryfikacji i walidacji modeli dynamiki tłumu bazujących na automatach komórkowych. Zwraca szczególną uwagę na potrzebę testowania modeli dynamiki tłumu pod kątem jakościowym i ilościowym. Przedstawia nowy zestaw testów, które zostały zaprojektowane w celu przebadania newralgicznych z punktów widzenia typu modelu aspektów modelowania. Prezentuje analizę literatury traktującej o walidacji i weryfikacji modeli dynamiki tłumu.

W piątym rozdziale znajduje się opis implementacji przestawianej w poprzednich rozdziałach metodologii dynamiki tłumu. Jest to symulator ruchu ludzi, zdolny symulować w czasie rzeczywistym na przykład ewakuacje ze stadionów piłkarskich. Autor sugeruje architekturę i sposób realizacji oprogramowania do symulowania masowej ewakuacji, łącząc podejście inżynierskie i naukowe. Opisuje możliwości stworzonego przez siebie oprogramowania.

Szósty rozdział zawiera praktyczne zastosowanie metodologii dynamiki tłumu. Na rozmaitych przykładach prezentowane są wyniki symulacji ruchu ludzi w zależności od przyjętego scenariusza. Oprócz wyników czysto symulacyjnych można znaleźć również zestawienia symulacji z wynikami empirycznymi potwierdzającymi przeprowadzony poprawnie proces walidacji i weryfikacji opracowanego modelu.

Ostatni rozdział stanowi podsumowanie pracy, z uwzględnieniem propozycji przyszłych badań.

## 2. Podstawy teoretyczne Automatów Komórkowych i dyskretnych metod modelowania tłumy

### 2.1. Klasyczny automat komórkowy

Automaty komórkowe (ang. Cellular Automata, CA) są postrzegane jako jedne z podstawowych modeli wykorzystujących naturalny schemat obliczeniowy (ang. natural computing). Posiadają one wiele właściwości fizycznych zaczerpniętych ze świata rzeczywistego to znaczy: składają się z wielkiej liczby prostych obiektów, działają równolegle, ewoluują na skutek lokalnych oddziaływań oraz są jednorodne w odniesieniu do czasu i przestrzeni. Automaty komórkowe tradycyjnie były używane w symulacjach systemów fizycznych. Dobrym przykładem są symulacje *gas lattice*. Najprostszym przykładem jest model HPP - jest to dwuwymiarowy automat komórkowy, w którym każda komórka może pomieścić maksymalnie do czterech poruszających się cząstek. Każda cząstka ma zdefiniowany kierunek ruchu: w górę, w dół, w lewo lub w prawo.

Automat komórkowy składa się z regularnych siatek komórek, z których każda ma skończoną liczbę stanów. Siatki mogą być wielowymiarowe, ale liczba wymiarów jest skończona. Dla każdej komórki zdefiniowany jest zbiór komórek, które definiują jej sąsiedztwo. Stan początkowy w chwili  $t = 0$  jest określony poprzez przypisanie stanu do każdej komórki na siatce. Komórki zmieniają swój stan synchronicznie, w dyskretnych krokach czasowych. W chwili  $t = 1$  wszystkie komórki aktualizują swój stan w zależności od stanu swojego sąsiedztwa oraz od zdefiniowanych reguł przejścia. Wszystkie komórki używają tych samych reguł przejścia w tym samym czasie. Klasyczne automaty komórkowe to tzw. *automaty homogeniczne* (jednorodne).

**Definicja 2.1.1.** Automat komórkowy jest definiowany jako czwórka parametrów.

$$CA = (L, S, N, F)$$

gdzie:

$L$  – siatka zawierająca zbiór regularnych komórek,

$S$  – skończony zbiór stanów komórki,

$N$  – zbiór sąsiadów,

$f$  – funkcja przejścia.

Konfiguracja  $C_t : L \rightarrow S$  jest funkcją przejścia, przypisująca każdej komórce na siatce jeden ze stanów zbioru  $S$ . Funkcja przejścia  $f$  zmienia konfigurację  $C_t$  w następną  $C_{t+1}$ . Zmianę konfiguracji przedstawia równanie (2.1).

$$C_{t+1}(r) = f(\{C_t(i) | i \in N(r)\}) \quad (2.1)$$

gdzie:

$N(r)$  – zbiór sąsiadów komórki  $r$ ,  $N(r) = \{i \in L | r - i \in N\}$ ,

$r$  – numer komórki,

$t$  – dyskretny krok czasowy  $t + 1$ ,

$i$  – pojedyncza komórka.

### 2.1.1. Homogeniczne i niehomogeniczne automaty komórkowe

W literaturze można spotkać pewną niespójność nazewnictwa i definicji w klasyfikacji automatów komórkowych na podstawie reguł. Niespójność występuje w kontekście określenia automatu o niejednakowej strukturze. Automat komórkowy o jednakowej strukturze nazywamy *homogenicznym*, natomiast niejako przeciwieństwem jest automat niehomogeniczny (ang. inhomogeneous lub non-homogeneous) lub niejednorodny (ang. non-uniform).

Hartman w pracy [6] definiuje automat komórkowy homogeniczny jako dyskretny system składający się z siatki regularnych komórek oraz z jednakową dla każdej komórki, lokalną regułą przejścia. Autor artykułu uznaje automat za niehomogeniczny wtedy, gdy funkcja przejścia nie jest jednakowa dla wszystkich komórek. Podobnie w pracach [7] [8] autorzy z tego samego powodu, lecz posługując się nieco innym aparatem pojęciowym nazywają automat niejednorodnym (niehomogenicznym).

W pracy [9] odnajdujemy kilka sposobów na zaburzenie homogeniczności automatu komórkowego. Niejednorodna siatka, sąsiedztwo, więcej niż jedna lokalna reguła przejścia, implikują określenie automatu jako niehomogenicznego. Dodatkowo zostaje wprowadzony podział na niehomogeniczność *czasową* i *przestrzenną*.

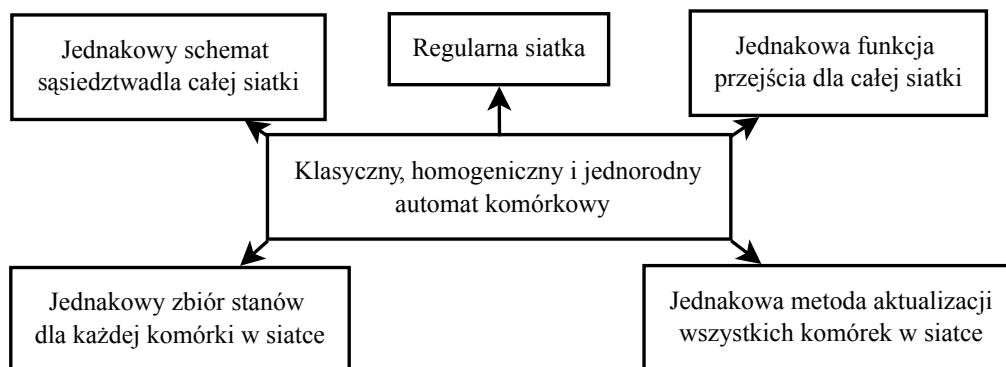
Z kolei w pracy [10] dzięki niejednorodności granic siatki automatu autor mógł odwzorować specyficzne fenomeny w symulacjach bioremediacji skażonej ziemi. Wskazywał na niehomogeniczność automatu ze względu na nie identyczne reguły przejścia oraz zaburzenia w reprezentacji przestrzeni.

Camara w artykule [11] uznaje niejednorodność automatu komórkowego w momencie, gdy nie wszystkie komórki używają tych samych reguł przejścia oraz, gdy te reguły mogą ewoluować w czasie. Jednocześnie podkreśla, że niejednorodne automaty wykazują podobne właściwości do regularnych automatów - obliczenia mogą być w łatwy sposób zrównoleglone oraz nadal są to systemy dyskretne.

Prof. Fernando J. von Zuben w swoich wykładach definiuje niejednorodne (ang. non-uniform) automaty komórkowe jako modele czasoprzestrzenne systemów dynamicznych z dyskretnym czasem i przestrzenią. Zbiór reguł przejścia jest odrębny dla komórek, a liczba stanów komórki jest skończona.

Siatka składa się z komórek o jednakowym kształcie i rozmiarze, przejście z jednego stanu komórki na inny odbywa się synchronicznie. Następny stan komórki jest określany przez lokalną ustaloną regułę przejścia skojarzoną z aktualny stanem komórki oraz komórek sąsiadujących. Sąsiedztwo komórki również może być określone indywidualnie, natomiast von Zuben ustala inne sąsiedztwo tylko dla komórek znajdujących się przy brzegach siatki.

Biorąc pod uwagę powyższą analizę literatury można określić, że klasyczny, homogeniczny i jednorodny automat komórkowy posiada następujące cechy:



Niehomogeniczny, niejednorodny automat komórkowy występuje w przypadku niespełnienia którejkolwiek z podanych wyżej cech. Warto zwrócić uwagę na fakt występowania niehomogeniczności również w kontekście zajmowanej przestrzeni. Pojedynczy obiekt na siatce może zajmować więcej niż jedną komórkę. Ma to swoje uzasadnienie w sytuacji, gdy reprezentowany na siatce rzeczywisty obiekt ma nieregularny kształt.

### 2.1.2. Automaty komórkowe synchroniczne i asynchroniczne

Automat komórkowy używa dyskretnego czasu i aktualizuje stan komórek synchronicznie. Stan każdej komórki w modelu aktualizowany jest w tym samym czasie - to znaczy, że nowy stan komórki nie wpływa na inne komórki w danym kroku czasowym - mamy do czynienia z *synchronicznym automatem komórkowym*. Przeciwnieństwem jest *asynchroniczny automat komórkowy*, który aktualizuje stan poszczególnych komórek niezależnie w taki sposób, że nowy stan komórki wpływa na obliczenia nowych stanów sąsiadujących komórek. Asynchroniczna metoda aktualizacji ma dwie odmiany:

- Automaty komórkowe asynchroniczne aktualizowane krokowo (*ang. step driven*) – kolejność aktualizacji jest narzucona przez algorytm.
- Automaty komórkowe asynchroniczne aktualizowane czasowo (*ang. time driven*) – aktualizacja stanów komórek występuje w określonym czasie.

### 2.1.3. Podział ze względu na rodzaj siatki

Typy siatek przedstawione są w tabeli 2.1.

Liczba wymiarów przestrzeni	Siatka
Przestrzeń jednowymiarowa	Siatka składająca się z odcinków
Przestrzeń dwuwymiarowa	Siatka kwadratowa, prostokątna, trójkątna, heksagonalna, Woronoja
Przestrzeń trójwymiarowa	Siatka składająca się z czworokątów, sześciokątów

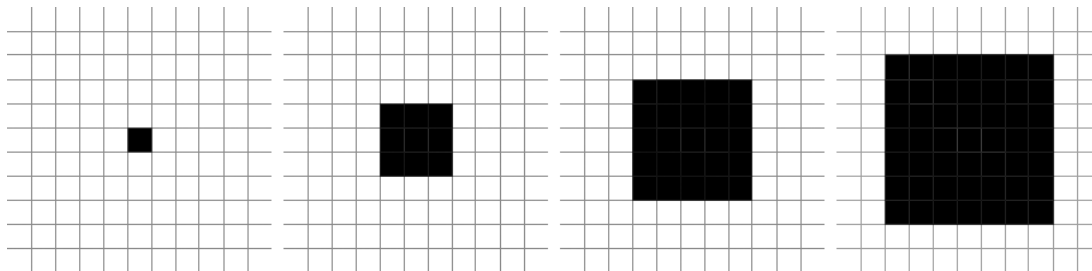
Tabela 2.1. Typy siatek w automacie komórkowym

### 2.1.4. Podział ze względu na definicje sąsiedztwa

Sąsiedztwo danej komórki  $c$  określa liczbę komórek, których stany mają wpływ na stan komórki  $c$ . Najczęściej stosowane jest sąsiedztwo Moore'a oraz von Neumanna.

Sąsiedztwo Moore'a  $M_{(x,y)}$  o promieniu  $r$  dla komórki o współrzędnych  $(x, y)$  to zbiór komórek  $(x', y')$  spełniających zależność (definicja za [12]):

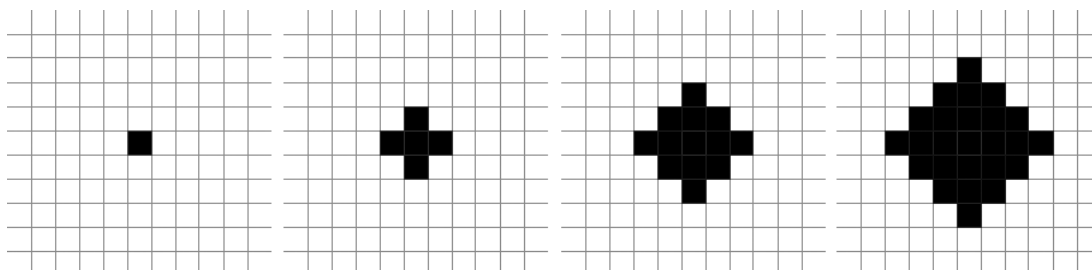
$$M_{(x,y)} = \{(x', y') : |x' - x| \leq r \wedge |y' - y| \leq r\} \quad (2.2)$$



Rys. 2.1. Sąsiedztwo Moore'a dla promieni 0, 1, 2, 3.

Natomiast sąsiedztwo von Neumanna  $N_{(x,y)}$  o promieniu  $r$  dla komórki o współrzędnych  $(x, y)$  to zbiór komórek  $(x', y')$  spełniających zależność (definicja za [13]):

$$N_{(x,y)} = \{(x', y') : |x' - x| + |y' - y| \leq r\} \quad (2.3)$$



Rys. 2.2. Sąsiedztwo von Neumanna dla promieni 0, 1, 2, 3.

## 2.2. Symulacje tłumy ludzi

Symulacje tłumów ludzkich (ang. crowd simulation) to proces symulowania ruchu lub dynamiki wielkiej liczby ludzi [14]. Symulacje są szeroko używane w przemyśle filmowym oraz w grach komputerowych do urzeczywistniania wirtualnych scen. Kolejnym zastosowaniem jest wykorzystanie symulacji do planowania zagospodarowania terenu [15], optymalizacji planów architektonicznych, inżynierii bezpieczeństwa czy w końcu do symulacji ewakuacji ludzi [16]. Symulacje tłumy można podzielić więc na dwie klasy: jedna to symulacje wykorzystywane do tworzenia rozrywki, a druga klasa symulacji dedykowana do zastosowań inżynierskich. Pierwsza klasa symulacji powstaje z myślą o bardzo efektownej wizualizacji zachowań tłumy, co nie zawsze idzie w parze z wiernym odwzorowaniem rzeczywistości. Druga klasa symulacji skupia się na jak najwierniejszym odwzorowaniu zachowań ludzkich w modelu komputerowym pod kątem jakościowym oraz ilościowym.

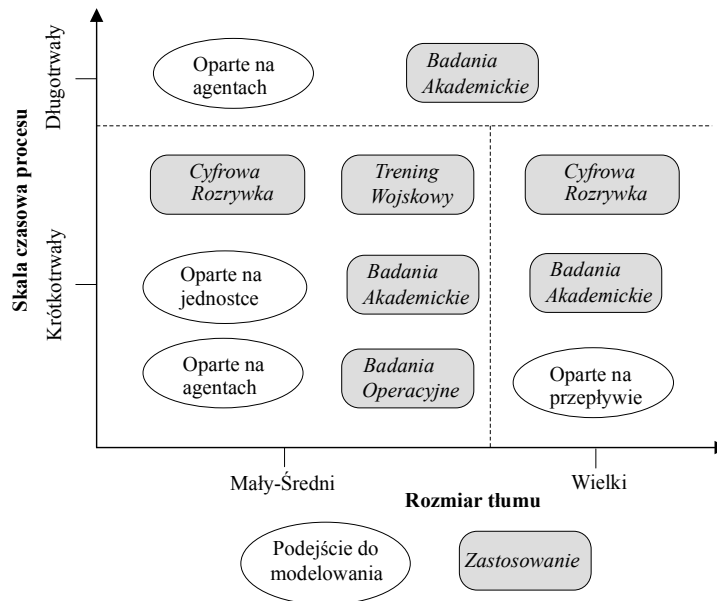
W dalszej części rozdziału autor skupi się na bardziej szczegółowej analizie drugiej klasy symulacji, kładąc szczególny nacisk na symulacje ewakuacji ludzi.

### 2.2.1. Klasyfikacja modeli dynamiki tłumy

Modelowanie zachowań ludzkich stało się bardzo ważnym narzędziem wykorzystywanym w zrozumieniu skomplikowanej natury zachowań ludzi w tłumie. Wachlarz zastosowań jest imponujący: od symulacji wojskowych poprzez inżynierie bezpieczeństwa, a kończąc na projektowaniu architektonicznym.

W [17] przedstawia klasyfikację modeli tłumy bazującą głównie na skali czasowej oraz wielkości tłumy. Tłum złożony od kilku do tysiąca ludzi zaliczany jest do małej lub średniej grupy, natomiast tłum wielki to określenie dla tłumów rzędu od kilku tysięcy osób. Skala czasowa może wahać się o kilka rzędów wielkości. Krótka skala czasowa odnosi się do ruchu zmieniającego się już w sekundach lub minutach. Długa skala czasowa przyjmowana jest w przypadku zjawisk zachodzący w tłumie na przestrzeni lat. Klasyfikacja zaprezentowana jest na Rys. 2.3.

Najczęściej wykorzystuje się dwa podejścia w modelowaniu ruchu pieszych. Podejście *makroskopowe* opiera się na rozwiązaniu równaniach przepływu. W podejściu *mikroskopowym* stosowanym w większości modeli, piesi są reprezentowani jako autonomiczne jednostki, skaczące cząsteczki w modelach dyskretnych lub cząsteczki z własnym pędem w modelach z ciągłą przestrzenią i czasem. Rozważając reprezentację przestrzeni w modelach mikroskopowych, istnieją dwa podejścia: *dyskretne* oraz *ciągłe*. Wybór jednego z nich jest ściśle związany z implementacją. Mocnym argumentem przemawiającym za dyskretną reprezentacją jest stosunkowa prostota i skalowalność takiego modelu. Użycie dyskretnego czasu w modelu, zazwyczaj prowadzi do dyskretnej reprezentacji przestrzeni, a to z kolei narzuca wykorzystanie regularnej siatki. Szczególnym rodzajem dyskretnych modeli są modele oparte o teorię automatów komórkowych (ang. *Cellular Automata models*).



Rys. 2.3. Klasyfikacja modeli dynamiki tłumy na podstawie [17].

### 2.2.1.1. Modele dynamiki płynów

Modele tłumy oparte na dynamice płynów zakładają, że dynamika pojedynczych jednostek nie wpływa znacząco na ruch w przypadku, gdy mamy do czynienia z wielką i bardzo gęstą populacją. Powstała klasa modeli bazujących na rozwiązywaniu równań Naviera-Stokesa. Takie modele zaniedbują modelowanie zachowań jednostek w tłumie. Podstawowym problemem z tego typu modelami jest ich ograniczona użyteczność oraz stosunkowa trudność w rozwiązywaniu nieliniowych równań zachowując odpowiednie proporcje pomiędzy dokładnością obliczeń a złożonością czasową.

### 2.2.1.2. Modele cząsteczkowe

W tej klasie modeli tłum jest traktowany jako zbiór indywidualnych jednostek. Piesi są reprezentowani jako cząsteczki o prawie identycznej strukturze. Ich dynamika jest głównie determinowana przez siłę, która jest wypadkową różnych fizycznych, społecznych i psychologicznych oddziaływań. Innym schematem obliczeniowym są tu algorytmy oparte na zasadach (ang. rules-based) stosowanych w zależności od lokalnego rozkładu pieszych. Pierwszy, to tak zwanych model oddziaływań społecznych (ang. social force model) [18], a drugi to dość szeroko stosowane podejście - modele oparte na automatach komórkowych [19].

### 2.2.1.3. Modele agentowe

Pozostając przy modelach w których piesi są traktowani jako indywidualne jednostki ciekawą klasą modeli są tzw. modele agentowe. Reprezentacja pieszych w takich modelach jest bardziej skomplikowana niż wcześniej wspomniana cząsteczka. Należy zaznaczyć, że nie ma jednoznacznie zdefiniowanej granicy pomiędzy modelami opartymi na cząsteczkach, a modelami agentowymi. Modele agentowe zawierają próbę reprezentowania procesów wewnętrznych, zarówno fizycznych, jak i psychologicznych,



które nie są zawarte w modelach cząsteczkowych. W ogólności to oznacza, że wewnętrzny stan agenta zmienia się w czasie w zależności od zachodzących reakcji z otoczeniem oraz innymi agentami. Modele agentowe mogą być utożsamiane jako rozszerzenie podejścia wykorzystanego w modelu sił społecznych (social force model) [20], lub bazujące na wielopłaszczyznowej obserwacji zachowań ludzkich [21] czy też połączeniem tych dwóch [22].

W swojej pracy [17] zauważa kilka kryteriów, które prowadzą do różnicowania w modelach tłumu:

- elastyczność - cecha modeli, która umożliwia reprezentację zróżnicowanych scenariuszy i sytuacji,
- rozszerzalność - modułowość, łatwość dodawania lub modyfikowania funkcji modelu,
- wydajność - moc obliczeniowa potrzebna do wykonania symulacji tłumu dla danego scenariusza,
- skalowalność - określenie jak bardzo wzrasta czas wykonania i zużycie pamięci w zależności od rozmiaru tłumu,
- dokładność - miara jak dobrze dany model odwzorowuje dane eksperymentalne,
- stabilność - czułość wyników symulacji w zależności od niepewności co do parametrów modelu.

Oczywiście wyżej wymienione kryteria muszą znaleźć się w każdym modelu dynamiki tłumu w jakimś punkcie równowagi. Faworyzowanie w stronę jednego kryterium będzie wpływać na inne, co doprowadzi do ukształtowania się modelu tłumu dedykowanego tylko do specyficznych zastosowań. Umiejętność odpowiedniego sterowania wyżej wymienionymi kryteriami to bardzo trudne wyzwanie w dziedzinie modelowania dynamiki tłumu.

Wyżej wymienione klasy modeli stanowią podstawę dla wyrafinowanych symulacji wieloagentowych. Warto wspomnieć, że w fizyce *model wieloagentowy* jest zwykle traktowany jako synonim *modelu mikroskopowego*. Zazwyczaj zwraca się szczególną uwagę na to aby model był: a) możliwie realistyczny, oraz b) łatwy do rozszerzenia na realne zastosowania. Punkt b) jest generalnie realizowany za pomocą podejścia wieloagentowego, które zapewnia środowisko obejmujące infrastrukturę, wizualizację itp.

## 2.2.2. Przykłady modeli symulujących tłum ludzi

Konkretne przykłady modeli dynamiki tłumu podzielone według powyższej klasyfikacji uwidoczną specyficzne różnice w podejściu obliczeniowym. W niniejszej sekcji opisano trzy najbardziej charakterystyczne typy modeli.

### 2.2.2.1. Model Helbinga - Social Force

Prawdopodobnie jednym z najbardziej znanych i docenianych w dziedzinie numerycznego modelowania dynamiki tłumu jest prof. Dirk Helbing z ETH Zürich (dawniej pracujący na Uniwersytecie Technologicznym w Dreźnie). Helbing wraz ze swoimi współpracownikami jest autorem koncepcji użycia modelu siły społecznej do realistycznego odwzorowania zachowań ludzkich w różnych klasach symulacji. Pierwotny model został opublikowany w 1995 przez Helbinga i Molnara [18], zaś z biegiem czasu

powstawały kolejne rozszerzenia modelu modelujące np. panikę w tłumie, fenomeny ruchu ludzkiego i inne aspekty [23], [24].

Ideą modelu Helbinga jest modelowanie zachowań tłumu poprzez określenie sił, które opisują interakcję między parami osób, interakcję między osobą a ścianą, oraz siłę samo-napędzającą, która reprezentuje wolę danej osoby, aby poruszać się w określony sposób. Dodatkowo każdy agent  $a$  posiada masę  $m_a$ , rozmiar (jest reprezentowany jako koło)  $d_a$ , pozycję  $r_a$  oraz prędkość  $v_a$ . Równanie pędu dla agenta można zapisać jako:

$$m_a \frac{dv_a}{dt} = \sum_{b \in A} f_{ab}^{soc} + \sum_{b \in A} f_{ab}^{con} + \sum_{c \in B} f_{ac}^{bnd} + f_a^{will} \quad (2.4)$$

gdzie:

$A$  – zbiór agentów,

$B$  – zbiór elementów ograniczających,

$a, b$  – agenci,

$f_{ab}^{soc}$  – siła interakcji socjalnych pomiędzy agentem  $a$  i  $b$ ,

$f_{ab}^{con}$  – siła interakcji kontaktu pomiędzy agentem  $a$  i  $b$ ,

$f_{ac}^{bnd}$  – siła interakcji agenta a elementów ograniczających ruch,

$f_a^{will}$  – siła inercji, siła samo-napędzająca.

Łatwo zauważyć podobieństwo równania 2.4 do II Zasady dynamiki Newtona. Rozwiązuje się je za pomocą numerycznej iteracyjnej metody rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych Rungego-Kutty 4 rzędu, przyjmując odpowiednio krótki krok całkowania. Model sił to przedstawiciel *ciągłego* i *mikroskopowego* podejścia do modelowania ruchu pieszych.

### 2.2.2.2. Model Floor Field oparty na CA

Niespełna dwie dekady temu został zaprezentowany dyskretny, oparty na regułach i na automatach komórkowych model dynamiki tłumu [25], [26], [19]. Znacznie bardziej elastycznym podejściem bazującym na automatach komórkowych okazał się model *Floor Field* [19], [27]. Łączył mechanizmy wyszukiwania najkrótszej ścieżki do miejsca docelowego z modelem interakcji z innymi agentami i otaczającą infrastrukturą. Inspiracją była natura, a dokładnie sposób poruszania się mrówek, gdzie komunikacja odbywa się w dużej mierze na bazie procesu chemotaksji.

Podstawowy schemat ruchu pieszego w modelu opiera się na prawdopodobieństwie na które wpływa wartość pola statycznego wyznaczającego najlepszy kierunek ruchu. Pole dynamiczne reprezentuje wirtualny ślad pieszych, posiada dynamikę zależną od aktualnego ruchu pieszych i służy do uzyskania efektu podążania za poprzedzającym pieszym. Pole to może się rozszerzać i kurczyć. Pieszy porusza się w obrębie sąsiedztwa Moore'a zaś dla każdej komórki z sąsiedztwa wyliczane jest prawdopodobieństwo ruchu na to pole. W oparciu o wynikowy rozkład prawdopodobieństwa planowany jest pożądany ruch.

Model pozostaje nadal w domenie mikroskopowej, jednak przestrzeń i czas w przeciwieństwie do modelu sił społecznych są dyskretne.

### 2.2.2.3. Model FDS+Evac

Kolejnym wartym wymienienia modelem jest model łączący dynamikę tłumu z symulacjami dynamiki płynów. Dostępne publicznie oprogramowanie jest w stanie symulować rozprzestrzenianie się dymu i ognia oraz dynamikę tłumu w oparciu o podejście wieloagentowe [22].

Punktem wyjścia do modelowania dynamiki tłumu jest model sił społecznych. Oznacza to, że ruch pieszych jest głównie determinowany poprzez siłę społeczną i siłę interakcji pomiędzy innymi pieszymi. Niezbędnym było rozszerzenie modelu Helbinga m.in. o dodatkowy czynnik w sposobie wyliczania siły interakcji pomiędzy pieszymi - radialny czynnik tłumienia. Kolejną modyfikacją było uzależnienie siły społecznej od prędkości - spowodowało to lepszą obsługę przypadku przepływów dwukierunkowych.

Pieszy jest reprezentowany poprzez trzy okręgi - to kolejna różnica w stosunku do modelu sił społecznych. Informacje przestrzenne dotyczące temperatury gazu, gęstości dymu i gazu oraz poziomu promieniowania wykorzystuje się do modyfikacji dynamiki ruchu agenta.

Model FDS+Evac jest praktycznym przykładem połączenia dwóch modeli.



## 3. Propozycja rozbudowy metodologii modelowania dynamiki tłumu

### 3.1. Model Social Distances - modelu podstawowy

W modelach dynamiki tłumu opartych na automatach komórkowych, przestrzeń przeważnie jest podzielona na jednakowe kwadratowe komórki zajmowane co najwyżej przez jednego pieszego [28]. Ruch pieszych jest głównie determinowany przez obecną konfigurację sąsiedztwa - dzięki temu podejściu tego typu modele są niesamowicie wydajne i efektywne. Zdecydowana większość modeli opartych na automatach komórkowych korzysta z homogenicznej siatki złożonej z kwadratowych komórek o rozmiarze  $40cm$ . Dokładność klasycznych modeli jest większa niż modeli makroskopowych, natomiast reprezentacja przestrzeni jest relatywnie zgrubna.

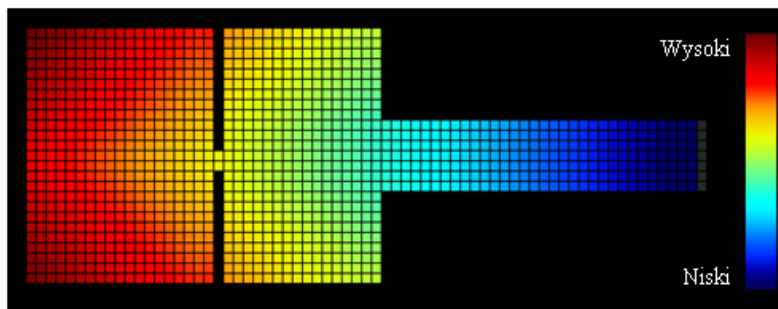
W celu polepszenia dokładności klasycznych modeli automatów komórkowych został zaproponowany przez J. Wąsa, B. Gudowskiego oraz P. Matuszyka, model Social Distances [29] będący z kolei rozwinięciem ich wcześniejszych modeli. Na reprezentację pieszego została wybrana elipsa umieszczona w kwadratowej siatce. Później model został zaadoptowany do modelowania ewakuacji ludzi z dużych obiektów [30], [31].

W prezentowanym modelu piesi są reprezentowani jako część systemu agentowego wykorzystującego zasady stosowane w asynchronicznych i niehomogenicznych automatach komórkowych. Każdy pieszy (agent) posiada zestaw unikalnych i niezależnych atrybutów, takich jak: pożądana prędkość, kierunek, cel, przebyty dystans czy czas ewakuacji. Klasyfikując ten model możemy wskazać, że mamy do czynienia z modelem: dyskretnym, mikroskopowym, numerycznym i stochastycznym.

Ze względu na umieszczenie modelu w domenie modeli opartych na automatach komórkowych nieunikniona jest dyskretyzacja przestrzeni i czasu - nie jest możliwa dokładna reprezentacja rzeczywistej przestrzeni na kwadratowej siatce o wymiarach  $25cm$ .

