

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА “АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ”

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

*“ Вдосконалення пропускної здатності перехресть для змішаних потоків
зі звичайними та автономними транспортними засобами ”*

ВИКОНАЛА:

Ковальченко Дар`я Павлівна

КЕРІВНИК:

Монастирський Юрій Анатолійович

Допущена до захисту

Зав. кафедри АТ

« _____ » червня 2024 р.

Ю.А.Монастирський

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
Кафедра “ Автомобільний транспорт ”
Освітня програма Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

Затверджую:

Зав. кафедри АТ

Ю.А.Монастирський

« » квітня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ

Ковальченко Дар`ї Павлівні

1. Тема проекту (роботи) “ *Вдосконалення пропускнуої здатності перехресть для змішаних потоків зі звичайними та автономними транспортними засобами* ” затверджена наказом по університету від « » квітня 2024 р. №
2. Термін здачі закінченої роботи « » червня 2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) *матеріали наукових досліджень з літературних джерел за темою роботи*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: *Вступ. Теоретичні основи теорії ігор, яка використана у дослідженні. Розробка алгоритму пріоритетного керування. Моделювання, тестування та результати. Висновки. Список використаних джерел*
5. Перелік графічного матеріалу Графіки та діаграми по результатам досліджень.
6. Дата видачі завдання - « » квітня 2024 р.

Студентка

Ковальченко Дар`я Павлівна

Керівник

Монастирський Юрій Анатолійович

Зміст

Анотація	4
1. Вступ.....	6
2. Теоретичні основи теорії ігор, яка використана у дослідженні	10
3. Розробка алгоритму пріоритетного керування	13
3.1. Тематичне дослідження (I) автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби транспортних засобів у всіх напрямках.....	13
3.1.1. Конфліктна точка	15
3.1.2. Час затримки (DT).....	16
3.1.3. Кейс (I) Стратегія гри автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби для перетину	18
3.1.4. Бажана швидкість для наступних транспортних засобів.....	19
3.2. Кейс-стаді (II) автономні транспортні засоби /звичайні транспортні засоби за визначеними напрямками	25
4. Моделювання, тестування та результати.....	35
4.1. Випадок (I): Автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби.....	36
4.2. Випадок (II) Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби.....	40
5. Висновки	45
Список використаних джерел	46

Анотація

Технологія автономних транспортних засобів (автономні транспортні засоби), що швидко вдосконалюється, матиме значний вплив на безпеку та ефективність дорожнього руху. У цій роботі представлено алгоритм керування пріоритетами автономних транспортних засобів, заснований на теорії ігор, для підвищення безпеки та ефективності перехресть зі змішаним рухом. Використовуючи зв'язок між транспортними засобами (V2I), ця модель дозволяє автономні транспортні засоби обмінюватися інформацією з придорожніми блоками (RSU) для підтримки прийняття рішення про те, чи повинен звичайний транспортний засіб (OV) або автономні транспортні засоби проїхати перехрестя першим. Безпека транспортних засобів приймається на різних стадіях прийняття рішень для забезпечення безаварійного руху на перехрестях. Представлені дві різні математичні моделі, де перша модель призначена для ситуації автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби, а друга — коли автономні транспортні засоби зустрічається з OV. Представлена імітаційна модель для реалізації алгоритму і порівняння продуктивності кожної моделі зі звичайним регулюванням дорожнього руху на чотириногому перехресті з сигналізацією і на кільцевій розв'язці. У симуляції було протестовано три рівні комбінацій обсягу трафіку та швидкості. Результати свідчать про значне зменшення затримки в обох випадках; для моделі case (I), автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби — зменшення на 65% порівняно з кільцевою розв'язкою та на 84% порівняно з чотириногим сигнальним перехрестям, а для моделі автономні транспортні засоби /OV (II) зменшення становить 30% та 89% відповідно.

Ключові слова: автономні транспортні засоби; управління перехрестями; зменшення затримки; автономний; звичайні транспортні засоби; теорія ігор; сигнальне перехрестя; кільцеві перехрестя

1. Вступ

Автономні транспортні засоби – це безпілотні транспортні засоби, які можуть взаємодіяти з іншими системами та самостійно приймати рішення щодо водіння [1]. Рішення, що приймаються автомобілем, можуть варіюватися від стеження за автомобілем і контролю швидкості до зміни смуги руху і вибору маршруту, і вони приймають рішення шляхом обробки даних від бортових датчиків або шляхом отримання інформації від інфраструктури або інших транспортних засобів [2]. Інженери дорожнього руху прагнуть скористатися перевагами аудіовізуальних засобів для підвищення безпеки дорожнього руху та підвищення операційної ефективності. Одним із способів використання переваг Автономні транспортні засоби є використання їх в управлінні перехрестями [3].

Перехрестя є життєво важливою зоною для вирішення дорожніх конфліктів [4]. Протягом десятиліть ми використовували світлофори для регулювання транспортного потоку, що проходить через перехрестя, відповідно до визначених сигнальних циклів, фаз та інтервалів. Однак цей метод контролю перехресть виявився неефективним з обмеженням пропускної здатності, головним чином через необхідність розділяти конфліктуючі траєкторії транспортних засобів і регулювати час сигналу, щоб пристосуватися до необхідного часу реакції водіїв-людей. У контексті автономних транспортних засобів традиційний метод управління сигналом для перехресть може більше не знадобитися; У той же час, пропускна здатність і ефективність перехресть можуть бути в значній мірі збільшені за рахунок можливостей передачі даних і мінімізації часу реакції автономних транспортних засобів. У даній роботі представлений новий метод управління перетинами з автономні транспортні засоби - потоками. Не порушуючи правил безпеки, є можливість підвищити ефективність

дорожнього руху, зменшивши затримки транспортних засобів, що наближаються.

Використовуючи технології «автомобіль-інфраструктура» (V2I) і «автомобіль-транспортний засіб» (V2V), Автономні транспортні засоби, що наближається, може обмінюватися інформацією з придорожнім блоком (RSU), щоб можна було контролювати його швидкість, щоб уникнути конфлікту, коли він безпечно проїжджає перехрестя [5, 6]. Залежно від транспортного засобу та польових умов, у процесі прийняття рішення може знадобитися враховувати такі фактори, як швидкість наближення, відстань та відносне розташування до інших транспортних засобів, а також поворотний рух та розміри кожного транспортного засобу [7]. Оскільки цей процес прийняття рішень схожий на генерацію стратегій в теорії ігор, ми дотримувалися цього методу, щоб побудувати матрицю виграшів для кожної окремої комбінації факторів. У цьому дослідженні було вивчено та змодельовано два випадки, де випадок (I) стосується ситуації, пов'язаної з автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби у всіх напрямках, а випадок (II) включає автономні транспортні засоби на одній дорозі та звичайний транспортний засіб (OV) на дорозі конфлікту.

