

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA  
WYDZIAŁ PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

MODELOWANIE RUCHU ULICZNEGO  
ZA POMOCĄ AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

MACIEJ BARTODZIEJ

*Praca dyplomowa napisana  
pod kierunkiem:  
dr Rafała WERONA*

# SPIS TREŚCI

<b>WSTĘP</b>	<b>4</b>
<b>1. CO TO SĄ AUTOMATY KOMÓRKOWE ?</b>	<b>6</b>
1.1. HISTORIA	6
1.2. DEFINICJA	7
<b>2. BUDOWA</b>	<b>8</b>
2.1. SIATKA AUTOMATU KOMÓRKOWEGO	8
2.2. SĄSIEDZTWO KOMÓREK	9
2.2.1. SĄSIEDZTWO VON NEUMANNA	9
2.2.2. SĄSIEDZTWO MOOREA	9
2.2.3. SĄSIEDZTWO MARGOLUSA	10
2.3. WARUNKI BRZEGOWE	10
2.3.1. PERIODYCZNE	11
2.3.2. POCHŁANIAJĄCE	11
2.3.3. ODBIJAJĄCE	11
2.4. PRZESTRZEŃ STANÓW	11
2.5. FUNKCJA PRZEJŚCIA	12
2.6. WARUNKI POCZĄTKOWE	12
<b>3. PRZYKŁADOWE AUTOMATY KOMÓRKOWE</b>	<b>13</b>
3.1. AUTOMATY JEDNOWYMIAROWE	13
3.2. AUTOMATY DWUWYMIAROWE – „GRA W ŻYCIE”	15
3.2.1. OPIS REGUŁ	15
3.2.2. STRUKTURY	15
3.3. AUTOMATY DWUWYMIAROWE – „MRÓWKA LANGTONA”	16
<b>4. MODELOWANIE RUCHU ULICZNEGO</b>	<b>18</b>
4.1. MODEL „CHOPARDA-LUTHUEGO-QUELOZA” („PODSTAWOWY”)	18
4.2. MODEL „NAGELA-SCHRECKENBERGA”	19
4.2.1. OPIS	19
4.2.2. ZASTOSOWANIE	22
4.3. MODEL „RUCH OKRĘŻNY”	23
4.3.1. OPIS	23
4.3.2. OBSERWACJE	24
4.4. MODEL „ZMIANA PASA RUCHU”	27
4.5. MODEL „SYGNALIZACJA ŚWIETLNA”	30
4.5.1. OPIS	30
4.5.2. OBSERWACJE	32
4.6. MODEL „CHOWDHURYEGO-SCHADSCHNEIDERA”	35
4.7. MODEL „SKRZYŻOWANIA”	37
4.7.1. OPIS	37
4.7.2. OBSERWACJE	39

<b>4.8. MODEL „ZMIANA OGRANICZENIA PRĘDKOŚCI”</b>	<b>39</b>
4.8.1. OPIS	39
4.8.2. OBSERWACJE	40
<b>4.9. MODEL „PAS ROZBIEGOWY”</b>	<b>41</b>
4.9.1. OPIS	41
4.9.2. OBSERWACJE	44
<b>4.10. MODEL „STROMY PODJAZD”</b>	<b>46</b>
4.10.1. OPIS	46
4.10.2. OBSERWACJE	48
<b>4.11. MODEL „ZWĘŻENIE DROGI”</b>	<b>50</b>
4.11.1. OPIS	50
4.11.2. OBSERWACJE	51
<b>4.12. MODEL „SKRZYŻOWANIE”</b>	<b>54</b>
4.12.1. OPIS	54
4.12.2. OBSERWACJE	57
<b>4.13. MODEL „RONDO”</b>	<b>59</b>
4.13.1. OPIS	59
4.13.2. OBSERWACJE	62
<b>PODSUMOWANIE</b>	<b>65</b>
<b>DODATEK</b>	<b>67</b>
<b>TRAFFICSIM</b>	<b>67</b>
INSTALACJA I URUCHAMIANIE	67
OPIS	67
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>70</b>

## WSTĘP

---

Rozwój motoryzacji, będący częścią rozwoju gospodarczego, spowodował, iż posiadanie samochodu przestało być symbolem przynależności do elity społecznej, lecz stało się obowiązkiem. W konsekwencji, od kilkudziesięciu lat obserwujemy wzrost liczby poruszających się po drogach pojazdów. Wiąże się to ze wzmożonym ruchem, prowadzącym do zatorów, skutecznie utrudniających podróże, a w wielu przypadkach wręcz uniemożliwiających ją. Początkowo uważano, iż jedynym rozwiązaniem tej sytuacji jest rozbudowa sieci dróg. Z biegiem lat dostrzeżono jednak realne ograniczenia tej polityki, przez chociażby konieczność ochrony obszarów „zielonych”, które niezbędne są dla zachowania życia na naszej planecie. Dlatego też, zaistniała potrzeba usprawnienia istniejącego systemu transportu. Z pomocą stojącym w niekończących się korkach kierowcom przyszli naukowcy.

Tematem niniejszej pracy jest *„Modelowanie ruchu ulicznego za pomocą automatów komórkowych”*. Zasadniczym jej celem jest potwierdzenie posiadania umiejętności konstruowania teoretycznych modeli realnie występujących procesów. Jako bazę symulacji przyjęto sytuacje z jakimi kierowcy spotykają się na co dzień.

Praca składa się z czterech rozdziałów. W pierwszym – *„Co to są automaty komórkowe”*, opisana jest pokrótce historia automatów komórkowych. Od momentu kiedy zostały wymyślone przez Johna von Neumanna (lata czterdzieste ubiegłego wieku), aż do roku 2002, w którym wydano książkę *„A New Kind of Science”* autorstwa Stephena Wolfram. Rozdział ten zawiera również definicję automatów komórkowych, która w zwięzły i przystępny sposób przybliży czytelnikowi ich idee. W następnym – *„Budowa”*, zawarty jest obszerny opis elementów, z których złożony jest każdy automat komórkowy. W rozdziale tym znajdują się między innymi informacje na temat liczności zbioru stanów, po co stosuje się warunki brzegowe, a także w jaki sposób i gdzie przebiega ewolucja automatów komórkowych. Kolejny – *„Przykładowe automaty komórkowe”*, oprócz opisu automatów jednowymiarowych, mających zastosowanie w modelowaniu ruchu, zawiera opisy najbardziej znanych

automatów komórkowych – „Gry w życie” oraz „Mrówki Langtona”. Ostatni rozdział – „Modelowanie ruchu ulicznego” jest najważniejszym rozdziałem w niniejszej pracy. Przedstawione są w nim najróżniejsze modele oraz wyniki symulacji. Rozróżniając stopnie skomplikowania, opisy rozpoczęto od bardzo prostego modelu „Choparda-Luthuego-Queloz” („Podstawowego”), a zakończono na modelu „Rondo”, uwzględniającego możliwość zmiany kierunku jazdy przez samochody. Wszystkie symulacje zostały przeprowadzone w programie „TrafficSim”, który został napisany specjalnie na potrzeby pracy dyplomowej.

# 1. CO TO SĄ AUTOMATY KOMÓRKOWE ?

## 1.1. HISTORIA

Automaty komórkowe (ang. „*cellular automata*”) zaliczane są przez część naukowców do szerokiego i modnego ostatnio działu informatyki, jaką jest sztuczna inteligencja [8]. Ich historia sięga lat czterdziestych ubiegłego wieku. Pracujący w Narodowym Laboratorium w Los Alamos naukowiec – John von Neumann, chciał stworzyć samoreplikujący się system. Początkowo, jego pomysł opierał się na robotach, budujących inne roboty. Jednak olbrzymia liczba części potrzebnych do ich budowy, stwarzała duże problemy. W 1951 roku, jego kolega, matematyk polskiego pochodzenia i współtwórca bomby wodorowej – Stanisław Ulam, zasugerował von Neumannowi, aby ten w swoich poszukiwaniach skupił się na modelu matematycznym. Zaproponował przy tym, aby zastosował model, którym posługiwał się Ulam w prowadzonych w tym czasie studiach nad wzrostem kryształów. W wyniku współpracy obu panów, na przełomie 1952 i 1953 roku powstał pierwszy automat komórkowy. Pojedyncza komórka, wchodząca w skład dwuwymiarowej siatki, mogła przebywać w jednym z 29 stanów (kolorów). Von Neuman, aby dowieść, iż stworzony przez niego model ma zdolność samopowielania się, stworzył między innymi 200.000 konfiguracji komórek. Jego dowód został uzupełniony o szczegóły we wczesnych latach sześćdziesiątych przez Arthura Burksa.

Dostrzegając możliwości, jakie drzeją w automatach komórkowych, wiele osób zajęło się badaniami na nimi. Od 1968 roku John Conway eksperymentował z różnymi ustawieniami automatów. Początkowo, robił to głównie przy pomocy „kartki papieru i ołówka”. Później przy zastosowaniu komputera PDP-9. Dzięki jego badaniom, w 1970 roku powstał jeden z najbardziej dziś znanych automatów komórkowych - „*Gra w życie*”. Po raz pierwszy został on przedstawiony przez Martina Gardnera w październikowym wydaniu „*Scientific American*” z 1970 roku, w dziale „*Gry Matematyczne*”. Popularność jaką zyskał ten automat spowodowała, że doczekał się niezwykle dokładnych analiz. Zaowocowało to między innymi zrealizowaniem przy jego wykorzystaniu funkcji logicznych, a także sklasyfikowaniem i nazwaniem wielu układów komórek pozostających w stanie stabilnym, zmieniających się

cyklicznie, a nawet przemieszczających się po planszy. W konkursie na konfigurację komórek, która będzie rosła w nieskończoność, zwyciężyła grupa z MIT. Publikując w listopadzie 1970 roku „*działo szybowcowe*” (rysunek 11) wygrali nagrodę w wysokości 50 \$.

Na początku lat osiemdziesiątych, jednym z głównych popularyzatorów przedstawionej dziedziny nauki, był twórca pakietu „*Mathematica*” – Stephen Wolfram. W 1983 roku dokonał klasyfikacji automatów komórkowych, a w 2002 opublikował książkę „*A New Kind of Science*”, która w dogłębny sposób omawia wszystkie zagadnienia związane z automatami komórkowymi [19].

## 1.2. DEFINICJA

Od czasu powstania pierwszego automatu komórkowego upłynęło wiele lat. Dużo też czasu i uwagi poświęcono ich badaniom. Uniwersalność automatów komórkowych spowodowała, iż znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach życia: biologii, fizyce, matematyce, kryptografii, grafice komputerowej itd. Ilość rodzajów i odmian sprawiła, że bardzo trudno jest sformułować zwięzłą definicję, która w pełni by je opisywała. Ogólnie rzecz ujmując, automat komórkowy jest to matematyczny model dynamicznych procesów zachodzących w czasie. Dyskretna, d-wymiarowa przestrzeń, w której zachodzi ewolucja automatu, podzielona jest na jednakowe komórki. Każda z nich może przyjąć jeden ze stanów, przy czym liczba stanów jest skończona, ale dowolnie duża. W jednym automacie nie mogą istnieć dwie komórki, które nie mają wszystkich elementów takich samych. Budowa wszystkich komórek musi być identyczna, muszą mieć tyle samo sąsiadów, taką samą przestrzeń stanów, kształt itp. Stan komórki zmieniany jest w dyskretnych chwilach czasu, zgodnie z regułami, mówiącymi w jaki sposób zależy on od jej poprzedniego stanu i stanu jej sąsiadów [19].

## 2. BUDOWA

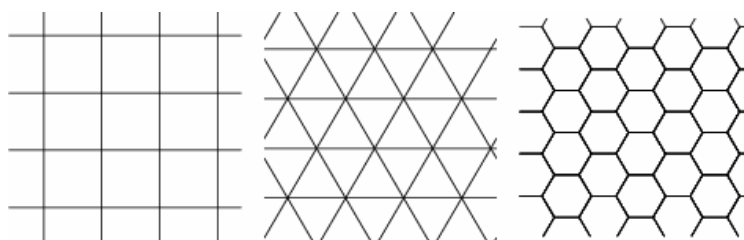
---

Rozdział „Budowa” oparty został na wydanej w 2002 roku książce Stephena Wolframa „*A New Kind of Science*”. Zaznaczyć tu należy, iż wywołała ona szereg skrajnych komentarzy. Jedni czytelnicy twierdzą, że stanowi nowe spojrzenie na naukę, co oddaje fragment artykułu zamieszczonego w *New York Times* „... Piękna książka. Szkoda, że więcej wiedzy nie przekazuje się w ten sposób” (ang. „... A beautiful book. It is too bad that more science isn't delivered this way.”) Dominuje jednak opinia, iż jest ona nudna i poza obrazkami nie ma w niej nic interesującego. Niezależnie od przedstawionych ocen, książka ta, z uwagi na nowatorskie potraktowanie tematu, stanowi cenne źródło wiedzy o automatach komórkowych.

### 2.1. SIATKA AUTOMATU KOMÓRKOWEGO

Dyskretna przestrzeń – tzw. *siatka*, w której przebiega ewolucja automatu komórkowego, zbudowana jest w całości z identycznych komórek (jak wspomniano, wszystkie komórki muszą mieć tyle samo sąsiadów, taką samą przestrzeń stanów itp.). Istnieją trzy zasadnicze elementy, które wpływają na budowę siatki, a tym samym na zachowanie się całego automatu:

- wymiar przestrzeni – siatka 1D, 2D, 3D, ...;
- warunek regularności – siatka automatu musi być w całości wypełniona przez komórki o jednakowym kształcie (komórki trójkątne, kwadratowe, heksagonalne dla siatki 2D);
- liczba sąsiadów – zależna od wymiaru siatki oraz kształtu pojedynczej komórki [17].



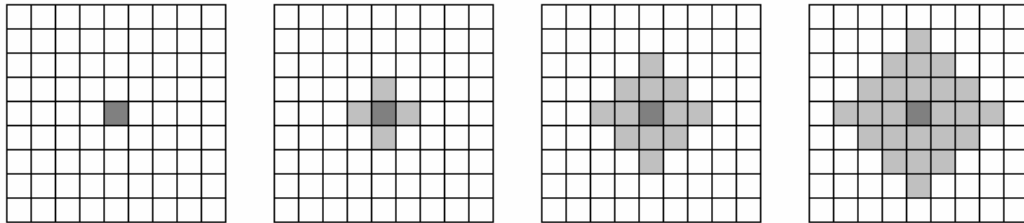
Rysunek 1. Dwuwymiarowa kwadratowa, trójkątna i heksagonalna siatka. Źródło: [17].



## 2.2. SĄSIEDZTWO KOMÓREK

### 2.2.1. SĄSIEDZTWO VON NEUMANNA

Jeżeli kierunki główne oznaczymy tak jak na róży wiatrów, czyli: N, S, E, W, a kierunki pośrednie NW, NE, SW, SE, to zbiór sąsiadów o promieniu  $r = 1$ , dla sąsiedztwa von Neumanna, złożony będzie z komórek: N, S, E, W.

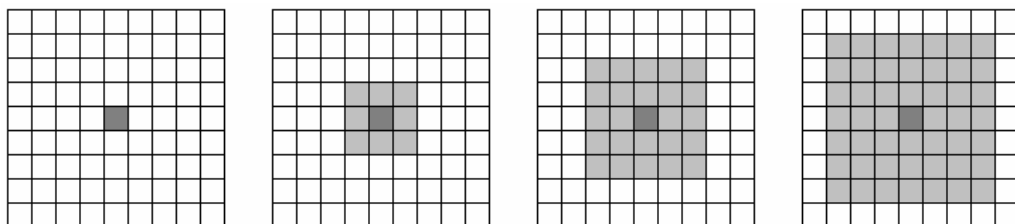


Rysunek 2. Sąsiedztwo von Neumanna dla siatki dwuwymiarowej, kwadratowej o promieniu  $r = 0, 1, 2, 3$ .

Pomimo, że jest to jedno z najprostszych sąsiedztw, to jest ono powszechnie wykorzystywane (np. „*Mrówka Langtona*”), a efekt działania opartego na nim automatu komórkowego daje bardzo skomplikowane wyniki.

### 2.2.2. SĄSIEDZTWO MOOREA

Stosując oznaczenia analogiczne do oznaczeń sąsiedztwa von Neumanna, sąsiedztwo Moorea o promieniu  $r = 1$ , tworzy zbiór ośmiu komórek ułożonych dookoła komórki centralnej (N, E, S, W, NE, NW, SE, SW).

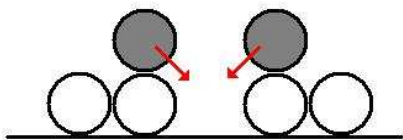


Rysunek 3. Sąsiedztwo Moorea dla siatki dwuwymiarowej, kwadratowej o promieniu  $r = 0, 1, 2, 3$ .

Podobnie jak sąsiedztwo von Neumanna, także i to jest powszechnie stosowane w wielu automatach komórkowych, np. „*Gra w życie*”.

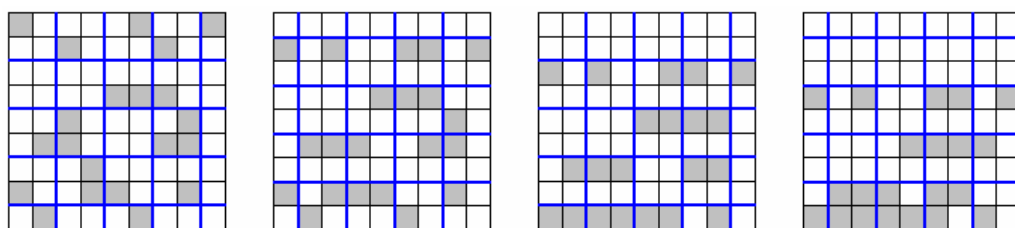
### 2.2.3. SĄSIEDZTWO MARGOLUSA

Sąsiedztwo Margolusa stosuje się między innymi w automatach symulujących spadający piasek, w których to następuje konflikt jednoczesności funkcji przejścia dla sąsiedztwa von Neumanna lub Moorea.



Rysunek 4. Przy założeniu jednoczesności, w przypadku sąsiedztwa Moore'a, nie wiadomo, która komórka powinna „spaść”.

Opiera się ono na kwadratowych blokach utworzonych przez cztery sąsiadujące ze sobą komórki. Stan wszystkich komórek, wchodzących w skład jednego bloku, zmienia się w tym samym czasie. W następnym kroku (czasie  $t+1$ ) stan komórek obliczany jest według tych samych zasad, z tą tylko różnicą, iż grupa komórek tworząca blok zmienia się [13].



Rysunek 5. Sąsiedztwo Margolusa dla siatki dwuwymiarowej, kwadratowej. Krok pierwszy, drugi, trzeci i czwarty. Bloki komórek przesuwają się o jeden w dół i w prawo.

### 2.3. WARUNKI BRZEGOWE

Z definicji, dyskretną przestrzeń, w której zachodzi ewolucja automatu komórkowego, tworzy  $d$ -wymiarowa, nieskończona siatka. Z uwagi jednak na fakt, że implementacja tego typu siatki jest niemożliwa do zrealizowania, w komputerze ma ona postać skończonej tablicy. Dlatego też ustala się warunki brzegowe, które określają zachowanie się komórek na brzegach tablicy.

### 2.3.1. PERIODYCZNE

Siatka automatu komórkowego jest zdefiniowana w ten sposób, iż symulowana cząstka po dojściu do brzegu siatki pojawia się z drugiej strony. Komórka znajdująca się na skraju ma za sąsiada komórkę leżącą po drugiej stronie siatki. Taki sposób modelowania przestrzeni bardzo dobrze oddaje nasze otoczenie (kula ziemską jest pewnego rodzaju przestrzenią periodyczną).

### 2.3.2. POCHŁANIAJĄCE

Brzegi siatki wypełnione są z góry ustaloną wartością, która powoduje, że symulowana cząstka po przekroczeniu krawędzi siatki przestaje istnieć. Warunki brzegowe pochłaniające stosuje się w automatach komórkowych, w których generowane są nowe obiekty i niezbędna jest ich redukcja lub też, kiedy przeprowadzana symulacja dotyczy pewnego wycinka większej przestrzeni.

### 2.3.3. ODBIJAJĄCE

Podobnie jak w przypadku warunków brzegowych pochłaniających, także i tu brzegi siatki wypełnione są z góry określoną wartością. Jest ona w ten sposób ustalana, że symulowana cząstka po dojściu do krawędzi „odbija” się od niej. Ten typ warunków brzegowych stosuje się w symulacjach zamkniętych przestrzeni, np. zachowanie się różnych gatunków ryb w akwarium.