Piesi są globalnie nawigowani przez gradient potencjału pola statycznego - wybór następnej komórki, która będzie kolejnym celem pieszego. Każda komórka siatki, która jest dostępna dla pieszego posiada wartość zwiększająca się proporcjonalnie od dystansu do najbliższego wyjścia - Rys. 3.1.

W modelu agenci są reprezentowani jako poszczególne elipsy, których centrum jest pozycjonowane na przecięciu się przekątnych komórki. Pieszy porusza się po siatce w sąsiedztwie Moore'a o promieniu 1, biorąc pod uwagę obrót wokół własnej osi o rozdzielności  $45^\circ$  - czyli 8 różnych pozycji. Ze względu



Rys. 3.1. Gradient statycznego pola potencjału.

na dosyć gęstą siatkę i rozmiar pieszego kluczowym było zdefiniowanie stanów dozwolonych i zabronionych w obrębie sąsiedztwa Moore'a o promieniu 1 [29]. Określenie zbioru dozwolonych i zabronionych pozycji polegało na prostych geometrycznych zależnościach [30]. Obliczenia brały pod uwagę względną orientację dwóch elips znajdujących się na dwóch sąsiadujących komórkach oraz na wielkości ich części wspólnej. Zostało przyjęte, że pozycja jest dozwolona jeżeli współczynnik części wspólnej dla tej pozycji do rozmiaru elipsy jest mniejszy niż dozwolony  $\epsilon_N \in [0, 1]$ .

Należy tutaj podkreślić, iż eliptyczna reprezentacja pieszego (oraz biorąc pod uwagę dozwolone/zabronione stany w sąsiedztwie) pozwala modelować fluktuacje gęstości w czasie ewakuacji w bardziej precyzyjny sposób niż w przypadku klasycznej reprezentacji pieszego w automatach komórkowych [19].

## 3.2. Propozycja rozszerzenia

W tej sekcji zostanie przedstawiony niezawodny i skuteczny model dynamiki tłumu oparty na systemach agentowych, dedykowany do wyspecjalizowanych celów, jakim jest symulacja dynamiki tłumu w dużych obiektach dla wybranych scenariuszy. Zastosowano metodę ABM (ang. Agent-Based Modeling) w połączeniu z niejednorodnymi automatami komórkowymi. Punktem wyjścia był model odległości społecznych - Social Distances opisany w [32] (model ten jest również stosowany w analizie wizualnej tłumu w połączeniu z metodami rozpoznawania wzorców [33]). Kolejne usprawnienia i rozszerzenia modelu pozwoliły przystosować go do symulacji masowej ewakuacji [34] - model został wzbogacony o koncepcje zaczerpnięte z systemów wieloagentowych.

W celu odwzorowania wybranych klas sytuacji autor wziął pod uwagę: pożądaną prędkość agenta, funkcję kosztu agenta (Równ. 3.7) (redefiniowane cele i parametry) oraz dopuszczalny poziom ściśliwości [34].

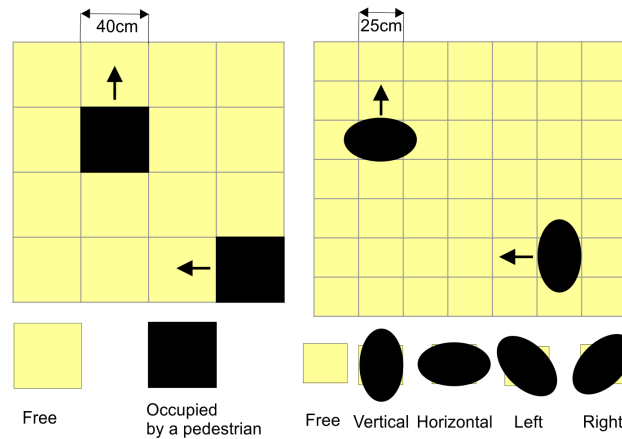
Główny wybór kryteriów wyjścia ewakuacyjnego opiera się na odległości do wyjścia. Dodatkowo autor proponują bardziej wyrafinowane kryteria wyboru wyjścia. Podczas symulacji agent może zmienić wyjście kilka razy w zależności od bieżącej sytuacji przed wyjściem. Agent analizuje stan trzech najbliższych wyjść biorąc pod uwagę gęstość, popularność, odległość i wybiera jedno - według niego najlepsze. Agent będzie mógł zmienić wyjście tylko wtedy, gdy jego otoczenie zawiera mniej, niż określoną z góry liczbę agentów.

Podejście oparte na systemach agentowych umożliwia tworzenie złożonych scenariuszy pozwalających na bieżące postrzeganie lokalnego środowiska przez różne typy agentów [35]. W takich przypadkach można wziąć pod uwagę: poziom *znajomość* agenta ze środowiskiem (znane, nieznanie), preferowaną strategię (np. najszybsza ścieżka, najkrótsza ścieżka, strategia mieszana), aspekty społeczne (wpływ grupy, zachowania konkurencyjne lub kooperatywne). Można również wziąć pod uwagę postrzeganie przez agentów zagrożeń (ogień, dym, potencjalnie niebezpieczne osoby) i ich reakcje na zagrożenia. Jest to realizowane poprzez użycie różnych klas agentów i dokładną kalibrację opracowanej symulacji.

### 3.2.1. Reprezentacja pieszego

W klasycznych modelach opartych na automatach komórkowych [28] piesi są reprezentowani jako szczególny **Stan** komórki (Rys. 3.2 - lewy). Każdy pieszy jest przypisany w danym kroku czasowym do kwadratowej komórki o rozmiarze 40cm (wynika to z faktu zachowania maksymalnej gęstości w tłumie [36]). Takie podejście w łatwy sposób umożliwia tworzenie zróżnicowanych funkcji przejścia, ale szybko okazuje się niewystarczające z powodu relatywnie zgrubnej reprezentacji przestrzeni [28].

Można zaproponować alternatywne podejście przy określaniu reprezentacji jednostki w modelu. Na takim podejściu bazuje model Social Distances [37] oraz jego późniejsze modyfikacje [34]. Warto tutaj wspomnieć, że takie podejście może zostać uogólnione na przypadek użycia różnych rozmiarów i kształtów pieszych (pogrupowanych w różne klasy).



**Rys. 3.2.** Fizyczna reprezentacja pieszego w klasycznych modelach opartych na automatach komórkowych (lewy) oraz w modelu Social Distances (prawy).

W tym przypadku każdy pieszy jest przypisany do konkretnej komórki na drobnoziarnistej siatce (na przykład  $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ ), ale z powodu geometrycznych zależności, on/ona formułują lokalną konfigurację zajmowanych komórek (Rys. 3.2 - po prawej). W modelu Social Distances [34, 16] jednostki są reprezentowane przez elipsy z ustalonym rozmiarem odnoszącym się do średnich rozmiarów ludzi określonych przez Międzynarodową Organizację Zdrowia (WHO). Wzajemne ułożenie jednostek generuje 14 różnych opcji lokalnej konfiguracji.

Matematyczny aspekt reprezentacji pieszych bazujący na automatach komórkowych jest szerzej przedstawiony w [38]. Na potrzeby dalszego opisu definiujemy następującą krotkę:

**Definicja 3.2.1.** Krotka  $CA = (L, S, N, f)$ :

gdzie:

- L** – kwadratowa siatka automatu komórkowego zawierająca różnego typu komórki: *Przestrzeń do ruchu* (zawierająca *Schody*, *Windy*, *Pola dźwiękowe*, *Pola widzenia* i *Przeszkody*),
- S** – zbiór stanów określający obecność agenta (typ agenta) oraz fizyczną orientację jego elipsy ([34]),
- N** – definicja sąsiedztwa,
- f** – funkcja przejścia biorąca pod uwagę rodzaj agenta i typ zajmowanej komórki.

**Definicja 3.2.2.** Agent  $A_j = (\tau_j, (x_j, y_j), R_j)$

gdzie:

- $\tau_j$  – rodzaj agenta  $j$ ,
- $x_j, y_j$  – współrzędne agenta  $j$  na siatce,
- $R_j$  – strategiczne, taktyczne i operacyjne umiejętności agenta  $j$ .



### 3.2.2. Proces podejmowania decyzji i algorytm ruchu

Ogólnie rzecz ujmując, w prezentowanym podejściu proces podejmowania decyzji przez pieszych jest wykonywany przy użyciu procesu dwupoziomowego (zgodnie z propozycją w [16]). Norma ISO13387-8 definiuje proces podejmowania decyzji, składa się z fazy związanej z poziomem strategicznym oraz z fazą związaną z poziomem taktyczno-operacyjnym.

### 3.2.3. Modelowanie zachowań strategicznych

W celu osiągnięcia dużej elastyczności i odpowiedniego poziomu skomplikowania w zagadnieniu modelowania zachowań ludzkich niezbędnym jest wzięcie pod uwagę strategicznego aspektu w procesie podejmowania decyzji. Na arenie profesjonalnych modeli służących do symulowania ewakuacji zdecydowana większość modeli implementuje tylko proste scenariusze ruchu ludzi przez system ścieżek ewakuacyjnych na poziomie operacyjnym czy też taktycznym [39, 28]. Rzeczywistość jest jednak znacznie bardziej skomplikowana - na decyzje agenta mogą wpływać rozmaite czynniki. Taki stan rzeczy został podkreślony w wynikach z badań w czasie trwania 7FP EU Project *Socionical* [40], gdzie to badano wpływ rozprzestrzeniania się informacji w urządzeniach mobilnych na podejmowane decyzje. W związku z tym, czynniki takie jak: rozprzestrzenianie się informacji przez system nagłośnienia, instrukcje przekazywane przez obsługę czy też komunikacja i spójność grup zostały wzięte pod uwagę.

Mechanizmy niehomogenicznych automatów komórkowych zdają się być bardzo pomocne w modelowaniu takich czynników. Nie zapominając o wymaganiu dużej wydajności modeli ewakuacyjnych zostaje zaproponowany specjalny typ komórki *Wybór* wchodzący w zbiór *Przestrzeń do ruchu*. Na podstawie reguły: na końcu korytarza lub schodów, zaraz przed wejściem do holu ludzie mają tendencje do *wybijania* ostatecznego celu.

Nie istnieje żadne uzasadnienie do podejmowania globalnych decyzji w każdym kroku czasowym. Na przykład, dzięki niejednorodności poszczególnych komórek w automacie komórkowym, niektóre komórki mogą być oznaczone w dobrym zasięgu głośnika informacyjnego. Oczywiście źródło dźwięku posiada wiele charakterystyk propagacji fali dźwiękowej. Zostało przyjęte, że komórka generator emituje kształt fali dookólnej. Komórki w zasięgu dźwięku  $SF$  (pola dźwiękowe) są zdefiniowane następująco:

**Definicja 3.2.3.** Pola dźwiękowe

$$SF_{x,y} = \{(x', y') : (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \leq r^2\} \quad (3.1)$$

gdzie:

$x, y$  – współrzędne komórki będącej źródłem dźwięku,

$r$  – (dookólny) promień fali,

Kiedy pieszy wchodzi w zasięg pola dźwiękowego, słyszy wiadomości z prawdopodobieństwem  $P_{SF}$  i wtedy może zostać podjęta globalna decyzja (np. zmiana wyjścia ewakuacyjnego, zmniejszenie

prędkości lub nawet całkowite zatrzymanie). Prawdopodobieństwo  $P_{SF}$  może się różnić w zależności od rodzaju transmitowanej wiadomości. Dla  $TypeOf_{SF} = \{niekrytyczna, krytyczna\}$  przyjmuje prawdopodobieństwa równe  $P_{SF} = \{0.5, 0.7, 1\}$

Innym równie ważnym czynnikiem wpływającym na podejmowanie decyzji na poziomie strategicznym jest komunikacja wewnątrz grupy (bezpośrednia komunikacja dla osób znajdujących się blisko siebie lub za pośrednictwem urządzeń mobilnych)

**Definicja 3.2.4.** Grupa to krotka  $(L_i, R_i, S_i)$ :

$$L_i = (x_i, y_i) \quad (3.2a)$$

$$R_i = (r_1, r_2, \dots, r_n)_i \quad (3.2b)$$

$$S_i \in \{2, 3, 4, \dots\} \quad (3.2c)$$

gdzie:

$L_i$  – lider grupy  $i$

$x, y$  – współrzędne lidera grupy,

$R_i$  – zasady panujące w grupie  $i$ ,

$S_i$  – rozmiar grupy  $i$ ,

$i$  – identyfikator grupy  $i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ ,

$m$  – liczba grup,

$r$  – zasada,

$n$  – liczba zasad.

Pieszy jest przypisany do grupy z prawdopodobieństwem  $P_{GB}$  na początku symulacji, tylko wtedy, gdy odległość  $D$  pomiędzy pieszym a liderem jest mniejsza niż zadana wartość. Jeżeli odległość  $D$  jest większa niż zadana wartość pieszy z prawdopodobieństwem  $P_{GR}$  pozostaje w grupie. W zależności od scenariusza (stopień zagęszczenia środowiska) odległość  $D$  jest zróżnicowana:

**Definicja 3.2.5.** Odległość

$$D = f(\rho) \quad (3.3)$$

gdzie:

$f(\rho)$  – funkcja przynależności,  $f(\rho) = \frac{Dens_{max}}{\rho}$ ,

$\rho$  – gęstość pieszych na metr kwadratowy wokół lidera grupy,

$\rho \in \langle 0; Dens_{max} \rangle$ ,

$Dens_{max}$  – maksymalna gęstość jaka może zostać osiągnięta w modelu.

Poniżej zaprezentowano przykładową zasadę  $r_i$ :

- „podążaj za liderem” -  $r_1$ . Pieszy w grupie stosujący tą zasadę wybiera kolejne pole do ruchu w następujący sposób: spróbuj wykonać ruch na pole na którym był lider lub na pole w promieniu 2 w sąsiedztwie Moore’a lidera
- „zakaz wyprzedzania” -  $r_2$ . Członkowie grupy posiadająca co najwyżej taką pożądaną prędkość jak lider.

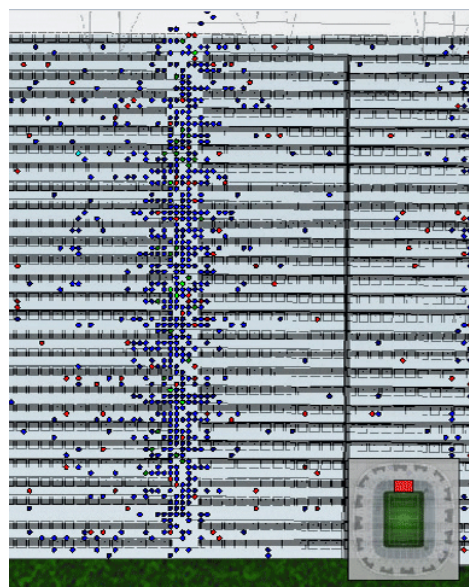
Opisana powyżej funkcjonalność zastosowana do modeli opartych na automatach komórkowych i systemach agentowych stwarza możliwości do rozwijania bardziej złożonych scenariuszy zachowań [41, 16]. Należy podkreślić, że po strategicznej fazie podejmowania decyzji (np. wybór nowej komórki do ruchu) zachowanie poszczególnych agentów jest determinowane zgodnie ze schematami operacyjnymi/taktycznymi wyjaśnionymi w następnej sekcji.

Jako przykładem podejmowania decyzji na poziomie strategicznym jest zmiana zachowania pieszych w specyficznym środowisku jakim jest stadion piłkarski, zastosowany w symulacji ewakuacji ludzi Allianz Arena w Monachium. W czasie symulacji ewakuacji, agenci zostali poinformowani, że najbliższe wyjście ewakuacyjne do którego podążali zostało zablokowane oraz, że zalecane jest spowolnienie lub zatrzymanie swojego procesu wyjścia do momentu nadejścia nowych informacji. Agenci zmienili swoje zachowanie poprzez zmniejszenie swojej pożądanej prędkości z  $1.34 \frac{m}{s}$  do  $0.5 \frac{m}{s}$ . Ta sytuacja jest zaprezentowana na Rys. 3.3.

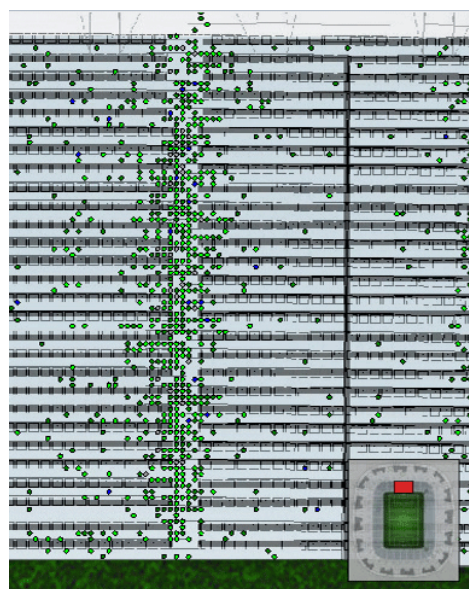
### 3.2.4. Poziom taktyczny i operacyjny

W tej sekcji zostanie szczegółowo opisany algorytm ruchu z uwzględnieniem podziału na poziom taktyczny i operacyjny. Algorytm ruchu składa się z dwóch głównych etapów: etap podejmowania decyzji oraz etap rozwiązywania konfliktów.

**Etap pierwszy** składa się procesu podejmowania decyzji przez agenta, decyzja dotyczy wyboru następnego kroku (następnej komórki  $c_{i,j}$ ). W procesie tym uwzględniane są następujące elementy: wartość pola statycznego  $S$  i dynamicznego  $D$ , konfiguracja sąsiedztwa oraz obecność ścian, przeszkód itp. Stosowana jest asynchroniczna metoda aktualizacji stanów automatu komórkowego. Budowana jest kolejka priorytetowa oparta głównie na odległości do globalnego punktu zainteresowania (cel pieszego - np. strefa bezpieczna, wyjście ewakuacyjne). Istnieje możliwość zastosowania różnych reguł harmonogramowania agentów/pieszych na liście. Na przykład: im mniejsza odległość od globalnego punktu zainteresowania, tym pieszy otrzymuje wyższy priorytet. Można rozbudowywać mechanizm priorytetów tak, aby różne klasy pieszych otrzymywały zróżnicowane funkcjonalnie priorytety (personel, strażacy itp.). Proces decyzyjny dotyczący przejścia do następnej komórki rozpoczyna się od pieszego o najwyższym priorytecie. Jeśli jest więcej niż jeden pieszy o tym samym priorytecie, pierwszeństwo aktualizacji jest wybierane losowo.



(a)



(b)

**Rys. 3.3.** Widok na symulację ewakuacji dwóch sektorów na jednej z trybun stadionu Allianz Arena w Monachium. Jako przykład podejmowania decyzji na poziomie strategicznym jest reakcja agentów na informacje o zablokowaniu wyjścia ewakuacyjnego. Pożądana prędkość została zmieniona: na 3.3a ciemniejsze kolory pieszych oznaczają wyższą prędkość natomiast na 3.3b jaśniejsze kolory oznaczają niższą prędkość.

Gradient statycznego pola potencjału prowadzi pieszego to wybranego celu (POI - Point of Interest). Pieszy otrzymuje informacje o przybliżonym kierunku ruchu. Dynamiczne pole wprowadzone przez Nishinari w [27] dostarcza wiedzy dla pieszego o swoich poprzednikach w symulacji ("wirtualny ogon").

Oryginalna intencja pola dynamicznego została zmodyfikowana przez autora. W szczególności dynamiczne pole zostało zastosowane do odtworzenia efektu zamka błyskawicznego (zipper-effect), oraz aby osiągnąć lepsze, bliższe rzeczywistości, wykorzystanie dostępnej przestrzeni głównie wokół miejsc nagłych zwrotów kierunku ruchu.

W przypadku algorytmów ruchu masowego autor zastosował pole dynamiczne  $D_{ij}^t$  w kroku czasu  $t$ , które odnosi się do idei pozostawiania niewidzialnych śladów - feromonów. Oznacza to, że określonych sytuacjach pieszy może podążać za poprzednikami. Uwzględniona została dynamika pola poprzez proces dyfuzji (Równ. 3.4) i zaniku (Równ. 3.5). Obliczanie pola dynamicznego opiera się na równaniu Nishinari i wsp. [27], jednakże autor zaproponował następującą modyfikację w oparciu o sąsiedztwo Moore'a:

$$D_{ij}^{t+1} = D_{ij}^t - \beta D_{ij}^t + \frac{\beta}{4} \sum_{i-1, j-1}^{i+1, j+1} D_{i,j}^t \quad (3.4)$$

$$D_{ij}^{t+1} = D_{ij}^t - \theta D_{ij}^t \quad (3.5)$$

gdzie:

$D_{ij}$  – wartość pola dynamicznego,

$\beta, \theta \in [0, \infty)$  – stałe kontrolują dyfuzję i rozpad pola dynamicznego,

$t, t + 1$  – dyskretny krok czasowy.

Odpowiednio odzwierciedla przypadkowość ruchu agenta i zakres widzialności danej osoby. W przypadku dymu lub mgły w środowisku definiuje się dużą wartość  $\theta$  ze względu na zmniejszoną widoczność [27].

Zmiana schematu sąsiedztwa z von Neumanna z Moore'a wprowadza dodatkowy wymiar we wprowadzonych przez autora modyfikacjach. Dynamika pola dynamicznego - proces rozprzestrzeniania się i zaniku dostarcza dane użyte później w funkcji kosztu (Równ. 3.7). W zależności od przyjętej kalibracji funkcji kosztu można uzyskać zachowanie pieszych polegające na unikaniu bezpośredniego podążaniu za poprzednikiem.

Pieszy otrzymuje informację o bieżącej konfiguracji sąsiedztwa z podzbioru sąsiedztwa Moore'a o promieniu 1, zawężone przez pole widzenia pieszego. Wprowadzana przez autora koncepcja pola widzenia i odpowiednich pól widoczności  $VF$  została krótko opisana w [34], poniżej przedstawiamy formalizm i wizualizację (patrz Rys. 3.4):

$$VF_{x,y}(r) = \{(x', y') : |x' - x| \leq r \wedge |y' - y| \leq r \wedge \arccos\left(\frac{a \cdot b}{|a||b|}\right) \leq 90^\circ\} \quad (3.6)$$

gdzie:

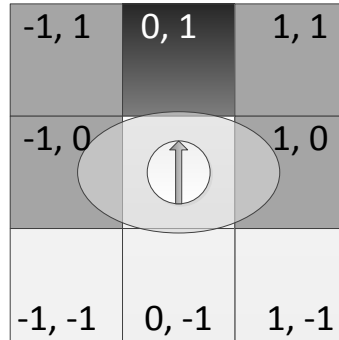
$x, y$  – współrzędne centralnej komórki,

$r$  – promień sąsiedztwa Moore'a,

$dx, dy$  – współrzędne komórki o najmniejszej wartości potencjału,

$a$  – wektor  $(x', y')$ ,

$b$  – wektor  $(dx, dy)$ .



**Rys. 3.4.** Pieszy zajmuje centralną komórkę  $(0, 0)$ , ciemnoszara komórka posiada najmniejszy potencjał (wartość gradientu potencjału pola statycznego)  $(dx, dy) = (0, 1)$ , szare komórki znajdują się w zbiorze komórek pola widzenia pieszego zgodnie ze wzorem 3.6.

Do tego momentu agent ma wiedzę na temat zbioru widocznych pól i wyboru kierunku ruchu. Następna faza to decyzja o tym, które komórki ze zbioru  $VF$  są dostępne (bez ścian i przeszkód oraz bez obecności innego pieszego) w odniesieniu do dozwolonych/zabronionych konfiguracji [32, 37].

Proces decyzyjny obejmuje wybór następnej komórki (komórka  $c_{ij}$  z sąsiedztwa Moore'a zawężonego do zbioru  $VF$ ) podczas ruchu w kierunku wybranego celu (POI). Proponowana funkcja kosztu (Równ. 3.7) oblicza koszt potencjalnego ruchu z bieżącej komórki do wszystkich dostępnych komórek ze zbioru  $VF$ . Komórka o najmniejszym koszcie zostaje wybrana do kolejnego etapu symulacji.

$$\begin{aligned} cost(c_{ij}) &= S_{ij}^a + (dens(c_{ij}) + \alpha \cdot dist(c_{ij}, POI)) \cdot W \cdot I \\ dens(c_{ij}) &= e^{\delta \cdot D_{ij}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

gdzie:

$S_{ij}^a$  – wartość statycznego pola potencjału, gdzie  $a$  jest indeksem warstwy potencjału prowadzącej do celu (np. wyjście ewakuacyjne - POI),

$a \geq 1$  – liczba możliwych celów do obrania,

$dens(c_{ij})$  – gęstość pieszyc w sąsiedztwie Moore'a o promieniu 1 komórki  $c_{ij}$ ,

$\alpha \in [1, \infty)$  – waga,

$dist(c_{ij}, POI)$  – odległość pomiędzy komórką o współrzędnych  $i, j$  a najbliższym celem (POI),

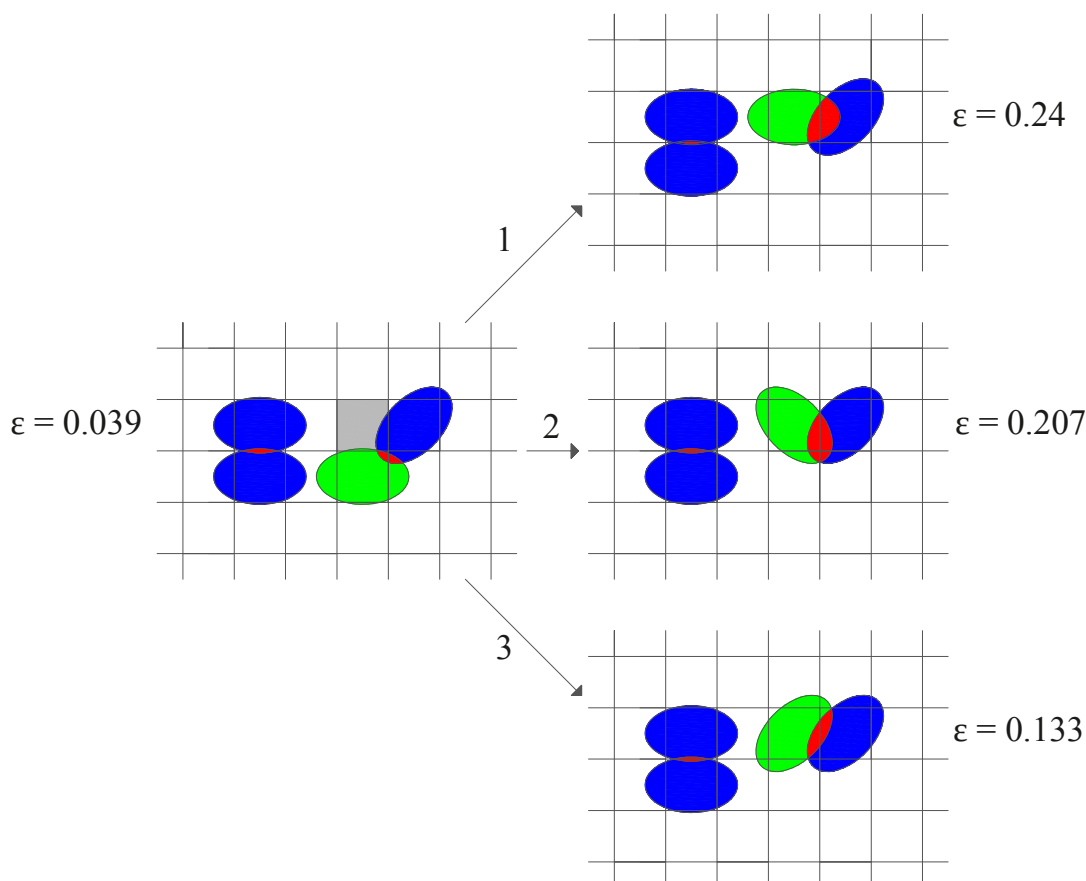
$D_{ij}$  – wartość pola dynamicznego w punkcie  $i, j$ ,

$\delta \in [0, \infty)$  – waga,

$W$  – komponent realizujący unikanie przeszkód, bierze jest pod uwagę odległość do najbliższej przeszkody:  $W = 1.0 + \sigma_W$ ,  $\sigma_W \in (0, 1]$ ,

$I$  – parametr inercji, piesi preferują zachowanie dotychczasowego kierunku ruchu tak długo jak to możliwe,  $I \in (0, 1)$ .

**Drugi etap** algorytmu ruchu to rozwiązywanie konfliktów. Metody rozwiązywania konfliktów zależą od typów aktualizacji stanu komórek, w literaturze można precyzyjnie śledzić następujące schematy: tasowanie sekwencyjne, aktualizacja równoległa, uporządkowana aktualizacja sekwencyjna [42]. Jeśli symulacja zawiera więcej niż jednego pieszego, dwóch lub więcej z nich może wybrać tę samą komórkę jako cel następnego kroku. Drugi typ sytuacji konfliktowej dotyczy 14 kombinacji lokalnych konfiguracji zdefiniowanych w modelu Social Distances. W zależności od, tak zwanego, współczynnika ściśłości  $\varepsilon$ , mogą występować niedozwolone konfiguracje. Na Rys. 3.5 są przedstawione trzy możliwości konfiguracji pieszych podczas drugiego etapu rozwiązywania konfliktów.

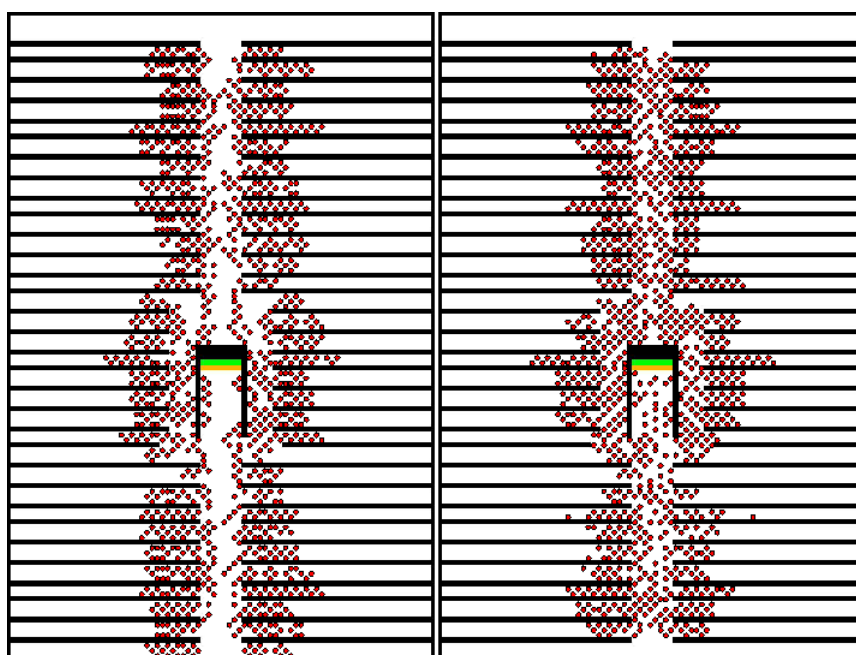


**Rys. 3.5.** Możliwe scenariusze rozwiązywania konfliktów. Po lewej stronie znajduje się początkowa faza konfliktu, z prawej strony możliwe warianty rozwiązania konfliktu. Zielony pieszy wykonuje ruch do szarej komórki, pozycja ciała może się zmienić o 45 stopni w prawo lub w lewo. Jeśli  $\varepsilon \leq 0.21$  dozwolony jest drugi lub trzeci wariant.

