

Symulacja ruchu drogowego

Szczepan Polak

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

szczepanpol@student.agh.edu.pl

2024

Abstract

Ruch drogowy jest niezwykle skomplikowanym zjawiskiem, które wymaga uwzględnienia wielu czynników. Pomimo skomplikowości problemu, przeprowadzanie kolejnych badań pomaga coraz lepiej zrozumieć zachodzące procesy i zależności, a to przekłada się do poprawy efektywności, bezpieczeństwa oraz opracowywania odpowiednich strategii zarządzania ruchem. Jedną ze strategii badań nad ruchem drogowym jest wykorzystanie symulacji komputerowej, jako środowiska testowego, które w możliwie najlepszy sposób odzwierciedla rzeczywistość i pozwala na dokonywanie różnego rodzaju eksperymentów. W ramach niniejszego artykułu zaimplementowana została prosta symulacja ruchu drogowego oparta o ideę automatu komórkowego. Na podstawie, której przeprowadzone zostały badania dotyczące płynności ruchu drogowego w zależności od zmiennych takich jak natężenie ruchu czy różnej długości okresy sygnalizacji świetlnej. Uzyskane wyniki, wykazały, że niezaprzeczalnym czynnikiem zmniejszania efektywności ruchu drogowego jest wzrost liczby samochodów na drogach, co w skrajnych sytuacjach wydaje się być problemem bez rozwiązania. Zaobserwowano również, że w niektórych sytuacjach brak sygnalizacji świetlnej może pozytywnie wpłynąć na wydajność ruchu drogowego, natomiast długość okresu sygnalizacji świetlnej posiada pewien optymalny przedział. Zwrócono również uwagę, że istotnym czynnikiem wpływającym na ruch drogowy są kierowcy. Których zachowania i podejmowane decyzje nie są obojętne i znaczący sposób przekładają się na ruch drogowy.

Keywords: symulacja komputerowa, modele ruchu drogowego, automat komórkowy

1 Introduction and review of related research

Niniejszy projekt koncentruje się na zbudowaniu modelu symulacji ruchu drogowego, dzięki któremu możliwe będzie przeprowadzenie badań dotyczących wpływu poszczególnych czynników na efektywność i wydajność poruszania się pojazdów w zadanym środowisku infrastruktury drogowej.

Modele symulacji drogowej są niezwykle przydatną techniką wykorzystywaną przez naukowców i inżynierów zajmujących się planowaniem i projektowaniem dróg. Symulacja ruchu drogowego pozwala na przetestowanie różnych scenariuszy i strategii, bez konieczności budowania drogi lub wprowadzania zmian w jej infrastrukturze. Działanie takie niesie za sobą wiele korzyści w szczególności ekonomicznych w postaci sporych oszczędności lub lepszego wykorzystania funduszy przeznaczonych na budowę infrastruktury drogowej. Czy zaoszczędzenie

czasu poprzez wykorzystanie zgromadzonych wyników z symulacji od razu podczas budowy bez konieczności wprowadzania ewentualnych poprawek w przyszłości.

Wydaje się, że wykorzystanie symulacji ruchu drogowego szczególnie może być przydatne w aglomeracjach miejskich gdzie powszechnie występują problemy z optymalną przepustowością dróg, a gęsta zabudowa powoduje niewielkie możliwości zmian w infrastrukturze. W takiej sytuacji symulacja, oraz przetestowanie różnych rozwiązań takich jak sygnalizacja świetlna, ograniczenia prędkości mogą okazać się kluczowe.

Częstym podejściem do symulacji ruchu drogowego są symulacje na podstawie automatów komórkowych. Wykorzystanie modeli ruchu drogowego na podstawie automatów komórkowych zostało zaprezentowane w [5]. Do implementacji programu autorzy wykorzystali język JAVA. Program miał charakter modułowy co miało pozwolić na równoległe prowadzenie różnych wątków implementacyjnych. Użytkownik posiadał możliwość ingerencji w właściwości symulacji, poprzez wybór mapy czy zmianę podstawowych parametrów. Dodatkowo możliwe było wyświetlanie podstawowych danych w formie wykresu. Opracowana symulacja z racji na połączenie kilku podstawowych modeli pozwalała na bardziej zaawansowane i rozbudowane warunki symulacji.

Wykorzystanie modeli automatów komórkowych zostało również opisane w [4]. Autorzy w tej pracy skupili się na pewnych niedoskonałościach modeli ze skrzyżowaniem w których występowało zjawisko blokowania skrzyżowań. W wyniku prac stworzono nowy model skrzyżowania który jest rozwinięciem modelu Chowdhuryego-Schadschneidera i Bartodzieja. Pozwala uwidocznienie niepoprawne zjawisko blokowania skrzyżowań. Co w praktyce może przyczynić się do zaprogramowania sterowników sygnalizacji świetlnej w taki sposób aby, w takiej sytuacji wymuszały światło czerwone.

Z kolei w [6] autorzy skupili się na przeglądzie badań i wykorzystywanych modeli mikroskopowych w kontekście ich użyteczności w szczególności w Indonezji, gdzie problem związany z korkami staje się coraz poważniejszy. Przede wszystkim skupiono się na modelach poruszania się samochodów jeden za drugim oraz modelach zmiany pasa ruchu. Zagadnienia te bezpośrednio odnoszą się do prób jak najbardziej realistycznego odwzorowania zachowań kierowców. Istnieje wiele koncepcji podejścia do zachowań kierowców. W artykule przedstawiono badania które wykorzystywały, specjalne modele stochastyczne, modele oparte na prawdziwych danych, czy sieciach neuronowych. W konkluzji uznano iż zbudowanie zaawansowanego modelu od wzorującego zachowanie kierowców nie jest proste, a także zwrócono uwagę na odmienności zachowań oraz uwarunkowań które występują pomiędzy różnymi kulturami np., kraje zachodnie i azjatyckie.

Poniekąd w przeciwieństwie do tego problemu są autonomiczne samochody które swoje decyzje podejmują na podstawie wyuczonych algorytmów, a nie konkretnych decyzji człowieka. Wydaje się że możliwość połączenia ze sobą grup samochodów autonomicznych, dzięki czemu mogły by one wspólnie podejmować decyzje i wymieniać się danymi niesie za sobą wiele korzyści, a poniekąd rewolucję w systemie transportowym. Jednym z problemów przy budowie symulacji Connected and automated vehicles (CAVs), jest brak standardów i wiele rozwiązań budowanych samodzielnie poprzez poszczególne firmy automotve. Przegląd nowoczesnych modeli i podejść do problemu został przedstawiony w [3]. Autorzy po przeprowadzonej analizie stwierdzili, iż pomimo rozwoju i wielu podejściach w dziedzinie symulacji CAVs, wciąż

brak możliwości skutecznego i obiektywnego porównania modeli i podejść pomiędzy sobą. Zalecane jest aby prowadzić do pewnej standaryzacji oraz tworzenia repozytorium z rzeczywistymi danymi dla CAVs. Autorzy zdają sobie sprawę z tego iż z racji na wciąż trwający proces tworzenia algorytmów dla CAVs, nie jest to proste, jednakże prowadzone badania i symulacje mogą przyczynić się do stworzenia lepszych algorytmów co tylko pozytywnie wpłynie na rzeczywisty ruch samochodowy.

Inne podejście do problemu korków zostało opisane w [1]. Autorzy skupili się na wykrywaniu krytycznych punktów (skrzyżowań) w grafach sieci drogowej. W swoich założeniach uwzględniali również czynniki społeczne takie jak analiza sieci społecznych. Co ma mieć fundamentalne znaczenie w celu lepszego zrozumienia przyczyn powstawania korków. Zbiór danych (dróg) pochodził z GIS online OpenStreetMap. W celu walidowania uzyskanych wyników skorzystano z programu do symulacji ruchu drogowego VISSM. Przeprowadzone symulacje potwierdziły stosowność wcześniejszych analiz. W artykule przedstawiono również wyniki symulacji przeprowadzonych z algorytmem inteligentnego zarządzania ruchem drogowym, który uwzględniał również społeczny wymiar ruchu codziennego w obszarach miejskich. Uzyskane rezultaty wykazały zmniejszenie czasu oczekiwania i długości kolejek.

Przegląd literatury obrazuje iż symulacja ruchu drogowego jest bardzo złożonym zagadnieniem. Istnienie wielu modeli oraz podejść do szczegółów symulacji sprawia, że to zagadnienie jest wciąż rozwijane, a kolejne badania i obserwacje rzucają nowe światło na lepsze zrozumienie tego problemu. W dalszej części pracy inspirować się omówionymi podejściami zostanie stworzony model symulacji ruchu drogowego oraz zostaną przedstawione wyniki badań wpływów poszczególnych czynników na ruch drogowy.