## 2.4. PRZESTRZEŃ STANÓW

Przestrzeń stanów jest to skończony zbiór wartości, jakie może przyjąć pojedyncza komórka. Stany, w jakich komórka może przebywać, zależą wyłącznie od potrzeb symulacji. W najprostszym przypadku jest to pojedyncza wartość logiczna – prawda lub fałsz. W bardziej skomplikowanych modelach komórki mogą przyjąć liczbę całkowitą, zmiennoprzecinkową, wektor czy nawet rozbudowaną strukturę złożoną z wielu pól. Stan w jakim przebywa komórka w danej chwili czasu zależy od jej poprzedniego stanu i stanu jej sąsiadów.

W klasie automatów komórkowych zwanych „*Akwarium*”, komórka może znajdować się w jednym z trzech stanów – pusta, zajmowana przez ofiarę lub

przez drapieżnika. Nazwa tego automatu pochodzi od efektu jego działania przypominającego akwarium, w którym dwa gatunki stworzeń rozmnażają się, giną, a drapieżniki zjadają ofiary. Jeszcze innym przykładem może być automat komórkowy symulujący działanie wiatru. Wówczas stan komórki ma postać złożonej struktury zawierającej informacje między innymi o sile, kierunku i wysokości wiatru.

## 2.5. FUNKCJA PRZEJŚCIA

Tak, jak dyskretną przestrzeń w automatach komórkowych stanowi tablica komórek, tak dyskretny czas wyznacza kolejne cykle przeliczania. Stany poszczególnych komórek aktualizuje się w każdej dyskretniej chwili  $t = 0, 1, 2, \dots$ . Algorytm – tzw. *funkcja przejścia*, w każdej iteracji, według pewnych określonych reguł, może przeliczać kolejno wszystkie komórki, tylko jedną (na pewnej pozycji pamiętanej między iteracjami, jako bieżąca), jeden wiersz tablicy itp. Dla każdej przeliczanej komórki wyliczany jest jej nowy stan na podstawie pewnych parametrów (przede wszystkim jej stanu aktualnego i stanu sąsiadujących z nią komórek).

## 2.6. WARUNKI POCZĄTKOWE

Warunki początkowe określają stan wszystkich komórek na początku symulacji, w chwili  $t = 0$ . Są one bardzo ważnym elementem, gdyż od nich zależy, w jaki sposób będzie przebiegać dalsza ewolucja automatu, a tym samym, czy rezultat jaki otrzymamy w wyniku przeprowadzonej symulacji będzie właściwy. Przykładowo, w „Grze w życie” w zależności od stanu początkowego zależy czy po  $n$  iteracjach wszystkie komórki będą martwe, czy też będą żyć w cyklicznych formach lub do samego końca pozostaną chaotyczne, a tym samym do jakiej klasy podziału automatów komórkowych wg Stephena Wolframa będzie należeć dany automat. W niektórych automatach komórkowych konieczne jest ustalenie warunków początkowych, ponieważ w trakcie ich działania nie są generowane nowe cząstki.

### 3. PRZYKŁADOWE AUTOMATY KOMÓRKOWE

Od czasu opracowania przez Johna von Neumanna pierwszego automatu upłynęło przeszło pół wieku. Ponieważ, badaniu ich własności poświęcono wiele czasu oraz energii, aktualnie trudno jest określić ich rzeczywistą liczbę, nawet przy próbie ich klasyfikacji. Rozdział „Przykładowe automaty komórkowe” zawiera opis tylko trzech spośród nich.

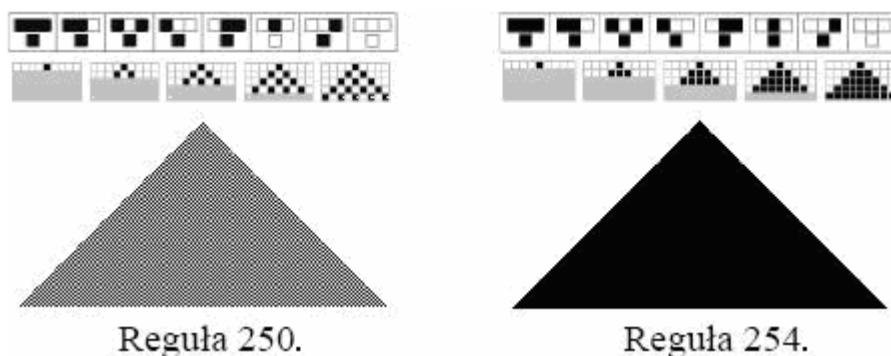
#### 3.1. AUTOMATY JEDNOWYMIAROWE

Jedną z najprostszych grup automatów komórkowych są jednowymiarowe automaty o dwóch stanach komórki – 0 lub 1, i otoczeniu złożonym z najbliższych sąsiadów. Często określa się funkcję przejścia zapisując ją w postaci liczb binarnych od 0 do 7 (000, 001, 010, 011, ...) z przypisanymi im wartościami.

111	110	101	100	011	010	001	000
0	1	0	1	1	0	1	0

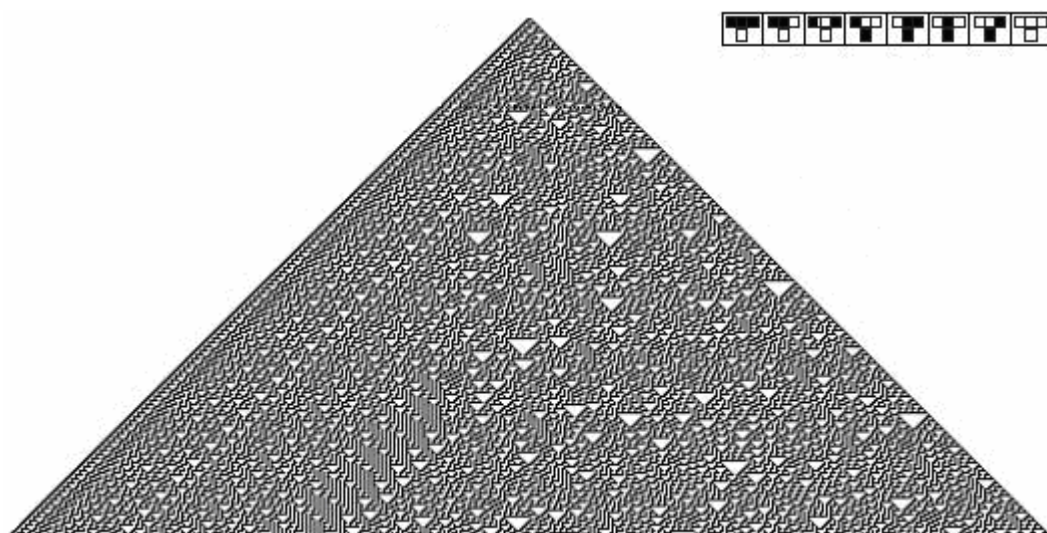
Rysunek 6. Przykładowa funkcja przejścia.

Do zdefiniowania tzw. *reguły* (funkcji przejścia) wystarczy podać ciąg ośmiu liczb „0” i „1” tworzących w zapisie binarnym kolejny numer automatu (np. dla powyższej przykładowej funkcji przejścia zapis ten będzie następujący:  $90_{\text{DEC}} = 1011010_{\text{BIN}}$ ). Nietrudno obliczyć, że wszystkich funkcji przejścia, dla tak określonego jednowymiarowego automatu komórkowego, jest  $2^8 = 256$ .



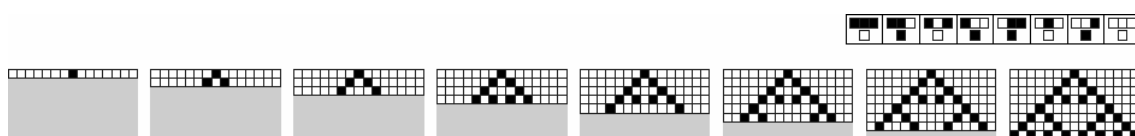
Rysunek 7. Funkcje przejścia i obrazy uzyskane przy pomocy reguły 250. i 254. Źródło: [19].

Umieszczając pod sobą wartości automatu komórkowego w kolejnych chwilach, można uzyskać najróżniejsze kształty. Część z nich jest regularna, jak np. reguła 250. i 254. Inne natomiast posiadają pewne znamiona losowości (prawa część obrazu uzyskanego przy wykorzystaniu reguły numer 30).

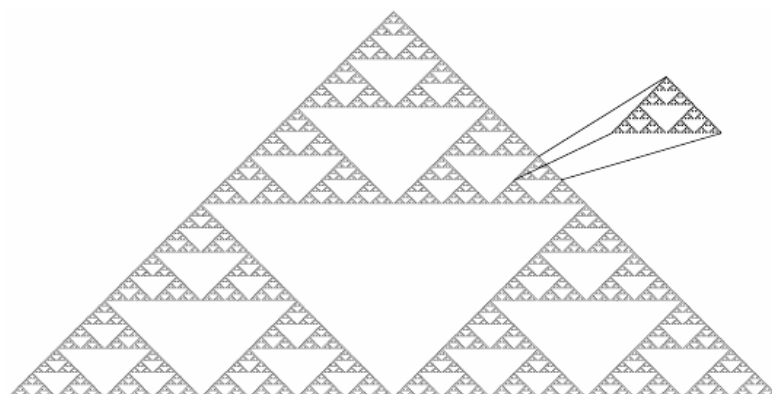


Rysunek 8. Funkcja przejścia i obraz uzyskany przy pomocy reguły 250. Źródło: [19].

Z kolei stosując regułę 90., której funkcja przejścia została przedstawiona na poniższym rysunku, można w łatwy sposób uzyskać jeden z najbardziej znanych fraktali – „*Trójkąt Sierpińskiego*” [19].



Rysunek 9. Funkcja przejścia i kilka początkowych kroków dla reguły 90. Źródło: [19].



Rysunek 10. „*Trójkąt Sierpińskiego*”. Źródło: [19].

## 3.2. AUTOMATY DWUWYMIAROWE – „GRA W ŻYCIE”

### 3.2.1. OPIS REGUŁ

Nazwa automatu pochodzi od porównania tablicy do organizmu w którym każda komórka może narodzić się, przeżyć do następnej iteracji lub zginąć. Gra toczy się w nieskończonej, dwuwymiarowej przestrzeni. Komórka ma postać kwadratu, posiada ośmiu sąsiadów – sąsiedztwo Moorea, i może przebywać w jednym z dwóch stanów – 0 („martwa”) lub 1 („żywa”). Stan, w jakim znajduje się komórka w chwili  $t+1$  obliczany jest na podstawie stanu jej sąsiadów, w chwili  $t$ , według następujących reguł:

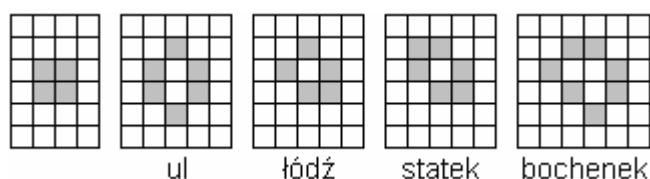
- jeżeli martwa komórka ma dokładnie trzech żywych sąsiadów, wówczas sama staje się żywa;
- jeżeli żywa komórka ma dokładnie dwóch lub trzech żywych sąsiadów, wówczas pozostaje żywa; w przeciwnym wypadku umiera.

Po obliczeniu, wszystkie komórki zmieniają swój stan dokładnie w tym samym momencie [10,13,19].

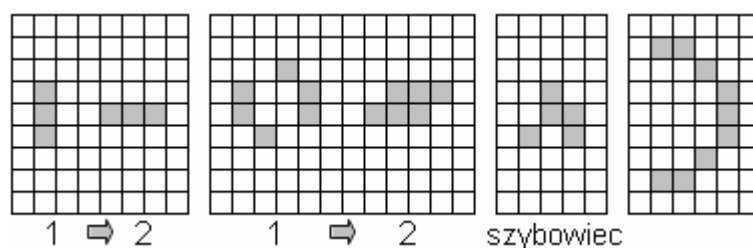
### 3.2.2. STRUKTURY

Struktury w „Grze w życie” można podzielić na trzy grupy:

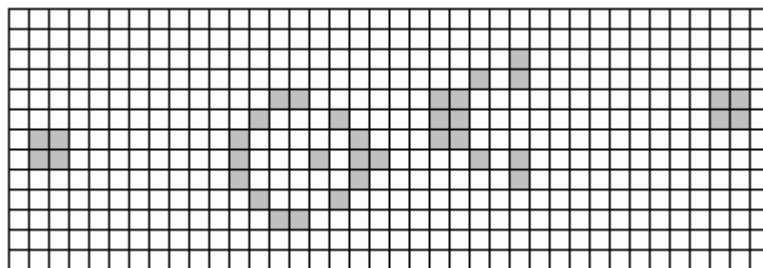
- znikające;
- zastygające po pewnym czasie;



- istniejące nieskończenie długo i wciąż poruszające się.



Przez wiele lat nie było wiadomo czy istnieje struktura trzeciego typu. W końcu udało się skonstruować układ, który przemieszcza się po planszy i nie znika – „szybowiec”. Inną, bardziej skomplikowaną i o wiele większą strukturą jest „działo szybowcowe”, „wyrzucające” z siebie co kilka iteracji „szybowiec” [10,13,19].



Rysunek 11. „Działo szybowcowe”. Źródło: [13].

### 3.3. AUTOMATY DWUWYMIAROWE – „MRÓWKA LANGTONA”

Tytułowa „mrówka”, wymyślona w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku przez Chrisa Langtona, porusza się w dwuwymiarowej przestrzeni. Komórki, z których zbudowana jest siatka, mają kształt kwadratu i mogą znajdować się w jednym z dwóch stanów – aktywnym lub nieaktywnym. Pomiędzy kolejnymi iteracjami pamiętane są następujące wartości:

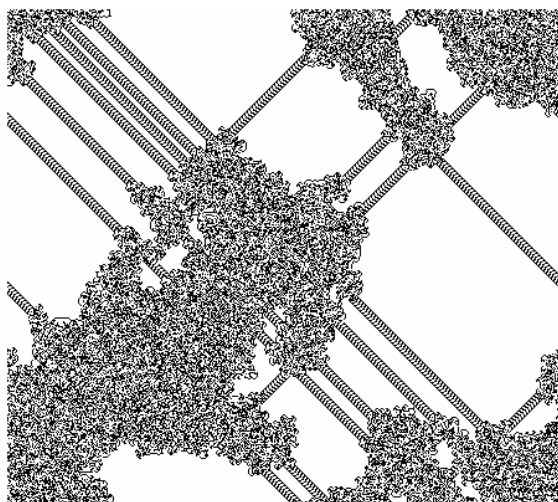
- pozycja mrówki (x,y);
- kierunek w jakim poruszała się mrówka (N, S, E, W).

Stan komórki, w jakiej znajduje się mrówka w chwili  $t+1$ , obliczany jest według następującego schematu:

1. jeżeli bieżące pole jest aktywne, zmień kierunek w jakim porusza się mrówka o 90 stopni w prawo;
2. jeżeli bieżące pole jest nieaktywne, zmień kierunek w jakim porusza się mrówka o 90 stopni w lewo;
3. zmień stan komórki w jakiej znajduje się mrówka i przesunь mrówkę o jedną komórkę do przodu.



Pomimo, że automat ten nie należy do bardzo trudnych, czasami jest on wykorzystywany do generowania skomplikowanych tekstur [11].



Rysunek 12. Siatka „*Mrówki Langtona*” o periodycznych warunkach brzegowych po 1.215.000 iteracjach.

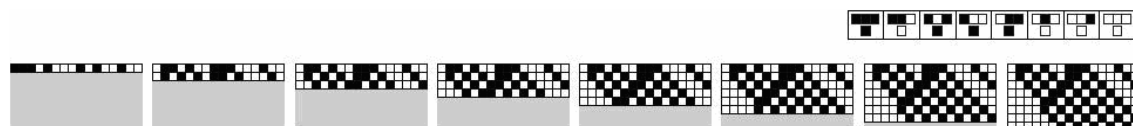
## 4. MODELOWANIE RUCHU ULICZNEGO

Rozdział „*Modelowanie ruchu ulicznego*” zawiera opis trzynastu różnych modeli ruchu. Pierwszy, drugi oraz szósty są modelami opracowanymi przez naukowców zajmujących się badaniem przepływu pojazdów na drodze (odpowiednio „*Choparda-Luthuego-Queloza*”, „*Nagela-Schreckenberga*”, „*Chowdhuryego-Schadschneidera*”). Pozostałe, stworzone zostały przez autora niniejszej pracy. Inspiracją dla modeli „*Ruch okrężny*”, „*Zmiana pasa ruchu*”, „*Sygnalizacja świetlna*”, „*Pas rozbiegowy*”, „*Stromy podjazd*” oraz „*Zwężenie drogi*” był program zamieszczony na stronie internetowej doktora Martina Treibera (<http://www.mtreiber.de>). Natomiast, „*Skrzyżowania*”, „*Zmiana ograniczenia prędkości*”, „*Skrzyżowanie*” i „*Rondo*” powstały w wyniku osobistych przemyśleń oraz obserwacji.

Dla urealnienia symulacji, w implementacji modeli „*Nagela-Schreckenberga*”, „*Ruch okrężny*”, „*Sygnalizacja świetlna*” oraz „*Zmiana ograniczenia prędkości*” przyjęto, iż symulowane drogi są dwupasmowe. Należy przy tym zaznaczyć, że każdy z pasów ruchu jest niezależny od drugiego.

### 4.1. MODEL „CHOPARDA-LUTHUEGO-QUELOZA” („PODSTAWOWY”)

Najprostszy automat komórkowy, który symuluje ruch pojazdów na jednopasmowej i jednokierunkowej drodze odpowiada regule numer 184. (patrz rozdział: 3.1) [5]. Droga reprezentowana jest przez jednowymiarową tablicę, w której to każda z komórek może przyjąć jeden z dwóch stanów – 0 (wolna) lub 1 (zajęta).



Rysunek 13. Funkcja przejścia i kilka początkowych kroków dla reguły 184.

Wszystkie samochody poruszają się w tym samym kierunku, przesuwając się jednocześnie o co najwyżej jedną pozycję. Następuje to wówczas, kiedy

komórka docelowa jest pusta (ma wartość 0). Ruch taki można opisać następującym wzorem:

$$n_i(t+1) = n_i^{\text{in}}(t)(1 - n_i(t)) + n_i(t)n_i^{\text{out}}(t) \quad (1)$$

gdzie:

- $n_i(t)$  – stan komórki numer  $i$  w chwili  $t$ ,
- $n_i^{\text{in}}(t)$  – stan komórki numer  $i-1$  w chwili  $t$ ,
- $n_i^{\text{out}}(t)$  – stan komórki numer  $i+1$  w chwili  $t$ .

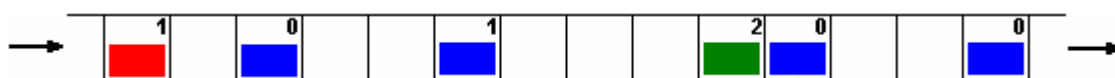
Dla periodycznych warunków brzegowych, automat ten, po pewnym czasie, staje się automatem okresowym. Ponadto, gdy liczba samochodów (komórek posiadających wartość 1) jest mniejsza od połowy wszystkich komórek, ruch na drodze staje się płynny (w kolejnych momentach czasu, żaden pojazd nie pozostaje na swoim miejscu, przemieszcza się).

Model ten niezbyt dobrze odzwierciedla rzeczywistość, gdyż nie uwzględnia wielu elementów, takich jak sygnalizacja świetlna, skrzyżowania, zdarzenia losowe występujące na drodze. Stanowi on jednak dobry wstęp do znacznie bardziej złożonych modeli.

## 4.2. MODEL „NAGELA-SCHRECKENBERGA”

### 4.2.1. OPIS

W latach 90 ubiegłego wieku dwaj niemieccy fizycy, Kai Nagel oraz Michael Schreckenberg, stworzyli model opisujący ruch pojazdów [12,16]. Jednopasmową i jednokierunkową drogę podzielili na odcinki – komórki, o długości 7,5 m, co odpowiada długości przeciętnego samochodu wraz z wolnym miejscem z przodu i z tyłu pojazdu. Każda komórka może być wolna lub zajęta przez tylko jeden samochód.



Rysunek 14. Fragment drogi w modelu „Nagela-Schreckenberga”. W prawym górnym rogu komórki znajduje się aktualna prędkość pojazdu.