W procesie rozwiązywania konfliktów w pierwszej kolejności rozwiązywane są klasyczne konflikty. Rozwiązaniem jest przydzielenie pieszych w konflikcie do kolejki priorytetowej według czasu oczekiwania na ruch - najwyższy priorytet otrzymuje pieszych oczekujący na ruch najdłużej. Czas oczekiwania to liczba kroków symulacji z rzędu w których pieszy nie wykonał ruchu. Konflikt wygrywa pieszy o najdłuższym czasie oczekiwania lub jeśli czas oczekiwania pieszych jest równy, następuje losowanie.

Po drugie, pieszy sprawdza, czy ruch może być wykonany zgodnie ze współczynnikiem ściśliwości w sąsiedztwie Moore'a komórki wybranej do następnego ruchu (najniższy koszt komórki z zbioru  $VF$ ). Jeśli parametr ściśliwości nie zezwoli na taką konfigurację, pieszy spróbuje dopasować się do wybranej komórki, obracając się o 45 stopni. Jeśli powyższa operacja się nie powiedzie, pieszy nie będzie się poruszał w następnym etapie symulacji.

Pomimo dwuetapowego procesu rozwiązywania konfliktów, dostępna do ruchu przestrzeń nie była w pełni wykorzystana, szczególnie w warunkach niskiej gęstości. Autor rozszerza proces rozwiązywania konfliktów o dodatkowy krok. Jeśli okaże się, że przejście do wybranej przez pieszego komórki jest niemożliwe ze względu na współczynnik ściśliwości, to proces rozwiązywania konfliktów jest powtarzany i jako nowy cel pieszy obiera kolejną komórkę ze zbioru  $VF$  z najmniejszym kosztem. Wynik działania tego dodatkowego mechanizmu można zaobserwować na Rys. 3.6.



**Rys. 3.6.** Przykładowa symulacja jednego sektora stadionu Wisły Kraków. Po lewej stop klatka z symulacji bez dodatkowego kroku, po prawej włączony dodatkowy krok. Parametry symulacji w obu przypadkach są dokładnie takie same.

Ten dodatkowy krok poprawia jakość reprezentacji rzeczywistości w modelu. Dostępna przestrzeń przy wyjściu (zielona linia pośrodku) oraz między lewym i prawym rzędem siedzeń jest lepiej wykorzystana. Wizualna weryfikacja przedstawiona jest na Rys. 6.19.



## **4. Propozycje metodologii procedur weryfikacji i walidacji modeli CA**

Proces weryfikacji i walidacji powinien być nieodłącznym etapem związanym z rozwojem i oceną wiarygodności modeli dynamiki tłumu. Weryfikacja może zostać zrealizowana poprzez wykreowanie (czasami sztucznie) zróżnicowanej liczby przypadków testowych, natomiast walidacja to proces bazujący na porównywaniu wyników symulacji z danymi empirycznymi. Autor twierdzi, że testy weryfikacyjne powinny być zbliżone do podejścia eksperymentalnego tak blisko jak to tylko możliwe.

Weryfikacja i walidacja jest bardzo ważną częścią procesu modelowania i symulowania. Z powodu wymaganej wiarygodności modelu, autor zaproponował systematyczne i bardzo restrykcyjne podejście to walidacji według normy ISO poświęconej symulacji ewakuacji - ISO/TR 13387-8.

Model dynamiki tłumu powinien zostać sprawdzony pod kątem:

- Testów komponentowych - sprawdzenie głównych komponentów oprogramowania zgodnie z metodami inżynierskimi.
- Testów funkcjonalnych - testowanie możliwości i funkcjonalności modelu zgodnie z założeniami i przeznaczeniem.
- Weryfikacji/Walidacji jakościowej - porównanie przewidywanych zachowań ludzkich ze świadomymi oczekiwaniami. Obejmuje to sprawdzanie określonych form zachowania w charakterystycznych miejscach, takich jak wąskie gardła, korytarze lub schody itp.
- Walidacji ilościowej - obejmuje szczegółowe porównanie aspektów ilościowych i wyników modelu z wiarygodnymi danymi (eksperymentalnymi). Na przykład jednym z najważniejszych etapów walidacji ilościowej jest sprawdzenie diagramu fundamentalnego, tj. zależności między gęstością tłumu a określonym przepływem lub prędkością pieszego [43].

### **4.1. Weryfikacja modeli opartych na automatach komórkowych**

Bardzo trudne i raczej niewskazane jest definiowanie uniwersalnego zestawu procedur testujących różne typy modeli dynamiki tłumu. Możliwe jest wydzielenie wspólnego zestawu testów weryfikacyjnych jednakowych dla wszystkich rodzajów modeli, jednak wtedy zestawy testów powinny być rozszerzane o przypadki testowe specyficzne dla konkretnych typów modeli. Przykładem może być test na to

czy przestrzeń dostępna dla pieszych zachowuje cechy izotropii w modelach z przestrzenią ciągłą czy dyskretną.

W tej sekcji zostaną przedstawione specyficzne aspekty weryfikacji modeli opartych na automatach komórkowych. Autor również proponuje modyfikacje i rozszerzenia istniejących w literaturze zestawów testów weryfikacyjnych [44], [45], [46].

#### 4.1.1. Efekty dyskretyzacji przestrzeni

Źródłem jednym z najbardziej znaczących błędów w symulacjach numerycznych jest dyskretyzacja przestrzeni oraz zmiennej czasowej. Powodem tego jest interpretacja pojedynczej komórki w modelach opartych na CA - jedna komórka, w danej chwili czasowej jest przypisana jednego pieszego, a jej klasyczny rozmiar do kwadrat o boku  $40\text{cm}$ . Taka gruboziarnista dyskretyzacja ma kilka dramatycznych implikacji dla wyników symulacji tłumu na bazie CA.

Przede wszystkim, przy zastosowanej dyskretyzacji, relacje takie jak diagram fundamentalny nigdy nie będą tak gładkie, jak wykresy uzyskane w eksperymentach lub w wyniku działania ciągłych modeli tłumu, ponieważ w dyskretnych modelach nie można precyzyjnie wyznaczyć wartości prędkości i gęstości. Ponadto taka ziarnistość powoduje częste problemy z reprezentacją przestrzeni, ponieważ nie wszystkie wymiary fizyczne są zgodne z rozmiarem komórki. Problem staje się bardziej znaczący, jeśli geometria przedstawiona w modelu zawiera zakrzywione linie czy też występują w przestrzeni kąty o mierze innej niż  $90$  stopni.

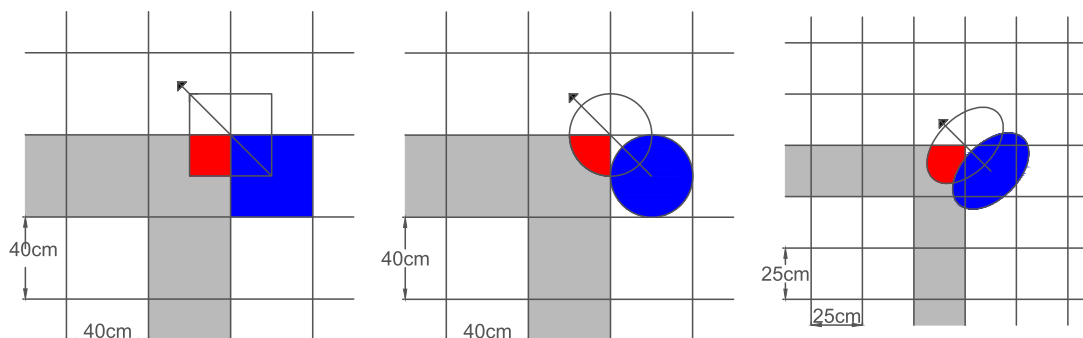
Kolejnym istotnym aspektem dyskretyzacji przestrzeni jest pojawiająca się utrata izotropii w modelach o skończonej siatce. Problem ten został rozwiązany na kilka sposobów: poprzez zliczanie kroków diagonalnych [47], przez obliczenie rzeczywistej odległości objętej przez agentów [42] lub za pomocą pożyczonej koncepcji czasu [48]. Aby sprawdzić, jaki wpływ na model ma anizotropia przestrzeni, należy ją zweryfikować za pomocą przypadków testowych, w których ruch pieszych nie jest równoległy do osi głównych siatki. Zagadnienie to zostało szeroko omówione w sekcji 4.1.4.

Autor w sekcji 4.2.3 zaproponował test na wykrycie ewentualnych błędów w modelu związanych efektem dyskretyzacji przestrzeni.

#### 4.1.2. Penetracja ścian

Penetracja ściany jest dobrze znanym problemem w modelach opartych na superpozycji sił. Na pozór ten problem nie występuje w modelach opartych na CA - wystarczy zadeklarować, że zestaw komórek ścian/przeszkód jest niedostępny. Należy jednak pokreślić, że modele te uwzględniają jednak trajektorie, a nie pozycje, penetracja ściany w modelach opartych na CA staje się możliwa i znacząco zakłóca wyniki symulacji.

W modelach z zastosowanym sąsiedztwem Moore'a, gdy symulowany pieszy porusza się przy rogu przeszkody, penetruje ściany/przeszkody. Omawiany scenariusz przedstawiono na Rys. 4.1. W większości przypadków taki problem spowoduje nierealistyczne trajektorie w zakrętach, ale w niektórych sytuacjach, np. w korytarzu zorientowanym pod kątem 45 stopni względem siatki, może znacznie zwiększyć przepustowość korytarza.



**Rys. 4.1.** Agent penetrujący ścianę/przeszkodę w modelach o skończonej kwadratowej siatce.

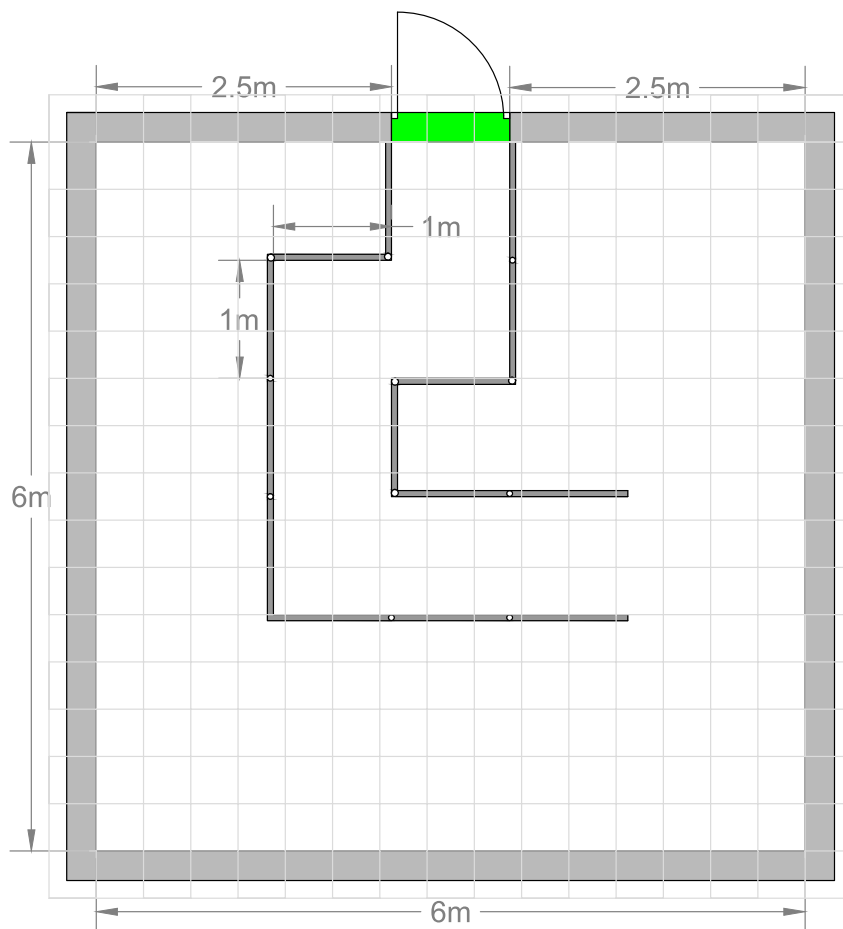
Inna sytuacja, która może być interpretowana jako *penetracja ścian* w modelach dynamiki tłumu opartych na automatach komórkowych występuje wtedy, gdy prawdziwa przeszkoda jest zbyt cienka, aby mogła być reprezentowana jako cała niedostępna komórka. Niektóre modele mogą dyskretyzować cienką ścianę jako wolną komórkę lub brać pod uwagę takie przeszkody tylko podczas obliczania wartości pola potencjału. W takich przypadkach pieszy może w rzeczywistości poruszać się przez przeszkody. Taki scenariusz przedstawiono na Rys. 4.2, 4.3a, 4.3d

#### 4.1.3. Weryfikacja geometrii wejściowej

Gruboziarnista dyskretyzacja w modelach opartych na CA prowadzi do znacznych różnic między rzeczywistą geometrią, a geometrią użytą w symulacji. Małe zmiany w wymiarach pomieszczenia lub korytarza zwykle nie mają silnego wpływu na wyniki symulacji. Jednak niektóre miejsca, takie jak: drzwi, wąskie korytarze, cienkie ściany, są szczególnie podatne na błędy dyskretyzacji. Na przykład, szerokość drzwi ma duży wpływ na przepływ pieszych, a niewłaściwa dyskretyzacja cienkich ścian może prowadzić do nierealistycznych ścieżek ewakuacyjnych (zobacz Rys. 4.2 i 4.3). Dlatego geometria wejściowa powinna być dokładnie sprawdzona. Należy potwierdzić, czy błędy dyskretyzacji zmieniają jej ogólną strukturę. Proces ten ma szczególne znaczenie w przypadku automatycznej lub półautomatycznej konwersji planu architektonicznego na wejściową dyskretną geometrie. Niewłaściwy rozmiar, położenie czy orientacja siatki może usunąć lub utworzyć nowe przejścia lub zmniejszyć szerokość korytarza.

#### 4.1.4. Utrzymanie pożądanej prędkości

W większości dokumentów, jednym z pierwszych testów modelu jest sprawdzenie, czy model jest w stanie utrzymać pożądaną prędkość pieszego (np. ISO 1033/1238: test 1, 2, 3, NIST Note 1822: test



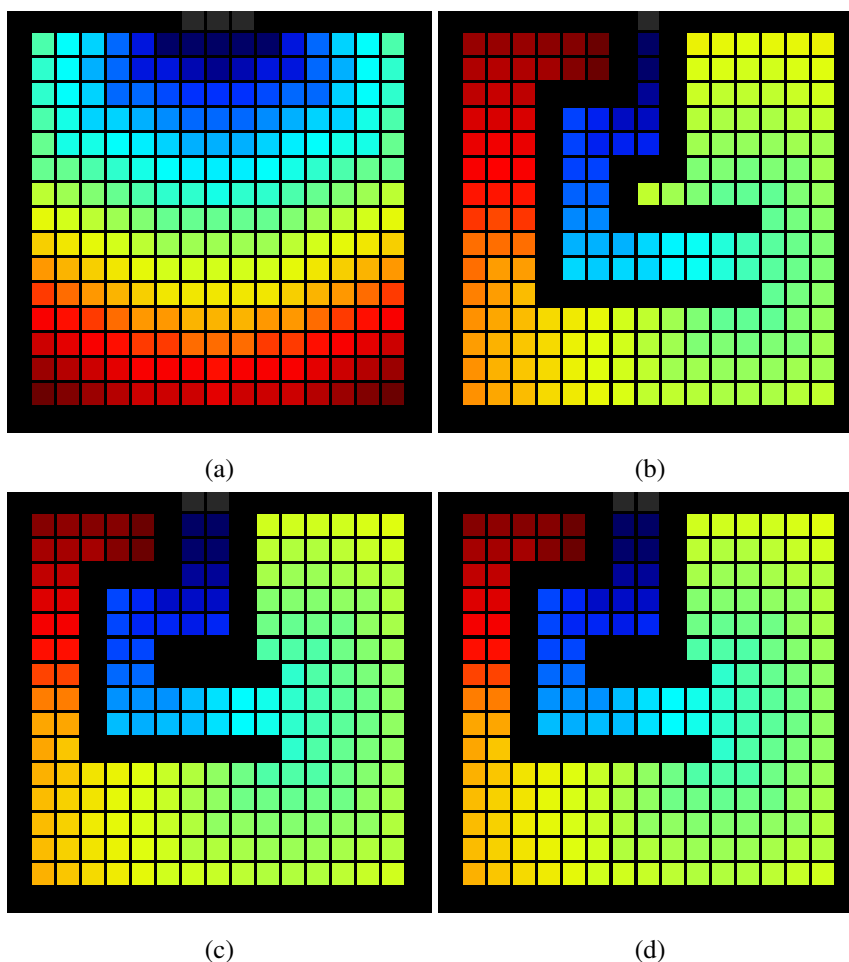
**Rys. 4.2.** Uproszczony plan pomieszczenia z „cienkimi” przeszkodami - barierami o szerokości 5 cm. Takie rozwiązania są często spotykane na lotniskach, stacjach kolejowych itd. Przedstawiono również podstawową siatkę symulacyjną.

2.1, 2.2). W przypadku modeli o drobnej siatce (głównie modele oparte na CA) na wyniki może mieć duży wpływ rotacja siatki. Dokument NIST Note 1822 tylko wspomina o tym problemie. Prosty przykład różnic w trajektoriach pieszych spowodowanych jedynie zmianami orientacji siatki pokazano na Rys. 4.4.

Ponadto, ze względu na dyskretną przestrzeń w modelach opartych na CA niektóre wartości prędkości, czasu i pozycji nie są dostępne. Oczekiwane wyniki przedstawionego testu powinny być podane jako zakres zaakceptowanych wartości, a nie przedstawienie dokładnych wartości.

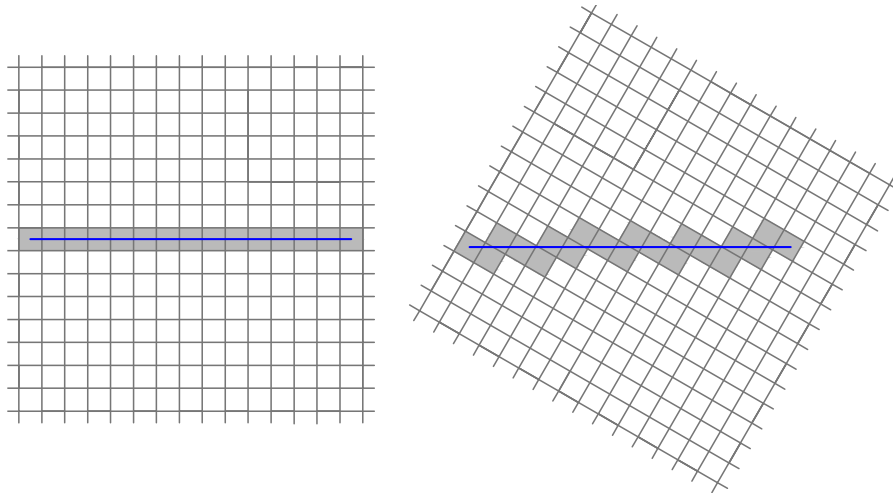
#### 4.1.5. Niepełnosprawni piesi

Ważną kwestią, która wzbudza coraz większe zainteresowanie, jest reprezentacja osób niepełnosprawnych (wózków inwalidzkich) i ich wpływ na ogólne wyniki symulacji. Najbardziej popularne podejście polega na tym, że osoba niepełnosprawna posiada indywidualną charakterystykę ruchu (w praktyce ruch takiej osoba jest nieco wolniejszy i osoba taka potrzebuje więcej miejsca niż typowy pieszy [49]).



**Rys. 4.3.** Cztery podejścia do budowy geometrii wejściowej i statycznego pola potencjału na podstawie geometrii pokazanej na Rys.4.2. Na 4.3a - komórka jest oznaczona jako przeszkoda tylko wtedy, gdy ponad 50% jej powierzchni na planie jest pokryta przeszkodami, 4.3b - komórka jest oznaczona jako przeszkoda, jeśli jej powierzchnia zawiera przeszkodę - ręcznie zmieniono geometrię wejściową, aby uzyskać odpowiednią szerokość korytarza, 4.3d - „cienkie” przeszkody wpływają tylko na statyczne pole potencjału. Wymaga to również dodatkowych zasad ręcznej interwencji w celu dostosowania właściwej szerokości korytarza.

Oba te wymagania są trudne do uzyskania w modelach opartych na CA. Szczególnie problematyczny jest fakt, że osoby niepełnosprawne na wózkach inwalidzkich powinny zajmować więcej niż jedną komórkę. Symulacje, w których piesi mają różne rozmiary, są niemożliwe do zamodelowania przy użyciu podstawowych modeli CA (gdzie pieszy jest reprezentowany jako stan pojedynczej komórki o wymiarach 40 cm x 40 cm). Jednak modele CA z lepszą reprezentacją pieszych [34] są w stanie reprezentować niepełnosprawnych pieszych. Taki agent jest nadal przypisany do pojedynczej komórki, modyfikując przy tym lokalne reguły dla sąsiedztwa. Jednocześnie należy podkreślić, że niewielkie różnice w prędkości są trudne do uzyskania w modelach CA.



**Rys. 4.4.** Wpływ orientacji siatki na ścieżkę ruchu pieszego. Oczekuje się, że pieszy będzie miał podobny czas ruchu w różnych orientacjach siatki, jednak dyskretna siatka prowadzi do znacznych zniekształceń w izotropii ruchu.

#### 4.1.6. Efekty zbiorowe

W prawdziwym świecie można obserwować dużą różnorodność zjawisk samoorganizacji. Każdy model dynamiki pieszych, w tym oparty na CA, powinien odtworzyć te efekty. Fakt ten może być podstawą do zestawu testów weryfikacyjnych, jeżeli tylko można te zjawiska wykryć/zmierzyć w solidny i powtarzalny sposób.

- *Zatłoczenie (ang. Jamming)* - Zwykle występuje przy wysokiej gęstości tłumu w miejscach, gdzie pojemność jest zmniejszona (wąskie gardła). Zjawisko to wynika z faktu, że przestrzeń może zajmować jeden agent na raz. Z obserwacji wynika, że zakleszczenia przed wąskim gardłem przyjmują kształt kropki lub klina. Drugi rodzaj tego efektu pojawia się w sytuacjach przeciwnapływowych (ang. counter flow), w których napór z obydwu kierunków powoduje zablokowanie. W modelach opartych na CA taką sytuację można wykryć, obliczając lokalny odsetek pieszych, którzy nie zmieniają swojej obecnej komórki. Zatłoczenie powinno pojawiać się powtarzalnie w określonych okolicznościach.
- *Formowanie się linii przepływu* - w przepływie przeciwnapływowym, gdy dwie grupy pieszych poruszają się w przeciwnych kierunkach, tworzone są jednorodne strugi (linie) dla tych osób, które poruszają się w tym samym kierunku. Liczba linii ruchu nie jest stała, zmienia się w czasie i zależy od szerokości przepływu. Niektóre ilościowe dane empiryczne i konfiguracje eksperymentalne można znaleźć w [50]. Poszczególne ścieżki osób poruszających się w tym samym kierunku można zidentyfikować poprzez grupowanie pieszych w oparciu o ich kierunek ruchu. Należy jednak zauważyć, że rozróżnienie między liniami przepływu i między zwykłymi grupami musi być bardzo dokładne, aby test był wiarygodny. Odtwarzanie linii przepływu w modelach CA jest dość łatwe, ale należy mieć na uwadze kwestie dyskretyzacji.

- *Fale gęstości* - (fale „stop-and-go”) - zwykle występują one w bardzo zatłoczonym korytarzu - przy gęstości bliskiej całkowitemu brakowi ruchu. W [51] autorzy ilościowo i jakościowo porównują trajektorie pieszych z dwóch empirycznych eksperymentów z danymi symulacyjnymi poszukując wystąpienia fali „stop-and-go”. Dodatkowo możemy skorzystać z testu *Verif.2.1. Speed in a corridor* z [49] z niewielkimi modyfikacjami - równomiernie rozproszeni piesi o wysokiej gęstości do  $7 \frac{P}{m^2}$  poruszający się w tym samym kierunku. Jak zauważono w [51], gdy taka sytuacja występuje, rozkład prędkości nie jest zgodny z rozkładem jednomodalnym, ale raczej dwumodalnym, co można łatwo wykorzystać jako kryterium testu weryfikacyjnego.
- *Oscylacje* - w przepływach przeciwnych w wąskich gardłach, np. drzwi, czasami można zaobserwować zmiany oscylacyjne w kierunku ruchu. Taką obserwację zamieszczono w teście *Verif.2.8. Horizontal counter-flows (rooms)* z [49]. Taki efekt można łatwo skwantyzować, wyliczając kierunek ruchu i wykrywając stabilne zmiany między naprzemiennymi fazami.
- *Efekt mrożenia przez ogrzewanie* (ang. *Freezing-by-heating effect* - przy wystarczająco wysokiej gęstości tłumu i w ekstremalnych warunkach linie przepływu pieszych są zakłócone przez fluktuacje. Prowadzi to do powstawania blokad, które mogą mieć regularną strukturę [23]. Test *Verif.2.8. Horizontal counter-flows (rooms)* poddany modyfikacji, może być wykorzystywany do obserwacji tego efektu, np. w sytuacji, gdy w każdym pokoju znajduje się 100 pieszych, którzy przemieszczają się do przeciwnego pokoju. W przypadku klasycznego modelu opartego na CA może nastąpić całkowita blokada i bez zmian w funkcji przejścia blokada będzie trwała.

#### 4.1.7. Testy weryfikacyjne opisane w literaturze wraz z propozycjami modyfikacji

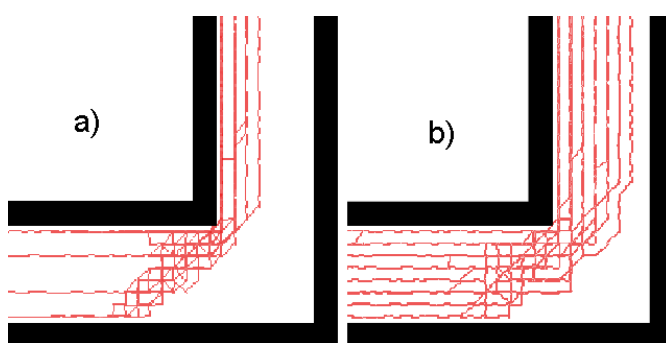
Testy weryfikacyjne obejmują: czasy ewakuacji pieszych, ruch i nawigację, wybór wyjścia, dostępność trasy i ograniczenia przepływu. Poniżej znajduje opis, analiza i komentarze autora testów z [49] oraz propozycje modyfikacji czy rozszerzenia testów.

**1.1 Dystrybucja czasów rozpoczęcia ewakuacji (ang. Pre-evacuation time distribution)** test weryfikuje zdolność modelu do przypisania pieszym czasów rozpoczęcia ewakuacji według zadanego rozkładu prawdopodobieństwa.

**2.1 Prędkość w korytarzu (ang. Speed in corridor) i 2.2 Prędkość na schodach (ang. Speed on stairs)** badają zdolność pieszych do zachowania pożądanej prędkości ( $1 \frac{m}{s}$ ) na 40m odcinku korytarza i 100m odcinku schodów. Modele dyskretne ze względu na dyskretną siatkę mogą mieć trudności z tym testem w przypadku, gdy korytarz czy schody są w orientacji  $45^\circ$  względem siatki. Ponieważ większość modeli dynamiki tłumu stosuje inną metodę radzenia sobie z możliwymi systematycznymi błędami powodowanymi przez rozmiar i orientację siatki, autor proponuje przeprowadzenie testu dla bardziej szczegółowego spektrum kątów. Należy również zauważyć, że nie wszystkie modele CA umożliwiają zamodelowanie prędkość równej dokładnie  $1 \frac{m}{s}$ . W podstawowych modelach dynamiki tłumu opartych na CA z sąsiedztwem Moore’a, gdzie nie obsłużono poprawnie ruchu pod kątem  $45^\circ$  propozycja rozwinięcia testu spowoduje natychmiastową identyfikację problemu. Ponadto ze względu na

możliwy systematyczny błąd spowodowany dyskretyzacją przestrzeni, nawet zaawansowane modele CA pod pewnymi kątami nie będą w stanie uzyskać dokładnego czasu przejścia korytarza czy schodów (40 lub 100 sekund). W związku z tym uzasadnione jest weryfikowanie wyników w zakresie akceptowalnego przedziału.

**2.3 Ruch w okolicy kątów/rogów (ang. Movement around a corner)** - w tym teście piesi powinni poruszać się po zakręcie bez penetrowania ścian. Reguły ruchu w modelach CA opierają się na dozwolonych/zabronionych stanach, w związku z czym penetracja granic jest niemożliwa z powodu tego podstawowego mechanizmu. Rozszerzenie tego testu może polegać na zbadaniu czy dostępna przestrzeń do ruchu jest optymalnie wykorzystana (preferencja najkrótszej lub najszybszej ścieżki) poprzez analizę macierzy odwiedzin - zob. 4.5).



**Rys. 4.5.** Trajektorie dwudziestu pieszych wskazujące na brak penetracji przeszkód. Wykorzystanie przestrzeni zależy od preferencji pieszych najkrótszych lub najszybszych ścieżki.

**2.4 Dane demograficzne uczestników (ang. Assigned occupant demographics)** weryfikuje zdolność modelu do przypisywania parametrów demograficznych. Ten test jest bardzo podobny do testu 1.1.

**2.5 Ograniczenie widoczności vs. prędkość ruchu (ang. Reduced visibility vs. walking speed)** oraz **2.6 Ubezpieczeniowanie uczestnika (ang. Occupant incapacitation)** są przeznaczone do weryfikacji jak dym wpływa na ruch pieszy. Należy podkreślić, że taka funkcjonalność jest dostępna w modelach opartych na CA poprzez wykorzystanie określonych funkcji przejścia, np. w [52]. W analogiczny sposób można implementować **2.7 Użycie wind (ang. Elevator usage)** w modelach opartych na CA.