2 Problem formulation and proposed solution

Porojekt koncentruje się na stowrzeniu symulcji ruchu drogowego, która pozwoli na przeprowadzenie eksperymentów i zbadanie jak poszczególne czynniki wpłyną na wydajność i efektywność poruszania się pojazdów w środowisku drogowym.

Przeprowadzone eksperymenty dotyczyć będą sygnalizacji świetlnej. Jak wpływa ona na środowisko ruchu dorgowowego oraz jak środowisko działa bez niej. Dodatkowo zasymulowane zostaną warunki różnego nateżenia ruchu aby sprawdzić jak mniejszy lub większy ruch wpływa na wydajność i efektywność ruchu drogowego.

Budowa modelu symulacji ruchu drogowego została oparta o ideę modelu automatu komórkowego. Automaty komórkowe stosowane były już dawno temu,a ich uniwersalność pozwalała na budowę wielu modeli do różnych zastosowań między innymi w fizyce, biologii czy matematyce. Uniwersalność i pewna łatwość opisywania skomplikowanych zjawisk potrzebnych do symulacji przyczyniła się do popularności automatów komórkowych. Stało sie tak również w przypadku symalacji ruchu drogowego, gdzie zostało wymyślonych wiele modeli opisujących różne warunki drogowe.

Zaimplementowany model symulacji ruchu drogowego obejmuje drogi dwupasmowe z ruchem jednostronnym w przeciwnych kierunkach oraz powstałe na przecięciach tych dróg skrzyżowania. Dodatkowo możliwe jest dodanie sygnalizacji świetlnej która będzie pracować na każdym

ze skrzyżowań.

Informacje przechowywane są w różnych tablicach, co pozwala na osobne tworzenie różnych obiektów na mapie, takich jak droga, miejsca sygnalizacji świetlnej, czy samochodów. Do głównych obliczeń wykorzystywana jest macierz z wartościami prędkości samochodów wynoszącymi 0 lub więcej, aż do prędkości maksymalnej. Natomiast miejsca gdzie nie znajdują się samochody oznaczone są jako wartości ujemne. Każda komórka posiada wymiary 7,5 x 7,5 metra.

Samochody mogą poruszać się zgodnie z kierunkiem ruchu obowiązującym na danej drodze, zaimplementowane została również możliwość skręcania samochodów na skrzyżowaniach. Zastosowany został również warunek brzegowy zgodnie z którym samochód po wyjechaniu poza mapę pojawia się na początku drogi po przeciwnej stronie.

Całość symulacji obsługowana jest przez tak zwaną funkcję przejścia która składa się z 6 etapów:

1. Przyspieszenie - Samochody przyspieszają w każdej funkcji przejścia o 1, pod warunkiem że pozwalają na to przepisy a więc prędkość ta musi być mniejsza od ustalonej w symulacji prędkości maksymalnej. Wydaje się to być poprawnym i naturalnym zachowaniem kierowców, gdzie każdy z kierowców porusza się możliwie jak najszybciej, przestzegając przy tym przepisów ruchu drogowego. Krok ten można wyrazić za pomocą następującego wzoru [2]:

$$V_{j,i} < V_{MAX} \rightarrow V_{j,i} = V_{j,i} + 1 \quad (1)$$

gdzie:

- $V_{j,i}$ - prędkość pojazdu znajdującego się w i-tej komórce;
 - V_{MAX} - prędkość maksymalna na symulowanym odcinku drogi.
2. Wybór kierunku - Każdy z samochodów w momencie, gdy znajduje się przed skrzyżowaniem losuje swój następny skręt lub jego brak zgodnie z zadaniem na początku symulacji prawdopodobieństwem.
 3. Skręcanie - Punkt ten w implementacji połączony jest z następnym krokiem - Hamowaniem. Każdy z samochodów w sytuacji, gdy ma możliwość wjechania na skrzyżowanie musi zachować się zgodnie z ustalonymi regułami, a więc wykonanie manewru skrętu możliwe jest dopiero po sprawdzeniu czy dany manewr można w tym momencie wykonać. Sprawdzane jest czy są wolne pola przez które przejeżdżać będzie samochód podczas manewru skrętu również pole które zajmie na koniec manewru na nowej drodze, tak aby nie wjechać na skrzyżowanie w momencie kiedy nie jest możliwe jak najszybsze jego opuszczenie. Dodatkowo sprawdzany jest warunek podobny do tak zwanej zasady "prawej ręki", a więc skręt może być wykonany gdy ulica po prawej stronie samochodu jest wolna. Dla każdej z dróg jest to sprawdzane osobno zgodnie z poniższym schematem 1:

```

1  def draw_next_turn(self):
2      # first setting to start values
3      self.will_turn = False
4      self.will_turn_right = False
5      self.will_turn_left = False
6
7      r = random.random()
8      if r < self.WILL_TURN_PROPABILITY:
9          self.will_turn = True
10         r = random.random()
11         if r < self.WILL_TURN_RIGHT_PROPABILITY:
12             self.will_turn_right = True
13         else:
14             self.will_turn_left = True
15     else:
16         self.will_turn = False
17         self.will_turn_right = False
18         self.will_turn_left = False

```

Listing 1: Kod źródłowy- funkcja losowania skrętu

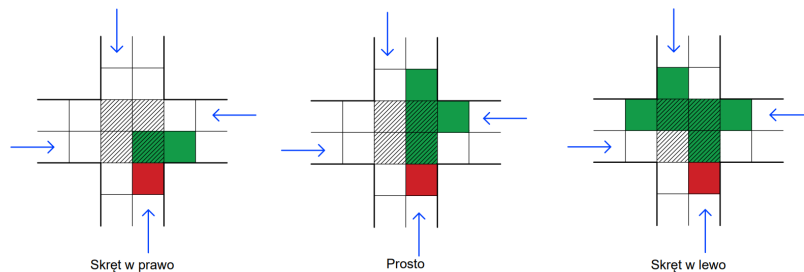


Figure 1: Pola które muszą pozostać wolne aby wykonać manewr skrętu

Powyższy rysunek przedstawia jakie pola muszą pozostać wolne (kolor zielony), aby samochód (kolor czerwony) mógł wykonać manewr skrętu. Dodatkowo niebieskimi strzałkami zostały oznaczone kierunki poruszania się na poszczególnych drogach. Przedstawiona sytuacja dotyczy samochodu który porusza się w kierunku północnym, natomiast dla każdego z kierunków dróg schemat wygląda równoważnie.

4. Hamowanie - Krok ten można opisać następująco:

Jeśli odległość do skrzyżowania wynosi 0:

- gdy samochód skręca w prawo to: $V_{j,i} = 1$
- gdy samochód skręca w lewo: $V_{j,i} = 2$
- gdy samochód jedzie prosto: $V_{j,i} = 2$
- gdy samochód nie może wykonać manewru: $V_{j,i} = 0$

W przeciwnym wypadku:

- Jeżeli następne światła mają kolor czerwony: $V_{j,i} = \min(d_{j,i}, s_{j,i}, c_{j,i}, V_{j,i})$
- w przeciwnym wypadku: $V_{j,i} = \min(d_{j,i}, c_{j,i}, V_{j,i})$

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.
- $c_{j,i}$ – odległość pojazdu znajdującego się w i-tej komórce drogi numer j do najbliższego skrzyżowania.

5. Zdarzenia Losowe - krok ten ma na celu symulowanie różnego rodzaju zdarzeń losowych występujących na drodze takich jak zapatrzenie się na reklamę czy niepewny ruch pieszego. Samochód, z określonym na początku symulacji prawdopodobieństwem, zmniejsza swoją prędkość o jeden. Dodatkowo przy obecnej implementacji założono, że kierowcy przy niskich prędkościach mniejszych równych 2, są bardzo skoncentrowani i nie popełniają błędów. Krok ten można wyrazić następującym wzorem [2]:

$$V_{j,i} > 2 \wedge P < p \rightarrow V_{j,i} = V_{j,i} - 1 \quad (2)$$

gdzie:

- $V_{j,i}$ – prędkość pojazdu znajdującego się w i-tej komórce drogi numer j;
- P - zmienna losowa;
- p - prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego.