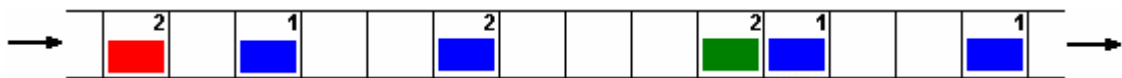
Zajęta posiada wartość liczbowa ( $V_i = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $i$  – numer komórki), która określa aktualną prędkość pojazdu znajdującego się na danym odcinku drogi ( $V_i = 5$  odpowiada 135 km/h). Niestety, w modelu tym nie uwzględniono różnych preferencji kierowców (jedne osoby jeżdżą szybciej, inne wolniej) oraz możliwości pojazdów (samochody osobowe, ciężarowe), co do prędkości maksymalnej. Funkcję przejścia podzielono na cztery etapy:

1. Przyspieszenie – wszystkie samochody zwiększają swoją prędkość o jeden, jeżeli tylko przepisy na to pozwalają (ich obecna prędkość jest mniejsza od prędkości maksymalnej). Jest to naturalne zachowanie, gdyż każdy kierowca stara się dotrzeć do miejsca przeznaczenia jak najszybciej, nie łamiąc przy tym przepisów drogowych. Krok ten można wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$V_i < V_{MAX} \rightarrow V_i = V_i + 1 \quad (2)$$

gdzie:

- $V_i$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce;
- $V_{MAX}$  – prędkość maksymalna na symulowanym odcinku drogi.



Rysunek 15. Fragment drogi przedstawionej na rysunku 14. po pierwszym kroku – przyspieszeniu. W tym przykładzie  $V_{MAX} = 2$ .

2. Hamowanie – w modelu „Nagela-Schreckenberga” wszyscy kierowcy zachowują się rozważnie i odpowiedzialnie. Dlatego też, w niektórych sytuacjach, muszą zredukować prędkość swojego samochodu, aby nie uderzyć w tył poprzedzającego ich pojazdu. Ma to miejsce wówczas, kiedy liczba wolnych komórek pomiędzy danym samochodem, a samochodem jadącym przed nim jest mniejsza, niż jego aktualna prędkość. Krok ten można wyrazić następującym wzorem:

$$V_i > d_i \rightarrow V_i = d_i \quad (3)$$

gdzie:

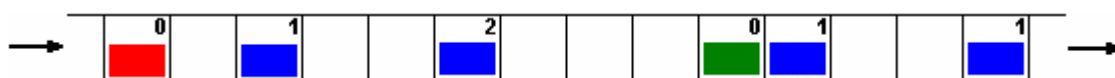
- $V_i$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce;

- 
- Diagram illustrating a sequence of colored blocks (red, blue, blue, green, blue) with labels  $d_i=1$ ,  $d_j=2$ ,  $d_k=3$ , and  $d_m=2$  above them. Arrows point to the first and last blocks.

3. Zdarzenia losowe – krok ten ma na celu symulowanie różnego rodzaju zdarzeń losowych występujących na drodze, np. wbiegnięcie na drogę dziecka, zapatrzenie się na reklamę itp. Samochód, z określonym prawdopodobieństwem, zmniejsza swoją prędkość o jeden. W zależności od potrzeb, rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia losowego może zmieniać się. Krok ten można wyrazić następującym wzorem:

$$V_i > 0 \wedge P < p \rightarrow V_i = V_i - 1 \quad (4)$$

- $V_i$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce;
- $P$  – zmienna losowa;
- $p$  – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego.



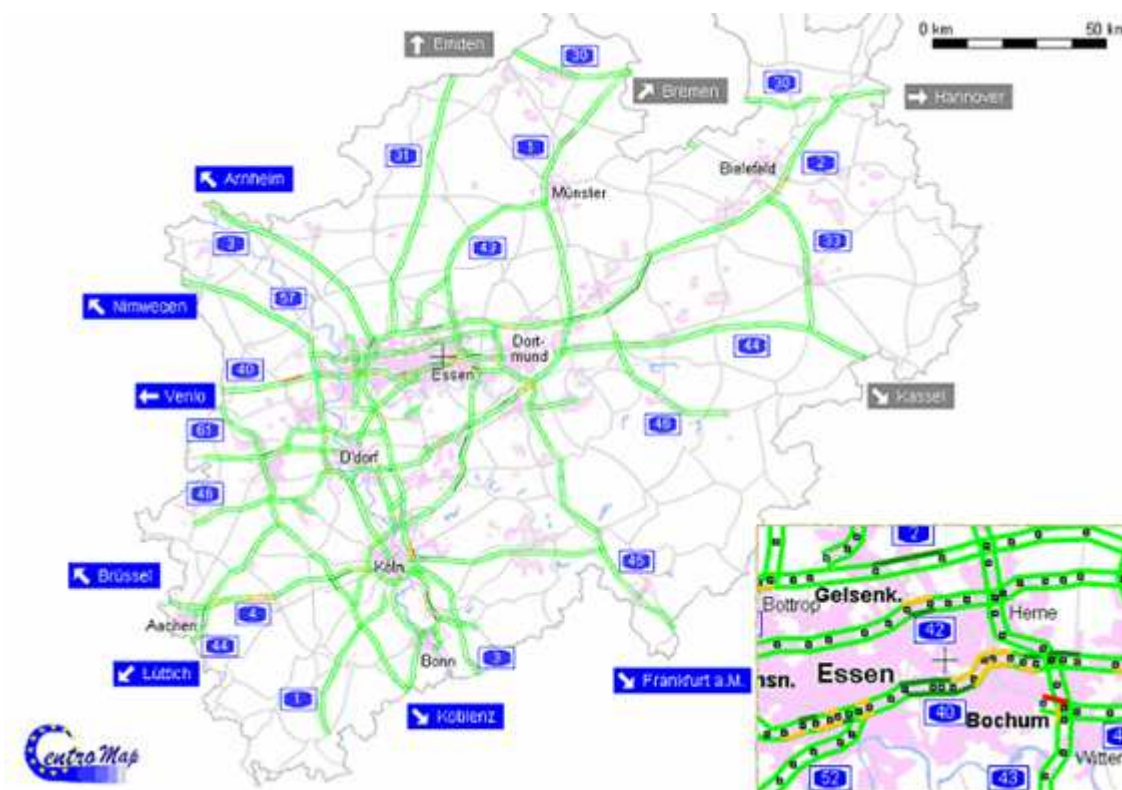
4. Przesunięcie – po *przyśpieszeniu*, *hamowaniu* i *zdarzeniu losowym*. następuje pora na ruch pojazdów. Wszystkie pojazdy przesuwają się w jednym kierunku o tyle komórek do przodu, ile wynosiła ich prędkość, a zmienna czasu zwiększa swoją wartość o jeden, z  $t$  na  $t+1$ .



Rysunek 18. Fragment drogi przedstawionej na rysunku 14. po czwartym kroku – *przesunięciu*. Samochody jadą, przesuwają się w prawo o tyle komórek, ile wynosi ich prędkość.

#### 4.2.2. ZASTOSOWANIE

Pierwsza na świecie centrala monitorująca sytuację na drodze powstała w Niemczech, a dokładniej w Zagłębiu Ruhry, z inicjatywy naukowca pracującego na uniwersytecie w Duisburgu – Michaela Schrekenberga. Dostarcza ona informacji kierowcom między innymi z okolic Kolonii, Bonn oraz Aachen. Dane z tysięcy czujników umieszczonych w drodze spływają nieprzerwanym strumieniem do centrali.



Rysunek 19. Mapa drogowa Zagłębia Ruhry z zaznaczoną sytuacją na drodze (wtorek 28 listopad 2006 r., godzina 11:18) . W prawym dolnym rogu widoczna szczegółowa mapa okolic Essen i korek niedaleko Bochum (kolor czerwony). Źródło: [18].

Na stronie internetowej <http://www.autobahn.nrw.de>, można obejrzeć nie tylko obecną sytuację na drodze, ale również jaka będzie miała miejsce za trzydzieści lub sześćdziesiąt minut. Dla każdego punktu pomiarowego, w

pamięci komputera znajdują się dane, określające jak natężenie ruchu zmieniało się w zależności od pory dnia czy roku. Komputer porównuje je z aktualnymi informacjami i na tej podstawie stara się przewidzieć przyszłość. System ten jest na tyle dobry, że prawdopodobieństwo sprawdzenia się prognozy bardzo rzadko spada poniżej 85%.

Największym problemem powstałego systemu wydaje się jego skuteczność. W przypadku, w którym wszyscy będą objeżdżać miejsce zagrożone zakorkowaniem, może nie dojść do zatoru albo co gorsza powstanie on gdzie indziej. Dlatego też, należało uwzględnić sposób myślenia kierowców. W wyniku przeprowadzanych przez trzy lata badań, dotyczących reakcji kierowców na informacje o natężeniu ruchu, Michael Schreckenberg, wraz z profesorem Reinhardem Seitenem, wyodrębnił trzy grupy zachowań. Pierwsza grupa – osoby „wrażliwe” (44%), reaguje nawet na najmniejsze niebezpieczeństwo powstania zatoru, natychmiast zmieniając trasę na inną. Z kolei druga grupa – tzw. „konserwatyści” (42%), przeważnie nie zwraca uwagi na komunikaty drogowe, niechętnie zmieniając przy tym trasę swojej podróży. Ich radykalna podgrupa – tzw. „stoicy”, okazywała się całkowicie „odporna” na ostrzeżenia o korkach. Osoby należące do niej, niezależnie od okoliczności, nie zmieniały swojej drogi. Najdziwniejsze jest jednak to, iż przeważnie to oni docierali do celu najszybciej. Ostatnia i zarazem najmniej liczna grupa – tzw. „hazardziści” (14%), spekuluje czy „wrażliwi” i „konserwatyści” zwolnią im drogę. Oni też, bardzo często z premedytacją wjeżdżali na newralgiczny odcinek [7,18].

### 4.3. MODEL „*RUCH OKRĘŻNY*”

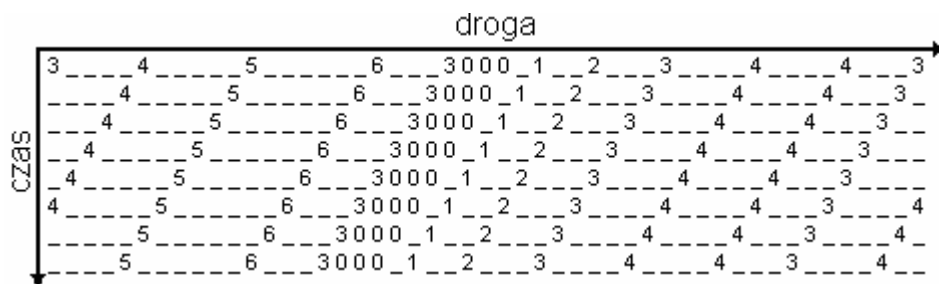
#### 4.3.1. OPIS

Model „*Ruch okrężny*”, w całości opiera się na modelu „*Nagela-Schreckenberga*”. Jednokierunkowa, jednopasmowa droga reprezentowana jest przez tablicę o jednym wierszu i  $n$  kolumnach. Każda komórka może przebywać w jednym z dwóch stanów – zajęta lub wolna przez samochód. Zajęta posiada wartość liczbową ( $V_i = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $i$  – numer komórki) określającą prędkość pojazdu znajdującego się na danym odcinku drogi. Funkcja przejścia

składa się z czterech etapów: *przyśpieszenia*, *hamowania*, *zdarzenia losowego*, *przesunięcia*. Jedyna różnica pomiędzy tym modelem, a modelem opisanym powyżej polega na tym, iż posiada on periodyczne, a nie pochłaniające warunki brzegowe. W ten sposób otrzymujemy rondo, na które nie wjeżdżają i z którego nie wyjeżdżają żadne samochody.

#### 4.3.2. OBSERWACJE

„*Ruch okrężny*” jest mało przydatny w modelowaniu przepływu pojazdów na drodze publicznej, ponieważ ruch tego typu odbywa się jedynie na torach wyścigowych. Jednak dzięki niemu, w bardzo łatwy sposób, można uzyskać tzw. *korek wsteczny*. Powstaje on wówczas, kiedy kierowca zbliżając się z dużą prędkością do poprzedzającego go pojazdu, w celu uniknięcia kolizji, musi znacznie ją zredukować. Kiedy to robi, kierowca samochodu jadącego za nim wykonuje to samo. W czasie, kiedy kolejne pojazdy hamują, kierowca jadącego na przedzie samochodu przyśpiesza i oddala się od pozostałych. W wyniku tego powstaje korek drogowy, który przesuwają się wstecz. Zjawisko to bardzo dobrze widoczne jest na poniższym rysunku. „*Korek wsteczny*” reprezentowany jest przez ciąg „0” przesuwający się w lewą stronę.



Rysunek 20. Wartości komórek automatu w kolejnych iteracjach. Zajęte komórki reprezentowane są przez liczbę oznaczającą prędkość samochodu znajdującego się na danym odcinku drogi, a wolne przez znak podkreślenia („\_”).

Jeżeli przez  $L$  oznaczmy liczbę samochodów znajdujących się na symulowanym „rondzie”, a przez  $n$  liczbę komórek na jaką zostało ono podzielone, to zagęszczenie pojazdów jest ilorazem tych dwóch wartości.

$$z = \frac{L}{n} \quad (5)$$



Natężenie ruchu –  $q$ , mierzone pomiędzy komórką  $r$  i  $r+1$ , określamy jako liczbę samochodów, które przejechały przez ten punkt od początku symulacji, aż do chwili  $T$ . Wyrazić to można za pomocą następującego wzoru:

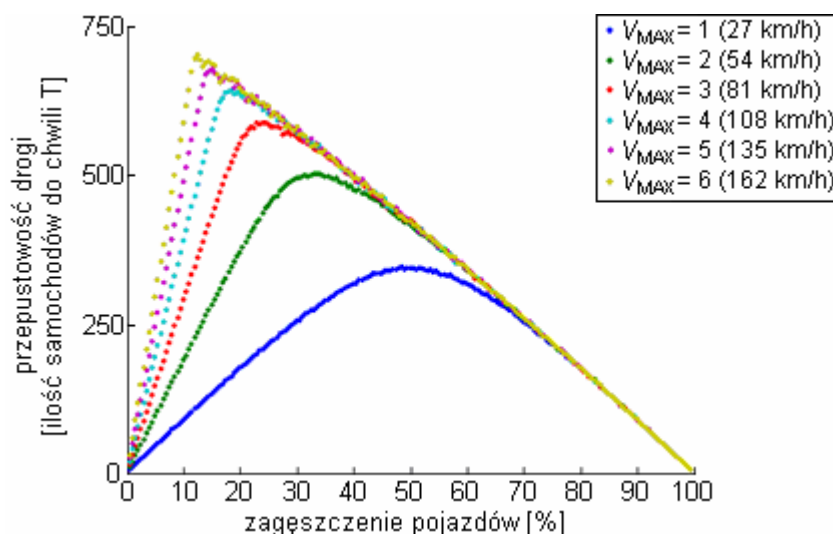
$$i + V_i > r \rightarrow q = q + 1 \quad (6)$$

gdzie:

- $i$  – jest numerem komórki, najbliższej komórce  $r$ , w której znajduje się pojazd (pomiędzy komórką  $i$ , a  $r$  nie znajduje się żaden samochód);
- $V_i$  – prędkością pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce.

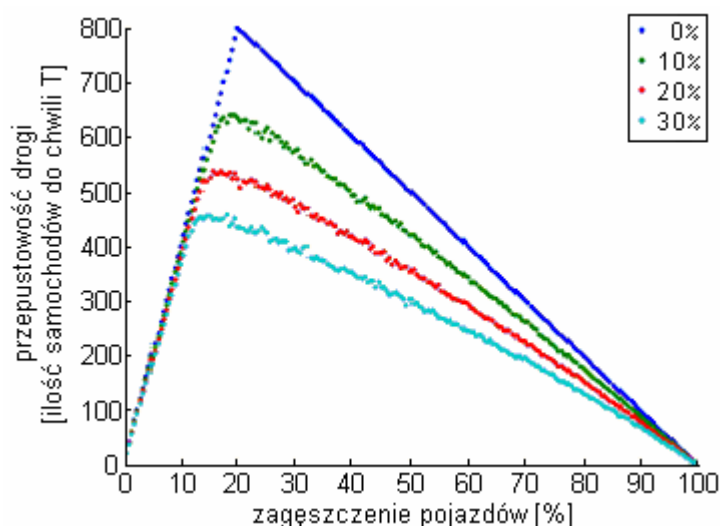
Z kolei, przepustowość drogi jest to maksymalne natężenie ruchu, przy którym ruch pojazdów zachowuje płynność.

Dla różnych wartości parametru  $V_{MAX}$  oraz różnego zagęszczenia pojazdów, przeprowadzono symulacje w specjalnie do tego celu napisanym programie. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunku 21.



Rysunek 21. Wykres zależności przepustowości drogi od zagęszczenia pojazdów, dla różnych wartości parametru  $V_{MAX}$  ( $n = 1000$ , prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego = 10%,  $T = 1000$ ).

Na ich podstawie można wywnioskować, że wraz ze wzrostem wartości parametru  $V_{MAX}$  wzrasta przepustowość drogi. Jest ona największa, gdy zagęszczenie pojazdów wynosi około  $(1+V_{MAX})^{-1} \times 100\%$ . Natomiast im większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego, tym mniejsza jest przepustowość (rysunek 22).

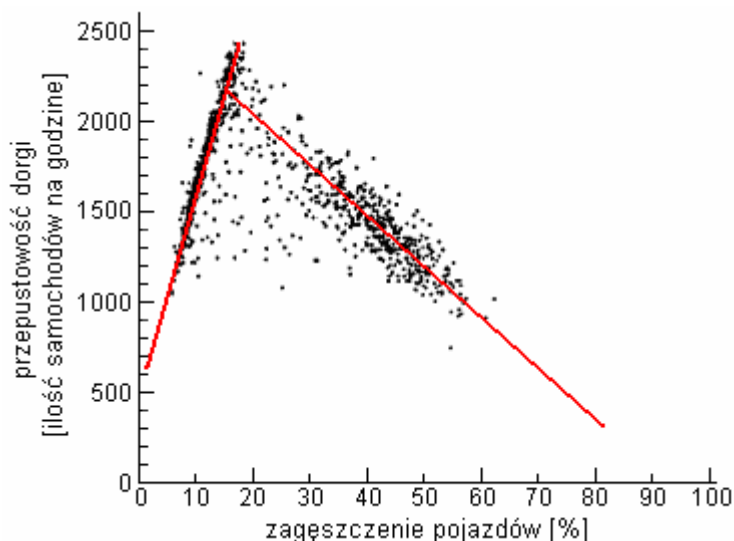


Rysunek 22. Wykres zależności przepustowości drogi od zagęszczenia pojazdów, dla różnych wartości prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia losowego ( $n = 1000$ ,  $V_{MAX} = 4$ ,  $T = 1000$ ).

Mogłoby się wydawać, iż optymalna sytuacja jest wówczas, kiedy parametr  $V_{MAX}$  ma maksymalnie dużą wartość. Jednakże, wraz z jego wzrostem, spada procentowy wzrost przepustowości. Dla  $V_{MAX} = 4$  ma on wartość 8,8%, a dla  $V_{MAX} = 6$  już tylko 3,8%. Być może dlatego, iż ostatni „duży” przyrost przepustowości ma miejsce dla  $V_{MAX} = 3$ , maksymalna prędkość poza terenem zabudowanym w rzeczywistym ruchu drogowym wynosi 90 km/h ( $V_{MAX} = 3$  odpowiada 81 km/h). Należy również pamiętać o tym, że szanse przeżycia uczestników wypadku gwałtownie spadają wraz ze wzrostem prędkości pojazdu, którym jechali.

$n = 1000$ ; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; $T = 2000$				
i	$V_{MAX(i)}$	przepustowość	wzrost przepustowości ( $V_{MAX(i)} - V_{MAX(i-1)}$ )	procentowy wzrost przepustowości
1	1	692	-	-
2	2	1006	314	45,4 %
3	3	1182	176	17,5 %
4	4	1286	104	8,8 %
5	5	1362	76	5,9 %
6	6	1414	52	3,8 %

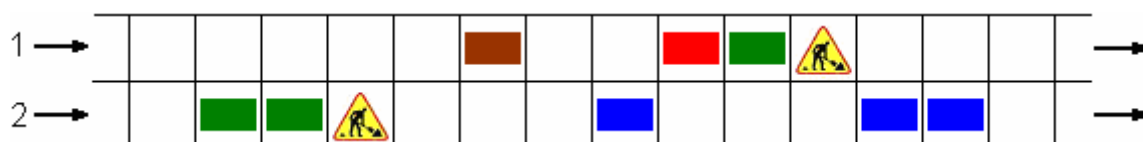
Wykres zależności przepustowości drogi od zagęszczenia pojazdów, dla  $V_{MAX} = 4$ , swoim kształtem przypomina wykres zależności przepustowości drogi od zagęszczenia pojazdów w prawdziwym ruchu (rysunek 23). Może z tego wynikać, że model „*Nalega-Schreckenberga*”, na którym oparty jest model „*Ruch okrężny*”, bardzo dobrze naśladuje rzeczywistość.