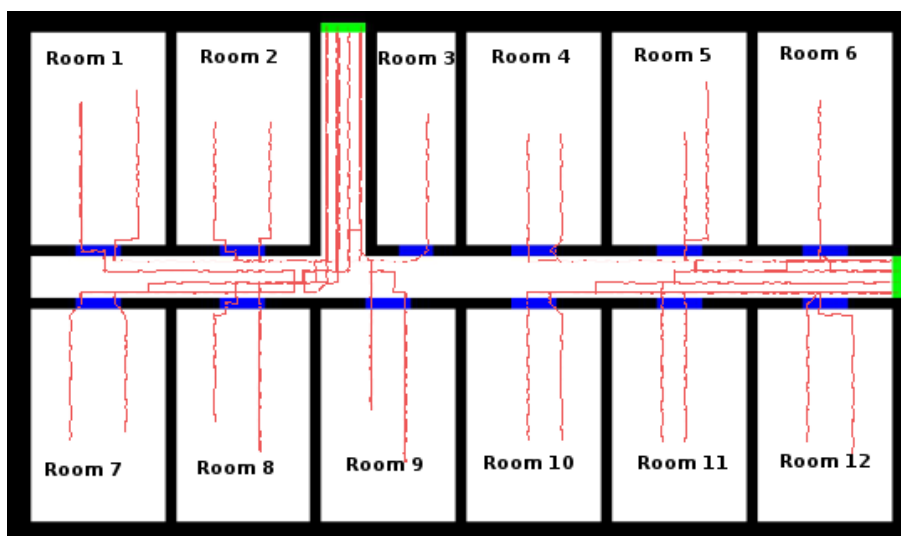
**2.8 Horyzontalny przeciuprądowy przepływ w pokoju (ang. Horizontal counter-flows (rooms))** weryfikuje, czy model jest w stanie symulować przeciuprąd i jego wpływ na czas ewakuacji. W kryteriach testu jest podane tylko wymaganie dotyczące czasu przejścia - powinien spadać wraz z wzrostem liczby pieszych biorących udział w teście. Autor proponuje rozszerzyć oczekiwane wyniki, aby uwzględnić zjawiska powstawania pasów/linii ruchu i bardziej szczegółowe oczekiwania dotyczące zmian czasu przejścia (na przykład na podstawie badań T. Kretza i wsp. [50]).

**2.9 Zachowanie grup (ang. Group Behaviors)** sprawdza, czy model implementuje zachowanie grupowe, a mianowicie czy mała grupa jest w stanie poczekać na znacznie wolniejszego członka. Cała grupa musi wyjść z pokoju, z zachowaniem różnicy czasów między pierwszym, a ostatnim członkiem grupy, mniejszej niż dany próg.



Weryfikacja zdolności modelu do symulacji wpływu osób niepełnosprawnych jest objęta testem **2.10 Osoby z niepełnosprawnością ruchową**. W tym teście pieszy powinien przemieszczać się z jednego pomieszczenia do drugiego, z udziałem i bez obecności osoby niepełnosprawnej znajdującej się bezpośrednio przed wyjściem. Oczekiwany wynik jest taki, że ewakuacja z udziałem osoby niepełnosprawnej ma zajmować więcej czasu. Ze względu na dyskretny charakter modeli opartych na CA reprezentacja osób niepełnosprawnych korzystających z wózków inwalidzkich może być problematyczna, ponieważ taka osoba może zajmować pewną liczbę komórek lub być reprezentowana przez zbyt małą komórkę. Jednak w przypadku osób korzystających z wózków inwalidzkich należy wziąć pod uwagę, że reprezentacja geometryczna takiej osoby jest inna, ze względu na to, że w klasycznych modelach CA rozmiar osoby jest równy rozmiarowi komórki 40 cm, dlatego autor zwraca uwagę, że w klasycznych modelach opartych na CA ten test jest problematyczny.

**3.1 Opcja wyboru wyjścia** sugeruje weryfikację deterministycznego przypisania wyjść. Piesi powinni opuścić obszar symulacji przydzielonym wyjściem. Należy zauważyć, że wiele modeli symulacyjnych oblicza przypisanie wyjścia (w zależności od odległości, gęstości, prędkości przemieszczania itp.), Zamiast używać deterministycznego przypisania - przykładowe przypisanie wygenerowane przez rozwijany przez autora Social Distances Model (SDM) jest pokazane na Rys. 4.6.



**Rys. 4.6.** Wybór wyjścia określony w modelu Social Distances, można zauważyć, że obliczony (najkrótszy dystans) wybór wyjścia z pomieszczeń 4 i 10 różni się od oczekiwanych wyników testu.

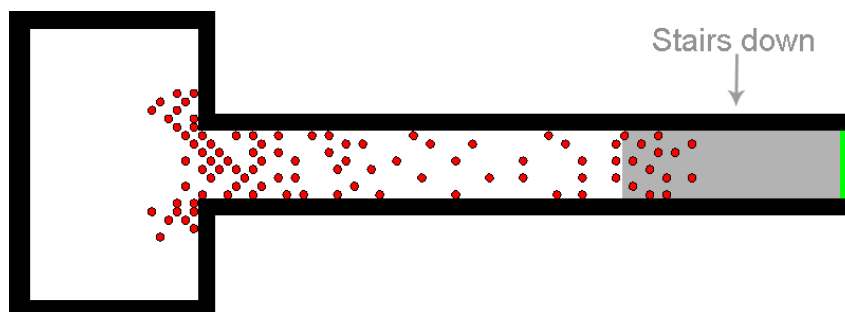
**3.2 Wpływ społeczny** sprawdza, czy pieszy ma szansę na podążanie za innymi, tj. wybierze to samo wyjście. Bardzo często wybór wyjścia jest oddzielony od algorytmu ruchu, dlatego wybór tego samego wyjścia może być całkowicie nieskorelowane z wpływem społecznym. W przypadku modeli CA wyniki tego testu mogą zależeć od szczegółów algorytmu ruchu, np. dynamiczne pole przedstawione przez Nishinari i in. [52] może narzucić pieszym podążanie za innymi, podczas gdy pole dynamiczne w modelu

SDM [34] będzie zachęcać pieszych do unikania podążania za innymi w najbliższym sąsiedztwie (z uwagi na precyzyjniejszą reprezentację przestrzeni).

**3.3 Afiliacja** sprawdza, czy model implementuje powiązanie pieszych z wybranym wyjściem. Autor uważa, że taka cecha wynikająca z podejścia kognitywnego jest cenna.

**4.1 Dynamiczna dostępność wyjść** sprawdza, czy pieszy jest w stanie zmienić wybrane wyjście, gdy jedno wyjście stanie się niedostępne (zamknięte). Od pieszych oczekuje się, że nie spróbują wyjść przez zamknięte drzwi.

**5.1. Zatłoczenie** weryfikuje, czy model jest w stanie odtworzyć kontrolowane zatłoczenie, korzystając z przykładu klatki schodowej. Zatłoczenie jest oczekiwane przy wyjściu z pokoju i u podstawy schodów. Przykładowe wyniki tego eksperymentu pokazano na rysunku Rys. 4.7.



**Rys. 4.7.** Geometria testu. Piesi znajdują się początkowo w pomieszczeniu, podczas symulacji przechodzą przez korytarz do klatki schodowej. Należy spodziewać się zatorów przy wyjściu z pokoju i u podstawy schodów.

**W 5.2. Maksymalne natężenie przepływu** - piesi powinni opuścić pomieszczenie jednym wyjściem o szerokości  $1m$ , aby sprawdzić, czy symulowany przepływ nie przekracza określonego progu (zalecane:  $1,33$  osoby na metr na sekundę). Rodzi to następujące pytanie: dlaczego testowany jest tylko przepływ maksymalny? Autor sugeruje zweryfikowanie bardziej złożonych parametrów, takich jak diagram fundamentalny, ponieważ opisują one bardziej szczegółowo ruch pieszych.

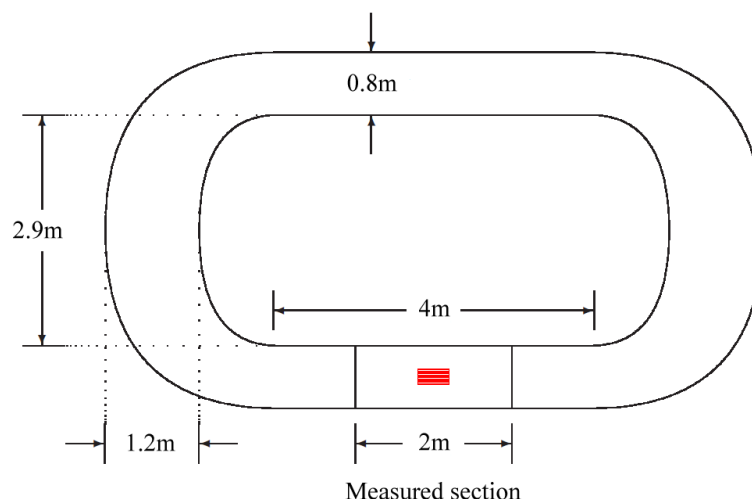
## 4.2. Rozszerzenie zestawu testów weryfikacyjnych i propozycja nowych testów

Proces weryfikacji i walidacji (V&V) jest bardzo ważnym etapem w procesie rozwoju i ocenie niezawodności modeli dynamiki pieszych. Weryfikację łatwo jest przeprowadzić, stosując liczne (czasami „sztuczne”) przypadki testowe, jednak proces walidacji opiera się głównie na danych eksperymentalnych/empirycznych. Autor twierdzi, że test weryfikacyjny powinien być jak najbardziej podobny do warunków w jakich przeprowadzane były eksperymenty.

### 4.2.1. Relacja gęstości do prędkości

Sugerowany test mierzy stosunek gęstości do prędkości dla ruchu w pojedynczej strudze (gęsiego). Pomysł został zaczerpnięty z [53]. Ponadto dane empiryczne są dostępne do walidacji. Ten test weryfikacji i walidacji jest odpowiedni do zweryfikowania, czy modele mikroskopowe są w stanie odtworzyć empiryczną zależność między prędkością i gęstością w prostej geometrii. Metodą testową jest ilościowa ocena wyników modelu, tj. porównanie wyników uzyskanych przez model z danymi empirycznymi.

**Geometria:** Geometria tego testu przedstawiona jest na Rys. 4.8



**Rys. 4.8.** Geometria proponowanego testu badającego stosunek prędkości do gęstości.

**Scenariusz:** Do osiągnięcia zróżnicowanych gęstości, można wykonać warianty testu z 15, 20, 25, 34 pieszymi. Piesi są równomiernie rozmieszczeni w korytarzu. Piesi trzykrotnie okrążają korytarz unikając przy tym wyprzedzania innych pieszych.

**Oczekiwany wynik:** Zmierzona prędkość pojedynczego pieszego powinna się zmniejszać (liniowo) wraz ze wzrostem gęstości, patrz Rys. 4.9.

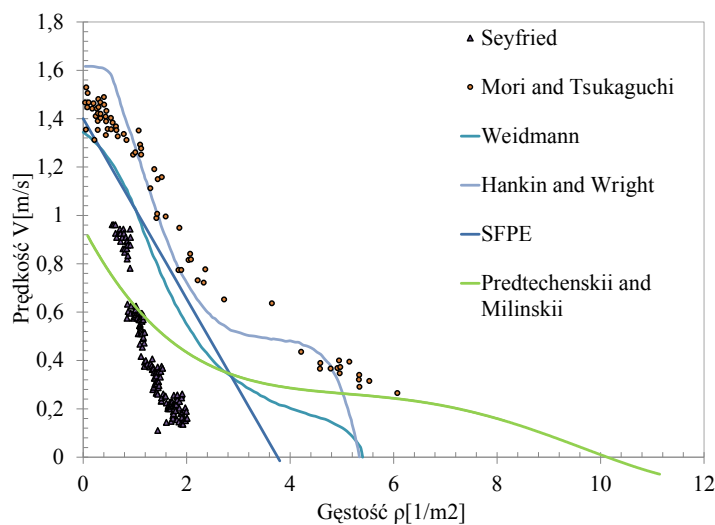
### 4.2.2. Spójność grup

Poniższy test ma na celu sprawdzenie zdolności modelu do zachowania spójności grupy. W sytuacji więcej niż jednego dostępnego rozwiązania, wszystkie grupy pieszych wybierają zwykle tę samą ścieżkę.

**Geometria:** Szczegóły geometrii testu przedstawiono na Rys. 4.10.

**Scenariusz:** Grupa 12 osób znajduje się na początku korytarza, powinna przejść do wyjścia. Prędkość pieszych i czas rozpoczęcia ruchu, opisane szerzej w [57] (ang. pre-movement time) należy przypisać za pomocą wybranej dystrybucji. Użytkownicy nie mają żadnych powiązań z określoną ścieżką. W grupie nie ma lidera.

**Oczekiwane wyniki:** Wszyscy członkowie grupy powinni wybrać jedną ścieżkę do wyjścia. Co więcej, podobnie jak w teście 2.9 powinni dotrzeć do wyjścia razem w określonym przedziale czasowym pomiędzy pierwszym i ostatnim pieszym.



**Rys. 4.9.** Diagram fundamentalny ruchu pieszych na płaskich powierzchniach z danymi empirycznymi wg. SFPE Handbook [54], [3], [55], [53], [56].

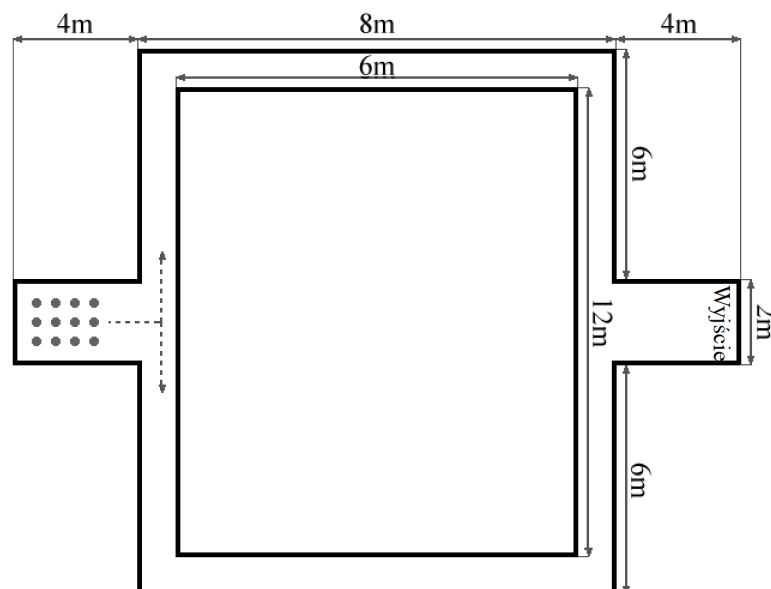
### 4.2.3. Błędy dyskretyzacji

Istnieje ogromna grupa modeli dynamiki tłumu, które wykorzystują dyskretyzację przestrzeni. Takie podejście ma wiele zalet wiążących się z wydajnością takiego modelu czy klarownością reguł ruchu. Jednak takie podejście ma swoje wady, jedną z podstawowych wad są nieuchronne błędy dyskretyzacji, które mogą wpływać na symulowane parametry tłumu. Ten test jest przeznaczony do dyskretnej metody sprawdzania, w jaki sposób dyskretyzacja wpływa na przepływ pieszych.

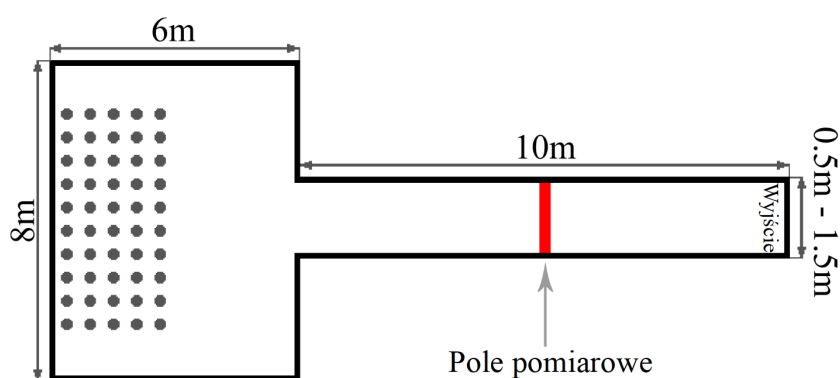
**Geometria:** Pokój o powierzchni  $6m$  na  $8m$  połączony z korytarzem o długości  $10m$ . Drzwi do korytarza znajdują się pośrodku jednej ze ścian. W kolejnych próbach eksperymentu szerokość korytarza wzrasta o  $10cm$  z  $0,5m$  do  $1,5m$ . Szczegóły geometrii testu przedstawiono na Rys. 4.11

**Scenariusz:** W pomieszczeniu jest 50 osób. Prędkość pieszych należy przypisać przy użyciu wybranego rozkładu prawdopodobieństwa a czas rozpoczęcia wyjścia ustawiony ma 0. Wszyscy piesi powinni opuścić pokój i korytarz przez wyjście na końcu korytarza.

**Oczekiwane wyniki:** Przepływ ruchu pieszych pośrodku korytarza powinien wzrastać liniowo wraz ze wzrostem szerokości korytarza, jak pokazano w [58]. Błąd dyskretyzacji może zaburzyć ten liniowy wzrost - dlatego autor proponuje liniowy współczynnik korelacji pomiędzy przepływami w kolejnych przebiegach eksperymentów jako prostą metodę pomiaru wpływu błędu dyskretyzacji na przepływ pieszych.



Rys. 4.10. Układ geometrii proponowanego testu koherencji grupy.



Rys. 4.11. Geometria pomieszczenia proponowanego testu błędów dyskretyzacji.

### 4.3. Diagram Fundamentalny w walidacji ilościowej modeli opartych na automatach komórkowych

Brak odpowiedniej korelacji pomiędzy przepływem pieszych, a gęstością pieszych jest traktowany jako poważny błąd w procesie modelowania dynamiki tłumu. Z tego powodu, poprawna walidacja modelu musi zawierać ocenę wiarygodności poprzez analizę diagramu fundamentalnego.

W celu oceny niezawodności modeli dynamiki tłumu w kategorii analizy bezpieczeństwa wymagane są specjalnie zaprojektowane zestawy testów i dane empiryczne do porównania z danymi zebranymi podczas prób symulacyjnych. Jakościowa walidacja z użyciem diagramu fundamentalnego jest właściwa do weryfikacji czy modele mikroskopowe oparte na automatach komórkowych odpowiednio przedstawiają relacje pomiędzy prędkością przemieszczania się a gęstością tłumu. Istnieją pewne różnice pomiędzy

diagramami fundamentalnymi, jednakże wszystkie opracowania są zgodne co do monotonicznej relacji prędkości zgodnie ze wzrostem gęstości tłumu.

Ogólnie akceptowaną ideą jest zapamiętanie trajektorii ruchu w czasie różnych prób symulacyjnych, następnie skontrolowanie diagramu fundamentalnego i porównanie go z diagramami uzyskanymi z analizy danych pozyskanych empirycznie. W literaturze można znaleźć różnorodność eksperymentów przeprowadzonych w celu pozyskania relacji pomiędzy prędkością a gęstością [59]. Ważnym podkreślenia jest fakt iż, różne sposoby pomiaru powyższych wielkości nie pozostają bez wpływu na poszukiwaną relację [60]. Niemniej jednak, pomiar prędkości, gęstości i przepływu w symulacji powinien być przeprowadzony z użyciem tej samej metody, co w odpowiadającym im eksperymencie. Pomimo, że nie ma jednoznacznego konsensusu w kontekście kształtu krzywej opisującej relację gęstość-prędkość, badania niezawodności modeli powinny uwzględniać ten jakościowy sposób walidacji. Podstawowy model oparty na automatach komórkowych posiada symetrię diagramu fundamentalnego, w około połowie zakresu maksymalnej gęstości - jest to mało realistyczna relacja. Bardziej skomplikowane zasady przejścia w modelu prowadzą do odwzorowania krzywej Weidmannna z wystarczającą dokładnością.

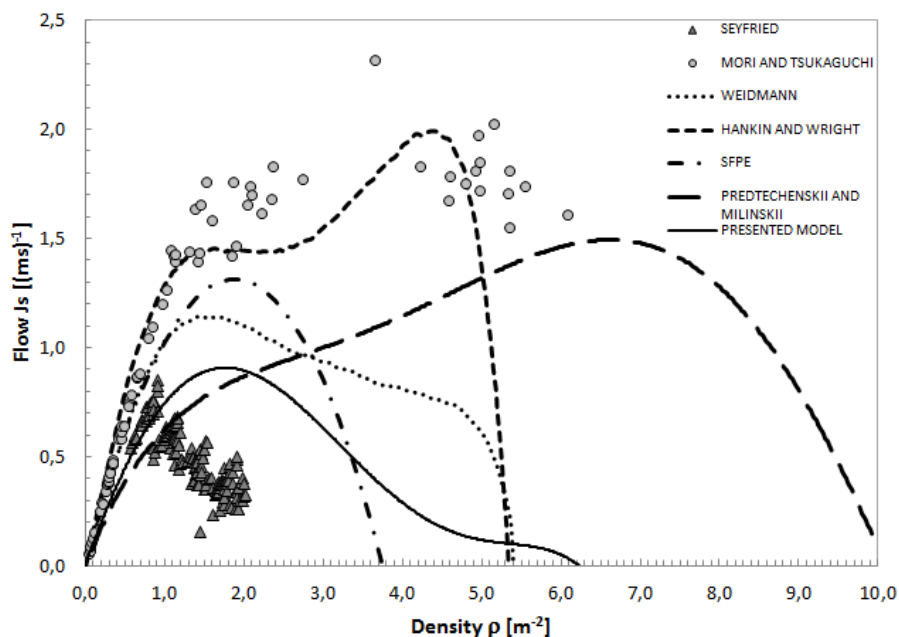
Kluczowym elementem w tworzeniu modeli dynamiki pieszych jest ich walidacja. Bardzo ważnym elementem walidacji jest weryfikacja zależności pomiędzy przepływem pieszych, a ich gęstością [28]. Należy podkreślić, że proponowana eliptyczna reprezentacja pieszych (wykorzystująca różne poziomy ściśliwości) umożliwia precyzyjniejsze odwzorowanie fluktuacji gęstości niż „klasyczna” reprezentacja CA. Przedstawiony model został przetestowany w kilku scenariuszach o różnych parametrach w porównaniu z danymi bibliograficznymi. Przykładowy diagram fundamentalny przedstawiony jest na Rys. 4.12, gdzie linia ciągła przedstawia zależność pomiędzy przepływem właściwym a gęstością. Należy zauważyć, że krzywa wyników prezentowanego modelu jest podobna do linii Weidmannna (reprezentowanej jako linia przerywana).

#### 4.3.1. Walidacja ilościowa z danymi empirycznymi

W tej sekcji zostanie przeprowadzona referencyjna walidacja ilościowa z danymi empirycznymi. Dodatkowo, autor publikacji [61] porównuje model rozwijany przez autora tej pracy z danymi pochodzącymi z eksperymentu.

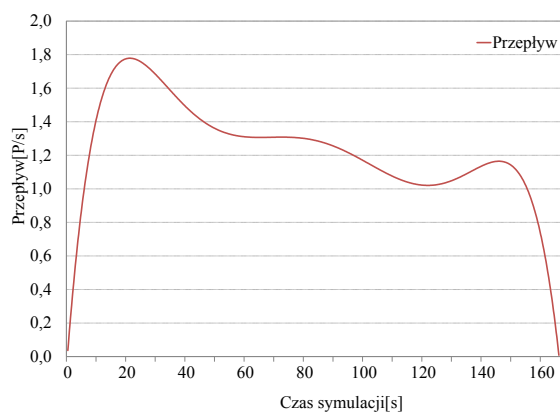
Walidacji zostaną poddane trzy modele dynamiki pieszych: model makroskopowy, uogólniony model siły odśrodkowej (ciągły) oraz model rozwijany przez autora. Powyższe modele zostały porównane z prawdziwym przypadkiem testowym. W sali wykładowej o pojemności 240 osób przeprowadzono eksperymentalną ewakuację około 210 studentów. Eksperyment przeprowadzono w normalnym warunkach, uczestnicy byli poinformowani o odbywających się ćwiczeniach ewakuacyjnych. Eksperyment został nagrany kamerami wideo, następnie nagrania zostały poddane analizie.

Rysunek 4.17 pokazuje uproszczony plan sali wykładowej, czyli lokalizację wszystkich przeprowadzonych symulacji. Na sali jest 15 rzędów po 16 miejsc każdy. Szare miejsca wskazują miejsca niedostępne dla pieszych. Podczas eksperymentu otwarto tylko połowę jednych drzwi ewakuacyjnych.

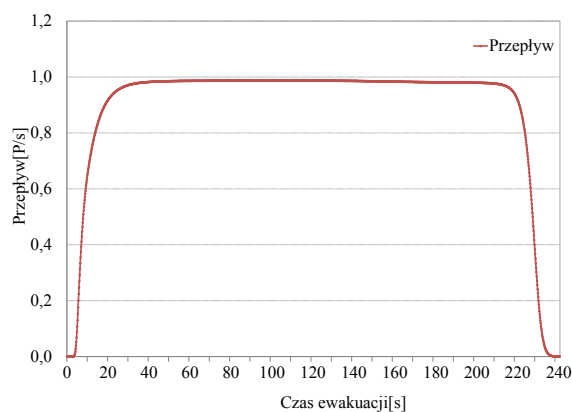


**Rys. 4.12.** Diagram fundamentalny prezentowanego modelu w porównaniu z innymi diagramami: Podręcznik SFPE, Predtechenskii & Milinskii, Weidmann, Hankin & Wright, Seyfried, Mori & Tskuguchi.

Całkowity czas ewakuacji wyniósł 162 sekundy. Najwyższy zaobserwowany przepływ nieznacznie przekracza 2.5 osoby na sekundę. Jednak średnio wynosi tylko 1.35 osoby na sekundę. Rys. 4.13 reprezentuje obserwowany wypływ osób<sup>1</sup>. Linia trendu pokazuje, że na początku przepływ osiąga średni poziom 1.7, ale wraz ze wzrostem gęstości tłumu przepływ spada do około 1.2 osoby na sekundę.



**Rys. 4.13.** Rzeczywiste dane - statystyki przepływu pieszych mierzone w eksperymencie.

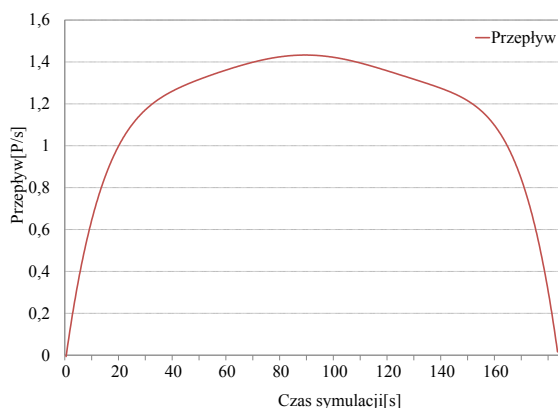


**Rys. 4.14.** Model makroskopowy - statystyki wypływu pieszych zebrane podczas symulacji.

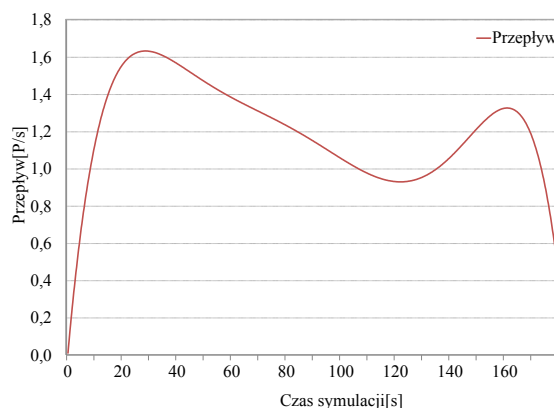
<sup>1</sup>W celu redukcji szumów wysokiej częstotliwości, wartość dla danej sekundy  $N$  jest obliczana jako średnia danych dla sekund  $N - 1$ ,  $N$  i  $N + 1$ .

Kolejną ważną obserwacją są znaczne oscylacje przepływu o średniej amplitudzie 1.3 i okresie 8–10 sek. Zjawisko to jest spowodowane tworzeniem fal gęstszego i rzadszego tłumu.

Dane przepływu z doświadczenia porównano z analogicznymi danymi przepływu uzyskanego z: makroskopowego modelu Rys. 4.14, modelu centrifugal Rys. 4.15 i modelu Social Distances rozwijanego przez autora Rys. 4.16. Maksymalne podobieństwo funkcji przepływu w porównaniu z rzeczywistymi danymi zaobserwowano dla modelu Social Distances i nieco mniejszym podobieństwem w uogólnionym modelu siły odśrodkowej. W modelu makroskopowym podobieństwo funkcji przepływu było najniższe w porównaniu do danych eksperymentalnych.



**Rys. 4.15.** Model siły odśrodkowej - statystyki przepływu ludzi.

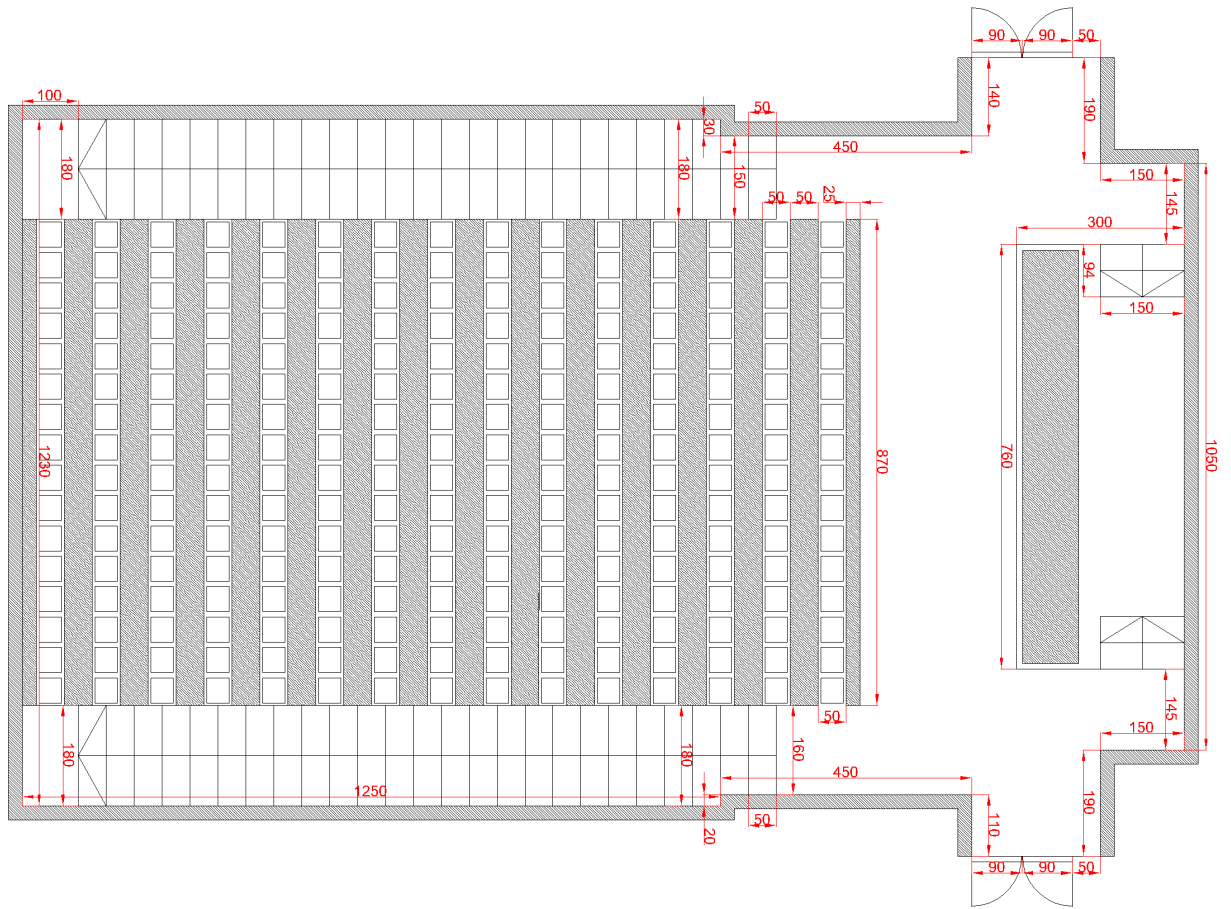


**Rys. 4.16.** Social Distance Model - statystyki przepływu ludzi.

Analiza linii trendu <sup>2</sup> pokazuje ogólną tendencję zmian wpływów. Dane eksperymentalne wahają się od 1.7 do 1.2, wraz ze wzrostem gęstości tłumu. Podobne zjawisko można zaobserwować w modelu Social Distances. Chociaż w tej metodzie przepływ mieści się w zakresie 1.6 - 1.0, można zaobserwować ogólną tendencję, że przepływ zmniejsza się w czasie. Podobieństwo wyników symulacji z danymi empirycznymi dla modelu rozwijanego przez autora dowodzi poprawności przeprowadzonego procesu modelowania i implementacji. Inne metody, model siły odśrodkowej i podejście makroskopowe, nie wykazują tendencji spadku przepływu w czasie.