6. Przesunięcie - Po poprzednich krokach wszystkie samochody przesuwają się zgodnie z kierunkiem jazdy o liczbę kraterów do przodu równą ich prędkości. Następnie samochodom które znajdują się na skrzyżowaniach zmieniane są kierunki ruchu zgodnie z nowymi drogami wynikającymi z manewru skrętu samochodu. Na koniec zmienna czasu t zwiększana jest na $t+1$.

W modelu zaimplementowano również system sygnalizacji świetlnej. Światła zmieniają się zgodnie ze schematem - możliwość jazdy horyzontalnej, przerwa na światła czerwone tak aby samochody na skrzyżowaniu miały większe szanse je opuścić, możliwość jazdy wertykalnej. Poszczególne czasy opierają się o ilość ticków symulacji. Poniżej przykład implementacyjny na bazie kodu źródłowego z ustawionymi na sztywno czasami 5 ticków na światło zielone, 3 ticki na światło czerwone dla wszystkich stron w celu możliwości opuszczenia skrzyżowania.

```

1      if self.ticks % 8 == 0:
2          y = self.map.lights_positions_n + self.map.lights_positions_s
3          x = self.map.lights_positions_e + self.map.lights_positions_w
4          if self.horizontal:
5              for pos in y:
6                  if self.map.lights_map[pos[0], pos[1]] == 1:
7                      self.map.lights_map[pos[0], pos[1]] = 0
8                  else:
9                      self.map.lights_map[pos[0], pos[1]] = 1
10         if self.vertical:
11             for pos in x:
12                 if self.map.lights_map[pos[0], pos[1]] == 0:
13                     self.map.lights_map[pos[0], pos[1]] = 1
14                 else:
15                     self.map.lights_map[pos[0], pos[1]] = 0
16     elif self.ticks % 8 == 5:
17         for pos in x + y:
18             self.map.lights_map[pos[0], pos[1]] = 0
19         self.vertical = not self.vertical
20         self.horizontal = not self.horizontal

```

Listing 2: Przykład z kodu źródłowego- zmienianie świateł

Implementacja modelu zrealizowana została w języku python. Poza standardowymi możliwościami języka python wykorzystano biblioteki takie jak:

- pygame - użytą do wizualizacji symulacji w czasie rzeczywistym
- numpy - użytą do przeprowadzania obliczeń
- random - umożliwiającą losowanie liczb pseudolosowych potrzebnych przy funkcjach takich jak losowanie skrętu

3 Experimental research results

3.1 Research description

Na podstawie stworzonej implementacji symulacji ruchu drogowego przeprowadzone zostały badania mające na celu sprawdzenie jak zmiana poszczególnych parametrów symulacji wpływa na ruch drogowy w szczególności na powstawanie korków, oraz płynność poruszania się po drogach.

W tym celu zasymulowano kilka poziomów natężenia ruchu, które miały odwzorowywać różne sytuacje w ciągu dnia np. godziny nocne, godziny szczytu, czy standardowy ruch uliczny w godzinach południowych. Na podstawie tych założeń stworzone zostały cztery poziomy

natężenia ruchu, które zakładały ilości samochodów odpowiadające 10, 25, 50 oraz 75 % z ilości wszystkich możliwych samochodów na danej mapie symulacji.

Dodatkowo sprawdzono również, różnice pomiędzy symulacją bez oraz z sygnalizacją świetlną, a także wpływ różnych długości okresów sygnalizacji świetlnej na wydajność ruchu drogowego.

Do zmierzenia jak różne opisane wcześniej scenariusze wpływają na ruch drogowy, zebrano następujące dane:

- średnia prędkość wszystkich samochodów
- procent samochodów stojących
- procent samochodów poruszających się
- średni czas przejazdów poszczególnych dystansów

3.2 Wyniki badań

Średnie prędkości samochodów podczas symulacji bez sygnalizacji świetlnej przedstawia rysunek 2.

Większe zatłoczenie na drogach wpływa na zmniejszenie średniej prędkości poruszania się samochodów. W przypadku prawie pustych dróg (przypadek nr 1 (10 %)) średnia prędkość poruszania się samochodów bliska jest wartości 2.5 z rozproszeniem danych bliskim 0.5 w obu kierunkach. W pikach zaobserwować można średnie prędkości bliskie 3. Wraz ze zwiększaniem liczby samochodów wartości te gwałtownie spadają do około (kolejno następne przypadki) 1.1, 0.52, 0.28. Wraz ze zwiększaniem ilości samochodów zauważalny jest również spadek rozrzutu wartości od średniej.

Procent wszystkich samochodów poruszających się oraz stojących podczas symulacji bez sygnalizacji świetlnej przedstawia rysunek 3.

Procent samochodów poruszających się (wraz z trwaniem symulacji) w pierwszym przypadku jest bliski 80% i utrzymuje się przez całą symulację, co powoduje, że zdecydowana większość samochodów cały czas się poruszają. W drugim przypadku procent samochodów stojących i jadących przez całą symulację jest bliski 50 procent, co powoduje, że około połowy samochodów jest w ciągłym ruchu. W kolejnych badanych przypadkach sytuacja ta zmienia się na odwrotną, a więc zdecydowanie większa liczba samochodów stoi w korkach. Podobnie jak w średnich na wykresach średnich prędkości również tutaj zauważalna jest sytuacja zmniejszających się rozrzutów wartości od średniej wraz ze zwiększaniem ilości samochodów.

Wykresy w rysunku 4 przedstawiają średnie czasy przejazdów określonych odcinków długości. Można zauważyć, że wraz ze zwiększaniem ilości samochodów zwiększają się również czasy przejazdów.

Ogólne wnioski są dość oczywiste, wraz z większym ruchem na drogach spada wydajność ruchu, co wpływa na powstawanie korków, a to na średnie czasy czy prędkości przejazdów. Wydaje się, że do drugiego badanego przypadku (25% samochodów) ruch samochodów jest w miarę stabilny i po prostu się odbywa, podczas gdy w kolejnych przypadkach samochody raczej

stoją w korkach i prawie w ogóle się nie poruszają.

Wykresy średnich prędkości samochodów podczas symulacji z sygnalizacją świetlną przedstawiają rysunki [5,6,7]

Wraz ze zwiększaniem długości świateł wzrasta średnia prędkość poruszania się samochodów. Wzrasta również rozrzucenie wartości wokół średniej. W porównaniu do średnich prędkości w przypadku symulacji bez świateł możemy zauważyć pewną powtarzalność (sezonowość, okres) na wykresie kiedy wartości wzrastają i spadają w podobny sposób, podczas gdy w symulacji bez świateł odbywało się to bardziej nieregularnie. Sytuacja taka wynika z działania świateł, które zarządzają ruchem w sposób systematyczny. Na wykresach widoczne jest również zmniejszanie się częstotliwości występowania tych odchyłeń wraz ze zwiększaniem długości świateł, co potwierdza wpływ działania sygnalizacji świetlnej na ruch drogowy.

Zwiększanie długości świateł wpływa na zmniejszanie się dysproporcji pomiędzy proc. samochodów poruszających się, a proc. samochodów stojących. Ogólny schemat jest zgodny z intuicją. W przypadku mniejszej ilości samochodów dysproporcje te są najmniejsze i rosną wraz ze zwiększającą się ilością samochodów na mapie. Co ciekawe w przypadku świateł o długości czasu 5 przez cały okres trwania sytuacji we wszystkich przypadkach zatłoczenia większy procent ogólnej liczby samochodów stoi w korkach, niż się porusza. Wraz ze zwiększaniem się długości czasu przynajmniej w przypadku najmniejszego zagęszczenia sytuacja ta się zmienia i dochodzi do parytetu, a nawet przewagi samochodów poruszających się nad stojącymi w korkach. Daje to pewny wniosek, iż zbyt krótki czas świateł raczej negatywnie wpływa na ruch samochodowy. Co ciekawe okazuje się, iż symulacja bez świateł przynajmniej w tym zakresie uzyskała lepsze rezultaty.

Wykresy zależności pomiędzy długością czasu świateł a średnimi czasami przejazdów określonych odcinków przedstawiają rysunki [8,9,10,11]

Zwiększanie długości świateł wpływa na zmniejszanie się średnich czasów przejazdów określonych jednostek długości. Zjawisko to jednak wraz ze zwiększaniem się czasu świateł zaczyna wygasać, (zauważalne są coraz mniejsze różnice), a w pewnym punkcie dalsze zwiększanie czasu sygnalizacji świetlnej nie wpływa już na zmniejszanie się średnich czasów przejazdów wręcz przeciwnie może zacząć wpływać negatywnie. Dobrze sytuację tą pokazują wykresy poniżej. Oczywiście jest również iż, mniejsza ilość samochodów wpływa pozytywnie na średni czas przejazdu. W porównaniu do symulacji bez świateł również w tym przypadku symulacja bez świateł uzyskała lepsze rezultaty nawet w przypadku najdłuższego badanego okresu świateł.