Rysunek 23. Wykres zależności przepustowości drogi od zagęszczenia pojazdów w rzeczywistym ruchu. Źródło: [1].

#### 4.4. MODEL „*ZMIANA PASA RUCHU*”

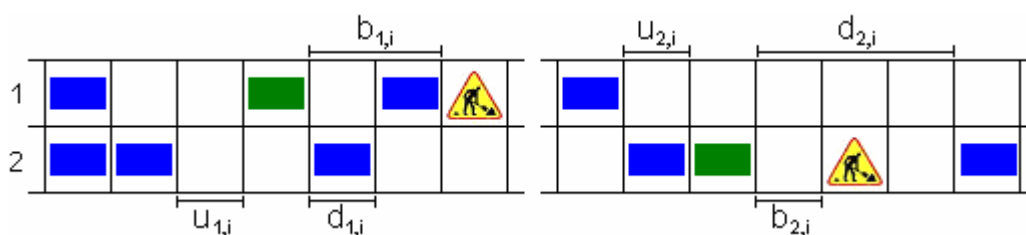
Model „*Zmiana pasa ruchu*” symuluje fragment drogi, na którym prowadzone są prace remontowe i jest w dużej mierze oparty na poprzednim modelu – „*Ruch okrężny*”. Różni się jednak od niego w trzech zasadniczych elementach. Po pierwsze, droga jest dwupasmowa, a nie jednopasmowa. Zatem siatka automatu komórkowego również uległa zmianie i ma postać tablicy dwuwymiarowej, o dwóch wierszach i  $n$  kolumnach.



Rysunek 24. Przykładowy fragment drogi w modelu „*Zmiana pasa ruchu*”.

Po drugie, komórka oprócz wartości określającej czy na danym odcinku drogi znajduje się samochód, może przyjmować jeszcze jedną, która mówi o tym, czy dany fragment drogi jest wyłączony z ruchu. Po trzecie, funkcja przejścia składa się z pięciu części:

1. Zmiana pasa ruchu – naturalną rzeczą jest, iż kierowca widząc przed sobą zwężenie drogi spowodowane np. robotami drogowymi, chce zmienić pas ruchu, aby móc bez przeszkód kontynuować podróż. Nie może tego jednak uczynić bez zwracania uwagi na innych uczestników ruchu drogowego, gdyż np. poprzez zajechanie komuś drogi może spowodować wypadek. Przed rozpoczęciem symulacji, należy ustalić dwa parametry. Pierwszy –  $b$ , określa odległość z jakiej widoczne jest zwężenie drogi (liczba komórek znajdujących się pomiędzy polem zajmowanym przez pojazd, a polem wyłączonym z ruchu). Uzależnione jest to od szeregu czynników, np. warunków atmosferycznych, ukształtowania drogi – zakrętów, roślinności znajdującej się na poboczu itp. (podobnie jak w przypadku prędkości maksymalnej, także i tu nie dokonano rozróżnienia kierowców – wszyscy mają jednakowo dobry wzrok). Drugi parametr –  $u$ , określa poziom tolerancji przy zmianie pasa ruchu, czyli odległość jaka będzie pomiędzy danym samochodem, a samochodem jadącym z tyłu, po zmianie pasa.



Rysunek 25. Wizualizacja zmiennych  $b_{j,i}$ ,  $d_{j,i}$  i  $u_{j,i}$  ( $j$  – numer drogi,  $i$  – numer komórki). Samochód, którego one dotyczą (zielony prostokąt), znajduje się w  $i$ -tej komórce pasa numer 1/2.

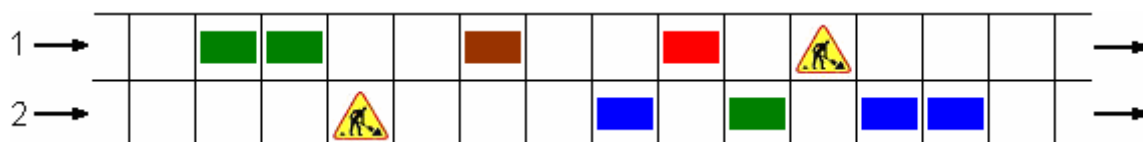
Jest to swojego rodzaju miernik „odwagi”, który mówi o tym czy kierowca zdecyduje się na zmianę pasa mając jedynie mały odcinek wolnego miejsca, czy potrzebuje go więcej (np. z uwagi na niewielkie doświadczenie). Stosując oznaczenia przedstawione na powyższym

rysunku, kierowca znajdując się w  $i$ -tej komórce pasa numer  $j$ , zmieni go, jeżeli  $i$ -ta komórka sąsiedniego pasa ( $j\%2+1$ ) jest pusta oraz:

$$b \geq b_{j,i}, u \leq u_{j,i} \quad (7)$$

gdzie:

- $b$  – odległość z jakiej widoczne są roboty drogowe;
- $b_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do najbliższej przeszkody, znajdującej się na jego pasie ruchu;
- $u$  – parametr „odwagi”;
- $u_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do samochodu jadącego za nim, znajdującego się na sąsiednim pasie ruchu.



Rysunek 26. Fragment drogi przedstawionej na rysunku 24. po pierwszym kroku – *zmianie pasa ruchu*. Roboty drogowe widoczne są z odległości 22,5 m (3 komórki), a poziom „odwagi” wynosi 1. Brązowy pojazd nie zmienił pasa ruchu, gdyż odległość pomiędzy nim, a zwężeniem drogi, wynosi 30 m (4 komórki) – kierowca nie widzi robót drogowych. Z kolei kierowca czerwonego pojazdu nie zmienił pasa ruchu, ponieważ gdyby to uczynił, pomiędzy nim a pojazdem jadącym za nim nie byłoby wolnego miejsca (nie starczyło mu „odwagi”).

2. Przyspieszenie.

3. Hamowanie – korzystając ze zmiennych przedstawionych na rysunku 25., etap ten można wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$V_{j,i} > \min(b_{j,i}, d_{j,i}) \rightarrow V_{j,i} = \min(b_{j,i}, d_{j,i}) \quad (8)$$

gdzie:

- $V_{j,i}$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$ ;
- $b_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do najbliższej przeszkody, znajdującej się na jego pasie ruchu;
- $d_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do następnego samochodu, znajdującego się na jego pasie ruchu.

4. Zdarzenie losowe.

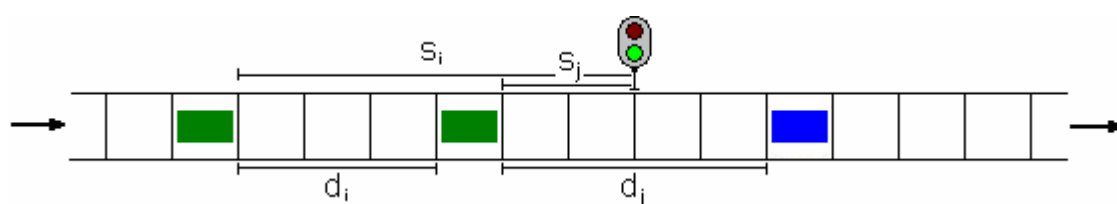
5. Przesunięcie.

Krok drugi, trzeci i piąty są takie same, jak w modelu „Nagela-Schreckenberga” i wykonywane są dla każdego z pasów osobno.

## 4.5. MODEL „SYGNALIZACJA ŚWIETLNA”

### 4.5.1. OPIS

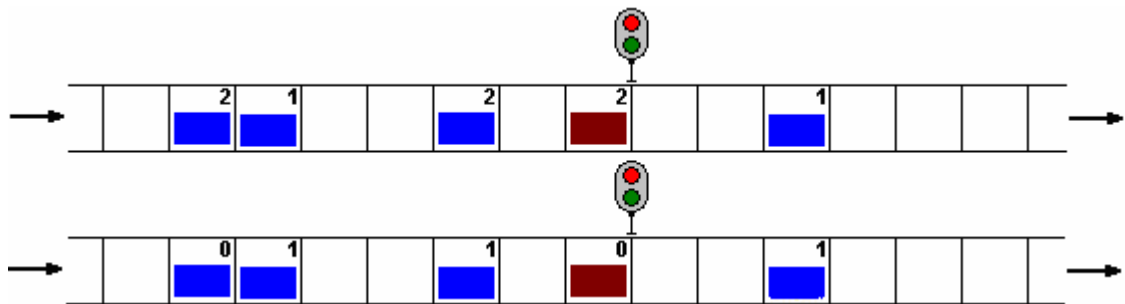
Model „Sygnalizacja świetlna” symuluje ograniczenia w ruchu spowodowane przez sygnalizację świetlną. Podobnie jak poprzednie dwa, także on oparty jest na modelu „Nagela-Schreckenberga”. Jednokierunkowa, jednopasmowa droga reprezentowana jest przez tablicę o jednym wierszu i  $n$  kolumnach oraz periodycznych warunkach brzegowych. Komórka może być wolna lub zajęta przez pojazd. Zajęta posiada wartość liczbową ( $V_i = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $i$  – numer komórki), która określa prędkość pojazdu znajdującego się na danym odcinku drogi w chwili  $t$ . Dodatkowo ustala się specjalne miejsce, pomiędzy dwiema komórkami, które odpowiada linii warunkowego zatrzymania się przed światłami. Sygnalizacja świetlna zmienia się co  $t_s$  jednostek czasu. Funkcja przejścia składa się z czterech części: *przyśpieszenia*, *hamowania*, *zdarzenia losowego* i *przesunięcia*.



Rysunek 27. Wizualizacja zmiennych  $d_i/d_j$  i  $s_i/s_j$  ( $i/j$  – numer komórki).

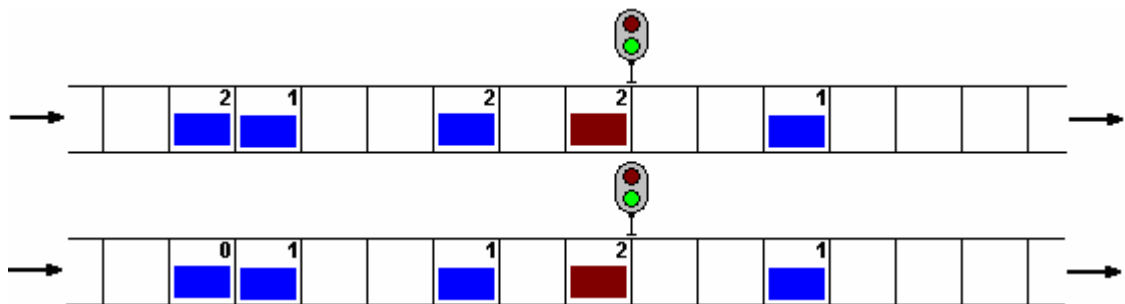
Pomiędzy tym modelem, a modelem „Nagela-Schreckenberga” jest jedna istotna różnica. W drugim kroku funkcji przejścia – *hamowania*, oprócz zmiennej oznaczającej liczbę wolnych komórek pomiędzy samochodem znajdującym się w  $i$ -tej komórce, a samochodem jadącym przed nim –  $d_i$ , jest dodatkowa zmienna –  $s_i$ . Określa ona odległość pojazdu do najbliższej sygnalizacji świetlnej. W przypadku natrafienia na światło czerwone, jeśli prędkość pojazdu

jest większa od mniejszej ze zmiennych, przyjmuje ona wartość mniejszej zmiennej.



Rysunek 28. Fragment drogi przed i po drugim kroku funkcji przejścia – *hamowaniu*, w przypadku światła czerwonego.

Jeżeli natomiast samochód natrafi na światło zielone, wówczas postępuje się tak jak w zwykłym modelu „*Nagela-Schreckenberga*”.



Rysunek 29. Fragment drogi przed i po drugim kroku funkcji przejścia - *hamowaniu*, w przypadku światła zielonego. Różnica pomiędzy tym, a poprzednim przypadkiem polega na tym, iż brązowy samochód nie zatrzymał się, ponieważ było zielone światło.

Może to się wydawać skomplikowane, ale w rzeczywistości takie nie jest. Zmodyfikowany krok drugi – *hamowanie*, można zapisać z pomocą następującej zależności. Jeżeli najbliższa sygnalizacja świetlna ma kolor:

- czerwony oraz  $V_i > \min(d_i, s_i)$ , to:  $V_i = \min(d_i, s_i)$  (9)

- zielony, to:  $V_i = \min(V_i, d_i)$  (10)

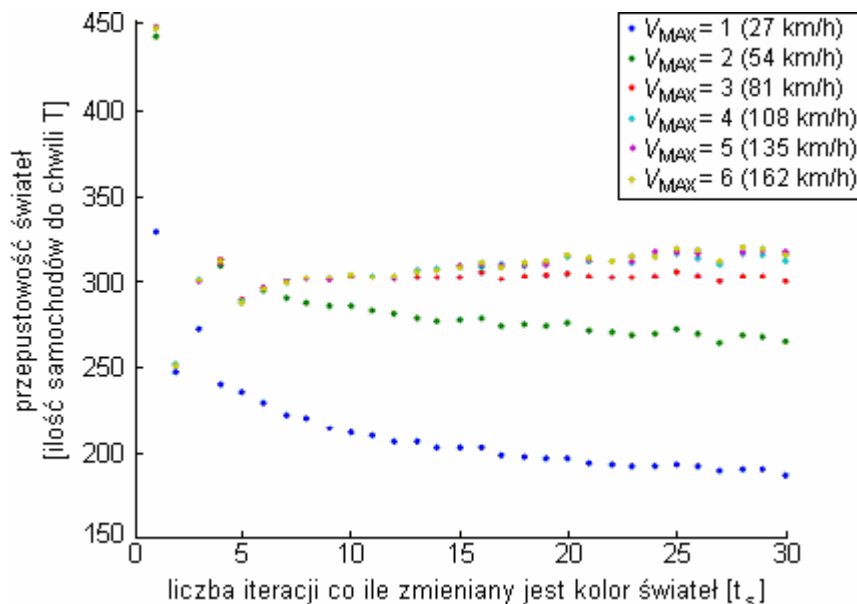
gdzie:

- $V_i$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce;
- $d_i$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce do następnego samochodu;

- $s_i$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce do najbliższych świateł.

#### 4.5.2. OBSERWACJE

Sygnalizacja świetlna na skrzyżowaniu ma za zadanie kierowanie ruchem, co w wydatny sposób zwiększa poziom bezpieczeństwa na drodze. Jednakże, jest również pewnego rodzaju przeszkodą, która w niekorzystny sposób wpływa na przepływ pojazdów. Należałoby zatem zadać pytanie: co zrobić, aby był on jak najmniejszy?



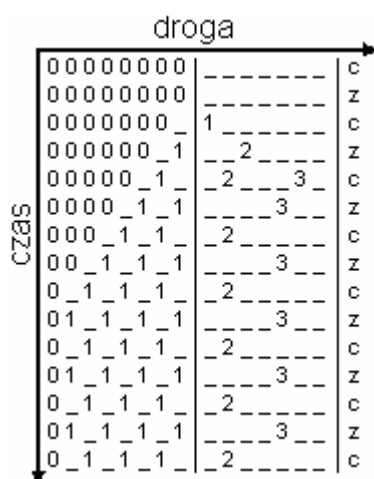
Rysunek 30. Wykres zależności przepustowości świateł od częstotliwości zmiany ich koloru, dla różnych wartości parametru  $V_{MAX}$  ( $n = 100$ ; prawdopodobieństwo pojawienia się samochodu w pierwszej komórce = 100%; prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego = 10%,  $T = 1000$ ).

Dla różnych wartości parametru  $t_s$  i  $V_{MAX}$ , przeprowadzono symulacje pięćdziesiąt razy. Przed rozpoczęciem każdej z nich, pierwsze  $k$  komórek, od początku aż do świateł, zostały „wypełnione” samochodami. Dzięki temu ma się pewność, że na światłach zawsze będzie czekać „wystarczająca” liczba pojazdów. Uśrednione wyniki przedstawione zostały na powyższym rysunku. Na ich podstawie można wywnioskować, że przepustowość sygnalizacji świetlnej zależy głównie od prędkości maksymalnej samochodów. Niezależnie od tego jaka była częstotliwość zmiany świateł –  $1/t_s$ , im większa była wartość



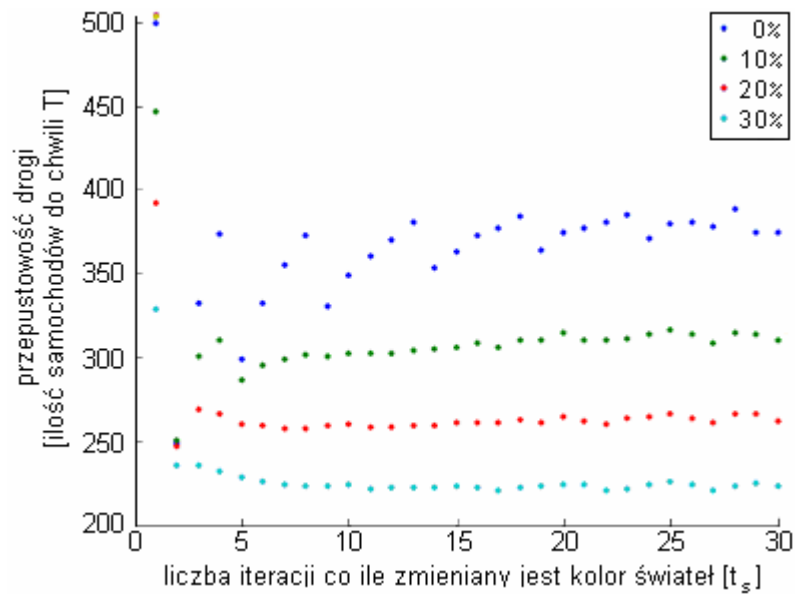
parametru  $V_{MAX}$ , tym większa była liczba przejeżdżających pojazdów. Ponadto wynika z nich, iż na drogach „szybkiego ruchu” lepiej stosować sygnalizację świetlną działającą z małą częstotliwością. Natomiast wszędzie tam, gdzie prędkość pojazdów jest stosunkowo niewielka (teren zabudowany), lepsze rezultaty dają światła w których czas oczekiwania na zmianę koloru jest krótki.

Tak samo jak w modelu „*Ruch okrężny*”, im większą wartość ma parametr  $V_{MAX}$ , tym przyrost przepustowości jest mniejszy. Dlatego też, zwiększenie prędkości maksymalnej w celu poprawienia przepustowości wirtualnych świateł, wydaje się nie najlepszym rozwiązaniem. Najbardziej optymalna sytuacja byłaby w przypadku, kiedy zagęszczenie pojazdów wynosiłoby około  $(1+V_{MAX})^{-1} \times 100\%$  – przepustowość drogi jest wówczas największa (patrz rozdział: 4.3.2), a światło miałoby kolor zielony tylko w czasie kiedy mijałby je samochód. Między innymi z tego wynika duża przepustowość dla  $t_s = 1$ .



Rysunek 31. Wartości komórek automatu w kolejnych iteracjach. Zajęte komórki reprezentowane są przez liczbę określającą prędkość samochodu znajdującego się na danym odcinku drogi, a wolne przez znak podkreślenia („\_”). Pierwsza pionowa linia oznacza linię warunkowego zatrzymania się przed światłami. Kolor świateł opisany jest przez litery znajdujące się przy prawej krawędzi wykresu: c – czerwone, z – zielone.

Tak krótki czas pozwala tylko na to, aby samochód znajdujący się tuż przed światłami mógł je pokonać. Kiedy światło ma kolor czerwony, kolejny samochód podjeżdża do przodu i hamuje się przed linią warunkowego zatrzymania, dzięki czemu „nie traci” zielonego światła na dojechanie do nich. Bardzo dobrze obrazuje to rysunek 31.



Rysunek 32. Wykres zależności przepustowości światła od częstotliwości zmiany ich koloru, dla różnych prawdopodobieństw wystąpienia zdarzenia losowego ( $n = 100$ ; prawdopodobieństwo pojawienia się samochodu w pierwszej komórce = 100%;  $V_{MAX} = 4$ ;  $T = 1000$ ).