<sup>2</sup>Linia trendu została obliczona wielomianem 5 stopnia.





Rys. 4.17. Rzut sali wykładowej.



## 5. Praktyczna implementacja metodologii dynamiki tłumu

### 5.1. Symulator ruchu pieszych

Ta sekcja opisuje architekturę i najważniejsze części stworzonego przez autora symulatora ewakuacji pieszych. Zdaniem autora zaproponowaną architekturę można wykorzystać jako podstawę do opracowania profesjonalnych aplikacji. Następnie krótko opisano warstwę logiczną i danych, warstwę kontrolera i warstwę prezentacji.

#### 5.1.1. Architektura aplikacji

Opracowana przez autora aplikacja implementuje opisany w sekcji 3 model. Został zaprojektowany w oparciu o wielowarstwową architekturę [62]. Można wyróżnić w nim trzy typy warstw:

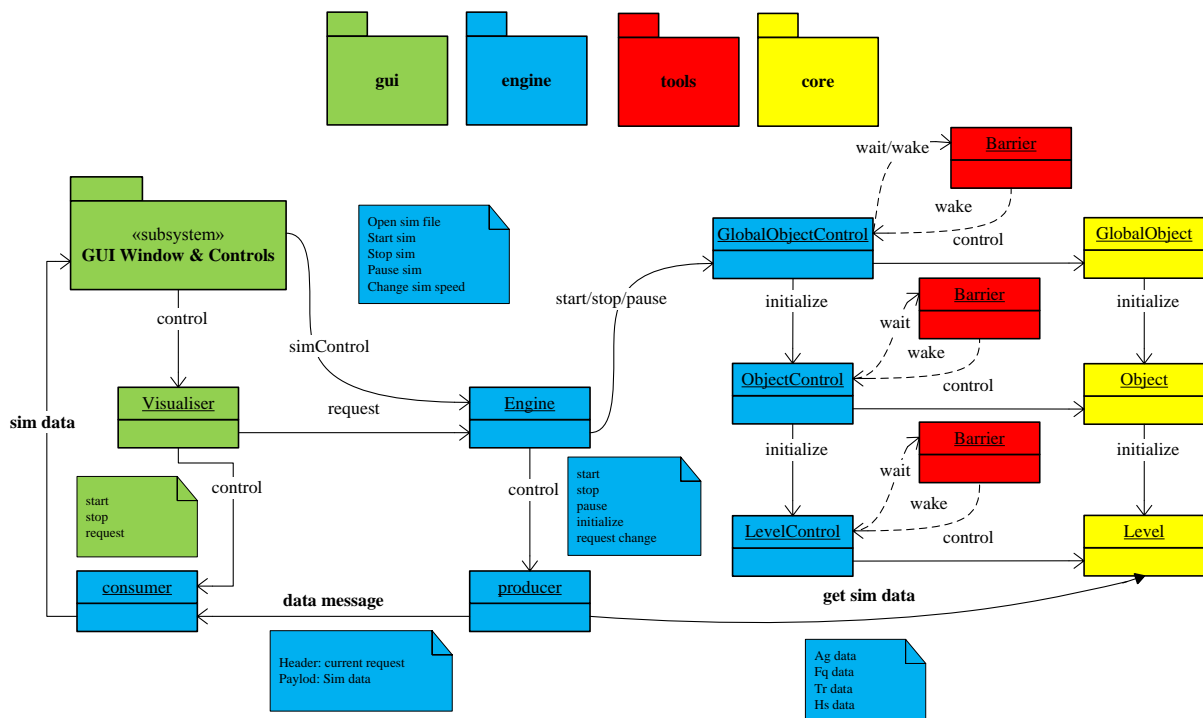
1. Warstwa logiki i danych - implementuje model dynamiki pieszych i przechowywanie danych – paczka *core*.
2. Warstwa kontrolera - obsługa żądań użytkownika i klas narzędziowych - paczka *engine* i *tools*.
3. Warstwa prezentacji - graficzny interfejs użytkownika, paczka *gui*.

Na rysunku Rys. 5.1 zostały zaprezentowane schematycznie pakiety aplikacji, w których komponenty są pogrupowane.

#### 5.1.2. Warstwa logiki i danych

Struktura logiczna modelu do symulacji ewakuacji pieszych składa się z: *Global Object*, *Objects* i *Levels* (np. Stadion, osobne trybuny i ich sekcje). Rozważmy przykład miejskiego stadionu Wisły Kraków, którego część - trybuna wschodnia została wykorzystana jako aplikacja proponowanego modelu do rzeczywistego przypadku. Ten stadion ma łącznie 4 trybuny (wschód, zachód, północ i południe), co odpowiada obiektom - *Objects*. Każda trybuna ma sekcje, które można traktować jako poziomy - *Levels*. Na koniec kompletny stadion Wisły Kraków reprezentowany jako *Global Object*, każda trybuna jest reprezentowana jako *Object* i każda sekcję trybuny jest reprezentowana jako *Level* - patrz Rys. 5.2a.

Taka struktura jest skalowalna i uwzględnia różne obiekty (np. stadiony piłkarskie, wieżowce, a nawet złożone obiekty). Minimalna i pełna implementacja modelu zawarta jest w strukturze *Level*. Wśród



Rys. 5.1. Ogólny schemat komponentów, który stanowi część architektury aplikacji.

najważniejszych komponentów w *Level* można wyróżnić: algorytm ruchu, statyczne i dynamiczne pole potencjału, układ geometrii i konfigurację symulacji. W rzeczywistości, każdy *Level* jest autonomiczną symulacją ze wszystkimi niezbędnymi strukturami danych i algorytmami.

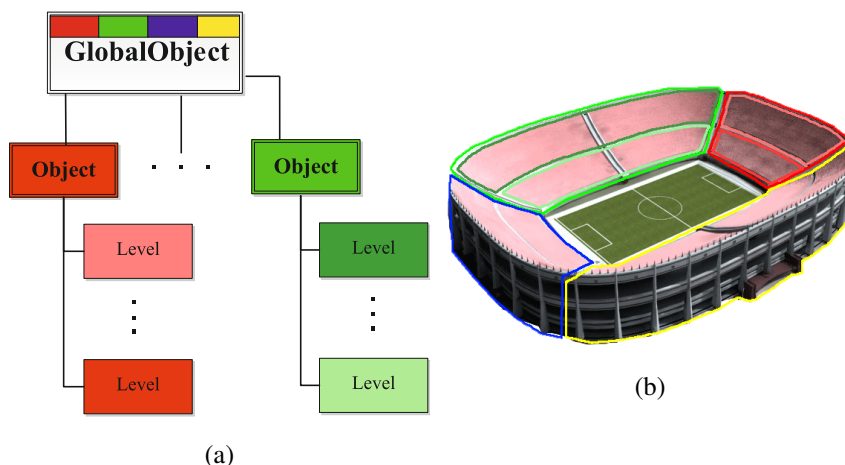
Styczne pole potencjału to trójwymiarowa struktura  $S[x][y][POIs]$ , która prowadzi pieszych do POI (Point of Interest) takich jak np. wybrane wyjście awaryjne. Styczne pole potencjału generowane jest dla każdego POI, więc gdy pieszy chce zmienić POI, po prostu zaczyna korzystać z pola statycznego, które odpowiada wybranemu POI.

Dynamiczne pole to dwuwymiarowa struktura  $D[x][y]$ , która zmienia się po każdym kroku symulacji. Dynamikę tej struktury opisują reguły dyfuzji i zaniku.

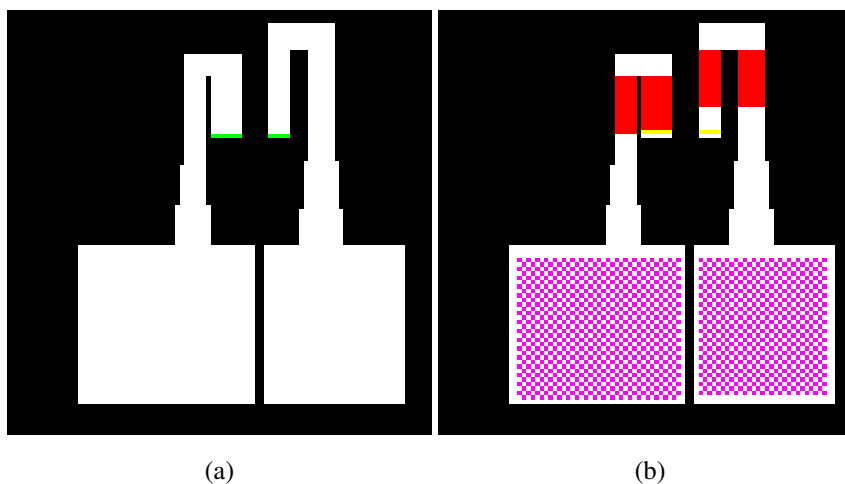
Układ geometrii to trójwymiarowa struktura z informacjami o dostępnej/niedostępnej przestrzeni, komórkach wolnych/zajętych, rozmieszczeniu punktów POI i parametrach, takich jak punkty startowe pieszych, redukcja prędkości (schody) i obszary pomiarowe. Układ ten powstaje dzięki analizie struktury dwóch plików wejściowych - patrz Rys. 5.3.

### 5.1.3. Warstwa kontrolera

Rosnące zapotrzebowanie na wielkoskalową symulację tłumy może zostać zapewnione poprzez właściwie zdefiniowaną architekturę wielowątkową. Każdy obiekt z warstwy logicznej i danych ma swój własny obiekt fasady, który odpowiada za komunikację z kontrolerem [63].



**Rys. 5.2.** Hierarchia obiektu w warstwie logicznej i danych 5.2a. Propozycja logicznego podziału stadionu piłkarskiego 5.2b. Odpowiednie kolory reprezentują typ obiektu.

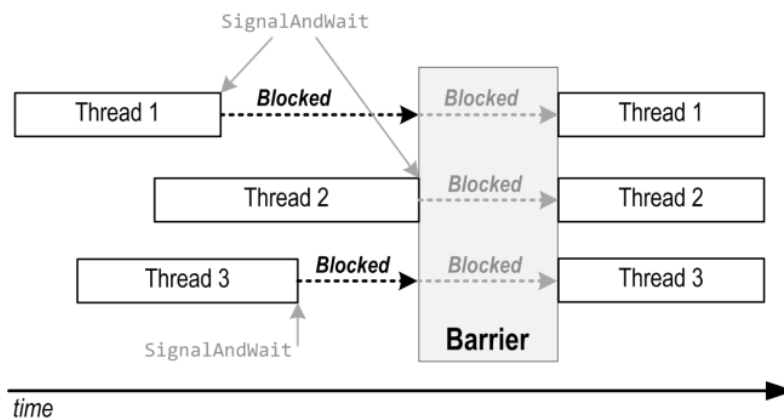


**Rys. 5.3.** Dwa pliki wejściowe używane do generowania układu geometrii. W polu wejściowym 5.3a kolor czarny oznacza niedostępną dla ruchu przestrzeń, biały dostępną dla ruchu przestrzeń i zieleń wskazuje cele pieszego. W polu wejściowym 5.3b kolor różowy oznacza punkt startowy pieszego, kolor czerwony to zmniejszenie prędkości (schody), a kolor żółty to obszar pomiarowy (np. czasu ewakuacji).

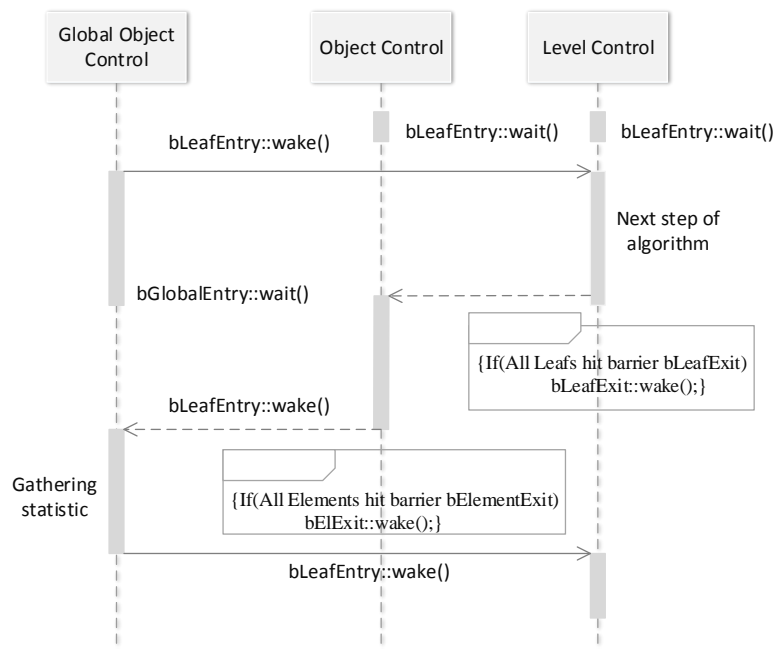
Aplikacje wielowątkowe i zrównoleglenie obliczeń wymaga dobrej synchronizacji obiektów fasad:

- **Level Control** – wątki odpowiedzialne za symulację na danych poziomach (np. jedno piętro w części budynku),
- **Object Control** – wątki odpowiedzialne za przepływ danych pomiędzy poziomami (np. całe sekcje budowlane lub trybuny stadionowe),
- **Global Control Object** – wątek kontrolujący całą symulację i zbierający wyniki.

Taki podział, w sposób skuteczniejszy, pozwala opracowywać rozwiązania. Obiekt fasady pośredniczy w wymianie danych między warstwą logiczną a warstwą kontrolera. Wszystkie obiekty fasady są uruchamiane w osobnym wątku i z oczywistych powodów wątki muszą być synchronizowane. Metoda synchronizacji wątku oparta jest na autorskiej implementacji wzorca projektowania synchronizacji - Bariera [64] (patrz Rys. 5.4) i zawiera pięć obiektów globalnej bariery pamięci: bariery wejściowe i wyjściowe dla obiektu *Level Control* i obiektu *Object Control* oraz jedna bariera dla *Global Object Control*.



Rys. 5.4. Synchronizacja wątków za pomocą wzorca bariery [65].



Rys. 5.5. Diagram sekwencji przedstawia kolejność wykonywania i synchronizację wątków w symulatorze.

Bariera wejściowa dla obiektu *Level Control* jest zwalniana bezpośrednio przez obiekt *Global Object Control*. Kiedy każdy obiekt *Level Control* zakończy swoje zadanie, zostają zwolnione dwa elementy: bariera wyjściowa obiektu *Level Control* i bariera wejściowa obiektu *Object Control*. Obiekt *Object Control* jest zatrzymany na swojej barierze wejściowej. Obiekt *Object Control* wykonuje przeniesienia pieszego pomiędzy poziomami, a następnie zatrzymuje się na barierze wyjściowej. Kiedy wszystkie obiekty *Object Control* zakończą swoje działanie, zwalniają swoją barierę wyjściową, a także barierę obiektu *Global Object Control*. Po zakończeniu wykonywania się obiektu *Global Object Control*, zwalnia się barierę wejściową obiektu *Level Control* i rozpoczyna nowa iteracja. Opisany powyżej mechanizm jest przedstawiony również na rysunku 5.5 w postaci diagramu sekwencji.

Kontroler odpowiada za realizację żądań użytkownika z warstwy prezentacji (np. start, stop, wstrzymanie lub zmiana bieżącego widoku). Ponadto koordynuje dostarczanie danych do warstwy prezentacji za pomocą dobrze znanego wzorca projektowego producenta i konsumenta.

Opisaną wyżej metodę synchronizacji można również zastosować do rozwiązań hybrydowych, które łączą ciągłe i dyskretne modele dynamiki pieszych. Aby zachować spójność takiego rozwiązania, czas symulacji we wszystkich metodach musi być zsynchronizowany. Przystosowanie metody synchronizacji do modelu hybrydowego polega na ponownym zdefiniowaniu zadań kontroli globalnej, obiektowej i kontroli poziomu, aby kontrolować całą symulację hybrydową. Umożliwia to zrealizowania przenoszenia pieszych z jednego typu modelu do innego oraz przeprowadzenie symulacji danego obszaru przy użyciu podanych modeli (zawartych w rozwiązaniu hybrydowym)<sup>1</sup>.

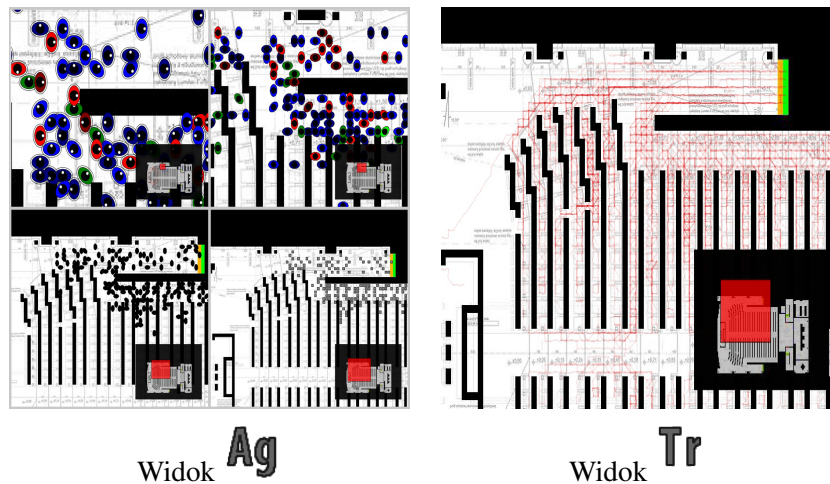
#### 5.1.4. Warstwa prezentacji

Warstwa składa się z elementów z paczki GUI i implementuje graficzny interfejs użytkownika - zawierający okna dialogowe, przyciski i widżety. Warto zauważyć, że wizualizacja wyników symulacji jest wyświetlana po każdych 1/8 sekundy symulacji (jest to główna jednostka czasu w proponowanej w symulatorze) i ma prawie nieistotny wpływ na wydajność [34]. Warstwa prezentacji jest odpowiedzialna za dwa główne zadania. Pierwszym z zadań jest dokładny i optymalny sposób prezentacji stanu symulacji, zaś drugim obsługa i interakcja z użytkownikiem, kontrolująca widok symulacji i wizualizacji.

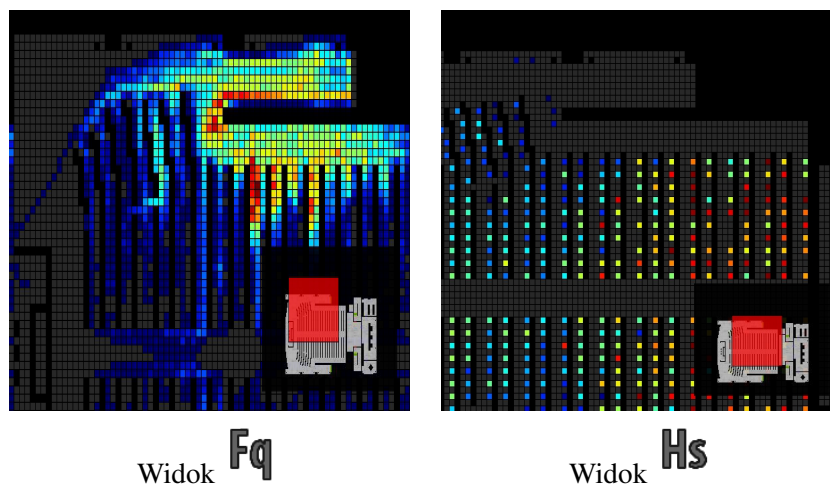
Cztery poziomy szczegółów reprezentacji pieszych pokazano na rysunku 5.6 (po lewej), ze statystykami, takimi jak trajektorie pieszych (po prawej). Ze względów wydajnościowych przy minimalnym powiększeniu piesi są rysowani jako kwadraty, przy maksymalnym powiększeniu możemy zaobserwować więcej szczegółów, takich jak kształt elipsy, głowa i przód ciała. Macierz częstotliwości odwiedzin pola (Rys. 5.7 - lewy) może być pomocna w wykrywaniu wąskich gardel, potencjalnie niebezpiecznych miejsc w geometrii budynku i ocenie powstawania linii w przepływie pieszych. Czasy ewakuacji (Rys. 5.7 - prawy) pokazują, rozkład czasu ewakuacji zależny od odległości do wyjścia. Podczas symulacji można wyświetlić wszystkie cztery widoki.

---

<sup>1</sup> Autor zauważył taką potrzebę oraz możliwość w trakcie realizacji projektu 7FP SOCIONICAL.



**Rys. 5.6.** Reprezentacja pieszego na różnych poziomach szczegółowości (po lewej) i śladach pieszych - zaznaczonych na czerwono (po prawej).

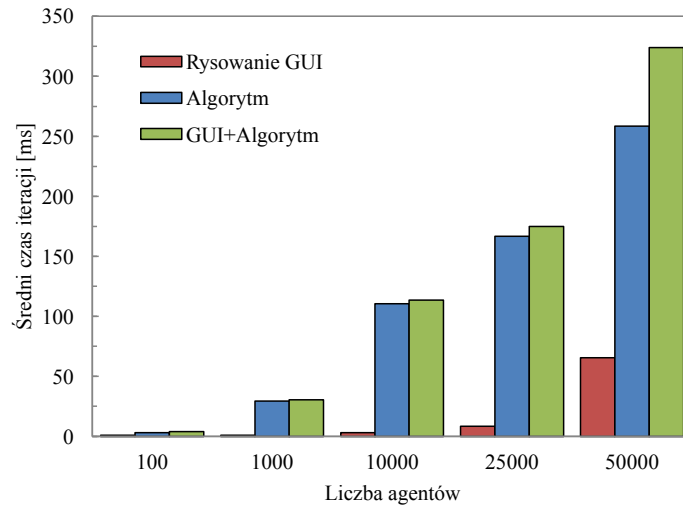


**Rys. 5.7.** Po lewej stronie wizualizowana jest macierz częstości odwiedzin w każdej komórce. Ciepłszy kolor oznacza większą liczbę odwiedzin. Po prawej przedstawiono czas ewakuacji dla każdego pieszego. Kolorowe kwadraty stanowią punkt startowy pieszego. Im cieplejszy kolor, tym dłuższy czas ewakuacji.

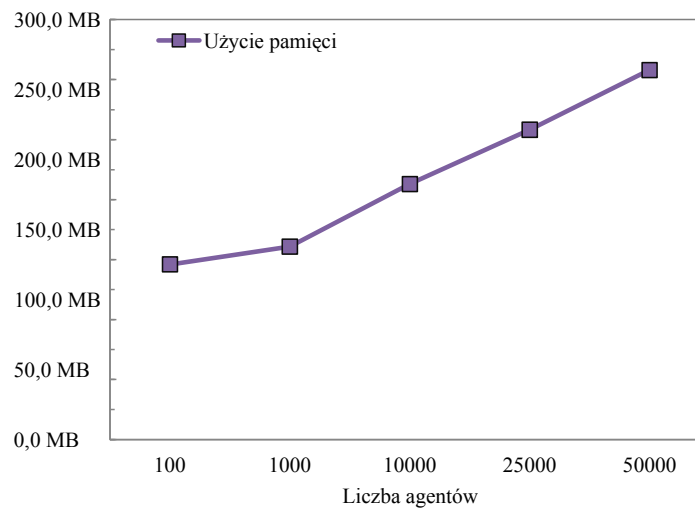
### 5.1.5. Test wydajnościowy symulatora

Test wydajności został wykonany na jednostce o następującej specyfikacji: procesor Intel q6600 3,2GHz, 4GB pamięci RAM i system Microsoft Windows 7 Pro 64-bitowy. Obiekt testowy jest zdefiniowany jako pusta przestrzeń o wymiarach 176,5m x 176,5m (31152,25m<sup>2</sup>). Liczba pieszych w symulacji wynosiła odpowiednio 100, 1000, 10000, 25000, 50000. Wykres na Rys. 5.8 pokazuje dynamikę zużycia pamięci i średni czas wykonania jednej sekundy symulacyjnej.





(a)



(b)

**Rys. 5.8.** Wyniki testów wydajności sekwencyjnej wersji proponowanego algorytmu ruchu przeprowadzonych na przeciętnym komputerze.

Złożoność czasowa przedstawionego algorytmu jest quasi-liniowa:  $O(n \log n + m)$ , gdzie  $n$  - liczba pieszych w symulacji i  $m$  - liczba wyjść awaryjnych. Powodem tej klasy złożoności jest algorytm sortowania używany do sortowania listy agentów. Warto wspomnieć, że złożoność czasu nie zależy od wielkości siatki, ale tylko od liczby agentów. Analizując wykres na rysunku 5.8 można stwierdzić, że sekwencyjna wersja programu umożliwia symulację czasu rzeczywistego (na przeciętnym komputerze) dla kilkunastu tysięcy agentów. Symulacja złożonych obiektów (takich jak stadiony) z dużą liczbą pieszych w trybie czasu rzeczywistego wymaga dekompozycji i obliczeń równoległych.

Złożoność pamięciowa jest bezpośrednio związana z rozmiarem siatki w symulacji. Jeśli w tym przypadku oznaczymy  $n$  jako rozmiar siatki ( $m$  - jest wciąż liczbą wyjść awaryjnych), złożoność pamięciowa zostanie oszacowana jako klasa  $O(n^2m)$ . Obserwuje się wzrost wykorzystania pamięci w zależności od liczby wyjść awaryjnych (POI). Jest to spowodowane przyjętą strukturą pola statycznego.

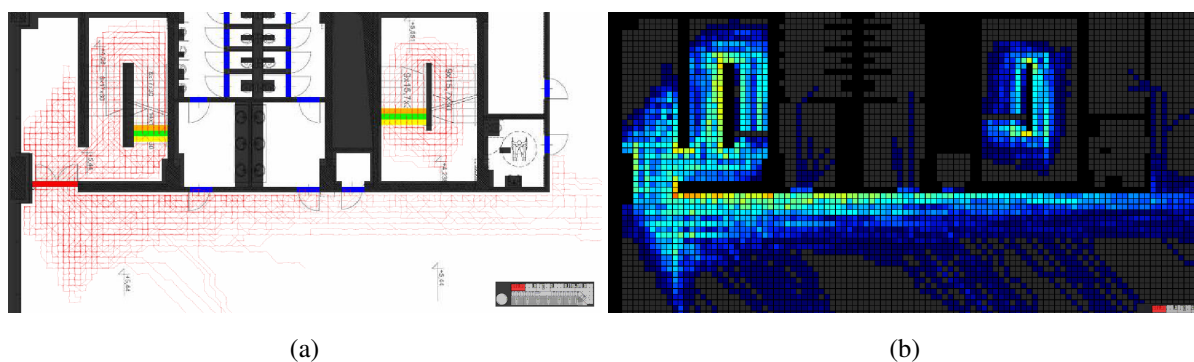
Warto tutaj wspomnieć o możliwości wykorzystania potencjału obliczeń ogólnego przeznaczenia na układach GPU (ang. general-purpose computing on graphics processing units lub general-purpose computation on graphics processing units). Modele oparte na automatach komórkowych są podatne na równoległą implementację na GPU [66].

## 6. Praktyczne zastosowania metodologii dynamiki tłumu

### 6.1. Analiza danych z symulacji komputerowych

#### 6.1.1. Przetwarzanie końcowe

Ostatnim etapem symulacji jest przetwarzanie końcowe wyników, a mianowicie analiza wyników symulacji, takich jak: statystyki trajektorii agentów, wykorzystanie przestrzeni i diagramy fundamentalne (zależności między gęstością i określonym przepływem) itp. Przykładowe statystyki przedstawiono na Rys. 6.1. W środowisku symulacyjnym statystyki są generowane jednocześnie z uruchomioną symulacją: w czasie rzeczywistym (ang. real-time) lub szybciej niż w czasie rzeczywistym (ang. faster-than-real-time).

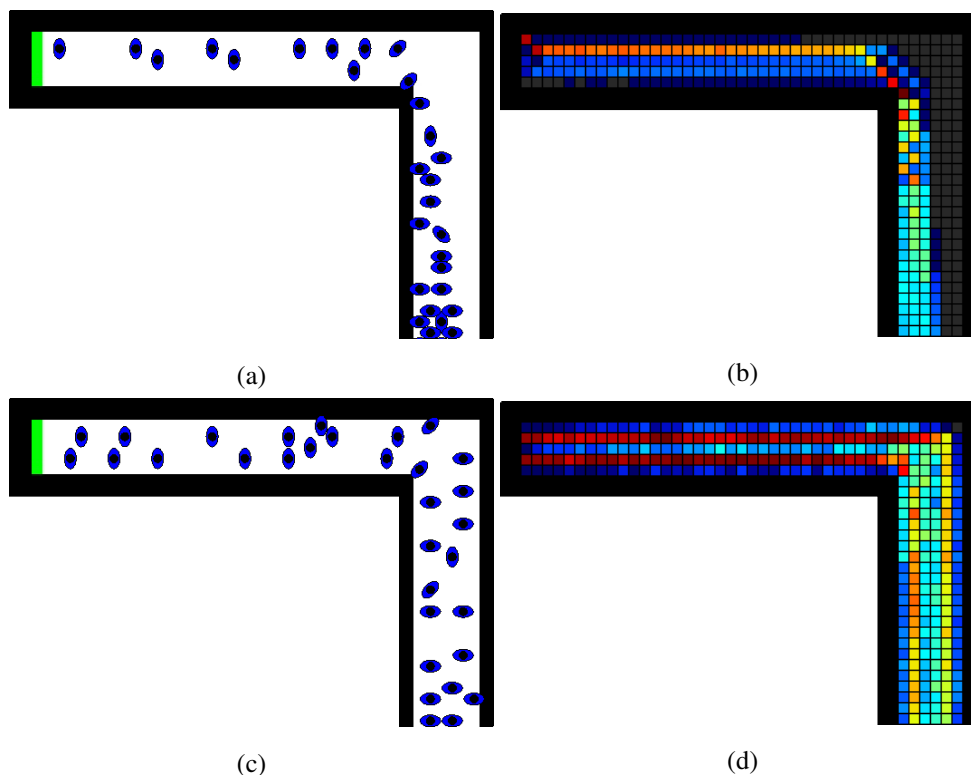


**Rys. 6.1.** Przykładowe statystyki akwizycji przestrzeni przez agentów. Prezentowana symulacja to scenariusz bez elementów współzawodnictwa stadionu Wisły Kraków. Trajektorie agentów przedstawiono na 6.1a, natomiast macierz częstotliwości odwiedzin pola przez agentów przedstawiono na 6.1b.