4 Summary and conclusions

Z przeprowadzonych analiz można wyciągnąć następujące wnioski:

- Bezpośrednim wpływem na zmniejszanie wydajności ruchu drogowego, a co za tym idzie powstawaniem korków, jest wzrost liczby samochodów na drogach. Czynnikiem ten wydaje się być kluczowy i ciężki, a w skrajnych sytuacjach nawet niemożliwy do opanowania.
- Sygnalizacja świetlna nie zawsze wpływa na poprawę wydajności ruchu drogowego. Rezultaty przeprowadzonych badań pokazują, że w badanej symulacji wydajność ruchu drogowego była lepsza bez niż z sygnalizacją świetlną. Wpływ na to może mieć wiele

czynników. Między innymi w badanej implementacji założono synchroniczne działanie całej sieci sygnalizacji, podczas gdy w rzeczywistości sygnalizacja działa niezależnie, lub podłączona jest do systemu optymalizacji ruchu drogowego, który na bieżąco analizuje aktualną sytuację na drogach w celu inteligentnego i optymalnego zarządzania ruchem drogowym. Dodatkowo w symulacji założono równomierne rozłożenie samochodów na drogach, a także sztywne prawdopodobieństwa skręcania podczas gdy w rzeczywistości sieć drogowa najczęściej składa się z głównych dróg, częściej uczęszczanych prowadzonych w konkretnym kierunku oraz pobocznych/alternatywnych. Niemniej jednak badany przykład pokazuje, że sygnalizacja, choć posiada pewne plusy w postaci strukturyzacji czy zarządzalności ruchem drogowym, nie zawsze jest optymalnym rozwiązaniem i powinna być poddawana pewnym badaniom interakcji z otoczeniem przed dodaniem jej do danego skrzyżowania.

- Zachowanie kierowców jest kluczowe. Powyższy punkt daje również przesłanki, by sądzić, że przy odpowiednim zachowaniu i umiejętnościach kierowców, ruch drogowy może być bardziej wydajny. Wskazują na to również inne badania. Czynniki takie jak czas reakcji, pewność w podejmowaniu decyzji np. na skrzyżowaniach czy zachowanie odpowiednich odległości znacząco wpływają na płynność ruchu drogowego. Ciężko wymagać, aby w rzeczywistości każdy kierowca zachowywał się idealnie w każdej możliwej sytuacji. Ciekawym zagadnieniem rozwiązania tego problemu mogą być samochody autonomiczne, które będą w stanie komunikować się pomiędzy sobą, podejmując optymalne decyzje.
- Długość światła sygnalizacji świetlnej ma bezpośredni wpływ na wydajność ruchu drogowego. Rezultaty z badań jasno wskazują, że istnieje pewien przedział czasu trwania faz sygnalizacji świetlnej, który jest optymalny. Podczas gdy skrócenie lub wydłużenie tego okresu będzie wpływać negatywnie.

Podsumowując badanie ruchu drogowego, jest niezwykle skomplikowanym zjawiskiem, które wymaga uwzględnienia wielu czynników. Pomimo skomplikowości problemu przeprowadzanie badań, oraz wyciąganie wniosków pomaga lepszemu zrozumieniu tego procesu i przyczynia się do poprawy efektywności ruchu drogowego, oraz opracowywania odpowiednich strategii zarządzania ruchem.

References

- [1] G. Baban, A. Iovanovici, C. Cosariu, and L. Prodan. “Determination of the critical congestion point in urban traffic networks: A case study”. In: *Informatics, 2017 IEEE 14th International Scientific Conference on*. IEEE. 2017, p. 1823.
- [2] M. Bartodziej. “Modelowanie ruchu ulicznego za pomocą automatów komórkowych”. Praca dyplomowa. Wrocław, Polska: Uniwersytet Wrocławski, 2007.
- [3] P. Gora, C. Katrakazas, A. Drabicki, F. Islam, and P. Ostaszewski. “Microscopic traffic simulation models for connected and automated vehicles (CAVs) – state-of-the-art”. In: *Procedia Computer Science* 170 (2020), pp. 474–481.
- [4] K. Małecki, M. Rokita, and J. Wątróbski. “Wykorzystanie automatów komórkowych w modelowaniu ruchu drogowego”. In: *Pomiary Automatyka Kontrola* 56.7 (2010), pp. 724–727.
- [5] K. Małecki and K. Szmajdsziński. “Symulator do mikroskopowej analizy ruchu drogowego”. In: *Logistyka* Tom nr 3 (2012).
- [6] R. Mardiati, N. Ismail, and A. Faroqi. “Review of microscopic model for traffic flow”. In: *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* 9 (2014), pp. 1794–1800.

5 Sekcja z rysunkami

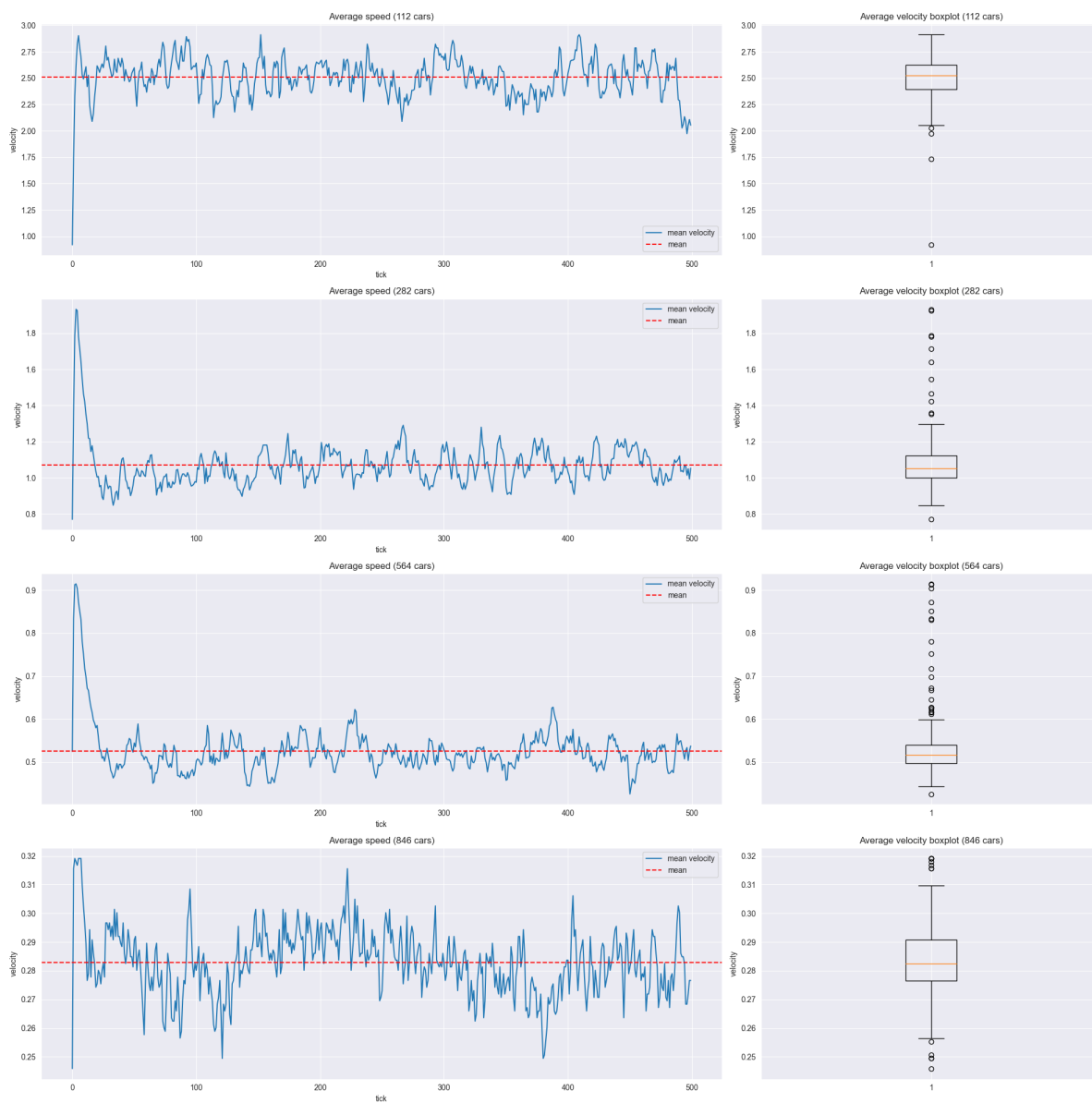


Figure 2: Średnia prędkość wszystkich samochodów podczas trwania symulacji - różne poziomy natężenia ruchu. Symulacja bez sygnalizacji świetlnej.