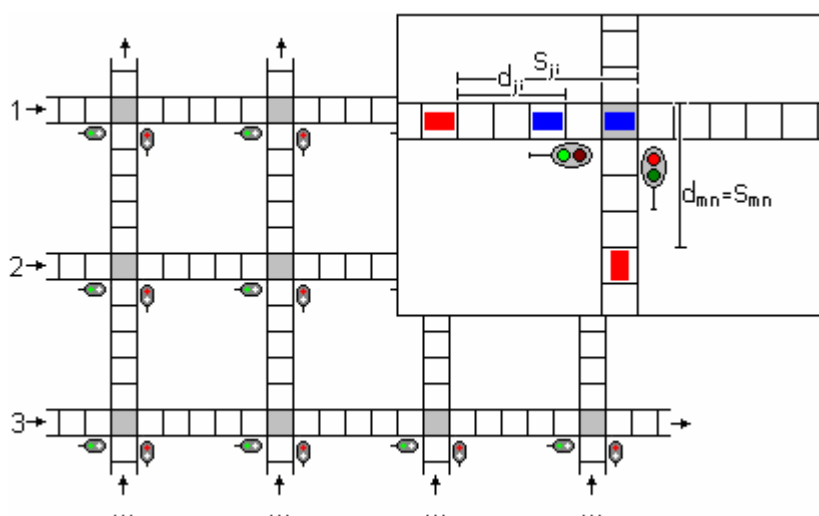
W sytuacji, gdy prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego wynosi 0%, model „Światła drogowe” jest deterministycznym automatem komórkowym. Niezależnie od tego ile razy przeprowadzalibyśmy symulację, uzyskane wyniki zawsze będą takie same. Dla niektórych wartości parametru  $t_s$ , liczba pojazdów przejeżdżających przez sygnalizację świetlną w jednym cyklu ( $N_s$ ) jest taka sama, jak dla  $t_s+1$ . Wynika z tego, że wydłużanie „zielonego światła” nie przekłada się prosto na wzrost przepustowości drogi. Widoczne jest to na wykresie zależności przepustowości sygnalizacji świetlnej od częstotliwości zmiany ich koloru (rysunek 32) w postaci skoków.

$t_s$	$N_s$	$\frac{N_s}{2 \cdot t_s}$	$t_s$	$N_s$	$\frac{N_s}{2 \cdot t_s}$	$t_s$	$N_s$	$\frac{N_s}{2 \cdot t_s}$
1	1	0,500	11	8	0,367	21	16	0,381
2	1	0,250	12	9	0,375	22	17	0,386
3	2	0,333	13	10	0,385	23	18	0,391
4	3	0,375	14	10	0,357	24	18	0,375
5	3	0,300	15	11	0,367	25	19	0,380
6	4	0,333	16	12	0,375	26	20	0,385

7	5	0,357	17	13	0,382	27	21	0,389
8	6	0,375	18	14	0,389	28	22	0,393
9	6	0,333	19	14	0,368	29	22	0,379
10	7	0,350	20	15	0,375	30	23	0,383

#### 4.6. MODEL „CHOWDHURYEGO-SCHADSCHNEIDERA”

Model „Chowdhuryego-Schadschneidera”, bazujący na modelu „Bahama-Middletona-Levinego” oraz „Nagela-Schreckenberga”, zajmuje się problemem skrzyżowań [6]. Sieć ulic przedstawiona jest w postaci siatki  $N \times N$  z periodycznymi warunkami brzegowymi. Jednokierunkowe, równoległe do osi X lub Y ulice, pozwalają jedynie na ruch w jednym z dwóch kierunków – do góry lub w prawo. Na każdym skrzyżowaniu znajduje się sygnalizacja świetlna, która zmienia się co  $t_s$  jednostek czasu i umożliwia ruch tylko w jednym kierunku. Odcinki drogi pomiędzy skrzyżowaniami podzielone są na  $D$  komórek.



Rysunek 33. Siatka automatu komórkowego w modelu „Chowdhuryego-Schadschneidera”. W prawym górnym rogu wizualizacja zmiennych  $d_{ji}$  i  $s_{ji}$  ( $j$  – numer drogi,  $i$  – numer komórki) dla czerwonych pojazdów.

Podobnie jak w modelu „Nagela-Schreckenberga”, komórka, interpretowana jako długość pojazdu wraz z wolnym miejscem z przodu i z tyłu, przyjmuje jedną z dwóch wartości – zajęta lub wolna przez pojazd. Funkcja przejścia składa się z czterech części:

1. Przyspieszenie – samochody, których prędkość ( $V_{j,i}$ ) w chwili  $t$  jest mniejsza od  $V_{MAX}$ , zwiększają ją o jeden. Zależność tą wyrazić można za pomocą wzoru (2).
2. Hamowanie – krok ten podobny jest do drugiego kroku w modelu „Sygnalizacja świetlna”. Zmienna  $d_{j,i}-1$  oznacza odległość (liczba wolnych komórek) do następnego pojazdu, a  $s_{j,i}-1$  odległość do najbliższych świateł. Jeżeli światło ma kolor:

- czerwony oraz  $\min(d_{j,i}, s_{j,i}) \leq V_{j,i}$ , to:  $V_{j,i} = \min(d_{j,i}, s_{j,i}) - 1$  (11)

- zielony:

- $d_{j,i} < s_{j,i}$ , to:  $V_{j,i} = d_{j,i} - 1$  (12)

- $d_{j,i} \geq s_{j,i}$ , to:  $V_{j,i} = \min(V_{j,i}, d_{j,i} - 1)$ , o ile  $\min(V_{j,i}, d_{j,i} - 1) \times \tau > s_{j,i}$  (13)

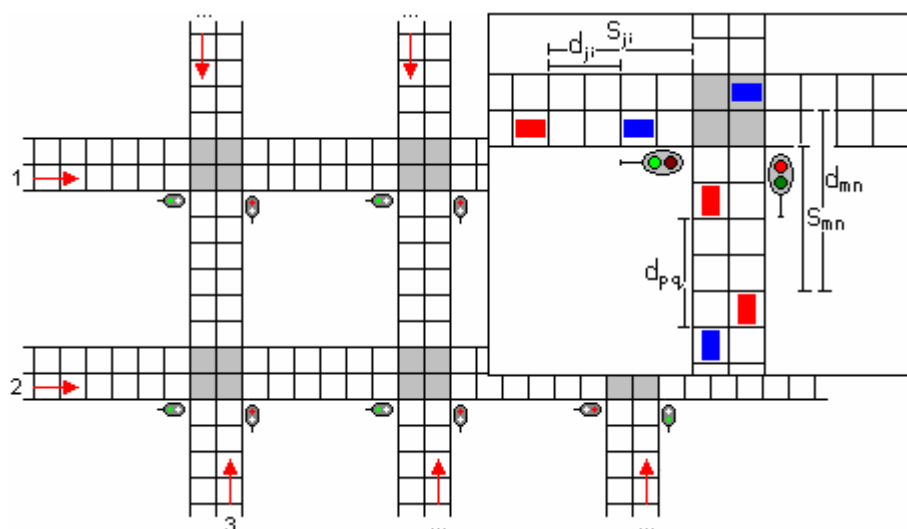
gdzie:

- $V_{j,i}$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$ ;
  - $d_{j,i}-1$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do następnego samochodu;
  - $s_{j,i}-1$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do najbliższych świateł;
  - $\tau$  - liczba iteracji do zmiany koloru światła na czerwone.
3. Zdarzenie losowe – z zadanim prawdopodobieństwem, samochody zmniejszają swoją prędkość o jeden. Zależność tą wyrazić można za pomocą wzoru (4).
  4. Przesunięcie – każdy pojazd porusza się w zadanim kierunku o tyle komórek, ile wynosi jego aktualna prędkość, a zmienna czasu zwiększa swoją wartość z  $t$  na  $t+1$ .

## 4.7. MODEL „SKRZYŻOWANIA”

### 4.7.1. OPIS

Model „Skrzyżowania” jest rozwinięciem modelu „Chowdhuryego-Schadschneidera” i, podobnie jak on, zajmuje się problemem skrzyżowań. Dwupasmowe, dwukierunkowe drogi przecinają się pod kątem prostym. Kolor świateł znajdujących się na  $i$ -tym skrzyżowaniu zmienia się co  $t_i$  iteracji. Jest to o tyle bliższe rzeczywistości, gdyż rzadko kiedy sygnalizacja świetlna, na dwóch sąsiadujących ze sobą skrzyżowaniach, jest zsynchronizowana.



Rysunek 34. Siatka automatu komórkowego w modelu „Skrzyżowania”. W prawym górnym rogu wizualizacja zmiennych  $d_{j,i}/d_{m,n}/d_{p,q}$  i  $s_{j,i}/s_{m,n}$  ( $j/m/p$  – numer drogi,  $i/n/q$  – numer komórki) dla czerwonych pojazdów.

Odległości pomiędzy poszczególnymi skrzyżowaniami nie muszą być jednakowe. Komórka może być wolna lub zajęta przez samochód. Zajęta, posiada wartość liczbowa ( $V_{j,i} = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $j$  - numer drogi,  $i$  - numer komórki), która określa prędkość pojazdu znajdującego się na danym odcinku drogi, w danej chwili. Funkcja przejścia składa się czterech etapów:

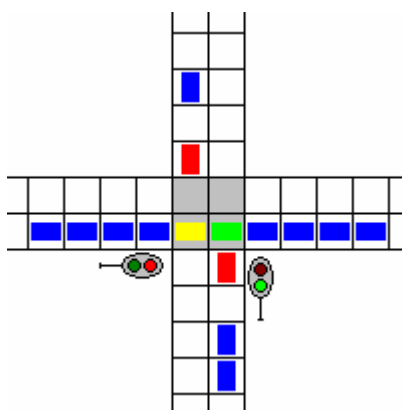
1. Przyspieszenie.
2. Hamowanie – etap ten jest bardzo podobny do drugiego etapu funkcji przejścia w modelu „Sygnalizacja świetlna”. Jeżeli sygnalizacja świetlna znajdująca się na najbliższym skrzyżowaniu ma kolor:

- czerwony oraz  $V_{j,i} > \min(d_{j,i}, s_{j,i})$ , to:  $V_{j,i} = \min(d_{j,i}, s_{j,i})$  (14)

- zielony, to:  $V_{j,i} = \min(V_{j,i}, d_{j,i})$  (15)

gdzie:

- $V_{j,i}$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$ ;
- $d_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do następnego samochodu;
- $s_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do najbliższych świateł.



Rysunek 35. Zablokowane skrzyżowanie.

Ponieważ, przeprowadzana symulacja dotyczy dróg dwukierunkowych, może dojść do sytuacji przedstawionej na powyższym rysunku. Wirtualni kierowcy zachowują się wówczas wyjątkowo życzliwie w stosunku do innych użytkowników drogi. Osoby prowadzące czerwone pojazdy poczekają, aż nie tylko zielony, ale również żółty samochód opuści skrzyżowanie. Innymi słowy, jeżeli komórka wskazana na rysunku 35. zajęta jest przez samochód żółty lub zielony, wówczas prędkość czerwonych pojazdów równa się ich odległości do świateł ( $V_{j,i} = s_{j,i}$ ).

3. Zdarzenie losowe.

4. Przesunięcie.

Czynności wykonywane w pierwszym, trzecim i czwartym etapie są takie same jak w modelu „Nagela-Schreckenberga”.

#### 4.7.2. OBSERWACJE

Z symulacji przedstawionych w rozdziale 4.5.2 wynika, że przepustowość sygnalizacji świetlnej zależy głównie od parametru  $V_{MAX}$ . Jeżeli jest ona mniejsza od liczby samochodów, które chcą przejechać przez skrzyżowanie, to kolejka oczekujących ulegać będzie stopniowemu wydłużaniu. W efekcie powstały zator może sięgnąć poprzedniego skrzyżowania. Model uwzględnia również realnie występujące uwarunkowania, a więc partykularyzm postaw kierowców, którzy wjeżdżają na skrzyżowanie nawet w sytuacji niemożności jego opuszczenia. W konsekwencji blokują przejazd innym użytkownikom drogi (rysunek 35), co powoduje zmniejszenie przepustowości sygnalizacji świetlnej. Jako, że jest to system naczyń połączonych, tworzący się w jednym miejscu, zator będzie miał tendencję do rozprzestrzeniania się. W efekcie jednostkowa sytuacja może doprowadzić do paraliżu całego systemu komunikacyjnego danego obszaru.

### 4.8. MODEL „ZMIANA OGRANICZENIA PRĘDKOŚCI”

#### 4.8.1. OPIS

Model „Zmiana ograniczenia prędkości” symuluje zmianę ograniczenia prędkości ruchu i jest równie prosty, jak model „Nagela-Schreckenberga”. Jedyna różnica polega na tym, że w pierwszym kroku funkcji przejścia, zamiast jednego parametru, określającego prędkość maksymalną dla całego symulowanego odcinka drogi –  $V_{MAX}$ , są dwa. Pierwszy z nich obowiązuje od początku symulowanej drogi do pewnego miejsca –  $k$ -tej komórki. Drugi zaś od pewnego miejsca aż do opuszczenia przez pojazd modelowanego fragmentu trasy. Tak więc, pierwszy krok funkcji przejścia – *przyśpieszenie*, można opisać następującą zależnością. Jeżeli:

- $i < k$ , to:  $V_i = \min(V_i + 1, V_{MAX\_1})$  (16)

- $i \geq k$ , to:  $V_i = \min(V_i + 1, V_{MAX\_2})$  (17)

gdzie:

- $k$  – miejsce (numer komórki) od którego obowiązuje nowe ograniczenie prędkości;

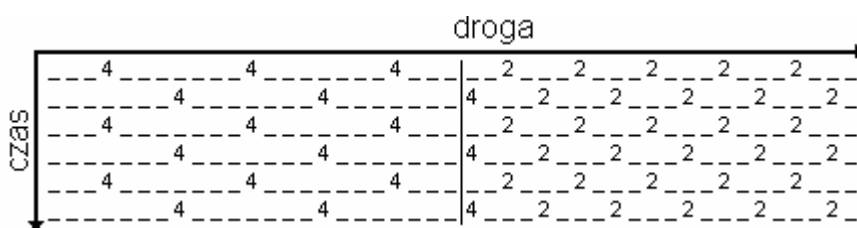
- $V_i$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce;
- $V_{MAX\_1}$ ,  $V_{MAX\_2}$  – prędkości maksymalne.

Pozostałe etapy funkcji przejścia – *hamowanie*, *zdarzenie losowe* oraz *przesunięcie*, są takie same, jak w modelu „Nagela-Schreckenberga”.

#### 4.8.2. OBSERWACJE

Z symulacji przeprowadzonych w rozdziale 4.3.2 wynika, że wraz ze wzrostem parametru  $V_{MAX}$  wzrasta przepustowość drogi. Mogłoby się wydawać, iż zmniejszenie maksymalnej dopuszczalnej prędkości, sprzyjać będzie tworzeniu się zatorów. Przeczy temu następująca symulacja.

Założmy, że na modelowanym odcinku drogi, o ograniczeniu prędkości  $V_{MAX\_1}$ , zagęszczenie pojazdów wynosi  $z_1$ . Samochody poruszają się z jednakową prędkością w równych odstępach. Po pewnym czasie wjeżdżają na teren o maksymalnej dopuszczalnej prędkości równej  $V_{MAX\_2} < V_{MAX\_1}$ . Wirtualni kierowcy zmniejszają prędkość, zatem zmniejsza się również odległość pomiędzy pojazdami. Pewna liczba samochodów –  $L$ , która wcześniej zajmowała 1 km, mieści się teraz na znacznie krótszym odcinku drogi (zagęszczenie pojazdów wynosi teraz  $z_2 > z_1$ ).



Rysunek 36. Wartości komórek automatu w kolejnych iteracjach. Zajęte komórki reprezentowane są przez liczbę oznaczającą prędkość samochodu znajdującego się na danym odcinku drogi, a wolne przez znak podkreślenia („\_”). Pionowa linia symbolizuje miejsce zmiany ograniczenia prędkości.

Jeżeli przepustowość drogi dla prędkości maksymalnej  $V_{MAX\_1}$  i zagęszczenia pojazdów  $z_1$  jest porównywalna z przepustowością drogi dla prędkości maksymalnej  $V_{MAX\_2}$  i zagęszczenia pojazdów  $z_2$ , to zator nie utworzy się. Należy jednocześnie przy tym uwzględnić prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego. Im jest ono większe, tym większa jest szansa na przestój

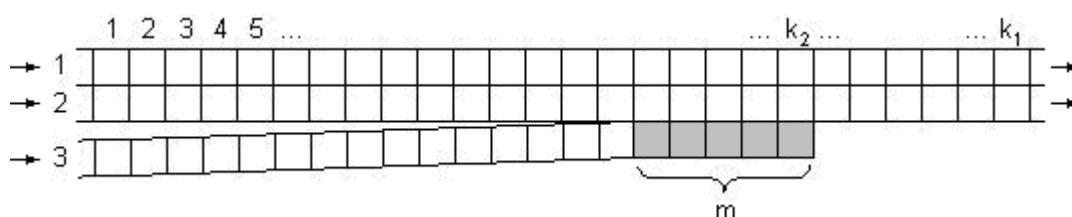


w ruchu, który w skrajnym przypadku może zmienić się w zator drogowy. Z kolei, jeżeli przepustowość drogi dla  $V_{MAX\_1}$  i  $z_1$  oraz przepustowość drogi dla  $V_{MAX\_2}$  i  $z_2$  znacznie różnią się, to prawdopodobieństwo powstania zatoru drogowego przy dużym natężeniu ruchu jest bardzo duże. Przykładowo: dla prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia losowego równego 10% oraz  $V_{MAX\_1} = 4$  (108 km/h) i  $V_{MAX\_2} = 1$  (27 km/h)).

## 4.9. MODEL „PAS ROZBIEGOWY”

### 4.9.1. OPIS

Model „*Pas rozbiegowy*” symuluje fragment trasy wraz z pasem rozbiegowym. Droga ma postać tablicy dwuwymiarowej o trzech wierszach oraz okresowych warunkach brzegowych. Pierwsze dwa wiersze (droga główna) mają  $k_1$  kolumn, a trzeci (droga dojazdowa)  $k_2$ , gdzie  $k_1 > k_2$ . Ostatnie  $m$  komórek trzeciego wiersza jest pasem rozbiegowym, z którego kierowca może bezpiecznie wjechać na symulowaną drogę. Podobnie, jak w modelu „*Nagela-Schreckenberga*”, pasy ruchu podzielono na 7,5 m odcinki – komórki, z których każda może być wolna lub zajęta przez tylko jeden samochód. Zajęta posiada wartość liczbowa ( $V_{j,i} = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $j$  - numer drogi,  $i$  - numer komórki), która określa prędkość pojazdu znajdującego się na danym odcinku trasy.

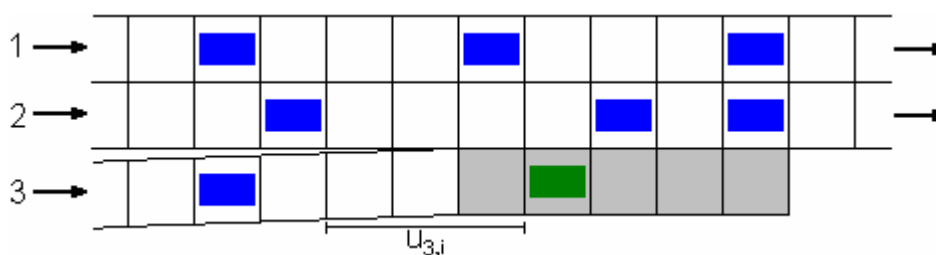


Rysunek 37. Siatka automatu komórkowego w modelu „*Pas rozbiegowy*”.

Funkcja przejścia składa się z pięciu kroków:

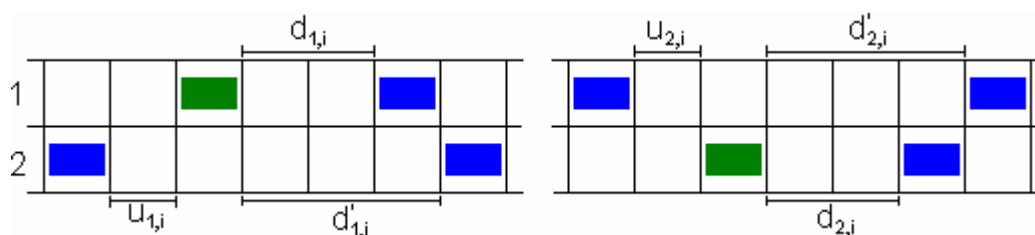
1. Zmiana pasa ruchu – muszą zajść dwa warunki, aby kierowca zmienił pas ruchu. Po pierwsze, aby wykonać ten manewr w sposób prawidłowy oraz bezpieczny, na docelowym pasie ruchu powinno być wystarczająco dużo miejsca. Dlatego też, przed rozpoczęciem symulacji, należy ustalić

parametr –  $u$ , który określa poziom „odwagi” kierowców (patrz rozdział: 4.4). Po drugie, zmiana pasa ruchu powinna być czymś podyktowana. W przypadku samochodów jadących drogą dojazdową, takim bodźcem jest konieczność wcześniejszego wjechania na pas rozbiegowy. Wyłącznie z niego kierowca może wjechać na główną drogę. Innymi słowy, tylko przejazd przez pas rozbiegowy (szare komórki na rysunku 37.) oraz  $u \leq u_{3,i}$ , warunkują możliwość wjazdu na zasadniczą drogę.