Piesi/agenci polegają na swojej percepcji środowiska i wiedzy intuicyjnie wybierając rozwiązanie, które jest odpowiednie z ich punktu widzenia. W większości przypadków powoduje to zaobserwowane zachowań, takich jak: tworzenie się strug ruchu, efekt zamka (ang. zipper effect), zoptymalizowana trajektoria większości pieszych lub wybrane kolejnych celi.

### 6.1.2. Fenomeny samoorganizacji w tłumie

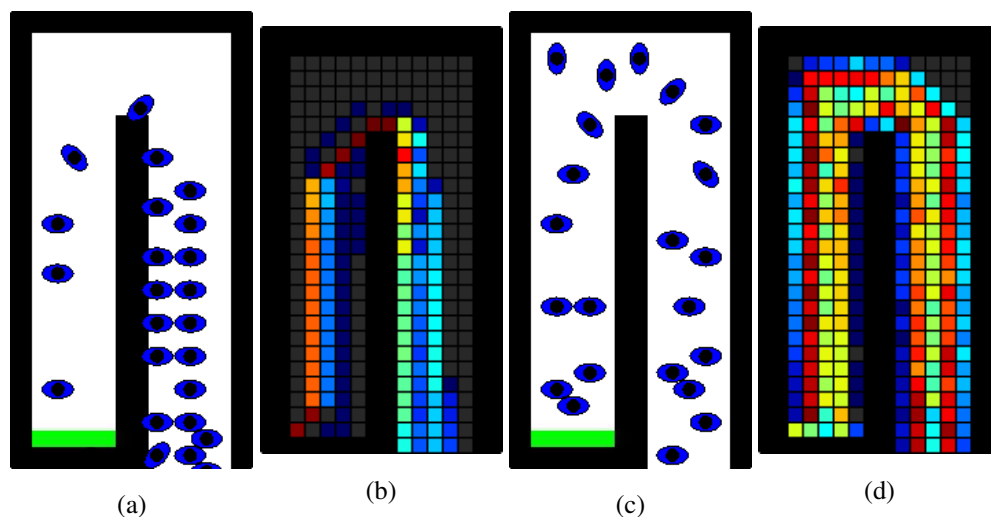
Na poziomie makroskopowym jednokierunkowego przepływu, jak również podczas dwukierunkowego przepływu, występuje samoorganizacja ruchu pieszych w postaci pojawiających się strug, oznacza to, że gdy piesi mają tę samą pożądaną szybkość i kierunek ruchu, pojawiają się zjawiska powstawania pasów ruchu. Zgodnie z obserwacjami możemy stwierdzić, że pasy ruchu są bardziej efektywne z punktu widzenia przepustowości niż ruch chaotyczny. Autor proponuje modelowanie tego zjawiska za pomocą kombinacji statycznych pól potencjału i pola dynamicznego. Statyczne pole wskazuje kierunek ruchu, pokazując położenie najbliższego POI (na przykład wyjścia ewakuacyjnego), zaś dynamiczne pole reprezentuje wirtualny ślad agenta.



**Rys. 6.2.** Przykładowe statystyki: widok symulacji 6.2a, 6.2c i macierz częstotliwości 6.2b, 6.2d.

Rysunek 6.2 i Rys. 6.3 przedstawiają zjawisko tworzenia linii ruchu w prostej geometrii. Na Rys. 6.2a, 6.2b, 6.3a i 6.3b funkcja kosztów przedstawiona w równaniu 3.7 została zredukowana do parametru  $S_{ij}$  (inne parametry w funkcji kosztu Równ. 3.7 są równe zero). Oznacza to, że jest brana pod uwagę tylko *uproszczona* strategia najkrótszej drogi, a symulacja nie reprezentuje właściwie jakościowych zjawisk w tłumie.

Jednak na Rys. 6.2c, 6.2d, 6.3c i 6.3d ze względu na fakt, że funkcja kosztów została włączona i oba zjawiska powstawania strug ruchu i efekt zipper są obserwowane.



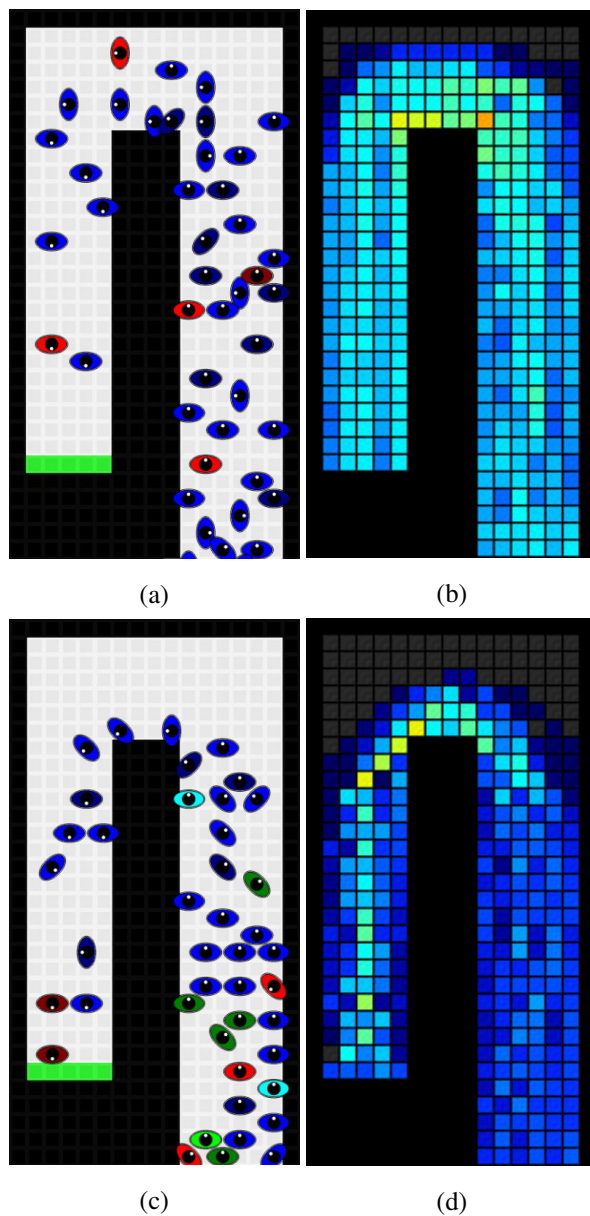
**Rys. 6.3.** Przykładowe statystyki: widok symulacji 6.3a( $S_{ij}$ , inne parametry w funkcji kosztu równe 0), 6.3c ( $S_{ij}$ ,  $\alpha = 1.3, \beta = 0.2, \theta = 0.25, \delta = 4.5$ ) i macierz częstości odwiedzin agentów dla analogicznych wartości parametrów 6.3b, 6.3d.

Użycie proponowanej funkcji kosztu (Równ. 3.7) daje możliwość znacznego ulepszenia „naiwnej” wersji algorytmu ruchu CA. Istotne elementy funkcji kosztu to: unikanie ścian, dynamiczne pole potencjału (interakcje z innymi pieszymi) i parametr bezwładności (utrzymywanie wybranej trajektorii). Podsumowując, proponowana funkcja kosztu pozwala naśladować racjonalne i inteligentne zachowanie prawdziwych pieszych, wykorzystując niektóre efekty zbiorowej inteligencji i samoorganizacji.

Parametr	Wartość
$\beta$	0.2
$\theta$	0.25
$\alpha$	1.3
$\delta$	4.5

**Tabela 6.1.** Parametry funkcji kosztu, które zostały ustawione, aby uzyskać formowanie się linii przepływu przedstawionych na Rys. 6.2c, 6.2d, 6.3c i 6.3d.

Piesi mogą reprezentować różne strategie: preferowanie najkrótszej ścieżki Rys. 6.4c, preferowanie najszybszej ścieżki Rys. 6.4a lub strategię mieszaną. Przykłady użycia różnych typów agentów i różnych typów strategii pokazano odpowiednio również w formie macierzy odwiedzin Rys. 6.4d i 6.4a. Przede wszystkim widać różnicę w sposobie pokonywania dwóch zwrotów ruchu.

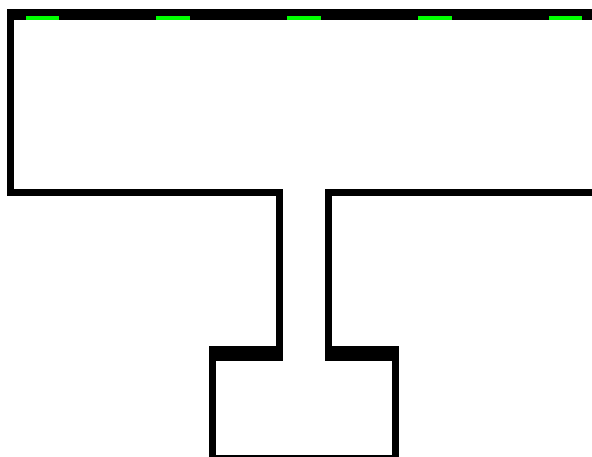


**Rys. 6.4.** Symulacja z widokiem pieszych i macierzy odwiedzin z przykładowymi parametrami funkcji kosztu:  $\delta = 7.3$ ,  $\alpha = 2.3$ ,  $I = 0.55$  - wyprzedzanie jest możliwe 6.4b i 6.4a oraz  $\delta = 0.3$ ,  $\alpha = 0.2$ ,  $I = 0.55$ , a zatem  $dens(f_{ij}) = 1$  - najkrótsza ścieżka jest preferowana 6.4c i 6.4d.

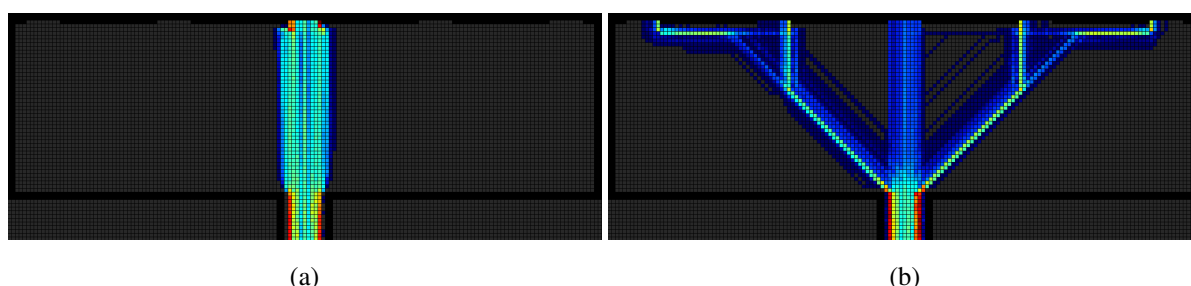
### 6.1.3. Wybór wyjścia ewakuacyjnego

Kilka razy podczas symulacji agenci mogą zmienić wyjście (POI). Ten proces obejmuje wybór optymalnego wyjścia w danej chwili symulacji. Następnie agent używa nowego pola potencjału statycznego prowadzącego do wybranego wyjścia w procesie wybierania następnej komórki do ruchu (równanie 3.7).

Jako przykład zmiany wyjścia (Rys. 6.6) zostanie wyświetlona symulacja prostej geometrii (Rys. 6.5) z pięcioma wyjściami.



**Rys. 6.5.** Prosta geometria używana do symulacji podejmowania decyzji o zmianie wyjść awaryjnych. Kolor zielony wskazuje wyjścia.



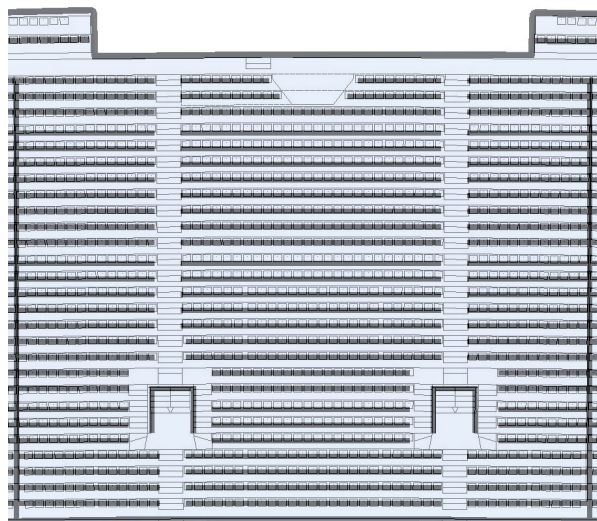
**Rys. 6.6.** Zaprezentowane są przykładowe statystyki: macierz częstotliwości agentów przepływających dla dwóch trybów wyboru, 6.6a - decyzja oparta na odległości do wyjścia i 6.6b - decyzja oparta na gęstości i popularności wyjść.

Na rysunku 6.6a każdy agent wybiera najbliższe wyjście, podczas gdy na Rys. 6.6b agenci zmieniają wyjście ewakuacyjne podczas symulacji. W bardziej złożonej geometrii, np. stadion piłkarski, optymalny wybór wyjścia ewakuacyjnego prowadzi do lepszego czasu ewakuacji.

#### 6.1.4. Wzorce zachowań agentów w różnych klasach sytuacji

Przykładowy fragment stadionu Allianz Arena zostanie użyty w kontekście prezentacji ilościowych wyników symulacji dla trzech różnych sytuacji: *warunki normalne*, *ewakuacja bez elementów współzawodnictwa* i *ewakuacja z elementami współzawodnictwa*. Symulowana część stadionu zawiera dwa sektory (Rys. 6.7) o pojemności 1305 ludzi z dwoma wyjściami ewakuacyjnymi.

Tabela 6.2 zawiera wyniki ilościowe symulacji dla każdego scenariusza. W przypadku scenariusz bez współzawodnictwa oraz z elementami współzawodnictwa można zaobserwować wyższą gęstość wokół wyjścia ewakuacyjnego w porównaniu ze scenariuszem warunki normalne (patrz też Rys. 6.9b, 6.10b, 6.11b). Istnieje również różnica w średniej prędkości (Rys. 6.9a, 6.10a i 6.11a) i średni przepływ, który przekłada się na lepsze czasy ewakuacji.



Rys. 6.7. Symulowana powierzchnia stadionu Allianz Arena.

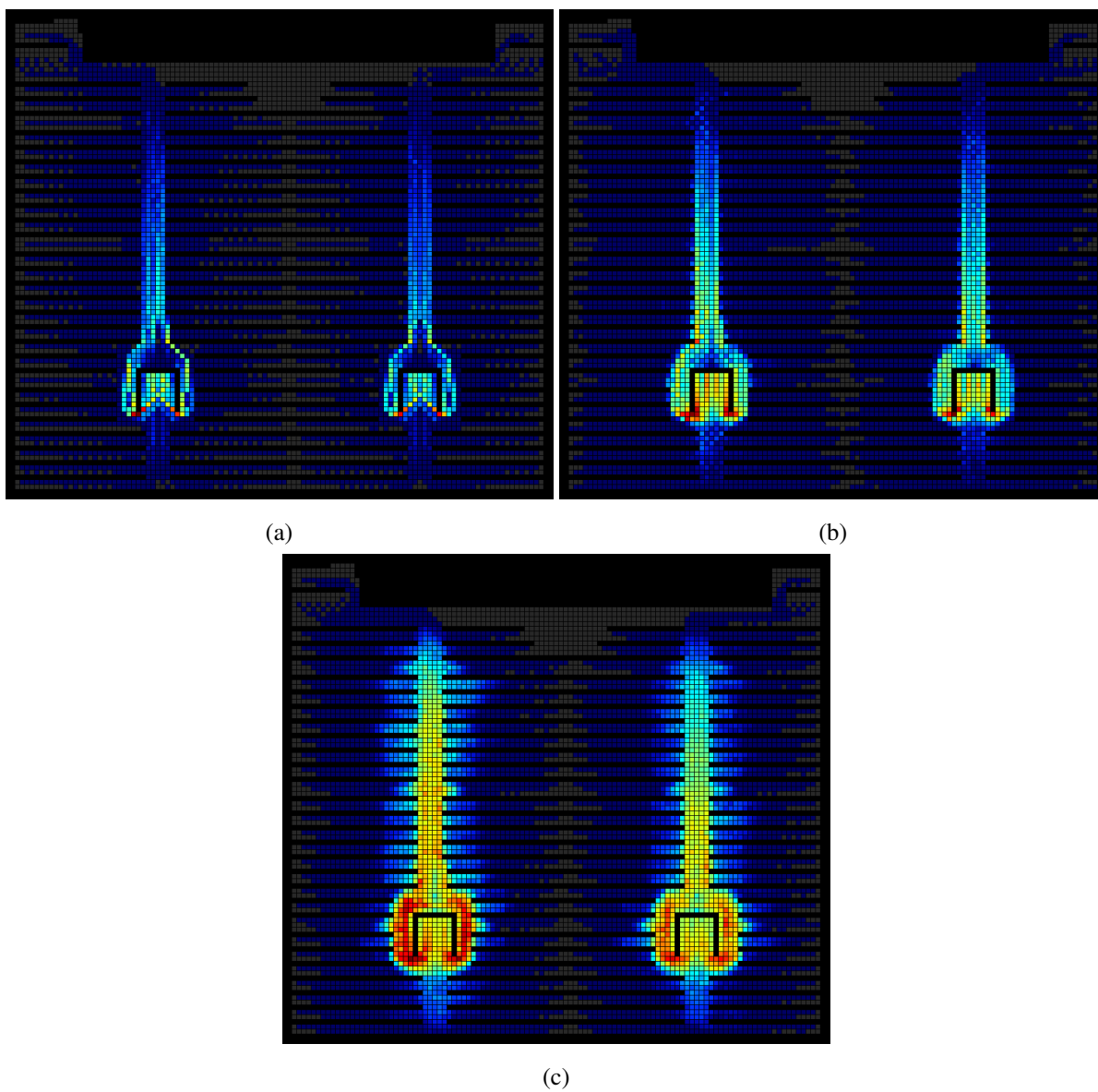
Typ	Warunki normalne	Ewakuacja bez elementów współzawodnictwa	Ewakuacja z elementami współzawodnictwa
Początkowa liczba agentów	1305	1305	1305
Czas ewakuacji [s]	361	226	218
Pożądana prędkość - rozkład normalny [m/s]	$\mu = 1.1$ $\sigma^2 = 0.26$	$\mu = 1.34$ $\sigma^2 = 0.26$	$\mu = 1.34$ $\sigma^2 = 0.26$
Średnia prędkość [m/s]	0.101	0.170	0.311
Średnia gęstość (dwa wyjścia) [ $P/m^2$ ]	1.86/1.55	3.61/3.08	3.00/2.74
Średni przepływ (dwa wyjścia) [ $P/s$ ]	1.89/1.71	3.03/2.74	3.13/2.85

Tabela 6.2. Wyniki symulacji sektorowych z różnymi konfiguracjami scenariuszy.

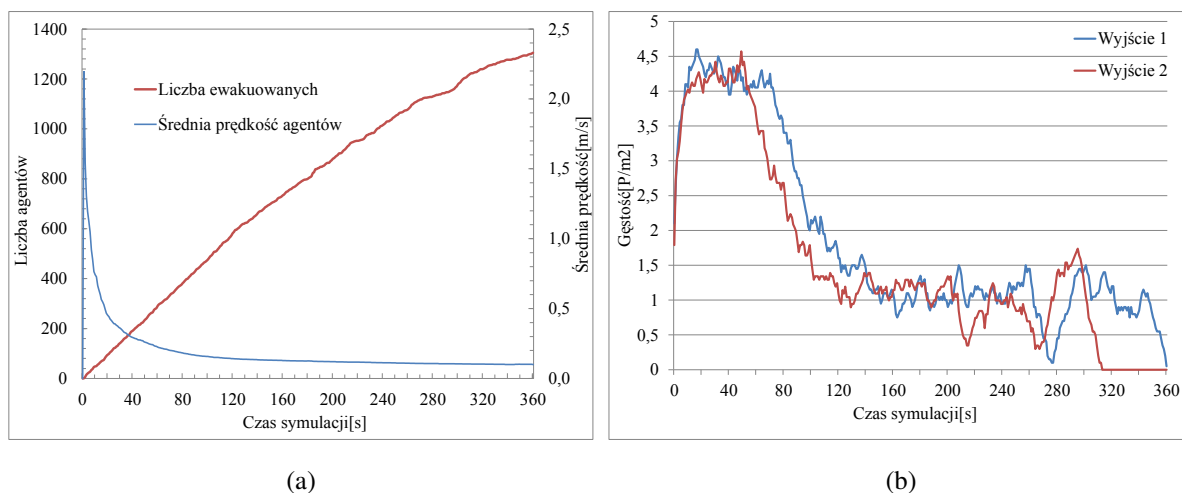
Liczba obserwowanych fluktuacji jest najniższa w warunkach normalnych (Rys. 6.9b), nieco większa w ewakuacji bez elementów współzawodnictwa (Rys. 6.10b) i największej w scenariuszu z elementami współzawodnictwa (Rys. 6.11b). W ewakuacji z elementami współzawodnictwa i bez elementów



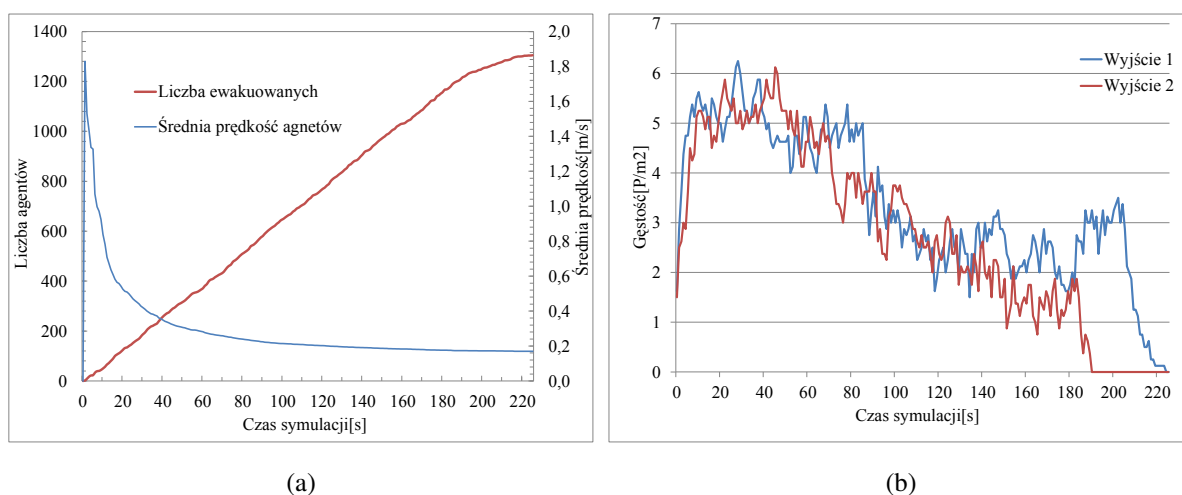
współzawodnictwa można zaobserwować bardziej dynamiczny proces podejmowania decyzji i procesów wyszukiwania ścieżki ewakuacyjnej (Rys. 6.8).



**Rys. 6.8.** Prezentacja przykładowych statystyk: macierz częstości odwiedzin dla trzech scenariuszy warunki normalne 6.8a, ewakuacja bez elementów współzawodnictwa 6.8b i ewakuacja z elementami współzawodnictwa 6.8c.



**Rys. 6.9.** Przykładowe statystyki średniej prędkości i średniej gęstości w sąsiedztwie wyjść podczas opuszczania obiektu w normalnych warunkach.

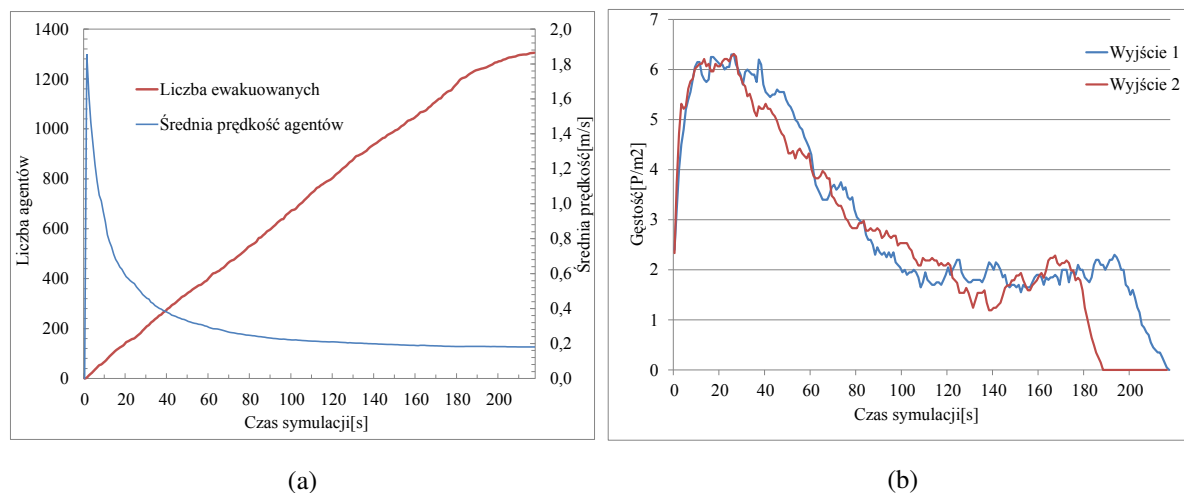


**Rys. 6.10.** Przykładowe statystyki średniej prędkości i średniej gęstości w sąsiedztwie wyjść podczas opuszczania obiektu w warunkach ewakuacji bez elementów współzawodnictwa.

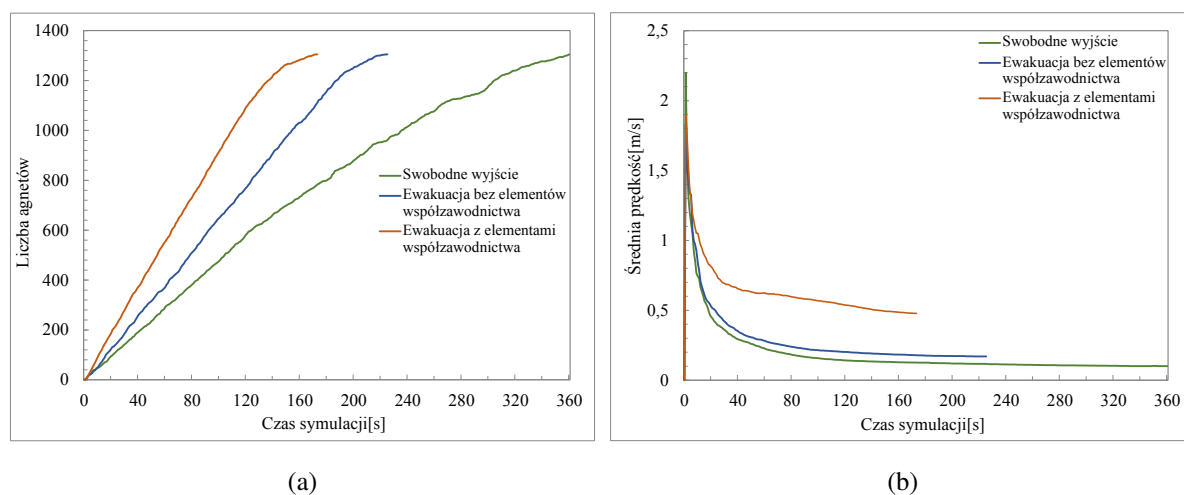
## 6.2. Zastosowania modelu do rzeczywistych przypadków

W tej części autor przedstawi przykładowe wyniki symulacji ewakuacyjnych z sali ćwiczeniowej, sali wykładowej, Stadionu Miejskiego Wisły Kraków i Stadionu Allianz Arena w Monachium. Dane uzyskane z symulacji sali ćwiczeniowej i sali wykładowej porównano z empirycznymi wynikami z eksperymentów i jednocześnie omówiono niektóre zagadnienia walidacji.

Należy również podkreślić, że wyniki symulacji obu stadionów piłkarskich są dobrym przykładem skalowalności i wydajności.



**Rys. 6.11.** Przykładowe statystyki średniej prędkości i średniej gęstości w sąsiedztwie wyjść podczas opuszczania obiektu w warunkach ewakuacji z elementami współzawodnictwa.



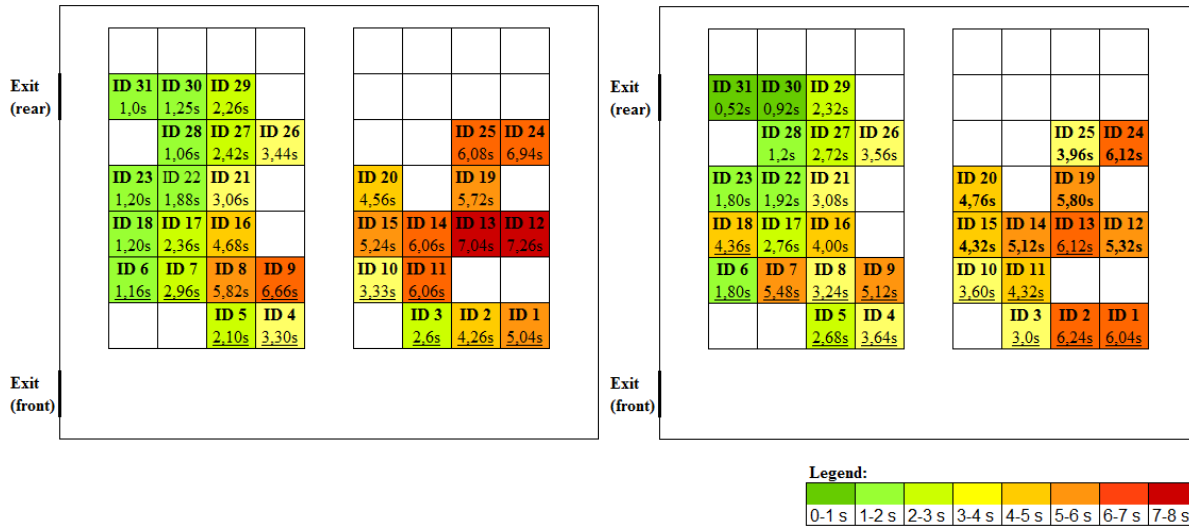
**Rys. 6.12.** Przykładowe statystyki: 6.12a czas ewakuacji i 6.12b średnia prędkość dla wszystkich trzech scenariuszy.