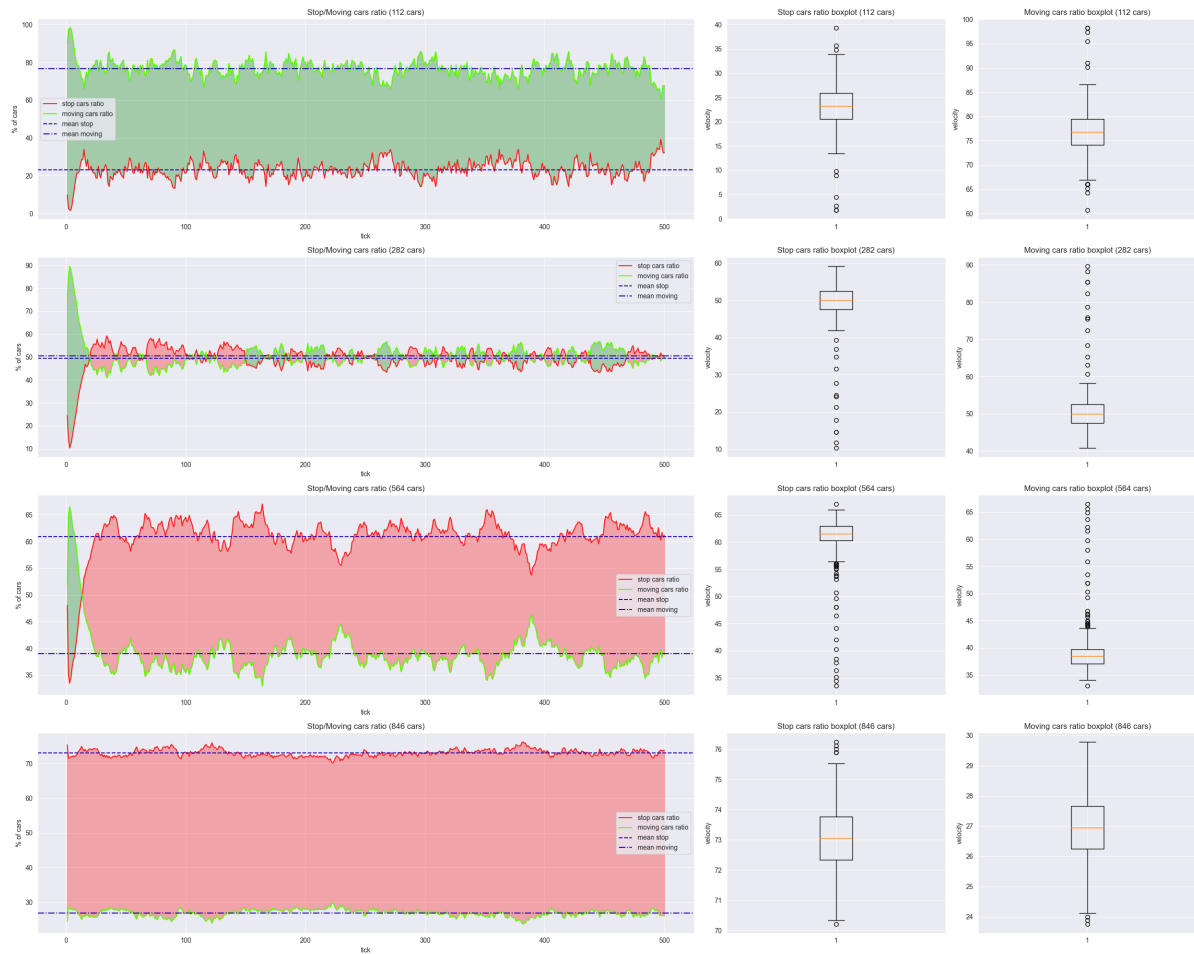


Figure 3: Ilość samochodów poruszających się oraz stojących podczas trwania symulacji - różne poziomy natężenia ruchu. Symulacja bez sygnalizacji świetlnej.

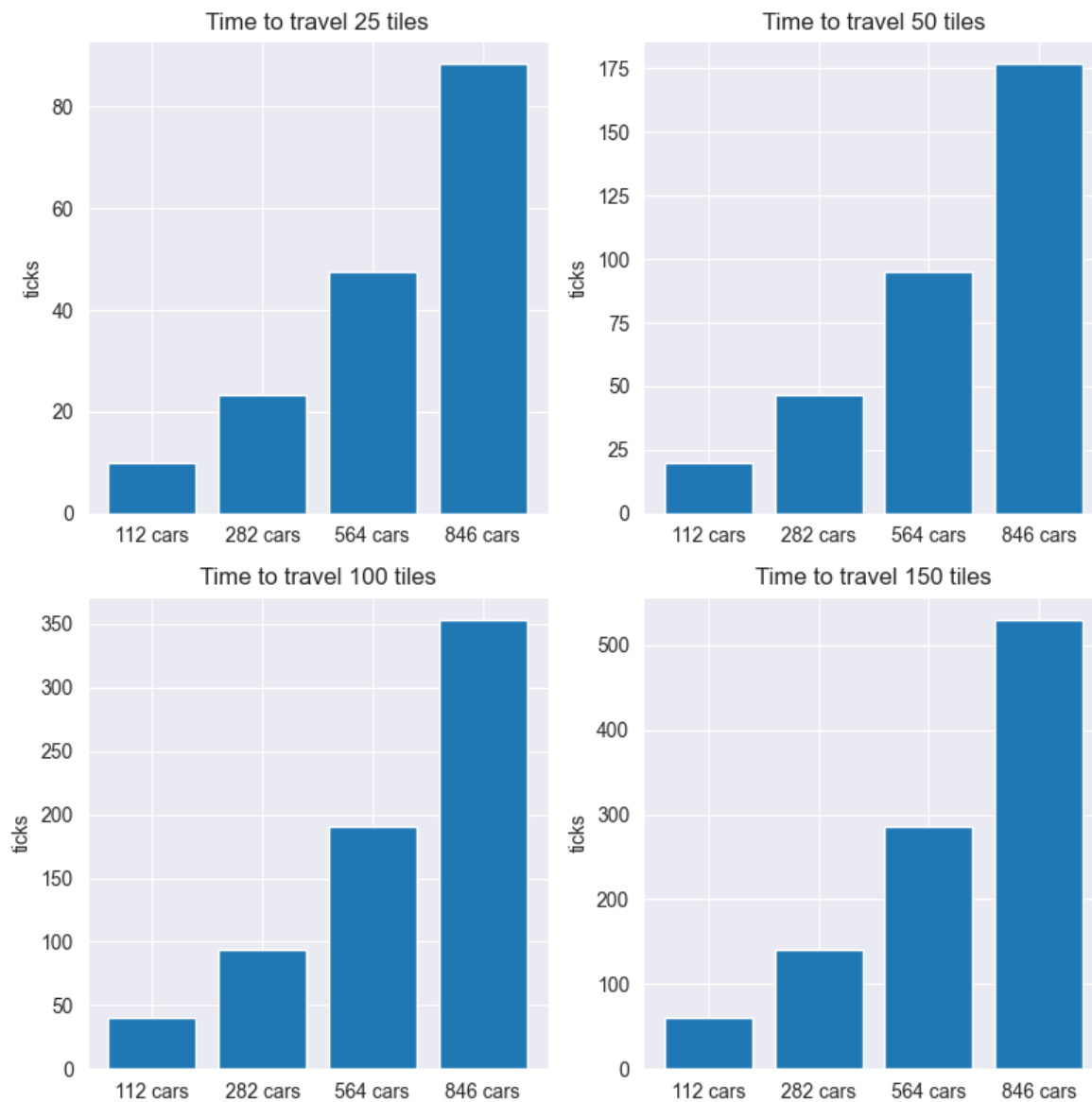


Figure 4: Średnie czasy przejazdów poszczególnych odcinków - różne poziomy natężenia ruchu. Symulacja bez sygnalizacji świetlnej.