Rysunek 38. Wizualizacja zmiennej  $u_{j,i}$  ( $j$  – numer drogi,  $i$  – numer komórki) dla pasa rozbiegowego ( $j = 3$ ).

W przypadku osób jadących już po autostradzie, takim bodźcem jest chęć jak najszybszego przebycia zadanej drogi. Jeżeli, na sąsiednim pasie ruchu jest więcej miejsca, wówczas kierowca zdecyduje się na jego zmianę (podstawowy warunek: samochód jadący prawym pasem nie może wjechać na pas rozbiegowy).



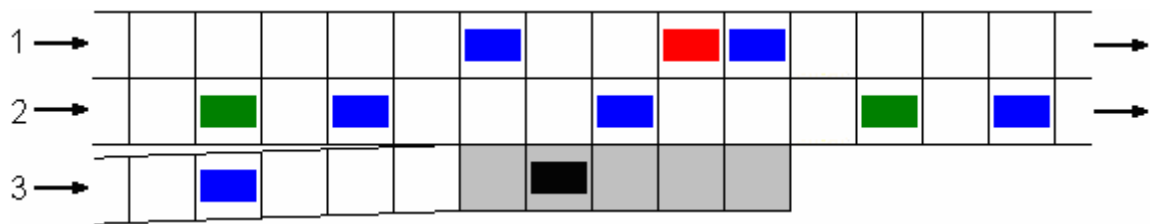
Rysunek 39. Wizualizacja zmiennych  $d_{j,i}$ ,  $d'_{j,i}$  i  $u_{j,i}$  ( $j$  – numer drogi,  $i$  – numer komórki) dla drogi głównej ( $j = 1, 2$ ).

Korzystając z oznaczeń przedstawionych na powyższym rysunku, pojazd jadący główną drogą zmieni pas ruchu, jeżeli  $i$ -ta komórka sąsiedniego pasa ( $j\%2+1$ ) jest pusta oraz:

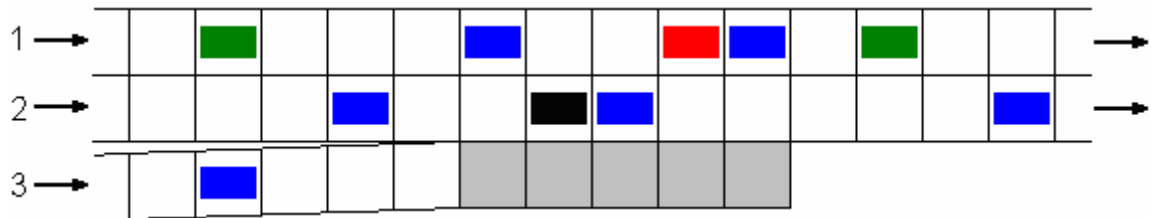
$$d_i < d'_i, u \leq u_{j,i} \quad (18)$$

gdzie:

- $d_i$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do następnego samochodu, znajdującego się na tym samym pasie ruchu;
- $d'_i$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do następnego samochodu, znajdującego się na sąsiednim pasie ruchu;
- $u$  – parametr „odwagi”;
- $u_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do samochodu jadącego za nim, znajdującego się na sąsiednim pasie ruchu.



Rysunek 40. Przykładowy fragment drogi przed zmianą pasa ruchu.



Rysunek 41. Przykładowy fragment drogi po pierwszym kroku funkcji przejścia – *zmianie pasa ruchu*, dla parametru  $u = 1$ . Kierowcy zielonych pojazdów zdecydowali się na zmianę pasa ruchu, ponieważ będą mogli przejechać dłuższy odcinek drogi (więcej, niż jedną komórkę). Czarny pojazd wjechał na drogę główną, gdyż znajdował się na pasie rozbiegowym oraz miał wystarczająco dużo miejsca ( $u \leq u_{3,j}$ , gdzie: 3 – numer drogi,  $j$  – numer komórki). Kierowca czerwonego samochodu nie zmienił pasa ruchu, ponieważ nie starczyło mu „odwagi” ( $u > u_{1,i} = 0$ , gdzie: 1 – numer drogi,  $i$  – numer kolumny).

2. Przyspieszenie.

3. Hamowanie – etap ten, dla drogi głównej (pierwszy i drugi wiersz tablicy), przebiega w identyczny sposób, jak w modelu „*Nagela-Schreckenberga*”. Natomiast, dla drogi dojazdowej jest nieznacznie zmodyfikowany.

Samochody, jeżeli nie uda im się wjechać na autostradę, nie wyjeżdżają poza symulację, tylko zatrzymują się przed końcem pasa rozbiegowego.

4. Zdarzenie losowe.

5. Przesunięcie.

Krok drugi, czwarty i piąty pozostają takie same, jak w modelu „*Nagela-Schreckenberga*” i są wykonywane dla każdego z pasów.

#### 4.9.2. OBSERWACJE

Drogi szybkiego ruchu, tj. autostrady, drogi ekspresowe, z założenia są drogami o dużej przepustowości. W celu utrzymania płynności jazdy, buduje się pasy rozbiegowe, które umożliwiają kierowcom bezproblemowe włączenie się do ruchu. Jednakże, nawet na tak specjalnie przystosowanych drogach zdarzają się zatory. Z symulacji przeprowadzonych w programie „*TrafficSim*” wynika, że zator powstanie wówczas gdy natężenie ruchu (prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce) na drodze głównej i dojazdowej jest większe od przepustowości głównej drogi i nie jest to zależne od wartości pozostałych parametrów.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 1) = 100%; prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 2) = 0%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)				
punkt pomiaru natężenia	$V_{MAX} = 2$ (54 km/h)	$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)	$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)	$V_{MAX} = 5$ (135 km/h)
1	738.488	875.088	929.209	929.537
2	738.448	875.059	929.190	929.521

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 1) = 0%; prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 2) = 100%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)				
punkt pomiaru natężenia	$V_{MAX} = 2$ (54 km/h)	$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)	$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)	$V_{MAX} = 5$ (135 km/h)
2	368.494	438.154	464.849	465.421
3	368.512	438.171	464.859	465.429

Parametr „odwagi” wpływa na przepustowość drogi. Im mniejszą ma wartość, tym mniej miejsca dany pojazd potrzebuje na zmianę pasa ruchu. Jeżeli jest on zbyt mały, wówczas może dochodzić do wymuszeń. Kierowca, któremu zajęchano drogę, będzie musiał gwałtownie hamować, co w skrajnym przypadku może doprowadzić do powstania zatoru wstecznego (patrz rozdział: 4.3.2). Wskazane sytuacje, przy dużym natężeniu ruchu oraz małym parametrze „odwagi” jego uczestników, powodują zmniejszenie przepustowości drogi głównej oraz zwiększenie prawdopodobieństwa powstania zatoru. Z kolei, gdy parametr „odwagi” ma dużą wartość, płynność ruchu na drodze głównej jest zachowana. Jednak duża liczba pojazdów na drodze dojazdowej może doprowadzić do powstania na niej zatoru.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 2) = 100%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; $V_{MAX} = 4$ (108 km/h); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)					
prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 1)	punkt pomiaru natężenia	„odwaga” kierowcy			
		0	1	2	3
20%	1	287.216	287.063	288.430	287.847
	2	741.078	744.900	746.895	746.882
	3	464.140	464.849	464.523	464.669
40%	1	343.129	466.407	565.204	565.484
	2	775.152	853.363	879.368	869.318
	3	434.782	387.390	317.226	308.570
60%	1	343.152	603.074	741.431	786.635
	2	755.399	860.632	915.889	921.805
	3	434.974	257.858	174.615	135.390
75%	1	343.229	603.443	742.387	815.967
	2	775.214	860.458	916.513	935.514
	3	434.797	257.297	174.264	119.641

Podobnie jak w pozostałych modelach, także i w tym wzrost prędkości maksymalnej lub spadek prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia losowego powoduje zwiększenie przepustowości trasy.

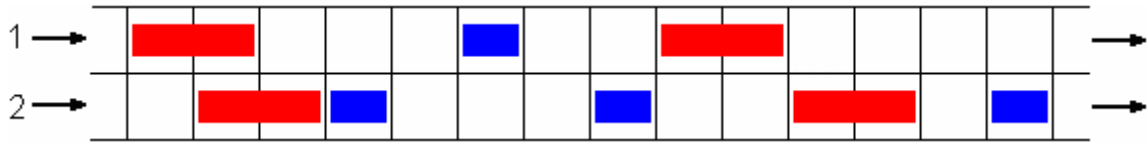
prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 1) = 25%; prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 2) = 50%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)				
punkt pomiaru natężenia	$V_{MAX} = 2$ (54 km/h)	$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)	$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)	$V_{MAX} = 5$ (135 km/h)
1	350.154	356.863	359.463	360.529
2	662.758	676.973	700.428	707.236
3	313.854	333.223	344.355	350.416

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 1) = 25%; prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce (droga nr 2) = 50%; $V_{MAX} = 4$ (108 km/h); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)			
punkt pomiaru natężenia	prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%;	prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 20%;	prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 30%;
1	359463	358.148	357.573
2	700.428	690.483	660.458
3	344.355	336161	305.778

## 4.10. MODEL „STROMY PODJAZD”

### 4.10.1. OPIS

Model „*Stromy podjazd*” symuluje utrudnienia w ruchu, spowodowane przez wolno jadące pojazdy, np. poruszające się po stromych podjazdach ciężarówki. Siatka automatu, posiadająca warunki brzegowe pochłaniające, ma postać tablicy o dwóch wierszach i  $n$  kolumnach, co odpowiada dwupasmowej, jednokierunkowej drodze. Ostatnie  $n-k$  komórek jest fragmentem drogi na którym część pojazdów („ciężarówki”) zwalnia. Pojedyncza komórka może znajdować się w jednym z dwóch stanów – wolna lub zajęta. Zajęta, posiada wartość liczbową ( $V_{j,i} = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $j$  - numer drogi,  $i$  - numer komórki), określającą prędkość pojazdu znajdującego się na danym odcinku drogi, w danej chwili. Na symulowanym odcinku drogi poruszają się różnego typu samochody, należy więc rozróżnić je i wskazać pojazdy utrudniające ruch. (W opracowanym modelu „ciężarówki” zajmują dwie sąsiadujące ze sobą komórki.)



Rysunek 42. Przykładowy fragment drogi w modelu „*Stromy podjazd*”. Samochody osobowe – kolor niebieski, „ciężarówki” – kolor czerwony.

Funkcja przejścia składa się następujących etapów:

1. Zmiana pasa ruchu – następuje w dwóch przypadkach. W pierwszym, „niebieskie” samochody zmieniają pas ruchu wówczas, gdy będą mogły przejechać bez przeszkód dłuższy odcinek drogi (patrz rozdział: 4.9.1). W drugim, jadąca lewym pasem „ciężarówka”, nie chcąc utrudniać ruchu innym użytkownikom drogi, zmieni go na prawy, kiedy będzie znajdować się na ostatnich  $n-k$  komórkach. W przedmiotowej sytuacji przyjęto, iż parametr „odwagi” ma dla niej wartość zero (patrz rozdział: 4.4).
2. Przyspieszenie – przed rozpoczęciem symulacji należy ustalić dwa parametry –  $V_{MAX\_1}$  i  $V_{MAX\_2}$ , określające maksymalną prędkość pojazdów. Pierwszy –  $V_{MAX\_1}$ , dotyczy samochodów osobowych na całym odcinku drogi oraz „ciężarówek” znajdujących się w pierwszych  $k$  komórkach siatki. Drugi –  $V_{MAX\_2}$ , określa maksymalną prędkość „ciężarówek” na ostatnich  $n-k$  komórkach (fragment trasy, na którym zmniejszają swoją prędkość). Powyższą zależność można wyrazić za pomocą następującego wzoru. Jeżeli:

- $i$ -ta komórka  $j$ -tego wiersza zajęta jest przez samochód (19) osobowy, to:  $V_{j,i} = \min(V_{j,i} + 1, V_{MAX\_1})$

- $i$ -ta komórka  $j$ -tego wiersza zajęta jest przez samochód „ciężarowy”:

- $i < k$ , to:  $V_{j,i} = \min(V_{j,i} + 1, V_{MAX\_1})$  (20)

- $i \geq k$ , to:  $V_{j,i} = \min(V_{j,i} + 1, V_{MAX\_2})$  (21)

gdzie:

- $V_{j,i}$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$ ;
- $V_{MAX\_1}$ ,  $V_{MAX\_2}$  – prędkości maksymalne.

3. Hamowanie.
4. Zdarzenie losowe.
5. Przesunięcie.

Krok od trzeciego do piątego pozostają takie same, jak w modelu „*Nagela-Schreckenberga*” i są wykonywane dla każdego z pasów osobno (względem wierszy tablicy).

#### 4.10.2. OBSERWACJE

Z przeprowadzonych w programie „*TrafficSim*” symulacji wynika, że poruszające się z niską prędkością pojazdy („ciężarówki”) stanowią poważne utrudnienie w ruchu, a im wolniej jadą, tym większe jest prawdopodobieństwo powstania zatoru. Znaczenie ma także ich ilość oraz prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 100%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; $V_{MAX} = 5$ (135 km/h); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)						
procent ciężarówek	$V_{MAX}$ ciężarówek na podjeździe = 2 (54 km/h)		$V_{MAX}$ ciężarówek na podjeździe = 3 (81 km/h)		$V_{MAX}$ ciężarówek na podjeździe = 4 (108 km/h)	
	1 punkt pomiaru	2 punkt pomiaru	1 punkt pomiaru	2 punkt pomiaru	1 punkt pomiaru	2 punkt pomiaru
10%	772.950	772.880	841.345	841.297	871.106	871.052
20%	670.383	670.313	737.599	737.536	772.357	772.301
40%	525.362	525.276	587.960	587.890	617.621	617.553
60%	424.816	424.742	479.546	479.467	499.124	499.051

Możliwość wyprzedzenia wolniej jadących pojazdów powoduje wzrost średniej prędkości maksymalnej oraz zwiększa przepustowość drogi. Istotne znaczenie ma tutaj parametr „odwagi”. Im mniejszą ma on wartość, tym częściej kierowca skłonny będzie do zmiany pasa ruchu. Jednocześnie, samochód wyprzedzający, po zmianie pasa ruchu, może zająć drogę innemu pojazdowi, co może zmusić go do gwałtownego hamowania. Spowoduje to zmniejszenie płynności ruchu i groźbę powstania wstecznego zatoru (patrz



rozdział: 4.3.2). Pomijając aspekt bezpieczeństwa i kultury jazdy, dla utrzymania wysokiej przepustowości drogi „korzystniejsze” są ryzykowne zachowania.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 100%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; $V_{MAX} = 4$ (108 km/h); $V_{MAX}$ ciężarówek na podjeździe = 2 (54 km/h); $T = 720.000$ (100 godz.)						
procent ciężarówek	„odwaga” kierowcy = 2		„odwaga” kierowcy = 3		„odwaga” kierowcy = 4	
	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru
10%	772.976	772.913	766.603	766.536	757.420	757.352
20%	673.296	673.217	665.349	665.268	654.317	654.232
40%	527.763	527.684	519.291	519.210	510.740	510.667
60%	427.732	427.646	421.113	421.036	415.715	415.634

Dostrzegalne jest, że wraz ze wzrostem prędkości maksymalnej, przy dużym natężeniu ruchu, przepustowość drogi maleje. Uwzględniając wyniki wcześniejszych modeli, jest to niekonsekwencja. Można ją jednak w prosty sposób wyjaśnić. Ruchome przeszkody, jakimi są wolno jadące „ciężarówki”, ograniczają przepływ pozostałych samochodów. Wzrost parametru  $V_{MAX}$  powoduje, że ta sama liczba pojazdów dojeżdża do „ciężarówki” w krótszym czasie. Zatem, dla  $V_{MAX} = i+1$  zator powstanie szybciej, niż dla  $V_{MAX} = i$ . Generuje to zmniejszenie przepustowości drogi.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 100%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; $V_{MAX}$ ciężarówek na podjeździe = 2 (54 km/h); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)						
procent ciężarówek	$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)		$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)		$V_{MAX} = 5$ (135 km/h)	
	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru
10%	752.099	752.028	772.976	772.913	773.361	773.293
20%	664.508	664.438	673.296	673.217	670.751	670.671
40%	529.867	529.790	527.763	527.684	524.240	524.159
60%	431.314	431.235	427.732	427.646	424.625	424.544

Gdy natężenie ruchu jest małe, potencjalny wpływ „ciężarówki” na możliwość powstania zatoru jest ograniczony. Dotyczy to także dużego  $V_{MAX}$ . Dlatego też wzrost prędkości maksymalnej sprawia, że przepustowość drogi wzrasta.

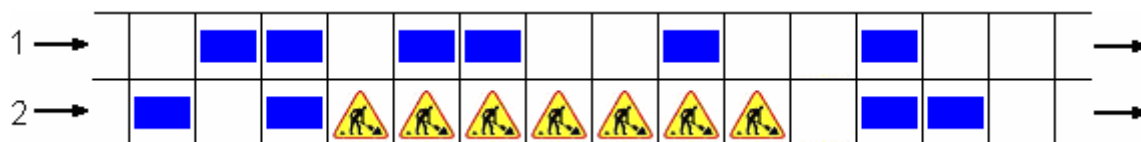
prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 25%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; $V_{MAX}$ ciężarówek na podjeździe = 2 (54 km/h); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)						
procent ciężarówek	$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)		$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)		$V_{MAX} = 5$ (135 km/h)	
	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru	1. punkt pomiaru	2. punkt pomiaru
10%	356.118	356.100	358.019	358.007	359.969	359.959
20%	353.421	353.406	357.713	357.692	358.702	358.689
40%	349.932	349.913	355.981	355.968	358.699	358.693
60%	345.015	344.995	352.652	352.641	357.005	356.989

#### 4.11. MODEL „ZWĘŻENIE DROGI”

##### 4.11.1. OPIS

Model „Zwężenie drogi” symuluje ruch na zwężonym odcinku drogi. Będąc modyfikacją modelu „Zmiana pasa ruchu”, różni się od niego w następujących elementach:

- siatka automatu komórkowego posiada warunki brzegowe pochłaniające;
- zwężenie, czyli odcinek drogi na którym jeden z pasów jest wyłączony z ruchu, może mieć długość większą, niż jedna komórka (7,5 m);

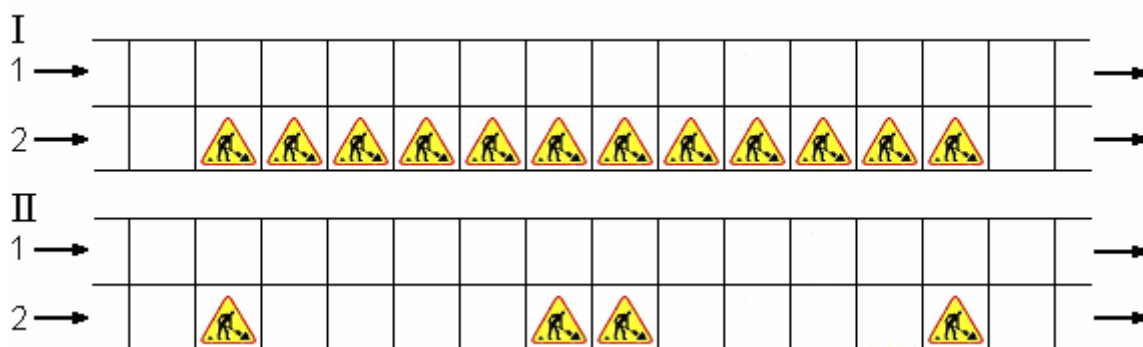


Rysunek 43. Fragment siatki automatu komórkowego opartego na modelu „Zwężenie drogi”. Droga wyłączona z ruchu (zwężenie) zaznaczona jest znakami „Roboty drogowe”.

- kierowca samochodu może zmienić pas ruchu, nie tylko z powodu zwężenia drogi, ale również, gdy po wykonaniu tego manewru będzie mógł bez przeszkód przebyć dłuższy odcinek drogi (patrz rozdział: 4.9.1).

#### 4.11.2. OBSERWACJE

W modelu założono, że dwie różne firmy prowadzą prace budowlane na dwóch różnych drogach dwupasmowych. Pierwsza wybiera wariant całościowy i zamyka najpierw jeden, a potem drugi pas ruchu na całym remontowanym odcinku. Druga z kolei nie zamyka jednego z pasów na całej długości, a jedynie „małe” fragmenty. Dzięki temu, pomiędzy remontowanymi odcinakami wciąż można poruszać się drogą dwupasmową.