### 6.2.1. Sala ćwiczeniowa

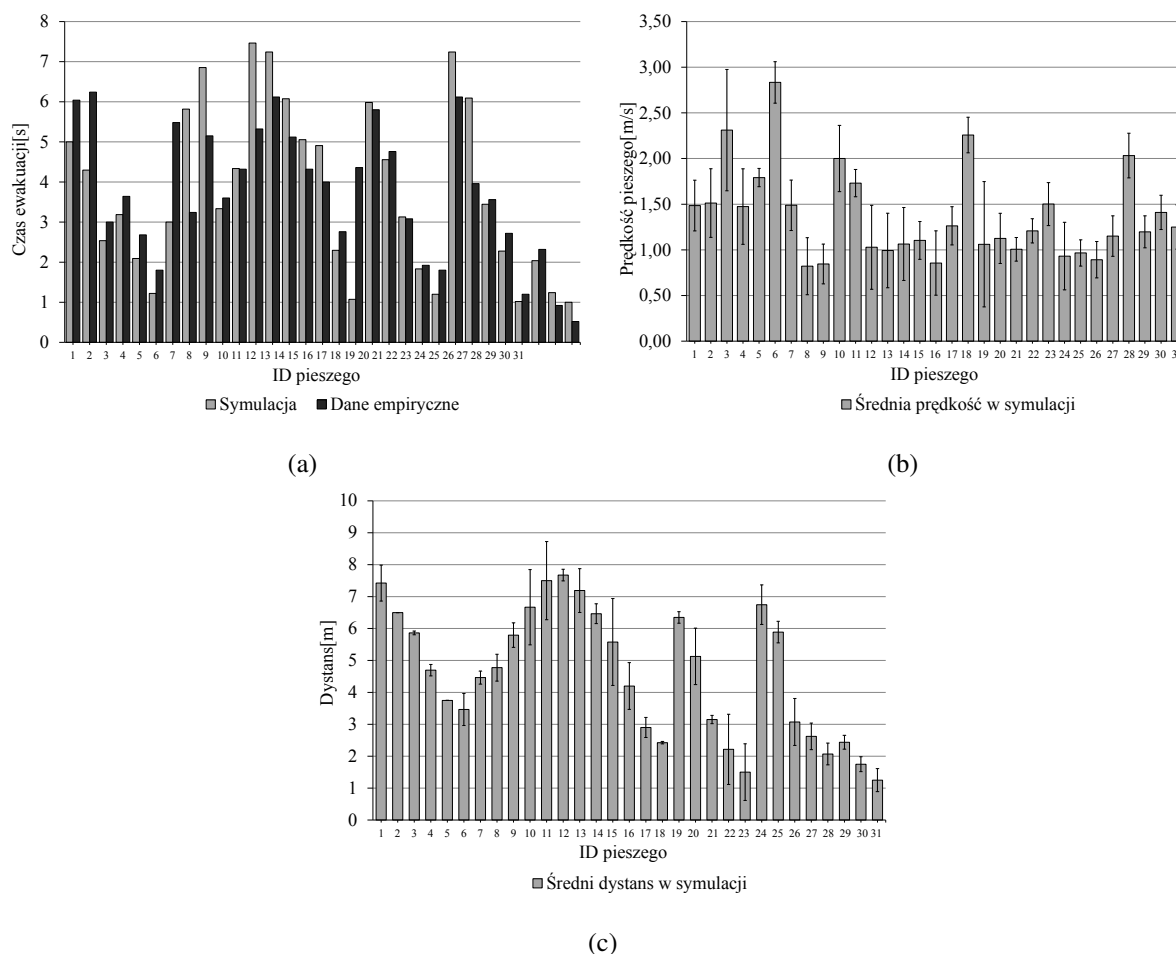
W [67] autor przedstawił eksperymenty ewakuacji pieszych w różnych sytuacjach. Grupa 31 uczniów wzięła udział w eksperymencie ewakuacyjnym w sali wykładowej. Średnie wyniki symulacji z 50 prób porównano z danymi empirycznymi uzyskanymi z eksperymentów kontrolowanej (czyli ewakuacji bez elementów współzawodnictwa) ewakuacji. W ewakuacji kontrolowanej, *podczas eksperymentów celem każdego uczestnika było osiągnięcie najlepszego czasu ewakuacji dla całej grupy.*

Według danych empirycznych czas ewakuacji wyniósł 6,24s, podczas gdy w symulacji wynosił 6,60s. Średnia prędkość w symulacji wynosiła  $1.25 \frac{m}{s}$ . Na rysunku 6.13 możemy porównać wyniki symulacji z empirycznymi w odniesieniu do indywidualnego procesu ewakuacji, jak również wybranego

wyjścia. Rysunek 6.14a przedstawia porównanie między danymi empirycznymi i danymi symulacyjnymi, rysunek 6.14b pokazuje średnią prędkość i odległość pokonaną od punktu początkowego do wyjścia dla każdego pieszego.



**Rys. 6.13.** Początkowa lokalizacja pieszych w sali wykładowej. U góry każdej komórki znajduje się identyfikator pieszego. U dołu każdej komórki znajduje się wynik czasu wyjścia (podkreślone - przednie wyjście / nie podkreślone - tylne wyjście). Dane z symulacji znajdują się w 6.13a, a dane empiryczne znajdują się w 6.13b.



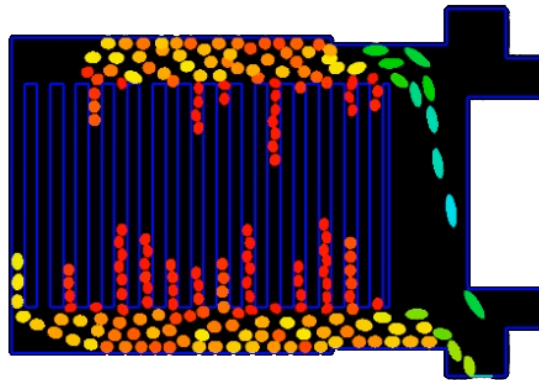
**Rys. 6.14.** Ewakuacja sali wykładowej. Porównanie wyników symulacji z prawdziwymi danymi 6.14a. Średnia prędkość i wartość średnia przebytej drogi przez każdego w symulacji 6.14b i 6.14c.

### 6.2.2. Sala wykładowa B1 H24 AGH

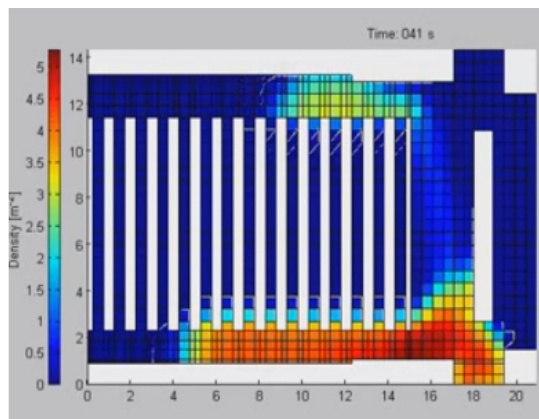
W artykule [68] przeprowadzono analizę ewakuacji sali wykładowej w celu potwierdzenia niezawodności i wydajności modelu opisanego w tej pracy. Wiarygodność w tym eksperymencie jest rozumiana jako podobieństwo wyników do danych eksperymentalnych, podczas gdy efektywność jest porównywana z wydajnością. Model prezentowany w tej pracy opierający się na założeniach z [34] został porównany z dwoma popularnymi modelami:

- *Uogólniony model odśrodkowy* [69] - podejście oparte na sile, rozszerzenie modelu siły społecznej (social force). Ruch pieszych jest określany poprzez połączenie trzech sił: siły napędowej w kierunku POI, siły odpychającej od przeszkody i siły odpychającej od innych pieszych.
- *Podejście hydrodynamiczne* - model makroskopowy, oparty na [70]. Tłum jest rozpatrywany w kategoriach lokalnie uśrednionej gęstości i prędkości, a nie zbioru jednostek.

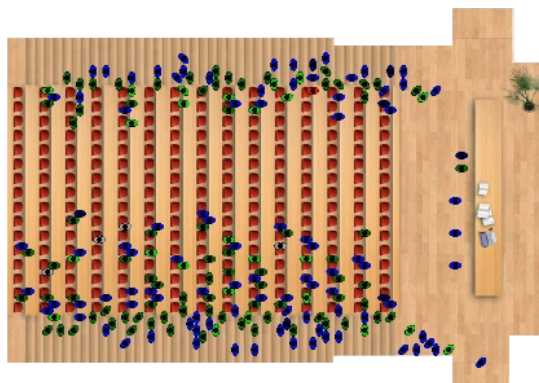
Wizualizacja wszystkich trzech metod przedstawiona jest na Rys. 6.15.



(a)



(b)

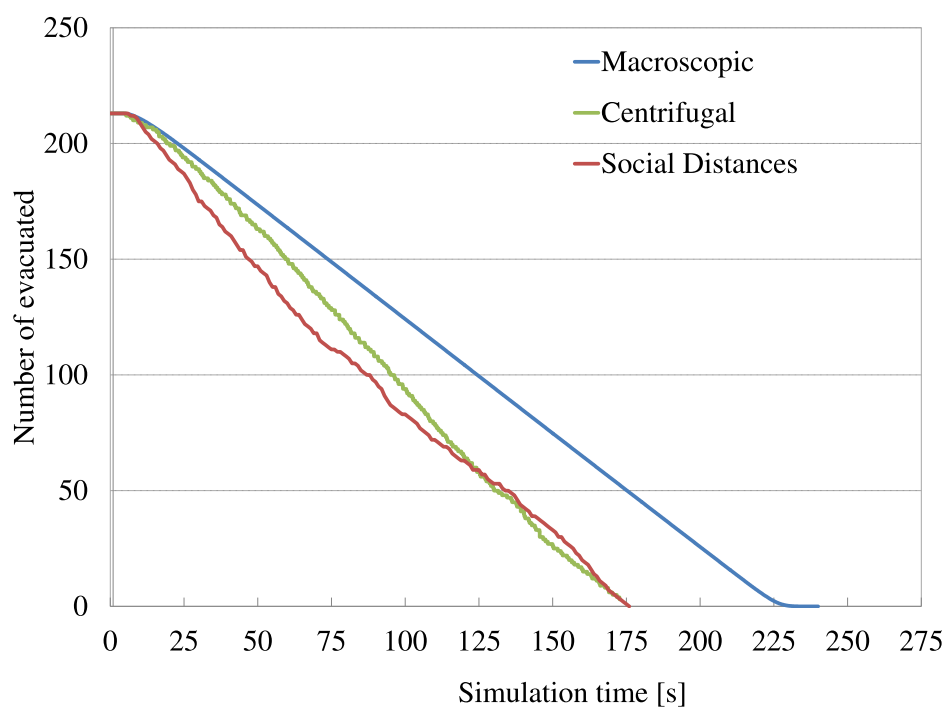


(c)

**Rys. 6.15.** Trzy metody symulacji dynamiki tłumu w eksperymencie sali wykładowej, 6.15a - uogólniony model odśrodkowy, 6.15b - podejście hydrodynamiczne, 6.15c - proponowane podejście oparte na modelu odległości społecznych.

Scenariusz eksperymentu to normalne warunki - typowe wyjście z sali wykładowej. Całkowity czas ewakuacji 210 uczniów wynosił 162 sekundy, podczas gdy w symulacjach wynosił 172 i 173 sekundy

dla prezentowanego modelu i modelu odśrodkowego, a 230 sekund dla podejścia hydrodynamicznego<sup>1</sup>. Na Rys. 6.16 widać zależność liczny wyewakuowanych od czasu symulacji.



**Rys. 6.16.** Czasy ewakuacji - porównanie wszystkich modeli.

Całkowity czas ewakuacji uzyskany każdego używanego modelu jest zbliżony do danych empirycznych. Porównanie czasów ewakuacji w poszczególnych modelach z danymi doświadczalnymi zamieszczono w tabeli. Parametr  $V_{des}$  opisuje wartość prędkości pożądaną przez pieszych, całkowity czas ewakuacji to czas mierzony od inicjalizacji ewakuacji do ostatniej osoby przechodzącej przez wyjście, oraz odpowiednio czasy ewakuacji ze schodów w lewo i w prawo - czas przepływu na schodach mierzony od pierwszej osoby który pojawia się na schodach, do ostatniej osoby, która opuszcza schody.

Wpływy wyprodukowane przez testowane modele zostały porównane z wynikami eksperymentalnymi. Zarówno model odśrodkowy, jak i proponowany model odległości były w stanie symulować ogólne tendencje zmian wpływów, podczas gdy przepływ wytworzony przez podejście hydrodynamiczne różni się znacznie od danych eksperymentalnych. Tendencję zaprezentowano na Rys. 4.15, 4.16, 4.14 oraz 4.13.

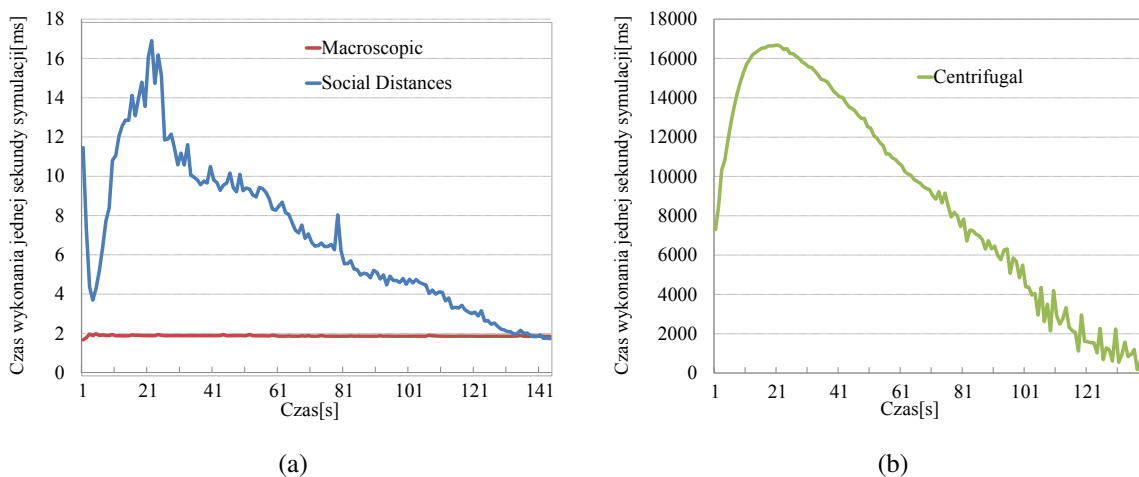
Efektywność została zbadana poprzez analizę czasu wykonania kolejnych sekund symulacji. Średni czas wykonania sekundy symulacyjnej dla modelu hydrodynamicznego, badanej wersji proponowanego modelu i uogólnionego modelu odśrodkowego wyniósł odpowiednio:  $1.86ms$ ,  $6.946ms$  and  $8825.67ms$ . Dla podejścia hydrodynamicznego czas wykonania był prawie stały dla każdej sekundy symulacyjnej. W dwóch pozostałych metodach czas wykonania sekundy symulacyjnej zależy od liczby poruszających się

<sup>1</sup>Następujące wyniki uzyskano przy użyciu pożądanego prędkości pieszego równej  $0.9 \frac{m}{s}$

Model	$V_{des}$ [ $\frac{m}{s}$ ]	Całkowity czas ewakuacji [s]	Czas na schodach (lewe) [s]	Czas na schodach (prawe) [s]
Makroskopowy Model	0.9	230	87	199
	1.11	198	73	172
	1.34	171	61	149
Social Distances	0.9	72	80	160
	1.11	131	66	120
	1.34	105	58	103
Centrifugal	0.9	173	108	164
	1.11	160	94	154
	1.34	158	98	146
Dane empiryczne	-	163	83	129

**Tabela 6.3.** Zestawienie wyników symulacji trzech różnych modelu dynamiki tłumu z danymi empirycznymi.

pieszych. Wzrasta od 1 do 25 sekundy, ze względu na rozkład opóźnień rozpoczęcia ruchu przez pieszych, a następnie maleje, gdy piesi opuszczają obszar symulacji. Szczyt w czasie wykonania symulacji może wiązać się z największą liczbą interakcji między pieszymi.



**Rys. 6.17.** Testy wydajności dla wszystkich modeli. Krzywe pokazują czas wykonania dla każdej kolejnej sekundy symulacji [68].

Warto zauważyć, że w tym scenariuszu średni czas wykonania sekundy symulacyjnej w proponowanym modelu jest tego samego rzędu wielkości co w modelu makroskopowym. Z drugiej strony uzyskane



wyniki są podobne do wyników uzyskanych za pomocą modelu opartego na siłach i nie są dalekie od danych eksperymentalnych.

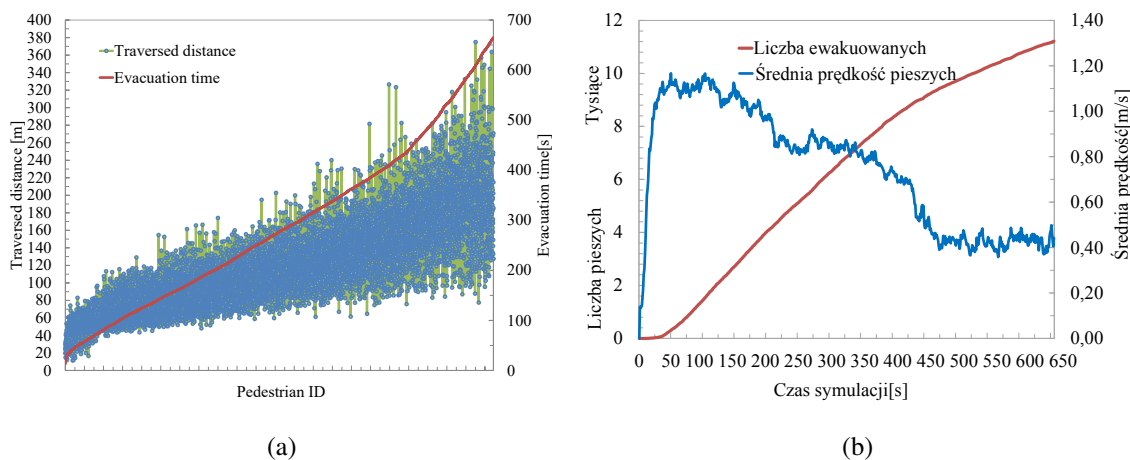
### 6.2.3. Wschodnia trybuna stadionu Wisły Kraków

Poniższe wyniki zawierają dane z symulacji scenariusza ewakuacji bez elementów współzawodnictwa wschodniej trybuny stadionu Wisły Kraków. Czas ewakuacji 95% początkowej liczby pieszych wynosił 653s (10 minut and 54 sekundy).

Tabela 6.4 przedstawia podstawowe statystyki z symulacji ewakuacji. Rysunek 6.18 przedstawia inne dane zebrane podczas symulacji. Warto zauważyć, że średnia prędkość (Rys. 6.18b) spadła podczas całej symulacji. Jest to spowodowane faktem, że większość osób gromadzi się wokół wyjścia je blokuje. Takie wyniki można traktować jako symptomy błędów w projektowaniu stadionu.

Nazwa	Próg ewakuacji 95%
Początkowa liczba pieszych	11 808
Bieżąca liczba agentów	583
Czas ewakuacji	653s
Najszybszy czas wyjścia	3s
Najwolniejszy czas wyjścia	653s
Pożądana prędkość populacji	1,36 $\frac{m}{s}$
Średnia prędkość agentów	0,316 $\frac{m}{s}$

**Tabela 6.4.** Podsumowanie symulacji scenariusza ewakuacji bez elementów współzawodnictwa wschodniej trybuny stadiony Wisły Kraków.



**Rys. 6.18.** Ewakuacja bez elementów współzawodnictwa wschodniej trybuny stadionu Wisły Kraków. (a) - przykładowa statystyka pokonanego dystansu i czasu ewakuacji dla każdego pieszego. (b) - liczba ewakuowanych w czasie i średnia prędkość.

Fragment trybuny stadionu Wisły Kraków podczas sytuacji normalnego wyjścia jest pokazany na Rys. 6.19. Wizualne porównanie wyników symulacji na Rys. 3.6 (z prawej), z prawdziwymi danymi, ukazuje, że model jest w stanie prawidłowo odtworzyć określone sytuacje zachodzące podczas ewakuacji.



**Rys. 6.19.** Fani opuszczający sektor stadionu Wisły Kraków w warunkach normalnych. Należy zwrócić uwagę na charakterystyczne formacje stworzone przez pieszych, gdy próbują dotrzeć do wyjścia z sektora. Podobne struktury można zaobserwować w symulacji, patrz Rys. 3.6 (po prawej).

#### 6.2.4. Stadion Wisły Kraków

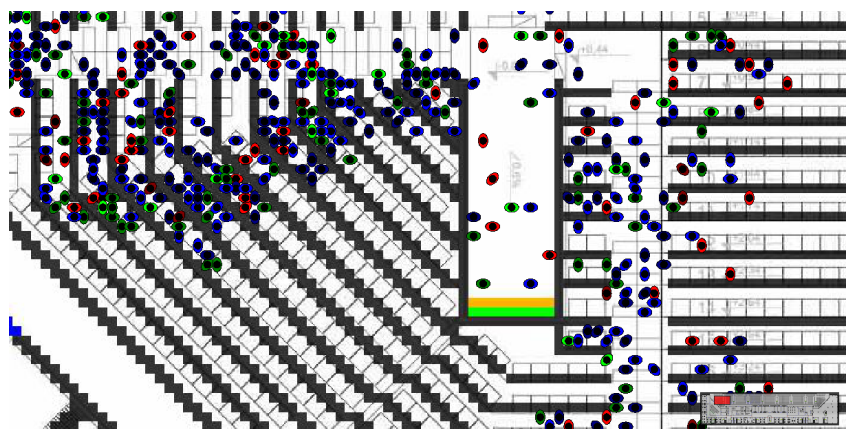
Zaproponowany model został wdrożony w kilku studiach przypadku, począwszy od przypadków testowych (w celu porównania z danymi empirycznymi i innymi symulacjami), aż po kompleksowe symulacje ewakuacji obiektów rzeczywistych, takich jak Stadion Miejski w Krakowie lub zintegrowany scenariusz ewakuacji Allianz Arena w Monachium (jako część 7FP UE - projekt Socionical).

Rysunek 6.20 przedstawia trzy różne widoki z symulacji opartej na proponowanym przez autora modelu - ewakuacji wschodniej trybuny Stadionu Miejskiego w Krakowie. Pierwszy widok to środowisko symulacji z pieszymi, drugi to macierz częstotliwości odwiedzin pola (zmiana liczby poszczególnych pieszych w siatce), a trzecia to widok śladów pieszych.

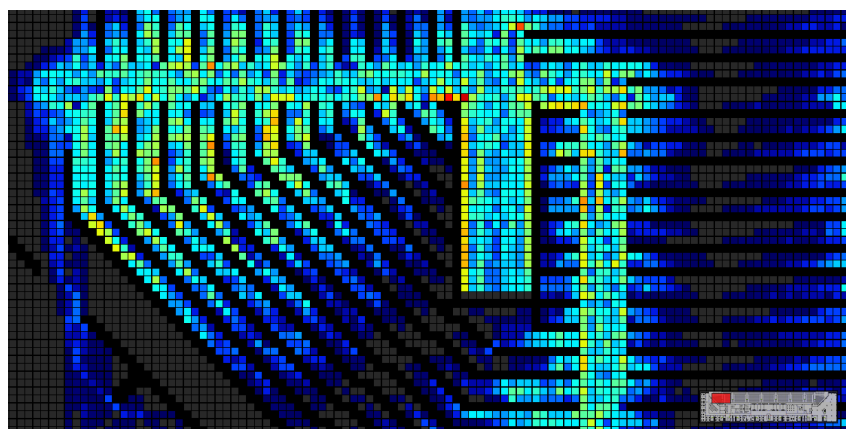
#### 6.2.5. Stadion Allianz Arena

Kolejnym przykładem jest symulacja stadionu Allianz Arena w Monachium. Symulacja tego złożonego obiektu z 70 000 miejscami dla fanów w była prawdziwym wyzwaniem, zwłaszcza jeśli chodzi o zintegrowany scenariusz symulacyjny realizowany przez autora w ramach 7FP UE - Socionical. Przykładowy podgląd na ewakuację trybuny stadionu w Allianz Arena Monachium przedstawiono na Rys. 6.21.

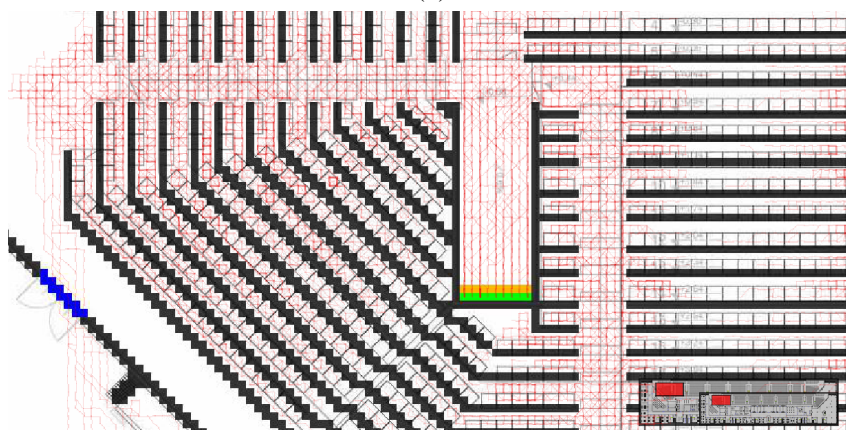
Tabela 6.5 i Rys. 6.22 zawierają wyniki ilościowe symulacji scenariusza ewakuacji bez elementów współzawodnictwa. Czas ewakuacji 95% początkowej liczby pieszych wyniósł 1117s (18 minut i 37



(a)



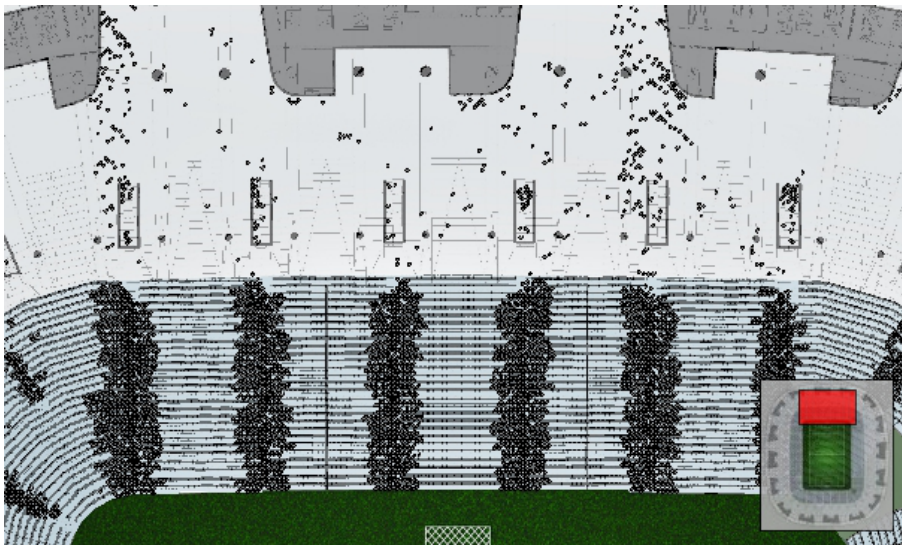
(b)



(c)

**Rys. 6.20.** Ewakuacja zachodniej trybuny Stadion Miejski w Krakowie z wykorzystaniem proponowanego modelu 6.20a, widok macierzy częstotliwości odwiedzin (liczba pieszych przechodzących przez konkretną komórkę) 6.20b, widok śladów pieszych 6.20c.

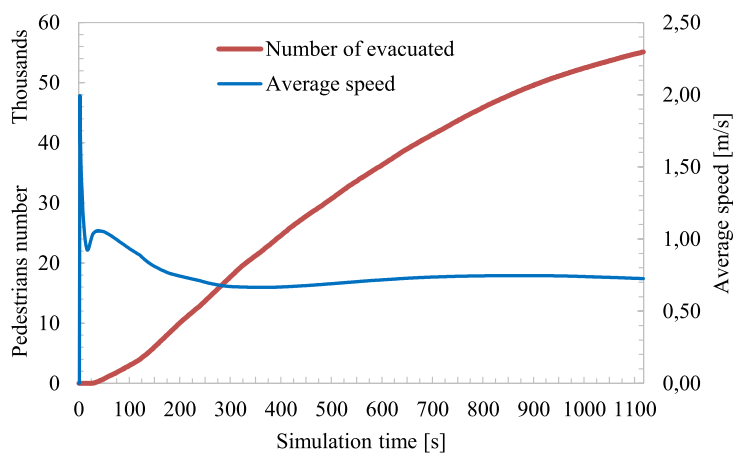
sekund). Średnia prędkość agentów po pierwszych 300 sekundach ustabilizowała się na poziomie około  $0,7 \frac{m}{s}$  - Dla prawie 70% czasu ewakuacji piesi byli w stanie utrzymać stabilny i dość wysoki przepływ.



**Rys. 6.21.** Symulacja ewakuacji stadionu Allianz Arena za pomocą zaproponowanego modelu.

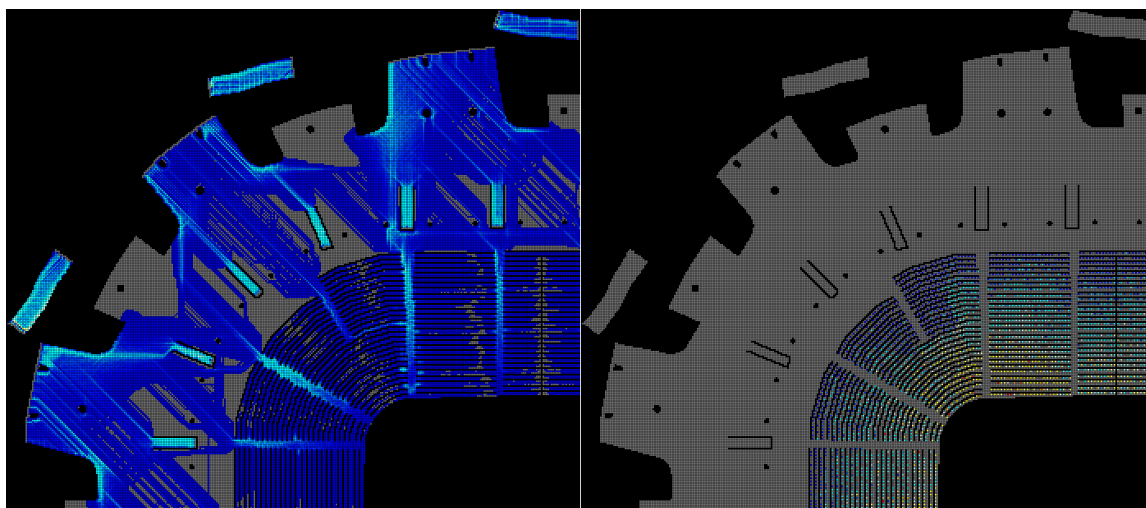
Nazwa	Próg ewakuacji 95%
Początkowa liczba pieszych	58 000
Bieżąca liczba agentów	2900
Czas ewakuacji	1117s
Najszybszy czas wyjścia	2s
Najwolniejszy czas wyjścia	1117s
Pożądana prędkość populacji	$1,34 \frac{m}{s}$
Średnia prędkość agentów	$0,726 \frac{m}{s}$

**Tabela 6.5.** Podsumowanie symulacji scenariusza ewakuacji bez elementów współzawodnictwa dla stadionu Allianz Arena.



**Rys. 6.22.** Przykładowe statystyki liczby osób ewakuowanych w czasie i średniej prędkości symulacji dla Allianz Arena Stadium.