Більшість досліджень і досліджень з управління автономні транспортні засоби -перетином зосереджені на 100% автономні транспортні засоби - випадку. [8] запропонували новий інструмент для управління траєкторіями транспортних засобів за допомогою кооперативних систем адаптивного круїз-контролю (CACC) для уникнення зіткнень. Вони використовували оптимізаційну модель, щоб мінімізувати час очікування у разі конфлікту, розділивши перехрестя на три зони: у першій зоні, щоб довести всі автономні транспортні засоби до максимальної швидкості, у другій зоні для регулювання швидкості, якщо це необхідно, а потім повернутися до максимуму, щоб пройти третю зону. Вони застосували модель до чотириноного перехрестя, де лише по одному автомобілю в кожному

напрямку. [9,10,11] застосовує підхід, заснований на бронюванні під назвою (AIM) — коли автономні транспортні засоби входить в зону покриття контролера, він надсилає запит на в'їзд на перехрестя, після чого контролер імітує траєкторію руху транспортного засобу, і якщо немає конфлікту з будь-яким іншим транспортним засобом, він приймає його, інакше він скасовує запит. Лише деякі дослідники говорили про випадок змішаного дорожнього руху, який керує керованими транспортними засобами або звичайними транспортними засобами [12], запропонований ними метод доведений математично. Однак це дослідження було повністю перевірено математично, а потім перевірено моделюючою симуляцією. Більшість досліджень автономних транспортних засобів в основному зосереджені на електричних, технологічних концепціях і концепціях машинного навчання. Внесок цього дослідження полягає в тому, щоб охопити цю тему з точки зору інженерії дорожнього руху, де варіації пропускної здатності доріг, інтенсивності руху та швидкості транспортних засобів відіграють важливу роль у валідації будь-якого підходу до управління перехрестями.

У цьому дослідженні йдеться про перехрестя, оскільки вони є ключовими вузлами транспортної мережі, де транспортні засоби, що наближаються до однієї і тієї ж ділянки з різних напрямків, спричиняють багато конфліктів. Це зменшує пропускну здатність доріг, збільшує затримку руху та знижує безпеку на дорогах. За даними [13], затримки на перехрестях доріг становлять понад 80% від загальної кількості затримок дорожньої мережі, а 40% дорожньо-транспортних пригод трапляються на перехресті [14]. Існують різні типи методів управління перехрестями, кожен тип має свої особливості, параметри, переваги та недоліки. У даній роботі ми порівняли аналітичні результати запропонованого нами методу управління перехрестями з результатами двох найбільш поширених і ефективних методів: сигналізованих перехресть і кільцевих розв'язок.

Перехрестя з круговим рухом є ідеальним методом для низької щільності руху [15], вони мають менше конфліктних точок, ніж перехрестя з сигналізацією [16], тоді як перехрестя з сигналізацією може краще справлятися з великим транспортним потоком, але вплив перехрестя з сигналізацією на затримку руху особливо очевидний, коли транспортні засоби змушені повністю зупинитися [17].

2. Теоретичні основи теорії ігор, яка використана у дослідженні

Теорія ігор - це розділ математики, що займається аналізом стратегій прийняття рішень, де результати залежать від вибору, зробленого одним або декількома гравцями [18]. Іншими словами, теорія ігор використовується для пошуку найкращого рішення, коли рішення, яке намагається прийняти, залежить від вибору іншої сторони. Теорія ігор застосовується в багатьох областях, наприклад, в економіці, війні, бізнесі, біології та багатьох інших [19].

Існують різні типи ігор, і кожен тип має свій власний метод математичного розв'язання задач. Наприклад, у кооперативній грі гравцям дозволяється вести переговори та досягати угоди, але в некооперативній грі співпраця не застосовується [20]. Крім того, існують ігри з одночасним і послідовним ходом, ігри з нульовою сумою (сума результатів всіх гравців дорівнює нулю) і ігри з ненульовою сумою [21] і т.д. У разі застосування перетину нашу задачу можна класифікувати як кооператив, послідовний хід і гру з ненульовою сумою [22,23,24].

Припустимо гру для двох гравців, де:

Гравець А має скінченний набір стратегій $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$

Гравець Б має скінченну стратегію $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$

При виборі пари стратегій (s_i, t_j) виплата першому і другому гравцеві становить $a_{ij} = u_A(s_i, t_j)$ і $b_{ij} = u_B(s_i, t_j)$ відповідно. u_A, u_B - функції виплати. Значення функцій виплат можуть формуватися окремо для різних

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

гравців:

(1)

Матриця А або В в рівнянні (1) називається матрицею виплат. Разом дві матриці можуть утворити біматрицю, рівняння (2), яка показує різні комбінації рішень і подальші результати.

		<i>Player 2</i>				
		Strategy	t_1	t_2	...	t_n
<i>Player 1</i>	s_1	(a_{11}, b_{11})	(a_{12}, b_{12})	...	(a_{1n}, b_{1n})	
	s_2	(a_{21}, b_{21})	(a_{22}, b_{22})	...	(a_{2n}, b_{2n})	
	:				
	s_m	(a_{m1}, b_{m1})	(a_{m2}, b_{m2})	...	(a_{mn}, b_{mn})	

(2)

У разі контролю перехрестя гравці є транспортними засобами, де кожен транспортний засіб має три можливі траєкторії, за якими потрібно слідувати: проїзд, поворот праворуч або поворот ліворуч при наближенні до перехрестя. Залежно від вибору маршруту транспортного засобу, його швидкості та відстані від перехрестя може бути розрахована точка конфлікту між двома або більше транспортними засобами [25]. У контексті автономних транспортних засобів звичайні світлофори не використовуються. Таким чином, для кожного транспортного засобу буде відбуватися прийняття рішень у режимі реального часу, щоб забезпечити безпеку та зменшити затримки. Для кожного транспортного засобу має бути встановлено пріоритет на прискорення, крейсерський рух або уповільнення (зупинку). Чим менше значення результату рішення в матриці виплат, тим менше затримка. Нульове значення результату означає, що для цього конкретного транспортного засобу немає затримки [26].

Автономні транспортні засоби можуть обмінюватися інформацією один з одним і з придорожнім блоком, що робить їх кооперативною грою [27] з метою мінімізації затримок. Крім того, це також гра з послідовними ходами, тому що якщо один транспортний засіб приймає рішення, то

інший(і) повинен реагувати відповідно. З іншого боку, у змішаному русі зі звичайними транспортними засобами пріоритет віддається ОВ; Таким чином, процес прийняття рішень є більш складним, як пояснюється в наступних розділах.