Rysunek 44. Różne sposoby prowadzenia prac remontowych na drodze dwupasmowej.

Na podstawie symulacji przeprowadzonych w programie „TrafficSim” można wywnioskować, że jeżeli ruch odbywa się w sposób uporządkowany, wszyscy jadą w jednym tempie, hamują i ruszają z jednakowym przyspieszeniem, to nie ma różnicy pomiędzy pierwszym, a drugim sposobem remontowania drogi. Z uwagi jednak na „zamieszanie” powstające w trakcie prowadzenia prac budowlanych, zamknięcie jednego z pasów na całej długości wydaje się lepszym rozwiązaniem, niż wyłączanie z ruchu jedynie niewielkich fragmentów. Natomiast wszędzie tam, gdzie poruszają się pojazdy posiadające różne przyspieszenie, np. samochody osobowe i ciężarowe, dużo lepsze efekty osiągnie się prowadząc prace remontowe fragmentami. Wynika to z faktu, że na dwupasmowym odcinku drogi, samochody dysponujące lepszymi parametrami technicznymi, mogą wyprzedzić wolniej jadące pojazdy, co nie jest możliwe na jednokierunkowej, jednopasmowej drodze.

Różnica przepustowości dróg, pomiędzy pierwszym a drugim sposobem prowadzenia prac remontowych, jest największa w sytuacji, gdy liczba pojazdów poruszających się w „spokojny” sposób jest porównywalna z liczbą pojazdów skłonnych jechać szybciej. W przypadku kiedy wielkość którejś z

wymienionych grup zdecydowanie przewyższa liczbą pozostałą, zalety drogi dwupasmowej są mniej dostrzegalne, z powodu niewielkiej liczba samochodów mogących być wyprzedzonymi.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 100%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); odległość do przeszkody = 4 (28 m); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 0%		prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%		prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 20%		prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 40%	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1	479.999	479.999	425.996	426.630	364.991	372.567	265.148	275.825
2	479.983	479.983	425.981	426.598	364.978	372.532	265.136	275.803
3	479.971	479.971	425.951	426.549	364.953	372.491	265.121	275.772
4	479.960	479.960	425.932	426.522	364.940	372.462	265.109	275.743

Parametr „odwagi” ma duży wpływ na przepływ pojazdów. Im większą ma wartość, tym wirtualni kierowcy są mniej skory do wymuszania miejsca przy zmianie pasa. Każde zajechanie drogi lub wpuszczenie samochodu chcącego zmienić pas, powoduje przestój w ruchu. Ma to bezpośrednie przełożenie na jego płynność i powoduje spadek przepustowości drogi.

prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); odległość do przeszkody = 4 (28 m); $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	„odwaga” kierowcy = 0		„odwaga” kierowcy = 1		„odwaga” kierowcy = 2		„odwaga” kierowcy = 3	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1	319.748	326.736	335.518	343.579	337.364	347.045	339.047	349.710
2	319.734	326.710	335.506	343.552	337.348	347.015	339.032	349.683
3	319.722	326.689	335.479	343.512	337.319	346.978	339.009	349.645
4	319.711	326.677	335.463	343.487	337.302	346.958	338.996	349.623

Poprawa widoczności na drodze bezpośrednio oddziałuje na wzrost przepustowości drogi. Jeżeli osoba prowadząca samochód widzi roboty drogowe z większej odległości, ma wówczas więcej czasu na zmianę pasa ruchu. Dzięki temu podczas wykonywania tego manewru może uniknąć

zajechania drogi innemu pojazdowi, a tym samym spowolnienia całego ruchu na drodze.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 100%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	odległość do przeszkody = 2 (14 m)		odległość do przeszkody = 4 (28 m)		odległość do przeszkody = 6 (42 m)		odległość do przeszkody = 8 (56 m)	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1	336.852	345.668	337.364	347.045	337.553	348.336	337.837	348.894
2	336.829	345.643	337.348	347.015	337.538	348.315	337.813	348.875
3	336.803	345.606	337.319	346.978	337.513	348.286	337.802	348.843
4	336.786	345.582	337.302	346.958	337.499	348.270	337.786	348.825

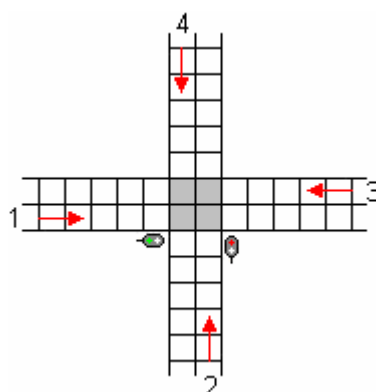
Wraz ze wzrostem prędkości maksymalnej, wzrasta przepustowość remontowanej drogi. Mogłoby się wydawać, iż zależność ta ma charakter liniowy, więc optymalną jest sytuacja, gdy parametr  $V_{MAX}$  ma maksymalnie dużą wartość. Z uzyskanych w trakcie symulacji rezultatów wynika jednak, że przy stałym wzroście prędkości, przyrost przepustowości drogi ma charakter logarytmiczny.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 100%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 25%; odległość do przeszkody = 4 (28 m); „odwaga” kierowcy = 2; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	$V_{MAX} = 1$ (27 km/h)		$V_{MAX} = 2$ (54 km/h)		$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)		$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1	185.201	204.651	285.879	322.958	337.364	347.045	348.247	348.538
2	185.175	204.602	285.862	322.925	337.348	347.015	348.233	348.512
3	185.140	204.569	285.828	322.883	337.319	346.978	348.210	348.477
4	185.109	204.525	285.805	322.853	337.302	346.958	348.195	348.445

## 4.12. MODEL „SKRZYŻOWANIE”

### 4.12.1. OPIS

„Skrzyżowanie” jest kolejną modyfikacją modelu „Chowdhuryego-Schadschneidera”. Zakłada on, iż wirtualne samochody mogą poruszać się nie tylko na wprost, ale również skręcać w prawo, bądź w lewo. Przecinające się pod kątem prostym drogi zostały podzielone na odcinki 7,5 m – komórki.



Rysunek 45. Siatka automatu komórkowego w modelu „Skrzyżowanie”.

Tak jak w modelu „Nagela-Schreckenberga”, komórka może przebywać w jednym z dwóch stanów – wolna lub zajęta. Zajęta posiada wartość liczbowa ( $V_{j,i} = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $j$  - numer drogi,  $i$  - numer komórki), określającą prędkość samochodu znajdującego się na danym odcinku drogi. Kolor świateł na skrzyżowaniu zmienia się w jednakowych odstępach czasu ( $t_s$ ). Funkcja przejścia składa się z sześciu etapów, z których każdy jest ważny dla prawidłowego działania automatu:

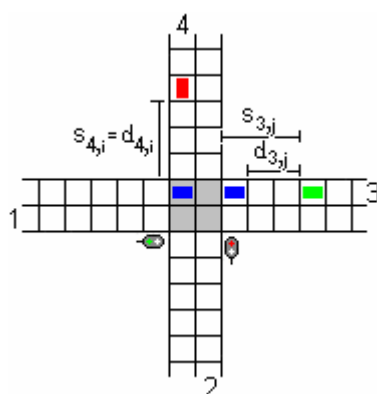
1. Wybór kierunku – kierowca, przed wjechaniem na skrzyżowanie, powinien zdecydować się czy będzie skręcał (w lewo lub prawo), czy też nie. W zależności od potrzeb symulacji, może to robić z różnym prawdopodobieństwem.
2. Przyspieszenie.
3. Hamowanie – krok ten jest bardzo podobny do drugiego kroku w modelu „Skrzyżowania”. Jeżeli sygnalizacja świetlna ma kolor:

- czerwony oraz  $V_{j,i} > \min(d_{j,i}, s_{j,i})$ , to:  $V_{j,i} = \min(d_{j,i}, s_{j,i})$  (22)

- zielony, to:  $V_{j,i} = \min(V_{j,i}, d_{j,i})$  (23)

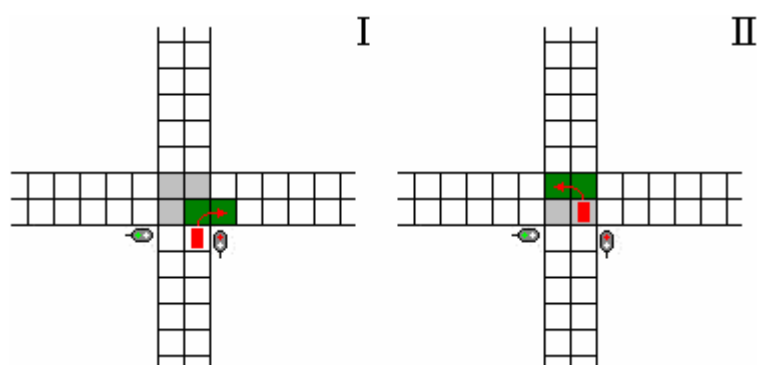
gdzie:

- $V_{j,i}$  – prędkość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$ ;
- $d_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do następnego samochodu;
- $s_{j,i}$  – odległość pojazdu znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  do najbliższych świateł.



Rysunek 46. Wizualizacja zmiennych  $d_{j,i}$  i  $s_{j,i}$  ( $j$  – numer drogi,  $i$  – numer komórki). Samochód czerwony znajduje się w  $i$ -tej komórce drogi numer cztery, a samochód zielony w  $j$ -tej komórce drogi numer trzy.

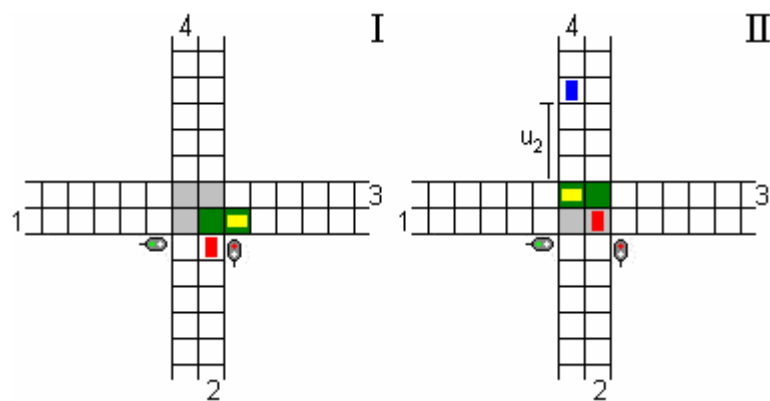
Jeżeli kierowca zdecydował się na skręt, powinien tak zredukować swoją prędkość, aby po ostatnim kroku funkcji przejścia – *przesunięciu*, znaleźć się we właściwym miejscu.



Rysunek 47. Miejsca w których powinien zatrzymać się samochód przed skrętem w prawo/lewo (I/II).

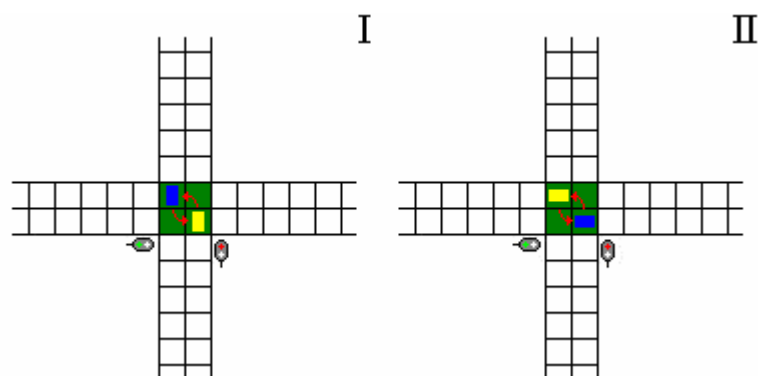
4. Skręcanie – kierowca przed skrętem, ma obowiązek upewnić się czy manewr ten może wykonać w bezpieczny sposób. Po pierwsze, przed

prowadzonym przez niego samochodem nie powinna znajdować się żadna przeszkoda. Po drugie czy miejsce w którym będzie znajdował się po zakończeniu manewru jest wolne. Dodatkowo, osoby skręcające w lewo, muszą upewnić się, czy nie zajadą drogi pojazdom jadącym z naprzeciwka. Podobnie jak w modelu „*Zmiana pasa ruchu*”, także i tu ma zastosowanie parametr –  $u$ , który określa poziom „odwagi” kierowców (patrz rozdział: 4.4). Jeżeli  $u \leq u_i$ , to kierowca zdecyduje się manewr skrętu. Po jego zakończeniu prędkość pojazdu wynosi jeden ( $V_{j,i} = 1$ ).



Rysunek 48. Samochód przed (kolor czerwony) i po skręcie (kolor żółty) w prawo/lewo (I/II). Na zielono zaznaczone są komórki, które muszą być wolne zanim kierowca zacznie wykonywać manewr skrętu. Dodatkowo, na drugim skrzyżowaniu zaznaczona jest zmienna  $u_i$ , ( $i$  - numer drogi z której kierowca skręca w lewo).

Dla tak określonych warunków, gdy dwa samochody jadące z przeciwnych kierunków będą chciały w tym samym momencie skręcić w lewo, może dojść do swego „zakleszczenia”.



Rysunek 49. Widok samochodów skręcających jednocześnie w lewo przed (I) i po (II) wykonaniu manewru.



Dlatego też, kierowcy obu pojazdów „umawiają się”, iż wykonują ten manewr jednocześnie, niejako zamieniając się miejscami.

5. Zdarzenie losowe.

6. Przesunięcie.

Kroki drugi, piąty i szósty są takie same jak w modelu „*Nagela-Schreckenberga*” i są wykonywane dla każdej z dróg osobno.

#### 4.12.2. OBSERWACJE

Skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną jest jednym z najczęściej spotykanych w mieście sposobów kierowania ruchem na przecinających się drogach. Z symulacji przeprowadzonych w programie „*TrafficSim*” wynika, że światła, pomimo iż regulują ruchem, są również pewnego rodzaju przeszkodą, która ogranicza swobodny przepływ pojazdów (patrz rozdział: 4.5.2). Wynika to z faktu, iż niezależnie od tego, czy z innych kierunków jadą samochody, kierowca musi czekać, aż będzie mieć „zielone światło”. Ponadto, pojazd skręcający w lewo blokuje ruch innym użytkownikom drogi. Jeżeli w sytuacji tej parametr „odwagi” ma małą wartość, wówczas manewr skrętu wykonany zostanie tak szybko, jak tylko jest to możliwe. W przeciwnym przypadku, nierzadko nastąpi to dopiero po zmianie świateł. Spowoduje to przestój w ruchu i znacznie ograniczy przepływ pojazdów.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 25%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	„odwaga” kierowcy = 0		„odwaga” kierowcy = 1		„odwaga” kierowcy = 2		„odwaga” kierowcy = 3	
	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
1	134.512	133.468	134.170	134.104	130.585	130.131	128.761	127.970
2	134.260	132.940	133.869	134.319	130.005	130.283	128.398	128.798
3	132.401	133.894	134.041	133.841	130.138	130.238	128.160	127.933
4	134.839	133.653	133.949	133.701	130.121	130.132	128.540	127.092

Niezależnie od tego, jak duże byłoby natężenie ruchu na drodze, przepustowość skrzyżowania nigdy nie będzie większa niż pewna wartość graniczna. Zależy ona między innymi od częstotliwości zmiany koloru świateł, prędkości maksymalnej oraz prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia losowego.

prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); „odwaga” kierowcy = 1; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	prawdopodobieństw. pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 10%		prawdopodobieństw. pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 20%		prawdopodobieństw. pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 30%		prawdopodobieństw. pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 40%	
	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
1	72.132	71.878	132.721	133.491	134.161	134.208	134.112	133.894
2	71.598	72.000	133.228	133.482	133.957	133.960	134.252	133.770
3	71.865	72.149	133.210	132.175	133.963	134.097	134.030	134.525
4	72.505	72.069	133.293	133.237	134.255	134.003	133.581	133.722

Im wyższą wartość ma parametr  $V_{MAX}$  lub im mniejsze jest prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego, tym mniej jest przestojów w ruchu, a średnia prędkość pojazdów przejeżdżających przez skrzyżowanie jest większa. Powyższa zależność ma zasadnicze znaczenie dla wzrostu przepustowości sygnalizacji świetlnej.

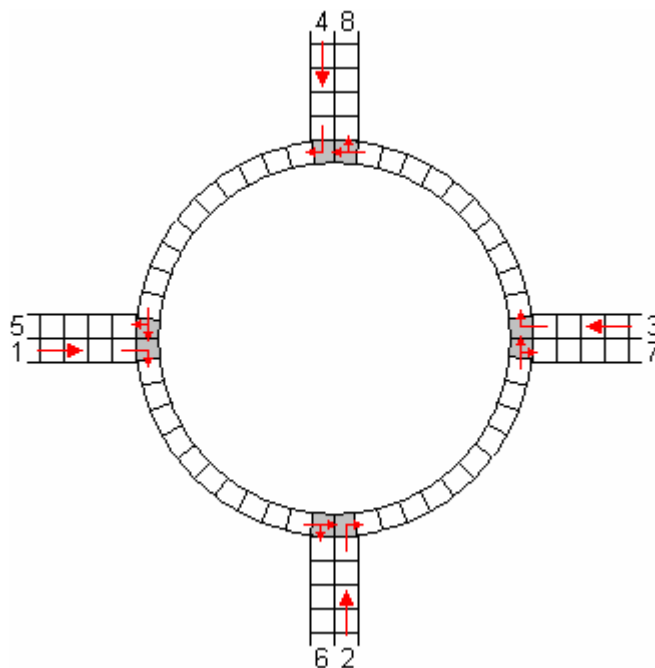
prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 20%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; „odwaga” kierowcy = 1; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	$V_{MAX} = 1$ (27 km/h)		$V_{MAX} = 2$ (54 km/h)		$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)		$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)	
	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
1	107.356	107.780	131.157	130.124	133.281	133.623	133.327	133.665
2	107.246	107.697	131.692	131.593	133.344	133.147	133.505	133.303
3	107.539	107.265	130.476	131.843	133.144	133.523	133.189	133.303
4	107.563	106.895	131.313	131.025	133.627	133.047	133.622	133.330

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 20%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); „odwaga” kierowcy = 1; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	prawdopodobieñ. zdarzenia losowego = 0%		prawdopodobieñ. zdarzenia losowego = 10%		prawdopodobieñ. zdarzenia losowego = 20%		prawdopodobieñ. zdarzenia losowego = 30%	
	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
1	139.150	140.600	133.281	133.623	124.494	124.330	113.709	113.381
2	140.510	139.648	133.344	133.147	124.527	123.691	113.887	113.725
3	139.801	139.500	133.144	133.523	124.346	124.903	113.702	113.844
4	140.543	140.223	133.627	133.047	123.954	124.334	113.884	114.178

### 4.13. MODEL „*RONDO*”

#### 4.13.1. OPIS

Model „*Rondo*” symuluje ruch na rondzie. Droga została podzielona na komórki, z których każda może przebywać w jednym z dwóch stanów – wolna lub zajęta przez samochód. Zajęta posiada wartość liczbowa ( $V_{j,i} = 0, 1, 2, \dots, V_{MAX}$ , gdzie:  $j$  - numer drogi,  $i$  - numer komórki), określającą prędkości pojazdu znajdującego się na danym odcinku drogi.



Rysunek 50. Siatka automatu komórkowego w modelu „*Rondo*”. Dla ronda  $j$  (numer drogi) ma wartość 9.

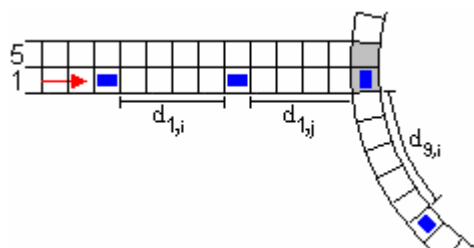
Funkcja przejścia, tak jak w poprzednim modelu, składa się z sześciu etapów:

1. Wybór kierunku – kierowca, przed wjazdem na rondo, powinien wiedzieć dokąd jedzie. W zależności od potrzeb symulacji, prawdopodobieństwo wyboru drogi, którą zjedzie z ronda, może zmieniać się.
2. Przyspieszenie.
3. Hamowanie – zmienna  $d_{j,i}$  określa odległość pojazdu (liczba wolnych komórek), znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$  (dla ronda  $j = 9$ ) do pojazdu jadącego przed nim. Jeżeli:

$$V_{j,i} > d_{j,i} \rightarrow V_{j,i} = d_{j,i} \quad (24)$$

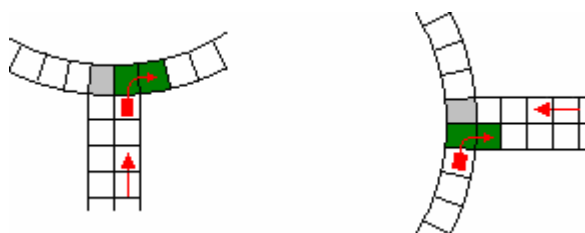
gdzie:

- $V_{j,i}$  – prędkość pojazdu, znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$ ;
- $d_{j,i}$  – odległość pojazdu, znajdującego się w  $i$ -tej komórce drogi numer  $j$ , do następnego samochodu.