Rysunek 6.23 przedstawia graficzną statystykę sekcji najniższego poziomu stadionu. *Macierz częstotliwości odwiedzin* poruszających się pieszych może być przydatna do wykrywania ewentualnych wąskich gardeł lub miejsc o nienormalnie wysokich gęstościach. Graficzne przedstawienie czasu ewakuacji dla każdego z pieszych pokazuje, że w rzeczywistości dokładnie odpowiada odległości od wyjść ewakuacyjnych, co w większości przypadków oznacza zależność: im dłuższa odległość, tym większy czas ewakuacji.



**Rys. 6.23.** Przykładowe statystyki graficzne dla dolnej części stadionu Allianz Arena. Macierz częstotliwości odwiedzin pól znajduje się po lewej stronie, a czas ewakuacji po prawej. Ciepłe kolory oznaczają odpowiednio wyższą częstotliwość odwiedzin i wyższe czasy ewakuacji.



## 7. Podsumowanie

W pracy autor przedstawił swoje dotychczasowe osiągnięcia skupiające się na zaproponowaniu szeregu metod modelowania dynamiki tłumu wykorzystujących automaty komórkowe. Nieodłącznym elementem modelowania procesów jest walidacja i weryfikacja przyjętej reprezentacji rzeczywistości, dlatego autor zaproponował również szereg metod kalibracji i testowania modeli dynamiki tłumu. Implementacja uogólnionego i rozszerzonego modelu Social Distances pozwoliła nadać pracom wymiaru praktycznego. Prezentowana w kolejnych częściach pracy analiza wyników z symulacji komputerowych pokazuje poprawność i praktyczną użyteczność zaproponowanych metod modelowania tłumu.

Uogólnienie i rozszerzenie modelu dynamiki tłumu wynikało z potrzeby reprezentacji różnych stylów zachowań pieszych, które występują w rzeczywistości. Kolejnym powodem była chęć zapewnienia stosowalności modelu do celów inżynierskich, na przykład do badania jakości przyjętych rozwiązań architektonicznych pod kątem bezpieczeństwa w czasie ewakuacji ludzi. W celu realizacji celów projektu autor zdecydował się oprzeć model na niehomogenicznych automatach komórkowych. Takie rozwiązanie zapewniło wydajność i elastyczność modelu, a także zapewniło otwartość rozwiązania na dalsze modyfikacje i usprawnienia w przyszłości.

Uogólnienie modelu polegało na przystosowaniu go do różnych klas sytuacji takich jak: scenariusz normalnego wyjścia z budynku, scenariusz kontrolowanej ewakuacji (bez elementów współzawodnictwa) oraz scenariusz z elementami współzawodnictwa. Do zrealizowania tego uogólnienia autor zaproponował wykorzystanie koncepcji dynamicznego pola jako metody informowania pozostałych agentów w symulacji o zmianach w ich bezpośrednim otoczeniu. Funkcja kosztu definiująca na które pole agent powinien przejść została zdefiniowana w taki sposób, żeby poprzez modyfikację jej parametrów zmienić zachowanie pieszych - modelować współzawodnictwo lub realizację wspólnego celu grupy jakim może być uzyskanie najlepszego czasu ewakuacji. Parametry funkcji kosztu pozwalają również na modelowanie fenomenów, m.in tworzenie się strug ruchu. Wprowadzona przez autora koncepcja *pól dźwiękowych* jako wygodny sposób przekazywania wiadomości w populacji pieszych oraz definicję *grupy* stały się możliwe dzięki przyjętemu założeniu niehomogeniczności automatu komórkowego.

Do rozszerzeń dyskretnego modelu zalicza się wprowadzenie koncepcji pól widzialności (ang. Visibility Fields). Dzięki temu można odwzorować rozglądanie się pieszego w czasie szukania następnego punktu POI. Dodatkowy etap w procesie rozwiązywania sytuacji konfliktowej pozwolił na odwzorowaniu bliższej rzeczywistości utylizacji dostępnej przestrzeni przez pieszych w symulacji.

Autor przeanalizował i skomentował dotychczasową metodologię walidacji i weryfikacji modeli dynamiki tłumu. Autor zwrócił również szczególną uwagę na dyskretyzację przestrzeni w modelach dyskretnych, a następnie uzasadnił i zaproponował procedury testowania dyskretnej reprezentacji przestrzeni. Ruch pieszych w modelach dyskretnych jest realizowany przeważnie na kwadratowej siatce, proponowany scenariusz testowy tego zjawiska przewiduje brak izotropowości przestrzeni. Podkreślono iż diagram fundamentalny, czyli relacja gęstości do przepływu lub prędkości jest jednym najważniejszych etapów walidacji ilościowej modelu. Jedną z zaproponowanych przez autora procedur jest właśnie test na relację gęstości do prędkości, kolejną jest test na błędy dyskretyzacji oraz spójność grup.

Praktyczna implementacja uogólnionego i rozszerzonego dyskretnego modelu Social Distances została opisana w przedostatnim rozdziale. Powstały wielkoskalowy symulator tłumu ludzi został wykorzystany w FP7 Socionical do symulacji ewakuacji ze stadionu Allianz Arena w Monachium. Zdobyte doświadczenie było punktem wyjścia do opracowania architektury dla tego typu oprogramowania. Architektura modułowa jest elastyczna, pozwala na szybkie modyfikacje by dostosować się do potrzeb np. łączenie innych metod symulacyjnych w jedną symulację end-to-end. Rozwiązania hybrydowe łączą ciągłe i dyskretne metody modelowania dynamiki tłumu.

Przedostatni rozdział pracy poświęcono implementacji uogólnionego i rozszerzonego modelu w rzeczywistych zastosowaniach. Model i jego implementacja nadaje się symulacji małych obiektów (dla populacji rzędu kilku czy kilkudziesięciu osób), jak również do dużych obiektów jakimi są stadiony. Poprzez uogólnienie można symulować różnego klasy zachowań agentów. Rozbudowany moduł prezentacji statystyk w przejrzysty sposób prezentuje najważniejsze wyniki z przeprowadzonych symulacji.

Jeżeli chodzi o przyszłe prace w obszarze tematycznym związanym z doktoratem, autor dostrzega szereg kierunków, które można rozwijać w przyszłości. Uogólniony model Social Distances można rozszerzyć o bardziej rozbudowany sposób reprezentacji pieszego. Niehomogeniczne automaty komórkowe w połączeniu z mechanizmem ściśliwości modelu dają wystarczającą elastyczność by modelować różne klasy populacji. Zbyt dużym uproszczeniem jest na przykład reprezentowanie populacji zróżnicowanej (mężczyzna, kobieta czy dziecko) jako elipsy tego samego kształtu, podobnie jak planowane jest wprowadzenie zróżnicowania w zależności od charakterystyki osobniczej pieszych, czy profili zachowań charakterystycznych dla różnych obszarów geograficznych dla poszczególnych osób. W planach przyszłych prac jest wprowadzenie różnych rozmiarów reprezentowanych pieszych.

Błędy reprezentacji przestrzeni w modelach wynikają głównie z przyjętego rozmiaru i kształtu siatki. Autor zamierza w przyszłości dynamicznie modyfikować rozmiar kwadratowej siatki z zależności od współczynnika błędu dyskretyzacji. Oczywiście rozmiar siatki wpływa na wydajność, więc stopień granularyzacji siatki będzie w relacji z wydajności i ze współczynnikiem błędu dyskretyzacji.

Podsumowując należy podkreślić, że wszystkie zamierzone cele pracy zostały osiągnięte i efektem jest szereg metod i szczegółowych rozwiązań algorytmicznych, które zostały zastosowane w modelowaniu dynamiki ludzi w różnych rzeczywistych obiektach, m.in w salach ćwiczeniowym i wykładowych czy na stadionach Wisły Kraków i Allianz Arena w Monachium.



## Bibliografia

- [1] B. D. Hankin i R. A. Wright. „Passenger Flow in Subways”. W: *OR* 9.2 (1958), s. 81–88. ISSN: 14732858.
- [2] John J. Fruin. *Pedestrian and Planning Design*. Metropolitan Association of Urban Designers i Environmental Planners, 1971.
- [3] V. M. Predtechenskii i A. I. Milinskii. *Planning for foot traffic flow in buildings*. Amerind, 1978.
- [4] Dirk Helbing i Anders Johansson. „Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics”. W: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Red. Robert A. Meyers. New York, NY: Springer New York, 2009, s. 6476–6495. ISBN: 978-0-387-30440-3. DOI: [10.1007/978-0-387-30440-3\\_382](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_382).
- [5] *Crowd disasters*. <http://www.gkstill.com/ExpertWitness/CrowdDisasters.html>.
- [6] Hyman Hartman, Pablo Tamayo i William Klein. „Inhomogeneous Cellular Automata and Statistical Mechanics”. W: *Complex Systems* 1 (1987), s. 245–256.
- [7] Moshe Sipper. „Co-evolving non-uniform cellular automata to perform computations”. W: *Physica D: Nonlinear Phenomena* 92.3 (1996), s. 193–208. ISSN: 0167-2789. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789\(95\)00286-3](http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789(95)00286-3).
- [8] Jarkko Kari. „Theory of cellular automata: A survey”. W: *Theoretical Computer Science* 334.1 (2005), s. 3–33. ISSN: 0304-3975. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tcs.2004.11.021>.
- [9] Thomas Worsch. „Programming Environments for Cellular Automata”. W: *ACRI '96: Proceedings of the Second Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Milan, Italy, 16–18 October 1996*. London: Springer London, 1997, s. 3–12. ISBN: 978-1-4471-0941-9. DOI: [10.1007/978-1-4471-0941-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0941-9_1).
- [10] S. Di Gregorio, R. Serra i M. Villani. „Applying cellular automata to complex environmental problems: The simulation of the bioremediation of contaminated soils”. W: *Theoretical Computer Science* 217.1 (1999), s. 131–156. ISSN: 0304-3975. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975\(98\)00154-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975(98)00154-6).
- [11] Daniel Camara i A V Williams Building. „Non-uniform Cellular Automata a Review Non-uniform Cellular Automata a Review”. W: 2006.

- [12] Eric W Weisstein. *Moore Neighborhood*. <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>.
- [13] Eric W Weisstein. *von Neumann Neighborhood*. <http://mathworld.wolfram.com/vonNeumannNeighborhood.html>.
- [14] Daniel Thalmann. „Crowd Simulation”. W: *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Red. Newton Lee. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 1–8. ISBN: 978-3-319-08234-9. DOI: [10.1007/978-3-319-08234-9\\_69-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08234-9_69-1).
- [15] George Drettakis, Maria Roussou, Alex Reche i Nicolas Tsingos. „Design and Evaluation of a Real-World Virtual Environment for Architecture and Urban Planning”. W: *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* 16.3 (czer. 2007), s. 318–332. ISSN: 1054-7460. DOI: [10.1162/pres.16.3.318](https://doi.org/10.1162/pres.16.3.318).
- [16] Jarosław Waś i Robert Lubaś. „Towards realistic and effective Agent-based models of crowd dynamics”. W: *Neurocomputing* 146 (2014). Bridging Machine learning and Evolutionary Computation (BMLEC) Computational Collective Intelligence, s. 199–209. ISSN: 0925-2312. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2014.04.057>.
- [17] Suiping Zhou, Dan Chen, Wentong Cai, Linbo Luo, Malcolm Yoke Hean Low, Feng Tian, Victor Su-Han Tay, Darren Wee Sze Ong i Benjamin D. Hamilton. „Crowd Modeling and Simulation Technologies”. W: *ACM Trans. Model. Comput. Simul.* 20.4 (list. 2010), 20:1–20:35. ISSN: 1049-3301. DOI: [10.1145/1842722.1842725](https://doi.org/10.1145/1842722.1842725).
- [18] D. Helbing i P. Molnár. „Social force model for pedestrian dynamics”. W: *Phys. Rev. E* 51.5 (maj 1995), s. 4282–4286. DOI: [10.1103/physreve.51.4282](https://doi.org/10.1103/physreve.51.4282). arXiv: [cond-mat/9805244](https://arxiv.org/abs/cond-mat/9805244).
- [19] Carsten Burstedde, Kai Klauck, Andreas Schadschneider i Johannes Zittartz. „Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton”. W: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 295.3 - 4 (2001), s. 507–525. ISSN: 0378 - 4371. DOI: [10.1016/S0378-4371\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00141-8).
- [20] Adriana Braun, Bardo E. J. Bodmann i Soraia R. Musse. „Simulating Virtual Crowds in Emergency Situations”. W: *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '05. Monterey, CA, USA: ACM, 2005, s. 244–252. ISBN: 1-59593-098-1. DOI: [10.1145/1101616.1101666](https://doi.org/10.1145/1101616.1101666).
- [21] Nanda Wijermans. „Understanding Crowd Behaviour”. Prac. dokt. University of Groningen, 2011.
- [22] Timo Korhonen, Simo Hostikka, Simo Heliövaara i Harri Ehtamo. „FDS+Evac: An Agent Based Fire Evacuation Model”. W: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Red. Wolfram W. F. Klingsch, Christian Rogsch, Andreas Schadschneider i Michael Schreckenberg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, s. 109–120. ISBN: 978-3-642-04504-2. DOI: [10.1007/978-3-642-04504-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2_8).
- [23] Dirk Helbing, Illés J. Farkas i Tamás Vicsek. „Freezing by Heating in a Driven Mesoscopic System”. W: *Phys. Rev. Lett.* 84 (6 2000), s. 1240–1243.

- [24] Fredrik Johansson, Anders Peterson i Andreas Tapani. „Waiting pedestrians in the social force model”. W: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 419.0 (2015), s. 95–107. ISSN: 0378-4371. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2014.10.003>.
- [25] Muramatsu Masakuni, Irie Tunemasa i Nagatani Takashi. „Jamming transition in pedestrian counter flow”. W: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 267.3 - 4 (1999), s. 487–498. ISSN: 0378-4371. DOI: [10.1016/S0378-4371\(99\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00018-7).
- [26] Minoru Fukui i Yoshihiro Ishibashi. „Self-Organized Phase Transitions in Cellular Automaton Models for Pedestrians”. W: *Journal of the Physical Society of Japan* 68.8 (1999), s. 2861–2863. DOI: [10.1143/JPSJ.68.2861](https://doi.org/10.1143/JPSJ.68.2861).
- [27] Katsuhiro Nishinari, Ansgar Kirchner, Alireza Namazi i Andreas Schadschneider. „Extended Floor Field CA Model for Evacuation Dynamics.” W: *IEICE Transactions* 87-D.3 (2004), s. 726–732.
- [28] Andreas Schadschneider, Wolfram Klingsch, Hubert Klupfel, Tobias Kretz, Christian Rogsch i Armin Seyfried. „Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications”. W: *Extreme Environmental Events*. Springer New York, 2011, s. 517–550. ISBN: 978-1-4419-7694-9. DOI: [10.1007/978-1-4419-7695-6\\_29](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_29).
- [29] Jarosław Waś, Bartłomiej Gudowski i Paweł J. Matuszyk. „Social distances model of pedestrian dynamics”. W: *Proceedings of the 7th international conference on Cellular Automata for Research and Industry*. ACRI'06. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, s. 492–501. ISBN: 3-540-40929-7, 978-3-540-40929-8. DOI: [10.1007/11861201\\_57](https://doi.org/10.1007/11861201_57).
- [30] J. Was, W. Mysliwiec i R. Lubas. „Towards Realistic Modeling of Crowd Compressibility”. English. W: *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Red. Richard D. Peacock, Erica D. Kuligowski i Jason D. Averill. Springer US, 2011, s. 527–534. ISBN: 978-1-4419-9724-1. DOI: [10.1007/978-1-4419-9725-8\\_47](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9725-8_47).
- [31] Jarosław Waś, Robert Lubas i Wojciech Mysliwiec. „Proxemics in Discrete Simulation of Evacuation.” W: *ACRI*. Red. Georgios Ch. Sirakoulis i Stefania Bandini. T. 7495. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2012, s. 768–775. ISBN: 978-3-642-33349-1.
- [32] Jarosław Waś, Bartłomiej Gudowski i Paweł J. Matuszyk. „Social distances model of pedestrian dynamics”. W: *Proceedings of the 7th international conference on Cellular Automata for Research and Industry*. ACRI'06. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, s. 492–501. ISBN: 3-540-40929-7, 978-3-540-40929-8. DOI: [10.1007/11861201\\_57](https://doi.org/10.1007/11861201_57).
- [33] K.N. Tran, A. Gala, I.A. Kakadiaris i S.K. Shah. „Activity Analysis in Crowded Environments Using Social Cues for Group Discovery and Human Interaction Modeling”. W: *Pattern Recognition Letters (in print)* 2013.0 (2013). ISSN: 0167-8655.
- [34] Jarosław Waś i Robert Lubaś. „Adapting Social Distances Model for Mass Evacuation Simulation”. W: *Journal of Cellular Automata* 8 (5 - 6 2013), s. 395–405.

- [35] Franziska Klugl, Georg Klubertanz i Guido Rindsfuser. „Agent-Based Pedestrian Simulation of Train Evacuation Integrating Environmental Data”. W: *KI 2009: Advances in Artificial Intelligence*. Red. Barbel Mertsching, Marcus Hund i Zaheer Aziz. T. 5803. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2009, s. 631–638. ISBN: 978-3-642-04616-2.
- [36] Ulrich Weidmann. *Transporttechnik der Fussgänger – Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literaturauswertung, Schriftenreihe des IVT*. Spraw. tech. 90. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Zurich, 1992.
- [37] Jarosław Waś, Bartłomiej Gudowski i Paweł J. Matuszyk. „New Cellular Automata Model of Pedestrian Representation”. W: *Cellular Automata*. T. 4173. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2006, s. 724–727. ISBN: 978-3-540-40929-8. DOI: [10.1007/11861201\\_88](https://doi.org/10.1007/11861201_88).
- [38] Ewa Dudek-Dyduch i Jarosław Waś. „Knowledge Representation of Pedestrian Dynamics in Crowd: Formalism of Cellular Automata”. W: *Artificial Intelligence and Soft Computing - ICAISC 2006, 8th International Conference, Zakopane, Poland, June 25-29, 2006, Proceedings*. 2006, s. 1101–1110.
- [39] W. Daamen. „Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities”. Prac. dokt. Delft University of Technology, The Netherlands, 2004.
- [40] K. Zia, A. Ferscha, A. Riener, M. Wirz, D. Roggen, K. Kloch i P. Lukowicz. „Pervasive computing in the large: The Socionical approach”. W: *Proceedings of the 8th International Conference on Pervasive Computing, Helsinki, Finland, May 2010*. Springer Verlag, 2010.
- [41] Stefania Bandini, Sara Manzoni i Giuseppe Vizzari. „Situating Cellular Agents: a Model to Simulate Crowding Dynamics”. W: *Transactions on Information Systems* (2004), s. 669–676.
- [42] Hubert Klupfel. „A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation”. Prac. dokt. University Duisburg–Essen, 2003.
- [43] Andreas Schadschneider i Armin Seyfried. „Validation of CA Models of Pedestrian Dynamics with Fundamental Diagrams”. W: *Cybernetics and Systems* (2009), s. 367–389.
- [44] Jakub Porzycki, Robert Lubas, Marcin Mycek i Jarosław Waś. „Application of NIST Technical Note 1822 to CA Crowd Dynamics Models Verification and Validation”. English. W: *Cellular Automata*. Red. Jarosław Waś, Georgios Ch. Sirakoulis i Stefania Bandini. T. 8751. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014, s. 447–452. ISBN: 978-3-319-11519-1. DOI: [10.1007/978-3-319-11520-7\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11520-7_46).
- [45] Robert Lubas, Marcin Mycek, Jakub Porzycki i Jarosław Waś. „Verification and Validation of Evacuation Models - Methodology Expansion Proposition”. W: *Transportation Research Procedia* 2.0 (2014). The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED 2014), 22-24 October 2014, Delft, The Netherlands, s. 715–723. ISSN: 2352-1465. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.079>.

- [46] Robert nad Porzycki Jakub Lubaś, Jarosław Wąs i Mycek Marcin. „Validation and Verification of CA-Based Pedestrian Dynamics Models”. W: *Journal of Cellular Automata* 11 (2016), s. 285–298.
- [47] M. Schultz, S. Lehmann i H. Fricke. „A discrete microscopic model for pedestrian dynamics to manage emergency situations in airport terminals”. English. W: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. Red. Nathalie Waldau, Peter Gattermann, Hermann Knoflacher i Michael Schreckenberg. Springer Berlin Heidelberg, 2007, s. 369–375. ISBN: 978-3-540-47062-5. DOI: 10.1007/978-3-540-47064-9\_35.
- [48] Marcin Mycek, Robert Lubas, Jakub Porzycki i Jaroslaw Was. „An Expanded Concept of the „Borrowed Time” in Pedestrian Dynamics Simulations”. English. W: *Traffic and Granular Flow '13*. Red. Mohcine Chraïbi, Maik Boltes, Andreas Schadschneider i Armin Seyfried. Springer International Publishing, 2015, s. 257–263. ISBN: 978-3-319-10628-1. DOI: 10.1007/978-3-319-10629-8\_31.
- [49] Enrico Ronchi, Erica D. Kuligowski, Paul A. Reneke, Richard D Peacock i Daniel Nilsson. *NIST Technical Note 1822, The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models*. Spraw. tech. NIST, 2013.
- [50] Tobias Kretz, Anna Grünebohm, Maike Kaufman, Florian Mazur i Michael Schreckenberg. „Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor”. W: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2006.10 (2006), P10001.
- [51] Andrea Portz i Armin Seyfried. „Analyzing stop-and-go waves by experiment and modeling”. W: *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Springer, 2011, s. 577–586.
- [52] K. Nishinari, A. Kirchner, A. Namazi i A. Schadschneider. „Simulations of Evacuation by an Extended Floor Field CA Model”. English. W: *Traffic and Granular Flow 2003*. Red. Serge P. Hoogendoorn, Stefan Luding, Piet H.L. Bovy, Michael Schreckenberg i Dietrich E. Wolf. Springer Berlin Heidelberg, 2005, s. 405–410. ISBN: 978-3-540-25814-8.
- [53] Armin Seyfried, Bernhard Steffen, Wolfram Klingsch, Thomas Lippert i Maik Boltes. „The Fundamental Diagram of Pedestrian Movement Revisited — Empirical Results and Modelling”. W: *Traffic and Granular Flow'05*. Red. Andreas Schadschneider, Thorsten Pöschel, Reinhart Kühne, Michael Schreckenberg i Dietrich E. Wolf. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, s. 305–314. ISBN: 978-3-540-47641-2.
- [54] National Fire Protection Association i Society of Fire Protection Engineers. *SFPE handbook of fire protection engineering*. National Fire Protection Association, 2002. ISBN: 9780877654513.
- [55] Ulrich Weidmann. *Transporttechnik der Fussgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturstudie)*. Literature Research 90. in German. ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich: Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau IVT an der ETH Zürich, mar. 1993.

- [56] Masamitsu Mori i Hiroshi Tsukaguchi. „A new method for evaluation of level of service in pedestrian facilities”. W: *Transportation Research Part A: General* 21.3 (1987), s. 223–234. ISSN: 0191-2607.
- [57] Jakub Porzycki, Jarosław Wąs, Robert Lubaś i Grzegorz Bazior. „Granularity of Pre-movement Time Distribution in Crowd Evacuation Simulations”. W: *Traffic and Granular Flow '15*. Red. Victor L. Knoop i Winnie Daamen. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 305–312.
- [58] Armin Seyfried, Oliver Passon, Bernhard Steffen, Maik Boltes, Tobias Rupprecht i Wolfram Klingsch. „New Insights into Pedestrian Flow Through Bottlenecks”. W: *Transportation Science* 43.3 (sierp. 2009), s. 395–406. ISSN: 1526-5447.
- [59] Andreas Schadschneider, Wolfram Klingsch, Hubert Klüpfel, Tobias Kretz, Christian Rogsch i Armin Seyfried. „Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications”. English. W: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Red. Robert A. Meyers. Springer New York, 2009, s. 3142–3176. ISBN: 978-0-387-75888-6. DOI: [10.1007/978-0-387-30440-3\\_187](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_187).
- [60] J. Zhang, W. Klingsch, A. Schadschneider i A. Seyfried. „Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions”. W: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2011.6 (2011).
- [61] Pavel Hrabák, Jakub Porzycki, Marek Bukáček, Robert Lubaś i Jarosław Wąs. „Advanced CA Crowd Models of Multiple Consecutive Bottlenecks”. W: *Cellular Automata*. Red. Samira El Yacoubi, Jarosław Wąs i Stefania Bandini. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 396–404. ISBN: 978-3-319-44365-2.
- [62] Martin Fowler. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2002. ISBN: 0321127420.
- [63] Erich Gamma, Richard Helm, Ralph E. Johnson i John Vlissides. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley, Reading, MA., 1995.
- [64] Rajesh K Karmani, Nicholas Chen, Bor-Yiing Su, Amin Shali i Ralph Johnson. „Barrier synchronization pattern”. W: *Computer Science Department University of Illinois and EECS Department University of California* (2009).
- [65] Joseph Albahari i Ben Albahari. *C# 4.0 in a Nutshell: The Definitive Reference*. O'Reilly Media, Inc., 4th edition, 2010.
- [66] Adrian Kłusek, Paweł Topa, Jarosław Wąs i Robert Lubaś. „An implementation of the Social Distances Model using multi-GPU systems”. W: *The International Journal of High Performance Computing Applications* 32.4 (2018), s. 482–495. DOI: [10.1177/1094342016679492](https://doi.org/10.1177/1094342016679492). eprint: <https://doi.org/10.1177/1094342016679492>.

- [67] Jarosław Waś. „Experiments on Evacuation Dynamics for Different Classes of Situations”. English. W: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Red. Wolfram W. F. Klingsch, Christian Rogsch, Andreas Schadschneider i Michael Schreckenberg. Springer Berlin Heidelberg, 2010, s. 225–232. ISBN: 978-3-642-04503-5.
- [68] Robert Lubaś, Janusz Miller, Marcin Mycek, Jakub Porzycki i Jarosław Waś. „Three Different Approaches in Pedestrian Dynamics Modeling - A Case Study”. English. W: *New Results in Dependability and Computer Systems*. Red. Wojciech Zamojski, Jacek Mazurkiewicz, Jarosław Sugier, Tomasz Walkowiak i Janusz Kacprzyk. T. 224. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer International Publishing, 2013, s. 285–294. ISBN: 978-3-319-00944-5.
- [69] Mohcine Chraïbi, Armin Seyfried i Andreas Schadschneider. „Generalized centrifugal-force model for pedestrian dynamics”. W: *Phys. Rev. E* 82 (4 paź. 2010), s. 046111. DOI: [10.1103/PhysRevE.82.046111](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.046111).
- [70] V. Coscia i C. Canavesio. „First Order Macroscopic Modelling of Human Crowd Dynamics”. W: *Math. Models Methods Appl. Sci* 18 (2008), s. 1217–1247.

## Opublikowane prace autora

### Spis publikacji indeksowanych na liście JCR

1. Adrian Kłusek, Paweł Topa, Jarosław Wąs, Robert Lubaś. „An implementation of the Social Distances Model using multi-GPU systems”. W: *The International Journal of High Performance Computing Applications* 32.4, Sage (2018), s. 482–495.
2. Robert Lubaś, Jarosław Wąs i Jakub Porzycki. „Validation and Verification of CA-Based Pedestrian Dynamics Models”. W: *Journal of Cellular Automata*, Old City Publishing (11 2016), s. 285–298.
3. Robert Lubaś, Jarosław Wąs i Jakub Porzycki. „Cellular Automata as the basis of effective and realistic agent-based models of crowd behavior”. W: *The Journal of Supercomputing* 72.6, Springer (2016), s. 2170–2196.
4. Jarosław Wąs i Robert Lubaś. „Towards realistic and effective Agent-based models of crowd dynamics.” W: *Neurocomputing* 146, Elsevier (2014), s. 199–209.
5. Jarosław Wąs i Robert Lubaś. „Adapting Social Distances Model for Mass Evacuation Simulation.” W: *Journal of Cellular Automata*, Old City Publishing (2013), s. 395–405.

### Pozostałe publikacje:

1. Jarosław Wąs, Jakub Porzycki i Robert Lubaś. „Walidacja i wiarygodność narzędzi do symulacji ewakuacji osób”. W: *Budownictwo podziemne i bezpieczeństwo w komunikacji drogowej i infrastrukturze miejskiej*, (2016), 94–97.
2. Pavel Hrabák, Jakub Porzycki, Marek Bukáček, Robert Lubaś i Jarosław Wąs. „Advanced CA Crowd Models of Multiple Consecutive Bottlenecks”. W: *Cellular Automata*. Springer International Publishing, 2016, s. 396–404.
3. Jakub Porzycki, Robert Lubaś, Marcin Mycek, Jarosław Wąs. „Granularity of Pre-movement Time Distribution in Crowd Evacuation Simulations”. W: *Traffic and Granular Flow '15*, Springer International Publishing, 2016, s. 305–312.
4. Robert Lubaś, Jakub Porzycki, Jarosław Wąs. „Distributed computing in crowd dynamics simulation systems”. W: *Traffic and Granular Flow '15*, Springer International Publishing, 2016.
5. Marcin Mycek, Robert Lubaś, Jakub Porzycki, Jarosław Wąs. „An Expanded Concept of the „Borrowed Time” in Pedestrian Dynamics Simulations”. W: *Traffic and Granular Flow '13*. 2015, s. 257–263.



6. Robert Lubaś, Marcin Mycek, Jakub Porzycki, Jarosław Wąs. „Verification and Validation of Evacuation Models - Methodology Expansion Proposition”. W: *Transportation Research Procedia* 2.0 (2014).
7. Jarosław Wąs, Jakub Rakoczy, Michał Rus, Jakub Porzycki, Robert Lubaś, Marcin Mycek, Katarzyna Szawan, „Problematyka modelowania i symulacji ewakuacji ludzi z tuneli” W: *BiBT* 2014, 171–177.
8. Jakub Porzycki, Marcin Mycek, Robert Lubaś, Jarosław Wąs. „Pedestrian Spatial Self-organization According to its Nearest Neighbor Position”. W: *Transportation Research Procedia*, 2014.
9. Jakub Porzycki, Robert Lubaś, Marcin Mycek, Jarosław Wąs. „Application of NIST Technical Note 1822 to CA Crowd Dynamics Models Verification and Validation”. W: *Cellular Automata, Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, 2014, s. 447–452.
10. Robert Lubaś, Janusz Miller, Marcin Mycek, Jakub Porzycki, Jarosław Wąs. „Three Different Approaches in Pedestrian Dynamics Modeling - A Case Study”. W: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2013, s. 285–294.