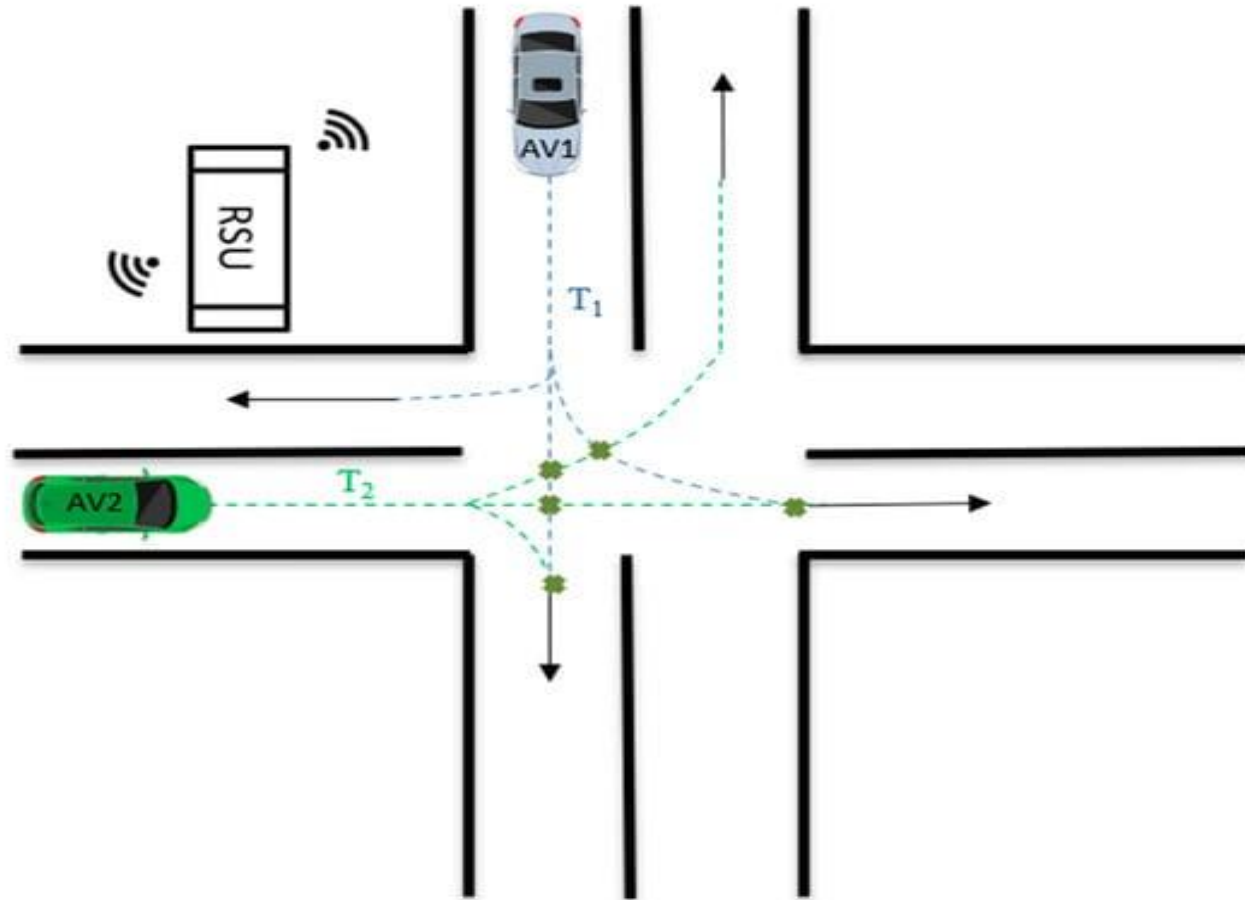
3. Розробка алгоритму пріоритетного керування

3.1. Тематичне дослідження (I) автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби транспортних засобів у всіх напрямках

Ця модель розглядає чотириноге перехрестя, як показано на малюнку 1. З метою розробки алгоритму ми припускаємо, що тільки по одній смузі в кожному напрямку і що прибуття транспортних засобів здійснюється з південного та східного підходів. Де:

- A.B.1: автономний транспортний засіб у південному напрямку.
- A.B.2: автономний транспортний засіб у східному напрямку.
- D1: відстань від автономні транспортні засоби 1 до точки конфлікту з автономні транспортні засоби 2.
- D2: відстань від автономні транспортні засоби 2 до точки конфлікту з автономні транспортні засоби 1.
- T1: час, необхідний для автономні транспортні засоби 1 дійти до точки конфлікту з автономні транспортні засоби 2. $T1 = D1/v1$
- T2: час, необхідний для автономні транспортні засоби 2 дійти до точки конфлікту з автономні транспортні засоби 1. $T2 = D2/v2$
- $v1$: швидкість автономні транспортні засоби 1.
- $v2$: швидкість автономні транспортні засоби 2.

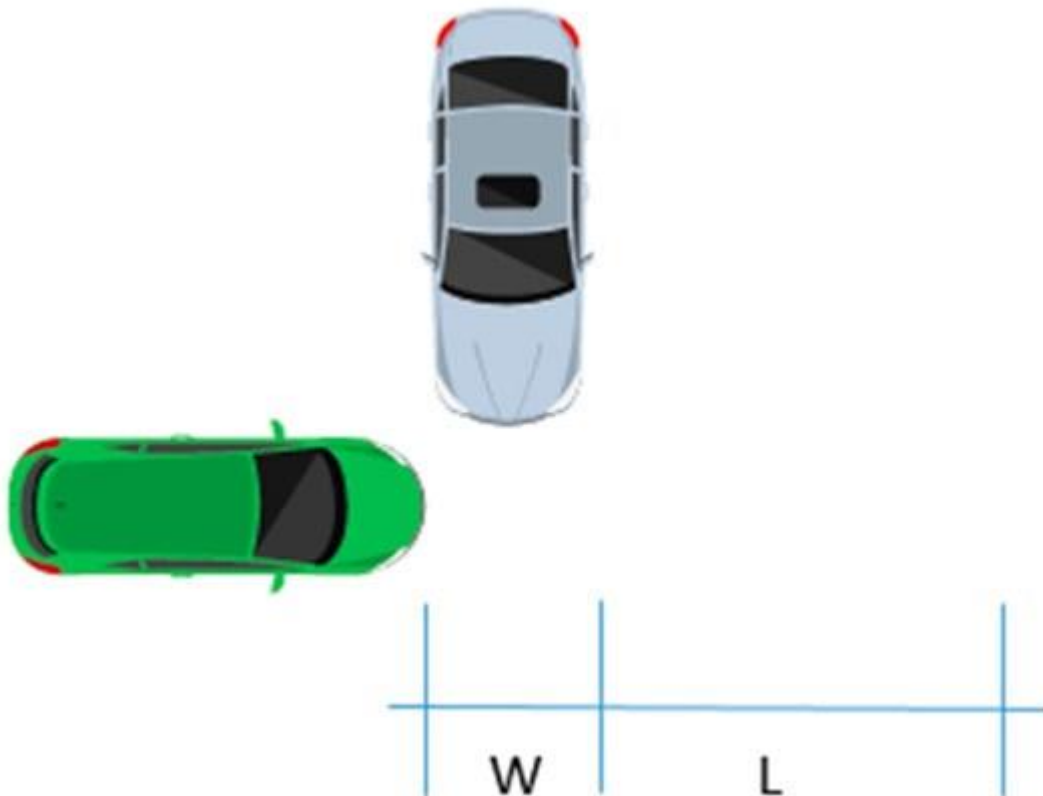
Передбачається, що перехрестя буде обладнано RSU, що забезпечує зв'язок V2I. Коли автономні транспортні засоби потрапляє в зону зв'язку, він підключається до RSU для обміну своїми даними, такими як швидкість, напрямок, місцезнаходження, тип і розміри транспортного засобу [28]. Система управління аналізує отримані дані від усіх транспортних засобів, що наближаються, щоб визначити, чи існує просторовий і часовий конфлікт між траєкторіями транспортних засобів, а потім визначає пріоритети руху транспортних засобів.



Малюнок 1. Корпус (I) автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби транспортні засоби в обох напрямках. автономні транспортні засоби , автономний транспортний засіб, RSU, придорожні блоки.