Rysunek 51. Wizualizacja zmiennej  $d_{j,i}$  ( $j$  - numer drogi,  $i$  - numer komórki).

W sytuacji kiedy kierowca zamierza skręcić, powinien tak zredukować swoją prędkość, aby po ostatnim kroku funkcji przejścia – *przesunięciu*, znaleźć się we właściwym miejscu.



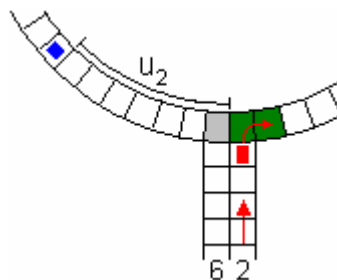
Rysunek 52. Miejsca, w których powinien zatrzymać się samochód przed skrętem w prawo.

4. Skręcanie – kierowca przed skrętem, ma obowiązek upewnić się czy manewr ten może wykonać w bezpieczny sposób. Po pierwsze, przed jego samochodem nie powinna znajdować się żadna przeszkoda. Po drugie, miejsce w którym będzie znajdował się po zakończeniu manewru musi być wolne.



Rysunek 53. Samochód przed (kolor czerwony) i po skręcie (kolor żółty) w prawo. Na zielono zaznaczone są komórki, które muszą być wolne zanim, kierowca zacznie wykonywać manewr skrętu.

Ponadto, samochody wjeżdżające na rondo powinny ustąpić pierwszeństwa przejazdu pojazdom znajdującym się na nim. Podobnie, jak w modelu „Zmiana pasa ruchu”, także i tu ma zastosowanie parametr –  $u$ , określający poziom „odwagi” kierowcy (patrz rozdział: 4.4). Jeżeli  $u \leq u_i$ , to kierowca wykona manewr skrętu. Po jego zakończeniu prędkość pojazdu wynosi jeden ( $V_{j,i} = 1$ ).



Rysunek 54. Wizualizacja zmiennej  $u_i$  ( $i$  – numer drogi z której pojazd wjeżdża na rondo) w modelu „Rondo”.

5. Zdarzenie losowe.
6. Przesunięcie.

Krok drugi, piąty oraz szósty pozostają takie same, jak w modelu „Nagela-Schreckenberga” i są wykonywane dla każdego z pasów osobno (względem wierszy tablicy).

#### 4.13.2. OBSERWACJE

Rondo jest to plac w kształcie koła, lub innym, który okala jednokierunkowa droga. Dochodzące do niej promieniście drogi, zakończone są skrzyżowaniami w kształcie litery „T”. Jego budowa skutecznie ogranicza prędkość samochodów oraz sprawia, że kierujący pojazdami mają dużo lepszą widoczność innych użytkowników drogi.

Przedstawione poniżej wyniki symulacji, dla modelu „Rondo” oraz „Skrzyżowanie”, uzyskano w programie „TrafficSim”. Różnica przepustowości wynika z faktu, że na rondzie ruch odbywa się znacznie płynniej, niż na skrzyżowaniu. Z uwagi na brak sygnalizacji świetlnej na symulowanym rondzie, pojazdy nie muszą czekać na „zielone światło”. Ruch odbywa się tylko na wprost lub w prawo, więc na rondzie nie występują komplikacje związane ze skrętem w lewo.

prawdopodobień. zdarzenia losowego = 10%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); „odwaga” kierowcy = 1; $T = 720.000$ (100 godz.)					
prawdopodobień. pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 20%;	punkt pomiaru natężenia	„Rondo”		„Skrzyżowanie”	
		wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
20%	1	143.458	143.609	132.721	133.491
	2	143.374	142.930	133.228	133.482
	3	143.654	143.368	133.210	132.175
	4	143.264	143.832	133.293	133.237
30%	1	177.706	179.261	134.161	134.208
	2	181.901	179.892	133.957	133.960
	3	177.907	180.138	133.963	134.097
	4	181.753	179.943	134.255	134.003
40%	1	180.389	180.112	133.555	134.316
	2	179.984	180.419	134.294	133.223
	3	179.971	179.769	133.971	133.887
	4	179.897	179.904	133.767	134.096

Parametr „odwagi” spełnia ważną rolę w przedmiotowym modelu. W sytuacji, gdy ma za dużą wartość, czas oczekiwania na wjazd na rondo znacznie wydłuża się. Przy małej wartości, może dochodzić do sytuacji, w których samochody wjeżdżające będą zajeżdżały drogę pojazdom już znajdującym się na rondzie. Zmniejsza to płynność ruchu, a tym samym ogranicza przepustowość.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 25%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	„odwaga” kierowcy = 0		„odwaga” kierowcy = 1		„odwaga” kierowcy = 2		„odwaga” kierowcy = 3	
	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
1	163.906	165.568	172.370	174.285	171.012	172.279	140.818	142.990
2	168.842	166.805	175.918	173.280	174.230	171.967	144.522	142.172
3	163.899	166.121	172.038	173.846	170.542	172.347	141.061	141.841
4	168.498	166.600	174.997	173.879	173.992	173.140	143.287	142.653

Podobnie, jak w poprzednich modelach, także i w tym prędkość maksymalna ma wpływ na otrzymane wyniki. Im jest ona większa, tym większa jest przepustowość drogi. Zachodzi tu jednak sytuacja opisana w modelach „Zwężenie drogi” oraz „Ruch okrężny”, czyli logarytmiczna zależność pomiędzy wzrostem prędkości, a przepustowością drogi.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 20%; prawdopodobieństwo zdarzenia losowego = 10%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; „odwaga” kierowcy = 1; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	$V_{MAX} = 1$ (27 km/h)		$V_{MAX} = 2$ (54 km/h)		$V_{MAX} = 3$ (81 km/h)		$V_{MAX} = 4$ (108 km/h)	
	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
1	123.402	125.647	141.862	142.346	143.458	143.609	143.807	143.849
2	127.982	125.747	141.908	141.673	143.374	142.930	143.486	144.167
3	123.608	125.596	141.586	141.624	143.654	143.368	143.916	143.499
4	128.121	126.068	141.849	141.538	143.264	143.832	143.974	143.654

Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia losowego. Przepustowość drogi wzrasta wraz ze spadkiem jego wartości. Wynika to z faktu, iż uwaga kierowców skupiona jest na drodze i nie jest rozpraszana przez inne czynniki. Wpływa to na utrzymanie płynności ruchu oraz średnią prędkość pojazdów.

prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu w pierwszej komórce = 20%; prawdopodobieństwo skrętu w lewo = 25%; prawdopodobieństwo skrętu w prawo = 25%; $V_{MAX} = 3$ (81 km/h); „odwaga” kierowcy = 1; $T = 720.000$ (100 godz.)								
punkt pomiaru natężenia	prawdopodobień. zdarzenia losowego = 0%		prawdopodobień. zdarzenia losowego = 10%		prawdopodobień. zdarzenia losowego = 20%		prawdopodobień. zdarzenia losowego = 30%	
	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd	wjazd	wyjazd
1	143.775	143.655	143.458	143.609	141.555	142.667	128.359	129.629
2	143.355	144.440	143.374	142.930	142.105	141.155	131.835	129.981
3	143.525	143.477	143.654	143.368	141.563	142.531	127.641	129.687
4	144.063	143.132	143.264	143.832	142.672	141.511	131.547	130.041



## PODSUMOWANIE

---

Jednym z zasadniczych celów niniejszej pracy dyplomowej było zaproponowanie i zaimplementowanie modeli ruchu ulicznego, wykorzystujących automaty komórkowe. Zostały one dobrane w sposób umożliwiający symulację najczęściej spotykanych na drogach sytuacji, związanych z transportem kołowym.

Trzydzieście zaprezentowanych modeli uszeregowano, uwzględniając stosowane w infrastrukturze drogowej rozwiązania oraz stopień ich skomplikowania. W pierwszym rzędzie opisano bardzo prosty model, symulujący przepływ pojazdów na jednopasmowej, jednokierunkowej drodze. Następnie opracowano m.in. symulacje funkcjonowania sygnalizacji świetlnej i pasa rozbiegowego. Pracę kończą modele ronda oraz skrzyżowania, uwzględniającego możliwość skrętu w lewo, bądź w prawo. Przedstawiony układ pozwolił zarówno na zobrazowanie przebiegu ewolucji modelowania ruchu, jak i na wypracowanie wniosków, które mogą być wykorzystane w praktyce. Szereg spośród nich jest dość zaskakująca, niejednokrotnie sprzeczna z powszechnymi opiniami. Do najciekawszych należy wniosek o logarytmicznej, a nie jak wydawałoby się liniowej, zależności pomiędzy prędkością maksymalną a przepustowością drogi.

Modele opracowane przez autora niniejszej pracy dyplomowej („*Ruch okrężny*”, „*Zmiana pasa ruchu*”, „*Sygnalizacja świetlna*”, „*Skrzyżowania*”, „*Zmiana ograniczenia prędkości*”, „*Pas rozbiegowy*”, „*Stromy podjazd*”, „*Zwężenie drogi*”, „*Skrzyżowanie*” oraz „*Rondo*”) oparto na modelu „*Nagela-Schreckenberga*”. Stanowi on jednak tylko ich zasadniczy trzon, gdyż w zdecydowanej części wzbogacono je o autorskie rozwiązania oraz indywidualne podejście do tematu. Do innowacyjnych należy zaliczyć „*Rondo*” oraz „*Skrzyżowanie*”, uwzględniające możliwość zmiany kierunku jazdy przez samochód.

Całość symulacji przeprowadzano w programie „*TrafficSim*”, który stworzony został przez autora niniejszej pracy, specjalnie na jej potrzeby. Sposób uruchamiania oraz obsługi aplikacji został szerzej omówiony w „*Dodatku*”.

Charakter oraz rozmiar pracy wymusiły zasadnicze ograniczenia w podejściu do tematu. Dlatego też wirtualna droga jest doskonała. Nie dochodzi na niej do łamania przepisów ruchu drogowego, a tym samym do kolizji i wypadków. Żaden samochód nie porusza się pod prąd oraz nie wyprzedza „na trzeciego”. Zachowywane są również ograniczenia prędkości ruchu. Ponadto, wszystkie pojazdy są jednakowe pod względem osiągnięć technicznych (przyśpieszenie, prędkość, droga hamowania), a osoby nimi kierujące mają taką samą sprawność psycho-fizyczną. Jak pokazuje doświadczenie niemieckich naukowców, uwzględniony w niniejszej pracy poziom komplikacji symulowania ruchu, jest wystarczający do opracowywania modeli, które mogą być wykorzystywane na co dzień. W Zagłębiu Ruhry już od kilku lat działa system, wykorzystujący automaty komórkowe. Informuje on nie tylko o aktualnej sytuacji na drodze, ale również, jaka ona będzie za trzydzieści czy sześćdziesiąt minut. Jest to dowód na to, iż modelowanie ruchu jest nie tylko interesującym tematem pracy dyplomowej o charakterze teoretycznym, ale ma również praktyczne zastosowanie. Biorąc pod uwagę niemal lawinowy wzrost liczby poruszających się po drogach pojazdów, należy przypuszczać, że modelowanie ruchu stanie się jednym z najefektywniejszych sposobów utrzymania przepustowości tras.

## DODATEK

---

### TRAFFICSIM

#### INSTALACJA I URUCHAMIANIE

Do prawidłowego działania aplikacji niezbędny jest *Java Runtime Environment*, który można za darmo pobrać ze strony internetowej *Sun Microsystems* (<http://java.sun.com>). Oprócz najnowszej wersji *JRE*, znajduje się również na niej wiele pomocnych samouczków, pełna dokumentacja języka, a także zintegrowane środowisko programistyczne *NetBeans IDE* (*Integrated Development Environment*). Po zainstalowaniu wszystkich niezbędnych programów wystarczy dwa razy kliknąć na plik *TrafficSim 1.0.bat* lub *TrafficSim 1.0.jar*.

#### OPIS

Program „*TrafficSim*” został napisany na potrzeby pracy dyplomowej: „*Modelowanie ruchu ulicznego za pomocą automatów komórkowych*”. Pierwsza zakładka – „*TrafficSim 1.0*”, jest zakładką „tytułową”. Zawiera podstawowe informacje o autorze programu oraz temat pracy. Druga – „*Opcje*”, służy do sterowania niektórymi właściwościami aplikacji, takimi jak kolor okna lub kolor symulacji. Pozostałe zakładki zawierają implementacje większości modeli ruchu ulicznego opisanych w niniejszej pracy. W skład każdej z nich wchodzi podobne elementy zwane panelami:

- „*Sterowanie*” – składa się z trzech przycisków: *Start*, *Pauza*, *Stop*. Przy ich pomocy można rozpoczynać, wstrzymywać lub zatrzymywać symulację. Zmiana zakładki na inną powoduje automatyczne wstrzymanie bieżącej symulacji.



Rysunek 55. Panel „*Sterowanie*”.

- „Zegar” – panel ten informuje użytkownika programu o czasie, jaki upłynął od rozpoczęcia symulacji.

Zegar
03:13:13

Rysunek 56. Panel „Zegar”.

- „Natężenie ruchu” – panel ten zawiera informację o liczbie samochodów, jakie przejechały przez dany punkt pomiaru (czerwone linie przecinające drogę) od rozpoczęcia symulacji.

Natężenie ruchu
1. 10062
2. 10625

Rysunek 57. Panel „Natężenie ruchu”.

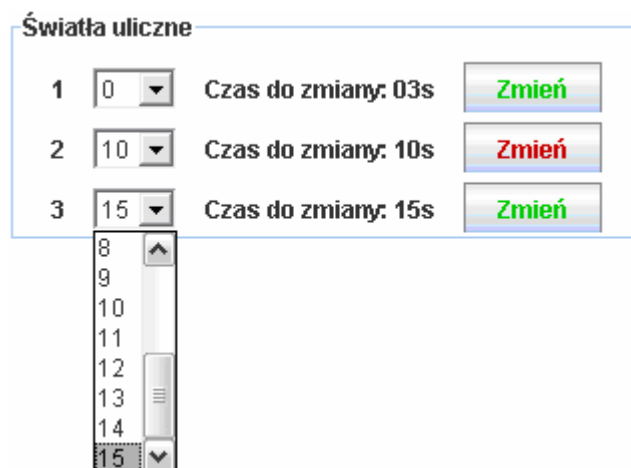
W niektórych modelach, zamiast jednej, są dwie wartości określające natężenie ruchu. W modelu „Skrzyżowania”, pierwsza z nich dotyczy pojazdów poruszających się z zachodu na wschód, a druga pojazdów jadących w przeciwnym kierunku. Z kolei w modelu „Skrzyżowanie” oraz „Rondo” pierwsza liczba jest to ilość pojazdów, które wjechały, a druga jest to ilość pojazdów, które wyjechały z symulowanego fragmentu drogi.

Natężenie ruchu
1. 4501 4514
2. 4618 4525
3. 4618 4684
4. 4555 4552

Rysunek 58. Panel „Natężenie ruchu”.

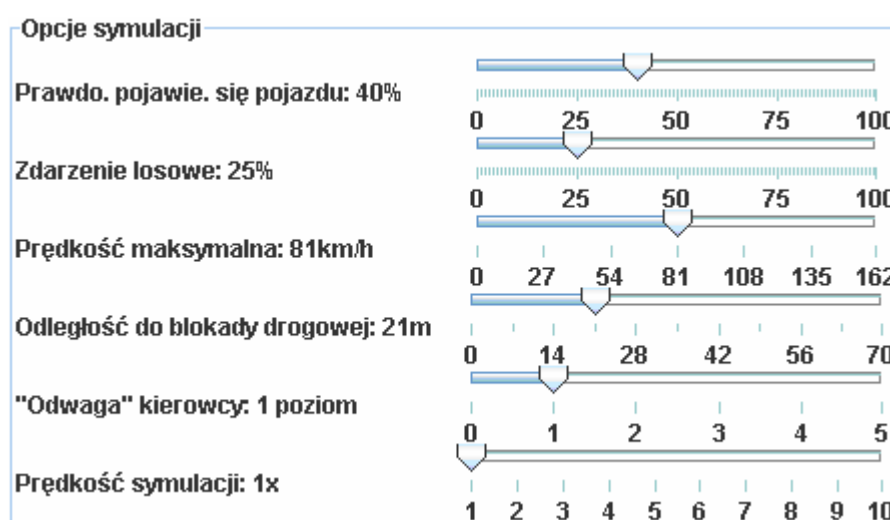
- „Światła uliczne” – panel ten służy do sterowania działaniem świateł ulicznych. Przy pomocy menu wyboru wchodzącego w jego skład można ustalić odstępy czasowe w których następuje zmiana koloru świateł. W przypadku kiedy wybrany okres oczekiwania będzie równy zero, wówczas światła nie będą się zmieniać. Ponadto, użytkownik sam w każdej chwili

może zmienić kolor świateł za pomocą przycisku „Zmień”. Kolor napisu na nim informuje o kolorze świateł.



Rysunek 59. Panel „Światła uliczne” w modelu „Skrzyżowania”.

- „Opcje symulacji” – panel ten zawiera, suwaki za pomocą których można ustalić parametry przeprowadzanej symulacji, takie jak: prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego, prędkość maksymalna pojazdów, poziom „odwagi” kierowcy itp. Ostatni suwak – „Prędkość symulacji”, służy do zmiany liczby iteracji przypadających na jedną sekundę czasu rzeczywistego (1x odpowiada dwóm iteracją na sekundę).



Rysunek 60. Panel „Opcje symulacji” w modelu „Zwężenie”.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] B.L. Allen, M.A. Gunter, F.L. Hall (1986), „*Empirical analysis of freeway flow density relationship.*”, Transportation Research A 20A: 197-210
- [2] K. Barteczko (2004), „*Java od podstaw do technologii.*”, Mikom, Warszawa
- [3] I. Białynicki-Birula, I. Białynicka-Birula (2002), „*Modelowanie rzeczywistości.*”, Prószyński i S-ka, Warszawa
- [4] J. Bielecki (2001), „*Java 4 Swing.*”, Helion, Gliwice
- [5] B. Chopard, P.O. Luthi, P-A Quéroz (1996), „*Cellular automata model of car traffic in a two-dimensional street network.*”, Journal of Physics A 29: 2325-2336
- [6] D. Chowdhury, A. Schadschneider (1999), „*Self-organization of traffic jams in cities: effects of stochastic dynamics and signal periods*”, Physical Review E 59: 1311-1314
- [7] Der Spiegel/Onet.pl (2005), „*Prognozowanie korków.*”, <http://moto.onet.pl/1302368,2217,artykul.html> (28.11.2006)
- [8] PWN (2005), „*Encyklopedia Gazety Wyborczej. Tom 7*”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków
- [9] „*Java™ 2 SDK, Standard Edition Documentation Version 1.4.2*”, <http://java.sun.com/j2se/1.4.2/docs>
- [10] M. Gardner (1970), „*Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life"*”, Scientific American 223: 120-123
- [11] Ch. G. Langton, K. Shimohara (1997), „*Artificial Life V*”, MIT Press, Massachusetts
- [12] K. Nagel, M. Schreckenberg (1992), „*A cellular automata model for freeway traffic.*”, Journal de Physique I 2: 2221-2229
- [13] N. Margolus, T. Toffoli (1987), „*Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*”, MIT Press, Massachusetts

- [14] P. Naughton (2001), „*Podręcznik języka programowania Java.*”, Nakom, Poznań
- [15] „*Prawo o ruchu drogowym.*”, Dziennik ustawy z dnia 19 sierpnia 1997 Nr 98 poz. 602
- [16] K. Sznajd-Weron (2001), „*Opowieść o fizyce egzotycznej, ewolucji i rewolucji.*”, Wiedza i życie X.2001: 2-5
- [17] D. Uznanski (2002), „*Grid.*”, MathWorld – A Wolfram Web Resource, <http://mathworld.wolfram.com/Grid.html> (15.10.2006)
- [18] „*Verkehrsinformationssystem autobahn.NRW*”, <http://www.autobahn.nrw.de>
- [19] S. Wolfram (2002), „*A New Kind of Science.*”, Wolfram Media, Champaign