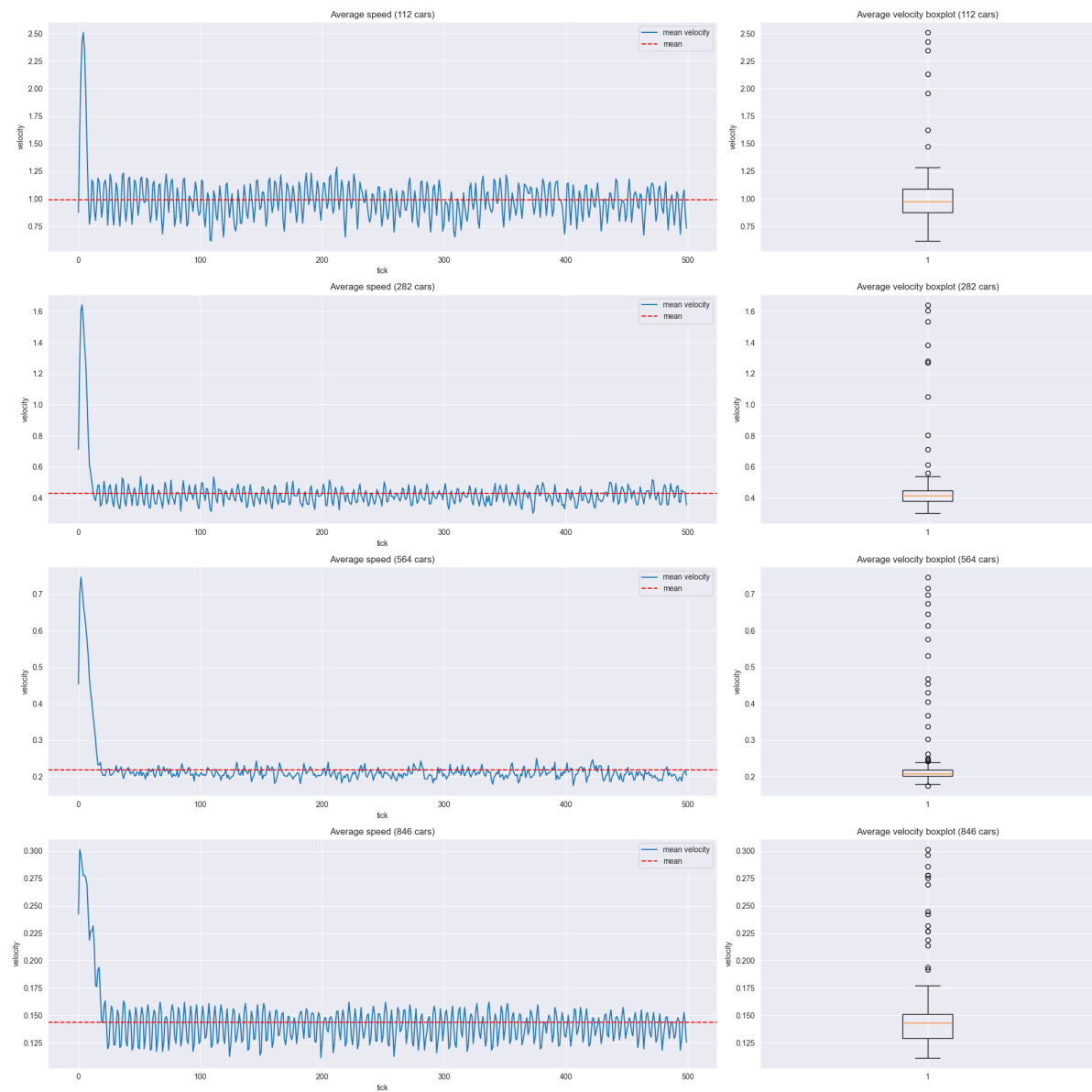


Figure 5: Średnia prędkość wszystkich samochodów podczas trwania symulacji - różne poziomy natężenia ruchu. Symulacja z sygnalizacją świetlną

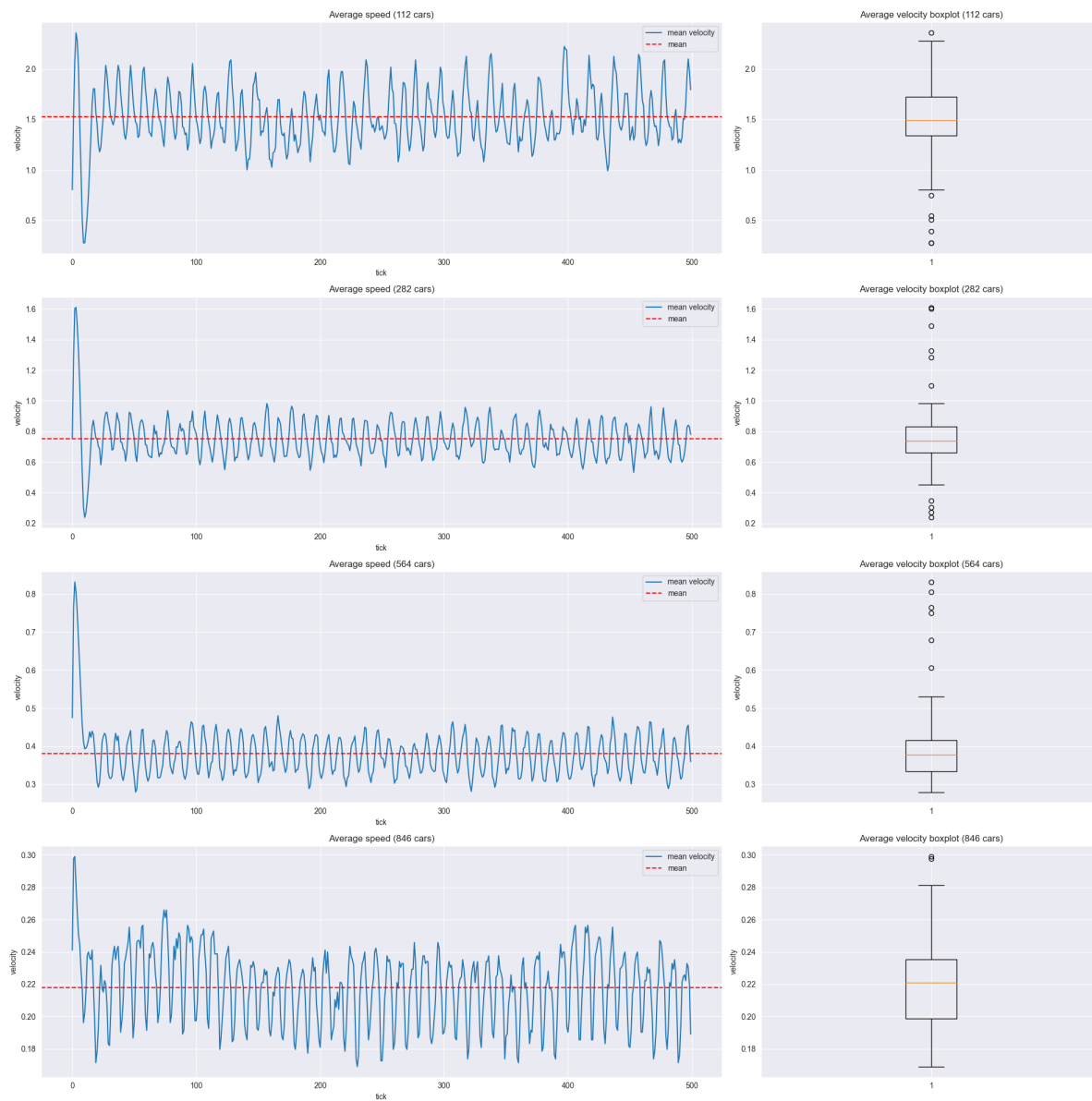


Figure 6: Średnia prędkość wszystkich samochodów podczas trwania symulacji - różne poziomy natężenia ruchu. Symulacja z sygnalizacją świetlną