3.1.1. Конфліктна точка

У цій моделі існує п'ять можливих точок конфлікту між будь-якими двома траєкторіями транспортних засобів, що йдуть у різних напрямках, як показано на малюнку 1. Точка конфлікту фактично є зоною, в якій транспортні засоби можуть зіткнутися, і це довжина одного транспортного засобу плюс ширина іншого [29], як показано на малюнку 2. Іншими словами, щоб уникнути конфлікту, один транспортний засіб повинен сповільнюватися або прискорюватися, щоб відокремитися від іншого транспортного засобу принаймні на $(w + l)$. Ця відстань може бути переведена в час, коли відома швидкість автомобіля [30].



Малюнок 2. Ілюстрація конфліктної точки (площі).

Як правило, пріоритет надається транспортному засобу, який виїхав на перехрестя раніше, ніж інший транспортний засіб. Однак, якщо два транспортні засоби прибувають одночасно, правило контролю перехрестя говорить, що той, хто знаходиться з правого боку, має перевагу в русі

першим [31]. Наприклад, на рисунку 2, коли очікується, що обидва транспортні засоби прибудуть до місця конфлікту одночасно, автономні транспортні засоби $_1$ подорож на південь повинна поступатися автономні транспортні засоби $_2$ праворуч від неї, яка рухається на схід. Цілком імовірно, що інший транспортний засіб, що рухається у східному напрямку, може слідувати за автономні транспортні засоби $_2$ до перетину, якщо це так, процес прийняття рішення продовжується рекурсивно. У разі, якщо для автономні транспортні засоби потрібні повторні уповільнення $_1$ у зв'язку з послідовним рухом транспортних засобів, що рухаються на схід, може використовуватися попередньо встановлена максимально допустима кількість, щоб уникнути надмірного очікування автономні транспортні засоби $_1$. У дослідженні моделювання та тестування, представленому пізніше, ми попередньо встановили це число так, щоб воно не перевищувало п'яти, і виявили, що затримка не чутлива до цього числа при даному попиті на трафік.

3.1.2. Час затримки (DT)

Якщо транспортному засобу необхідно зменшити швидкість в результаті прийняття рішення, то затримка розраховується. Оскільки час прибуття транспортних засобів до місця конфлікту має бути розділений запасом міцності, Δt , припустимо, що автономні транспортні засоби $_1$ має пріоритет входу в шкалу уповільнення по автономні транспортні засоби $_2$ буде часом затримки (DT), так як

$$DT = T_1 - T_2 + \Delta t_{12} \quad (3)$$

де, T_1 : час, необхідний для автономні транспортні засоби $_1$ дійти до точки конфлікту з автономні транспортні засоби $_2$.

T_2 : час, необхідний для автономні транспортні засоби 2 дійти до точки конфлікту з автономні транспортні засоби 1 .

Δt_{12} : запас міцності часу, що автономні транспортні засоби 2 повинні передбачити автономні транспортні засоби 1 щоб пройти першим.

У рівнянні (3) вираз $DT \Delta t_{12}$ повинен принаймні забезпечувати мінімальний проміжок часу для виїзду заднього бампера транспортного засобу, що рухається, до того, як передній бампер транспортного засобу, що затримується, увійде в точку конфлікту [32]. Незважаючи на те, що автономні транспортні засоби не потребують стільки часу на реакцію, скільки потрібно водіям-людям, все одно необхідно забезпечити достатній час гальмування для зупинки автономні транспортні засоби у разі надзвичайної ситуації. Випадки надзвичайної ситуації можуть включати падіння предметів, щоб заблокувати транспортний засіб, або, в гіршому випадку, технічні проблеми, які змусили транспортні засоби, що рухаються, зупинитися прямо в точці конфлікту. Транспортний засіб, що затримався з перехрестя, повинен зреагувати на ситуацію, щоб уникнути зіткнення. Таким чином, додатковий час гальмування (BT). Рівняння (4),

$$BT = \frac{v_2}{2g[f \pm (G)]}$$

[33] слід включити в Δt_{12} як;

(4)

де f - коефіцієнт тертя,

G - марка дорожнього полотна,

g - постійна сили тяжіння,

V - швидкість, що наближається [34].

Важливо визнати, що інші фактори також можуть впливати на безпечну експлуатацію автономні транспортні засоби. До таких факторів можна віднести затримку передачі даних з РСУ або час механічного включення гальмування і т.д. [35]. Ці фактори можуть змінюватися від

одного транспортного засобу до іншого і час від часу, але в цілому повідомляється, що сумарний ефект від них становить близько 0,03 с [36]. Коли всі перераховані вище міркування включені, кінцевий час запасу міцності (Δt) — для спрощення нижній індекс відкидається так, що Δt

$$\Delta t = \frac{w + l}{v_1} + \frac{v_2}{2g[f \pm (G)]} + 0.034$$

відповідає або Δt_{12} або Δt_{21} за необхідності — можна записати, як у рівнянні (5);

(5)

де, w - ширина автономні транспортні засоби 1,

l - довжина автономні транспортні засоби 2,

v_1 - швидкість автономні транспортні засоби 1,

v_2 - швидкість автономні транспортні засоби 2.

3.1.3. Кейс (I) Стратегія гри автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби для перетину

Враховуючи, що два автономні транспортні засоби, що наближаються до перехрестя одночасно, кожен автономні транспортні засоби має три можливі варіанти: проїзд (GT), поворот праворуч (TR) або поворот ліворуч (TL). Оскільки існує п'ять можливих конфліктних точок, як показано на малюнку 1, в кожному випадку один з транспортних засобів повинен зменшити швидкість, перш ніж він досягне перехрестя, і до того моменту, коли транспортний засіб під'їде до точки конфлікту, інший транспортний засіб повинен безпечно подолати цю точку. Цільова функція полягає в тому, щоб скоротити час очікування (затримку) транспортних засобів, тим самим підвищити ефективність перехрестя. Це можна зробити, спочатку класифікувавши комбінацію часу прибуття транспортних засобів у різні

типи часових поясів, коли вони в'їжджають у зону зв'язку (перехрестя) і наближаються до можливої точки конфлікту. Перший тип часового поясу - це коли один автономні транспортні засоби може пройти точку конфлікту до того, як настане інший, не змінюючи своєї швидкості; другий тип - коли цей АВ може перетнути точку конфлікту після того, як інший благополучно пройшов точку, не змінюючи своєї швидкості; Третій тип часового поясу знаходиться між двома вищезазначеними типами, в якому конфлікт траекторій може існувати одночасно, і одному з двох транспортних засобів необхідно відрегулювати свою швидкість.

Під час комунікації V2I можливі такі конкретні випадки, до яких ми застосовуємо теорію ігор:

- Якщо $T_1 < T_2 - \Delta t$, автономні транспортні засоби $_1$ вільно проїжджає перехрестя перед автономні транспортні засоби $_2$ прибуває в точку конфлікту. ДТ для обох автономні транспортні засоби $_1$ і автономні транспортні засоби $_2$ дорівнює нулю.
- Якщо $T_2 - \Delta t < T_1 < T_2 + \Delta t$, можливі конфлікти. А.В. $_1$ повинен поступитися перевагою в русі транспортному засобу праворуч, автономні транспортні засоби $_2$. А.В. $_1$ регулює швидкість, щоб уникнути зіткнення. ДТ для автономні транспортні засоби $_2$ дорівнює нулю, а час затримки для автономні транспортні засоби $_1 \in (T_1 - T_2 + \Delta t)$.
- Якщо $T_1 > T_2 + \Delta t$, автономні транспортні засоби $_2$ вільно проїжджає перехрестя перед автономні транспортні засоби $_1$ прибуває в точку конфлікту. ДТ для обох транспортних засобів дорівнює нулю.