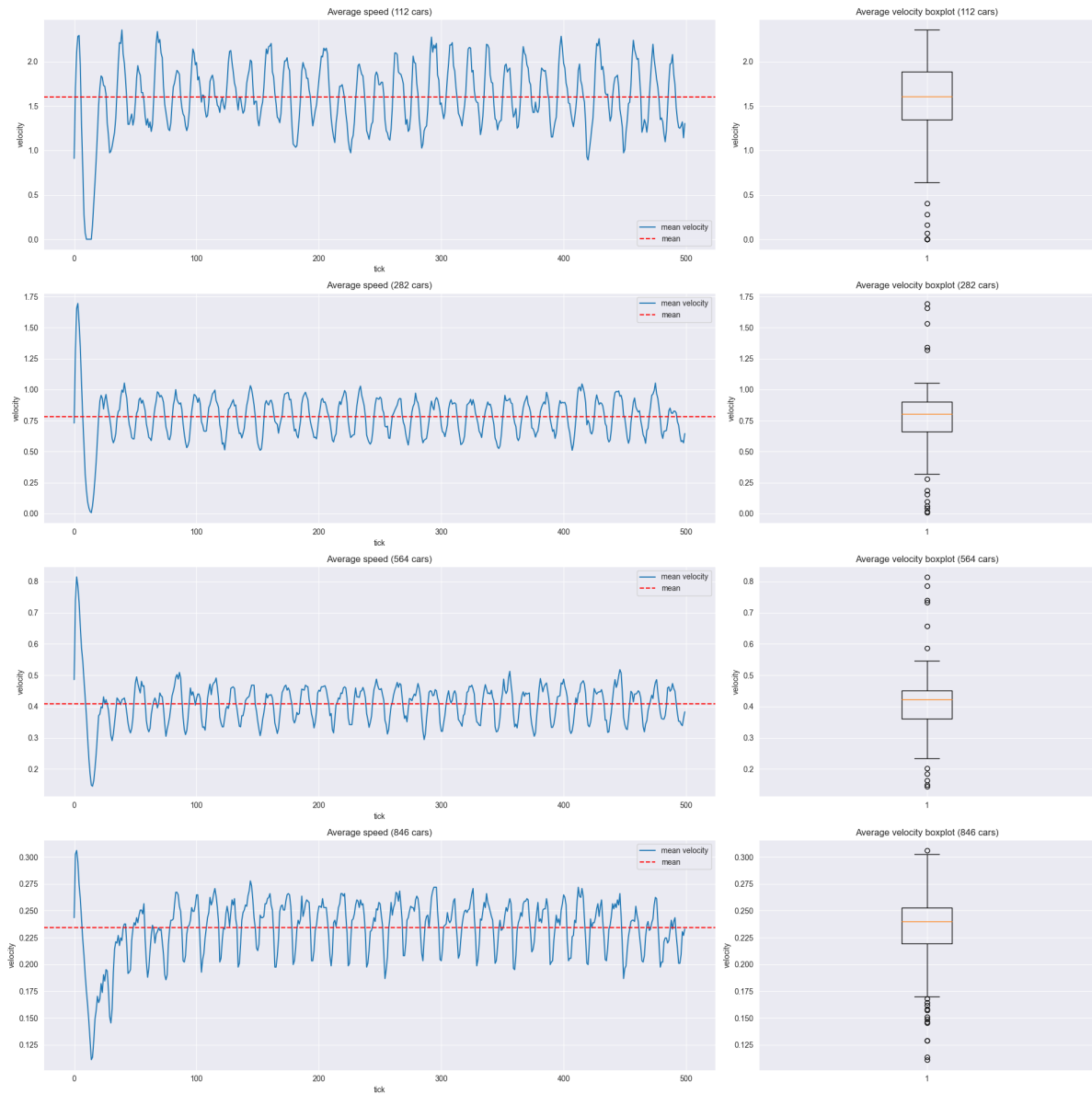


Figure 7: Średnia prędkość wszystkich samochodów podczas trwania symulacji - różne poziomy natężenia ruchu. Symulacja z sygnalizacją świetlną

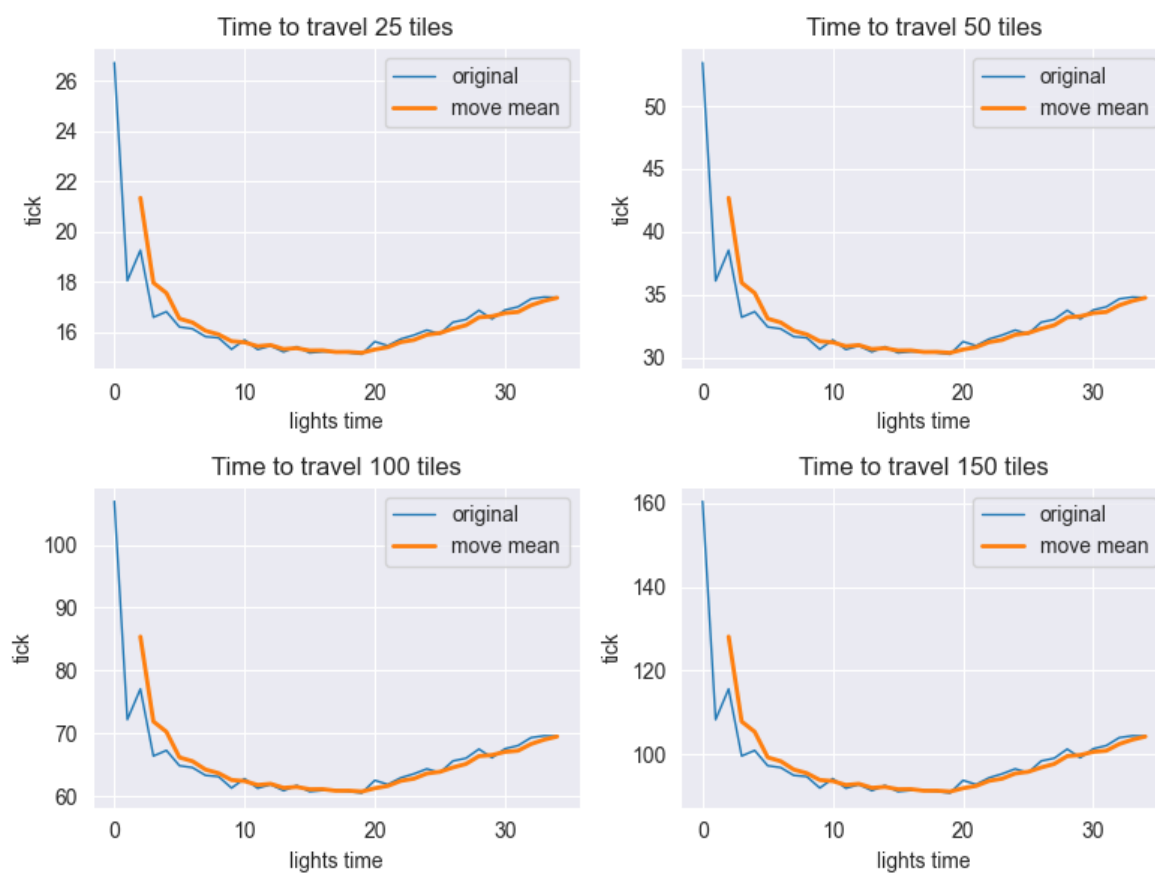


Figure 8: Średnie czasy przejazdów poszczególnych odcinków dróg dla pierwszego przypadku natężenia ruchu (10% samochodów)