3.1.4. Бажана швидкість для наступних транспортних засобів

Алгоритм прийняття рішень буде застосований рекурсивно до будь-якого транспортного засобу, що наближається до перехрестя. У разі конфлікту транспортний засіб, що сповільнюється, може вплинути на швидкість транспортного засобу, що рухається позаду нього, для цього

слід розробити механізм зниження швидкості для контролю руху цих транспортних засобів.

- T_{AV1} : час, необхідний для автономні транспортні засоби 1 дійти до точки конфлікту.
- T_{AV2} : час, необхідний для автономні транспортні засоби 2 дійти до точки конфлікту.
- ΔT_{AV1} : час між автономні транспортні засоби 1 і автономні транспортні засоби 2.
- ΔT_{AV2} : час між автономні транспортні засоби 2 і автономні транспортні засоби 3.

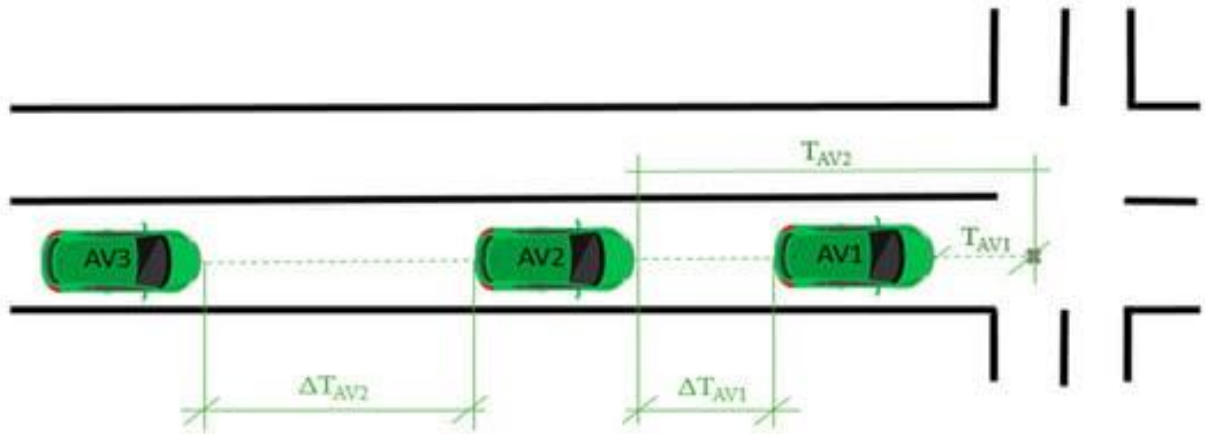
Щоб мінімізувати затримку автономні транспортні засоби 2 на рисунку 3 система повинна перевірити, чи є різниця в часі між двома послідовними автономні транспортні засоби (тобто $\Delta T_{A.B.}$) більше, ніж час затримки для автономні транспортні засоби 1 плюс час (Δt_1), щоб покрити довжину транспортного засобу. Якщо ця умова ($\Delta T_{AV1} > \Delta T_1 + \Delta t_1$) виконується, то немає необхідності в автономні транспортні засоби 2 сповільнюватися; інакше, автономні транспортні засоби 2 доводиться сповільнюватися і набирати потрібну швидкість для автономні транспортні засоби 2 можна обчислити, як у рівнянні (6):

$$V_{AV2} = \frac{D_2}{T_{AV2} + \Delta T_{AV1} + \Delta t_1} \quad (6)$$

де:

- $T_{AV2} = D_2/V_2$
- V_2 ; швидкість автономні транспортні засоби 2 до точки конфлікту перед зміною швидкості.
- D_2 ; швидкість автономні транспортні засоби 2 до точки конфлікту перед зміною швидкості.
- $\Delta T_{AB1} = T_{AV2} - T_{AV1} - \Delta t_1$

- $\Delta t_1 =$ еквівалентний час для довжини транспортного засобу автономні транспортні засоби 1 .



Малюнок 3. Бажаний інтервал для наступних транспортних засобів.

Потрібне рівняння швидкості враховувало безпечний зазор між транспортними засобами. Він буде застосований рекурсивно для всього автопарку, якщо вони відповідають умові, згаданій вище, за допомогою узагальненого додатку:

$$\text{Якщо } \Delta T_{AVi} < DT_{я} + \Delta t_{я}$$

Потім позначимо передню автономні транспортні засоби, яка повинна сповільнюватися, як автономні транспортні засоби $я$ і транспортний засіб, що слідує безпосередньо за ним, як автономні транспортні засоби $(i+1)$

Бажана швидкість для автономні транспортні засоби $(i+1)$:

$$V_{AV(i+1)} = \frac{D_{(i+1)}}{T_{AV(i+1)} + \Delta T_{AVi} + \Delta t_i}$$

(7)

Ми застосували рівняння (7) у симуляції та тестуванні та виявили, що алгоритм здатний ефективно контролювати швидкість автопарку, прикладом чого є кілька випадків, коли знижена швидкість впала до рівня

нижче 10 миль на годину, щоб поступитися транспортним засобам, що конфліктують.

3.1.5. Матриця виплат автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби Case (I)

За наведеним вище алгоритмом можна створити таблицю виплат для визначення часу затримки для автономні транспортні засоби 1 і автономні транспортні засоби 2 у всіх можливих сценаріях. Для можливих рухів транспортних засобів — проїзд (GT), поворот праворуч (TR) або поворот ліворуч (TL) — якщо два транспортні засоби повертають праворуч або якщо вони прибувають на перехрестя послідовно з досить великим розривом у часі, конфлікту не виникає, і час затримки дорівнюватиме нулю для обох транспортних засобів. У п'яти інших сценаріях конфлікти можливі в залежності від траєкторій і часу двох транспортних засобів, коли вони досягають конкретної точки конфлікту, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1.

Матриця виплат Case (I) автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби для двох автономних транспортних засобів.

		Автономний транспортний засіб на східному напрямку		
		TR	GT	TL
Автономний автомобіль на південному напрямі	Стратегії TR	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
		If $T_1 < T_2 - \Delta t$ OR $T_1 > T_2 + \Delta t$		
	GT	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
		If $T_1 > T_2 - \Delta t$ AND $T_1 < T_2 + \Delta t$		
		$(T_1 - T_2 + \Delta t, 0)$	$(T_1 - T_2 + \Delta t, 0)$	$(T_1 - T_2 + \Delta t, 0)$
	TL	If $T_1 < T_2 - \Delta t$ OR $T_1 > T_2 + \Delta t$		
		(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
		If $T_1 > T_2 - \Delta t$ AND $T_1 < T_2 + \Delta t$		
		(0, 0)	$(T_1 - T_2 + \Delta t, 0)$	$(T_1 - T_2 + \Delta t, 0)$

Наприклад, якщо проїжджають обидва транспортні засоби, можливі дві ситуації. Перший - коли один з транспортних засобів може проїхати до прибуття іншого без зміни швидкості для обох транспортних засобів, а інший - коли можливий конфлікт, тому для автономні транспортні засоби буде затримка₁.

Час затримки залежить від типу траєкторії, а також варіюється від одного транспортного засобу до іншого, оскільки T_1 і T_2 змінюються в режимі реального часу, а також Δt відповідно до швидкості та габаритів кожного транспортного засобу.

Наведена вище таблиця виплат показує затримку для кожного транспортного засобу в результаті спільного прийняття рішень. У дужках перше число або вираз позначає затримку на автономні транспортні засоби ₁ і друге число по автономні транспортні засоби ₂. Для простоти демонстрації стратегій прийняття рішень і розрахунків затримки, в таблицю включено лише один транспортний засіб з кожного заходу на посадку, тому в більшості сценаріїв затримки для транспортних засобів немає. Більш складний випадок, що включає кілька транспортних засобів, обговорюється в наступному розділі.

Наприклад, якщо проїжджають обидва транспортні засоби, можливі дві ситуації. Перший - коли один з транспортних засобів може проїхати до прибуття іншого без зміни швидкості для обох транспортних засобів, а інший - коли можливий конфлікт, тому для автономні транспортні засоби буде затримка₁.

Час затримки залежить від типу траєкторії, а також варіюється від одного транспортного засобу до іншого, оскільки T_1 і T_2 змінюються в режимі реального часу, а також Δt відповідно до швидкості та габаритів кожного транспортного засобу.

Наведена вище таблиця виплат показує затримку для кожного транспортного засобу в результаті спільного прийняття рішень. У дужках перше число або вираз позначає затримку на автономні транспортні засоби $_1$ і друге число по автономні транспортні засоби $_2$. Для простоти демонстрації стратегій прийняття рішень і розрахунків затримки, в таблицю включено лише один транспортний засіб з кожного заходу на посадку, тому в більшості сценаріїв затримки для транспортних засобів немає. Більш складний випадок, що включає кілька транспортних засобів, обговорюється в наступному розділі.

3.2. Кейс-стаді (II) автономні транспортні засоби /звичайні транспортні засоби за визначеними напрямками

Оскільки аудіовізуальна технологія все ще знаходиться на стадії розробки та тестування, з цього моменту до моменту повної автоматизації автомобіля (або рівня автоматизації L5 за даними Товариства автомобільних інженерів) пройде тривалий період часу. Таким чином, очікується, що протягом більшої частини наступних двадцяти-тридцяти років безпечна та ефективна експлуатація змішаного потоку автономні транспортні засоби та звичайні транспортні засоби залишатиметься серйозною проблемою для керівників транспортних систем. Очікується, що під час перехідного періоду можуть використовуватися визначені маршрути для автономних транспортних засобів, оскільки аудіовізуальні засоби вимагають, щоб дорожня інфраструктура була оснащена спеціальним зв'язком ближнього радіусу дії (DSRC) або 5G, RSU, додатковими пристроями відеоспостереження та іншими пристроями спостереження тощо. Таким чином, ідея обмежених доріг для автономні транспортні засоби стає логічно прийнятною. Крім того, ідея автономні транспортні засоби рухатися пліч-о-пліч з звичайними транспортними засобами, якими керують водії-люди в міських районах, може зіткнутися з додатковими проблемами, які потрібно вирішити. Водії-люди можуть скористатися перевагами автономні транспортні засоби для стеження за автомобілем, зміни смуги руху та зупинки, коли вони знають, що автономні транспортні засоби не зіткнуться з ними. З іншого боку, оскільки звичайні транспортні засоби не спілкуються з автономними транспортними засобами, важко передбачити їх поведінку і спільно управляти змішаним потоком для пом'якшення перевантажень. Ця проблема більш реалістична на міських вулицях і перехрестях, на відміну від автомагістралей, де контроль доступу і різноспрямовані смуги

спростили багато маневрів транспортних засобів, таких як поворот, рушення з місця і зупинка для сигналів.

Отже, у цьому дослідженні розглядається сценарій, де використовуються окремі підходи до перетину для автономні транспортні засоби та звичайні автономні транспортні засоби (Рисунок 4). Цей обмежений аудіовізуальний маршрут перетинається з маршрутом, який не є автономні транспортні засоби -маршрутом, перш ніж він зрештою з'єднується з шосе, щоб, можливо, з'єднатися з іншими типами транспортних засобів.

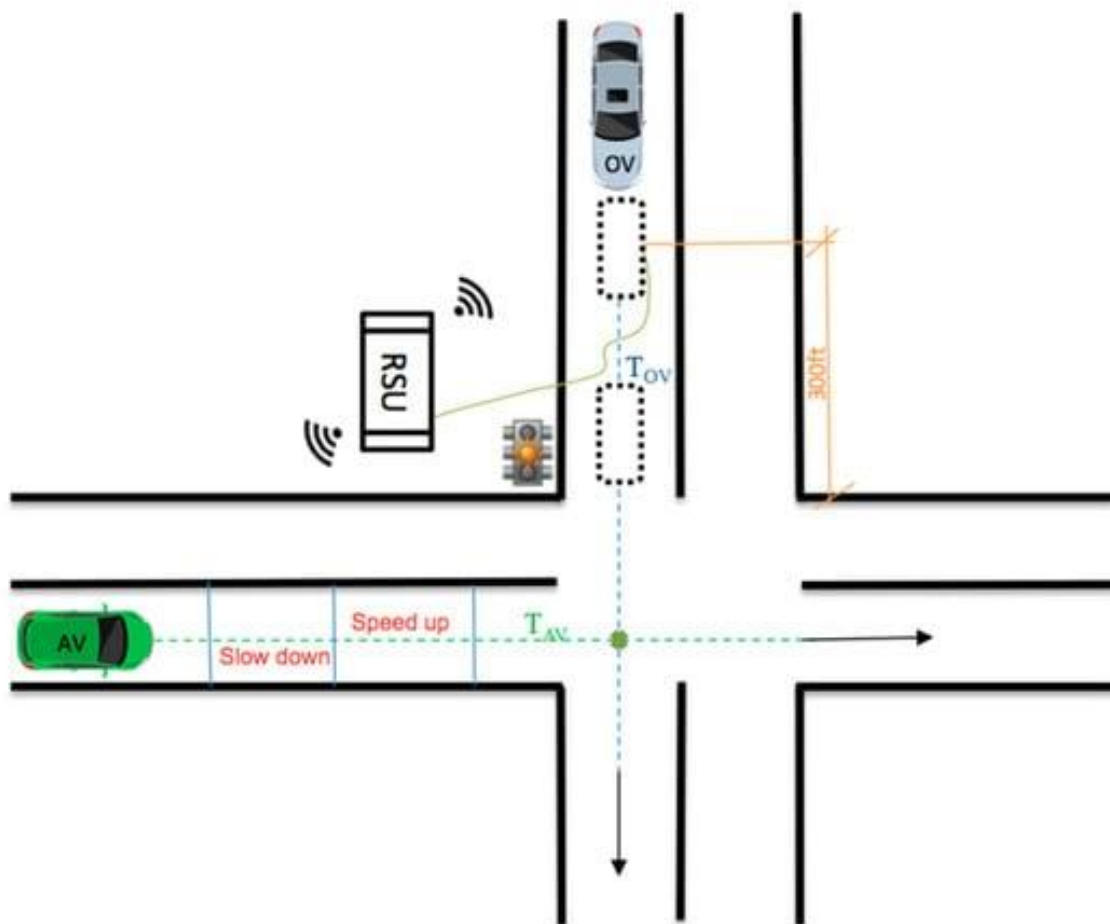


Рисунок 4. Випадок (II): ілюстрація перетину автономні транспортні засоби/ звичайні транспортні засоби .