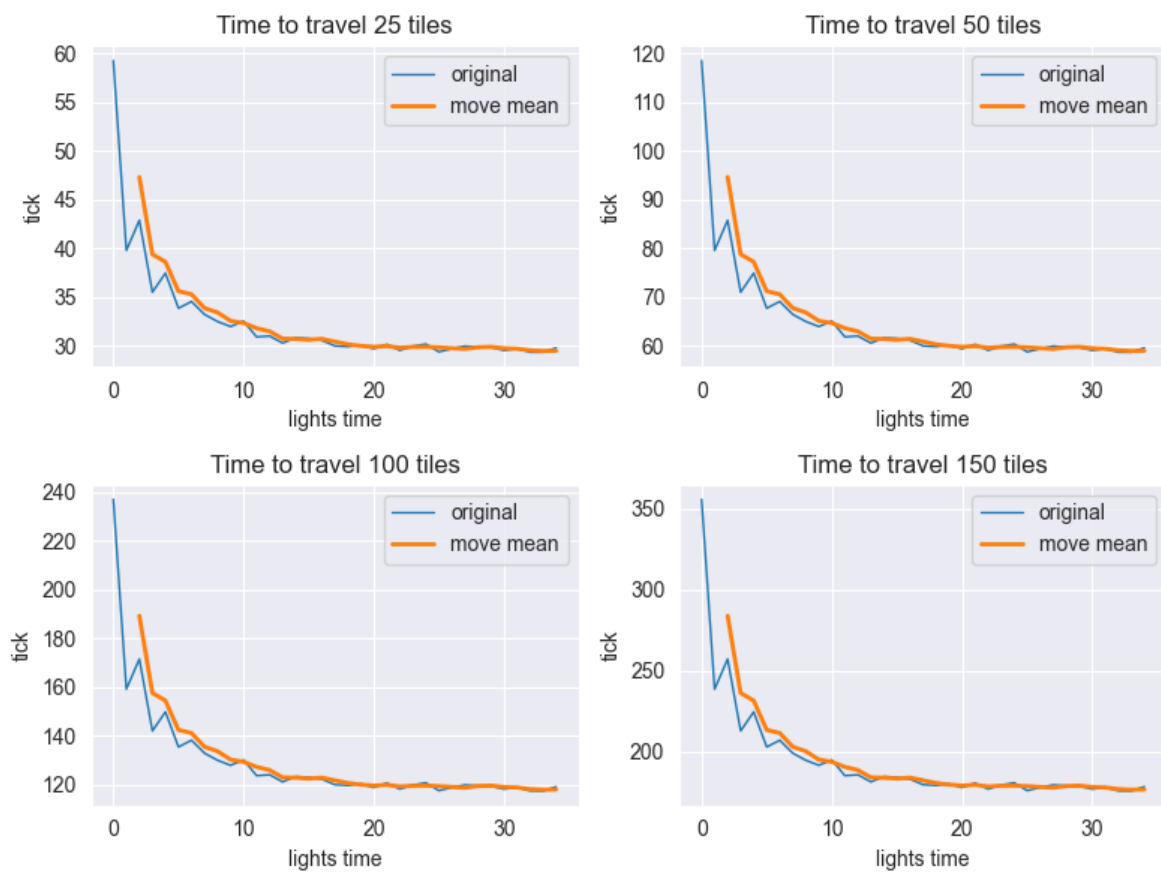


Figure 9: Średnie czasy przejazdów poszczególnych odcinków dróg dla pierwszego przypadku natężenia ruchu (25% samochodów)

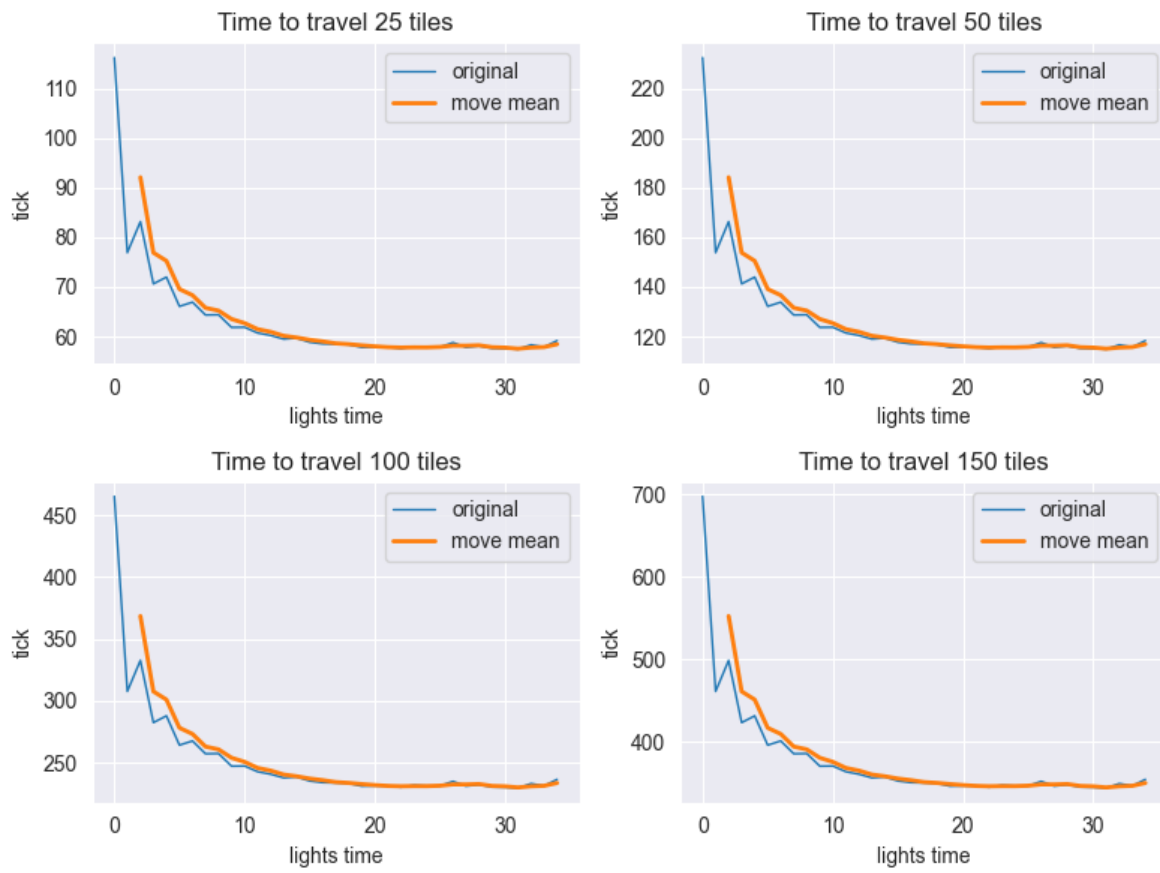


Figure 10: Średnie czasy przejazdów poszczególnych odcinków dróg dla pierwszego przypadku natężenia ruchu (50% samochodów)

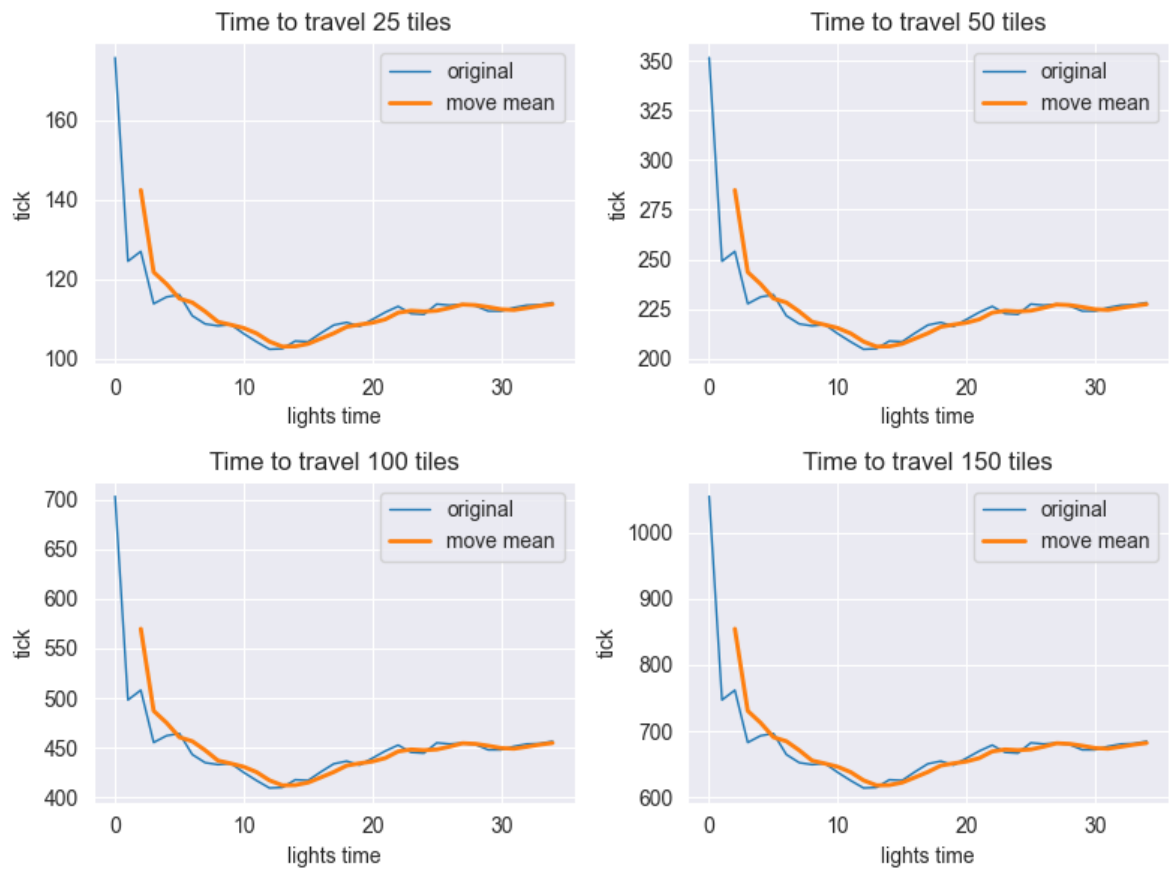


Figure 11: Średnie czasy przejazdów poszczególnych odcinków dróg dla pierwszego przypadku natężenia ruchu (75% samochodów)