Оскільки автономні транспортні засоби та звичайні транспортні засоби не зв'язується автоматично між собою, для визначення швидкості звичайних транспортних засобів, що наближається, і відстані до

перехрестя використовуються окремі датчики автомобіля (наприклад, дорожні детектори). Для простоти розробки фундаментального алгоритму розглядається тільки односторонній рух на південній і східній смузі і поворотних рухів відсутній. Датчики виявлять прибуття транспортного засобу, а дані передаються RSU для визначення точки конфлікту між автономні транспортні засоби і звичайні транспортні засоби. Якщо звичайний транспортний засіб зможе безпечно проїхати перехрестя до прибуття автономні транспортні засоби або навпаки, конфлікту не виникне; в іншому випадку автономні транспортні засоби потрібно регулювати свою швидкість, оскільки звичайні транспортні засоби слід надавати пріоритет для підвищення безпеки та зменшення затримки.

Детектори транспортних засобів на південному напрямку розміщені в стратегічних місцях для своєчасного надання даних. Наприклад, детектор вище за течією розміщений приблизно на відстані 100 метрів від перехрестя. Ця відстань визначається методом проб і помилок у моделюванні та випробувальному дослідженні діапазону встановленого обмеження швидкості. Крім того, оскільки поведінка водіїв-людей може бути непередбачуваною [37], існує ймовірність того, що водій змінить швидкість після проходження детектора. Таким чином, інший детектор розміщується на відстані 20 метрів від перехрестя, щоб відстежувати можливу зміну швидкості звичайні транспортні засоби і допомагати вирішити, чи є потреба в тому, щоб автономні транспортні засоби активував екстрене гальмування з вимогою часу, Δt , визначеною в рівнянні (5).

Якщо автономні транспортні засоби і звичайні транспортні засоби наближаються до перехрестя одночасно, у автономні транспортні засоби є дві стратегії: або прискоритися, або сповільнитися. Якщо автономні транспортні засоби знаходиться ближче до перетину, ніж звичайні транспортні засоби, то автономні транспортні засоби може прискоритися,

щоб пройти точку конфлікту перед звичайні транспортні засоби. Аналогічно, якщо звичайні транспортні засоби знаходиться ближче до перетину, ніж автономні транспортні засоби, то автономні транспортні засоби може сповільнитися, щоб дозволити звичайні транспортні засоби безпечно пройти точку конфлікту. Доступність автономні транспортні засоби для прискорення ретельно перевіряється, щоб побачити, чи дозволяє поточний інтервал прискорення і чи буде отриманий виграш у часі достатнім для використання при попередньо встановленому максимально допустимому обмеженні швидкості для проїжджої частини. Подібно до випадку з автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби, розглянутого вище, комбінація часу прибуття транспортного засобу також класифікується за часовими поясами, і в цьому випадку їх чотири. Перший тип - це коли автономні транспортні засоби може пройти точку конфлікту до прибуття звичайні транспортні засоби, не змінюючи своєї швидкості; другий тип - коли автономні транспортні засоби може пройти точку конфлікту після того, як звичайні транспортні засоби пройшла точку без затримки; третій і четвертий типи часового поясу знаходяться між двома вищезазначеними типами, в яких можливий конфлікт, і автономні транспортні засоби повинен регулювати свою швидкість, щоб сповільнитися в третьому типі або прискоритися в четвертому типі (якщо виграш у часі безпечний і придатний для використання). Подробиці пояснюються нижче з посиланням на малюнок 4:

- Якщо $T_O > T_{A.V.} + (\Delta t)$, АВ проходить точку конфлікту до прибуття ОВ. Час затримки для обох автомобілів дорівнює нулю.
- Якщо $T_O < T_{A.V.} - (\Delta t)$, ОВ проходить точку конфлікту до прибуття АВ. Час затримки для обох автомобілів дорівнює нулю.

- Якщо $T_O > T_{A.B.} - (\Delta t)$, автономні транспортні засоби сповільняться, щоб дозволити ОВ вільно пройти. Час затримки для автономні транспортні засоби дорівнює $[T_O - T_{A.B.} + (\Delta t)]$ і нуль для ОВ.
- Якщо $T_O < T_{A.B.} + (\Delta t)$, автономні транспортні засоби прискоряться (якщо це підтримується іншими умовами), щоб проїхати перехрестя, і ОВ не вплине на проїзд. Закономлений час для автономні транспортні засоби дорівнює $[T_O - T_{A.B.} - (\Delta t)]$, а час затримки дорівнює нулю для ОВ.

Алгоритм прийняття рішень буде застосовуватися рекурсивно до транспортних засобів, що наближаються до перехрестя. Якщо уповільнення автономні транспортні засоби може вплинути на швидкість інших автономні транспортні засоби, що знаходяться позаду, для відповідного управління їх швидкістю використовується рівняння (7).

Випадок (II) автономні транспортні засоби / звичайні транспортні засоби

Матриця виплат

Оскільки пріоритет надається звичайні транспортні засоби, змішаний випадок автономні транспортні засоби / звичайні транспортні засоби вимагає суворих заходів безпеки у відповідь на можливу зміну статусу звичайні транспортні засоби через людину-водія, включаючи раптове прискорення, уповільнення або зупинку. Слід ще раз зазначити, що для контролю безпеки наше правило безпеки гарантує, що в будь-який момент часу до зіткнення між автономні транспортні засоби і звичайні транспортні засоби задовольняє вимогу часу безпеки, Δt . Ми припускаємо, що бортові датчики в автономні транспортні засоби здатні виявити аварійну ситуацію і автоматизована система може відреагувати на неї навіть після того, як ОВ пройде останній датчик і виїде на перехрестя. Зокрема, в нашому моделюванні постійно перевіряється час безпеки, і якщо воно не задовольняється в будь-який момент, швидкість автономні транспортні засоби зменшується для підтримки Δt .

Ми впровадили модель автономні транспортні засоби / звичайні транспортні засоби для обробки кількох прибуттів транспортних засобів. Алгоритм застосовується рекурсивно для будь-якого транспортного засобу, що наближається, і час затримки накопичується. Оскільки таблиця виплат дуже складна для опису комбінацій з декількома прибуттями транспортних засобів, ми включили приклад (розглядаючи по два транспортні засоби з кожного напрямку), щоб показати стратегії прийняття рішень і відповідний час затримки, як показано в таблиці 2. У дужках перше та друге число/вираз представляють час затримки (або збережений час, якщо від'ємний) для звичайні транспортні засоби та автономні транспортні засоби відповідно. У таблиці використовуються аббревіатури для наочності і для економії місця. Кожна аббревіатура пояснюється в кінці таблиці.

Таблиця 2.

Матриця виплат Case (II) автономні транспортні засоби / звичайні транспортні засоби.

		AV	
Strategies	Cases	Slow Down	Speed Up
No Action	1 AV & 1 OV	(0, D.T.)	(0, S.T.)
	1 AV & 2 OVs	(0, D.T. + (W - S.T.))	
	2 AVs & 2 OVs	1st AV (0, D.T. + (W - S.T.)) 2nd AV (0, D.T. + (W - S.T.) - Δt _{AV})	
	2 AVs & 1 OV	1st AV (0, D.T.) 2nd AV (0, D.T. - Δt _{AV})	2nd AV (0, S.T.) 1st AV (0, S.T. - Δt _{AV})
OV	1 AV & 1 OV	((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T.)	((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T.)
	1 AV & 2 OVs	((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.))	((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.))
	2 AVs & 2 OVs	1st AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.)) 2nd AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.) - Δt _{AV})	1st AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.)) 2nd AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.) - Δt _{AV})
	2 AVs & 1 OV	1st AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T.) 2nd AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. - Δt _{AV})	1st AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T.) 2nd AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. - Δt _{AV})
Slow Down	1 AV & 1 OV	((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T.)	((T _{OVc} - T _{OV'}), S.T.)
	1 AV & 2 OVs	((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.))	
	2 AVs & 2 OVs	1st AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.)) 2nd AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. + (W - S.T.) - Δt _{AV})	
	2 AVs & 1 OV	1st AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T.) 2nd AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), D.T. - Δt _{AV})	2nd AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), S.T.) 1st AV ((T _{OVc} - T _{OV'}), S.T. - Δt _{AV})

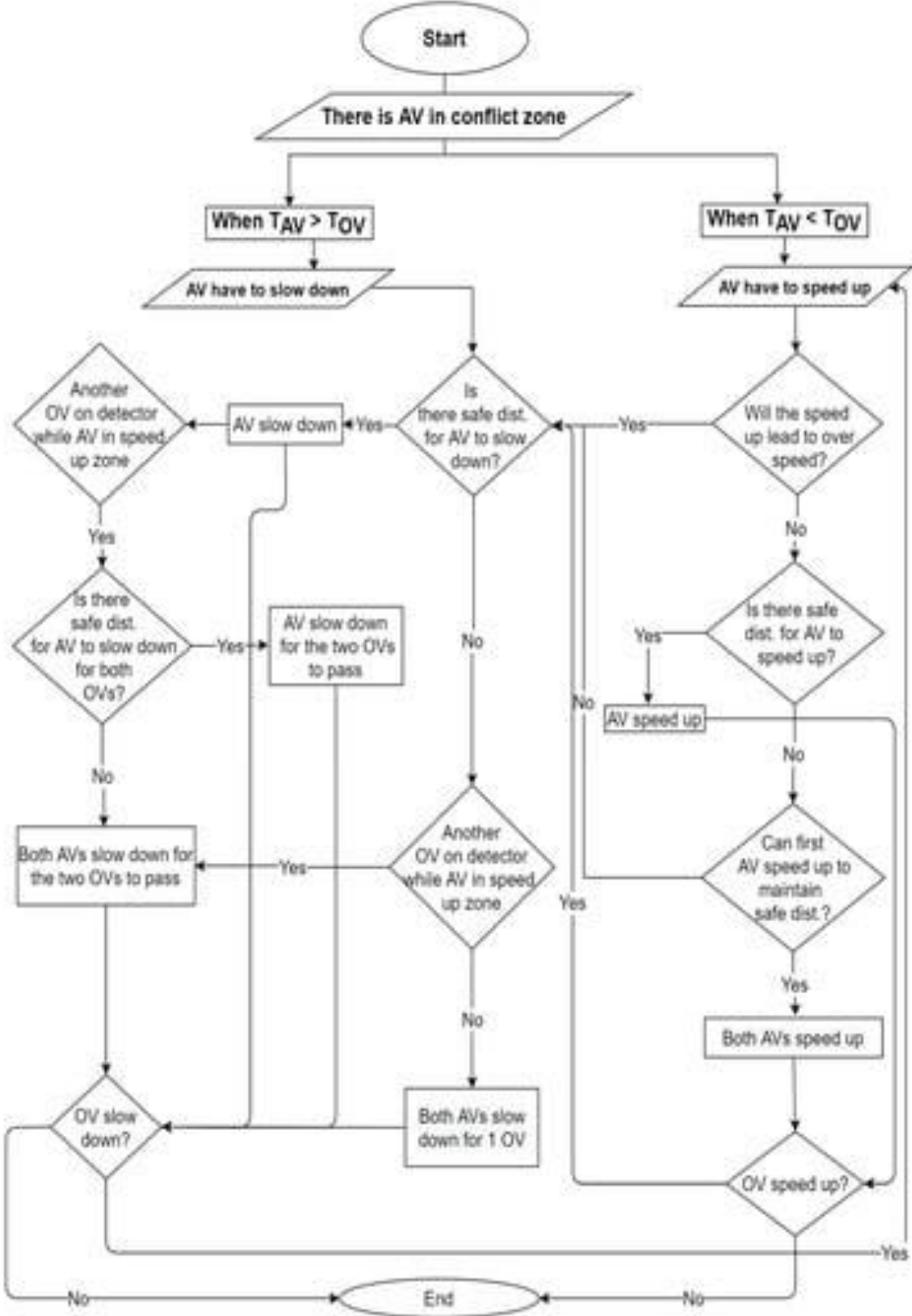
- Д.Т. Час затримки; обчислюється $(T_O - T_{A.B.}) + \Delta t$
- С.Т. Зкономлений час; обчислюється $(T_O - T_{A.B.}) - \Delta t$
- W. Час, щоб охопити всю зону прискорення та уповільнення для автономні транспортні засоби .
- $\Delta t_{A.B.}$ Час між двома автономні транспортні засоби .
- $T_{OB'}$ Час для того, щоб звичайні транспортні засоби досяг точки конфлікту, якщо немає зміни швидкості.
- T_{Ovc} Час для того, щоб звичайні транспортні засоби досяг точки конфлікту, якщо відбувається зміна швидкості.

Для демонстрації логіки прийняття рішень представлених моделей на рисунку 5 створена блок-схема, де права її частина присвячена рішенням про збільшення швидкості [38]. Наприклад, при виявленні конфлікту автономні транспортні засоби в часовому поясі прискорення перше, що потрібно перевірити, це чи не призведе це до перевищення швидкості. Якщо так, то автономні транспортні засоби доведеться змінити свою дію, щоб сповільнитися; в іншому випадку він перевірить, чи є достатня відстань, щоб автономні транспортні засоби прискорився. Якщо ні, це призведе до ще однієї перевірки, щоб побачити, чи може передній автономні транспортні засоби прискоритися, щоб дати автомобілю позаду можливість прискоритися. Якщо ні, то дія буде полягати в уповільненні; якщо так, то обидва автономні транспортні засоби прискорювалися б разом.

Ліва частина блок-схеми обробляє уповільнені рішення системи. Наприклад, коли автономні транспортні засоби потрібно уповільнити, система спочатку перевірить, чи достатня відстань між цим автомобілем і автомобілем позаду нього, щоб уникнути різкого гальмування. Якщо відстані недостатньо, щоб автономні транспортні засоби сповільнився, то наступний автономні транспортні засоби також повинен сповільнитися відповідно до рівняння (7). Потім ця логічна блок-схема перетворюється на

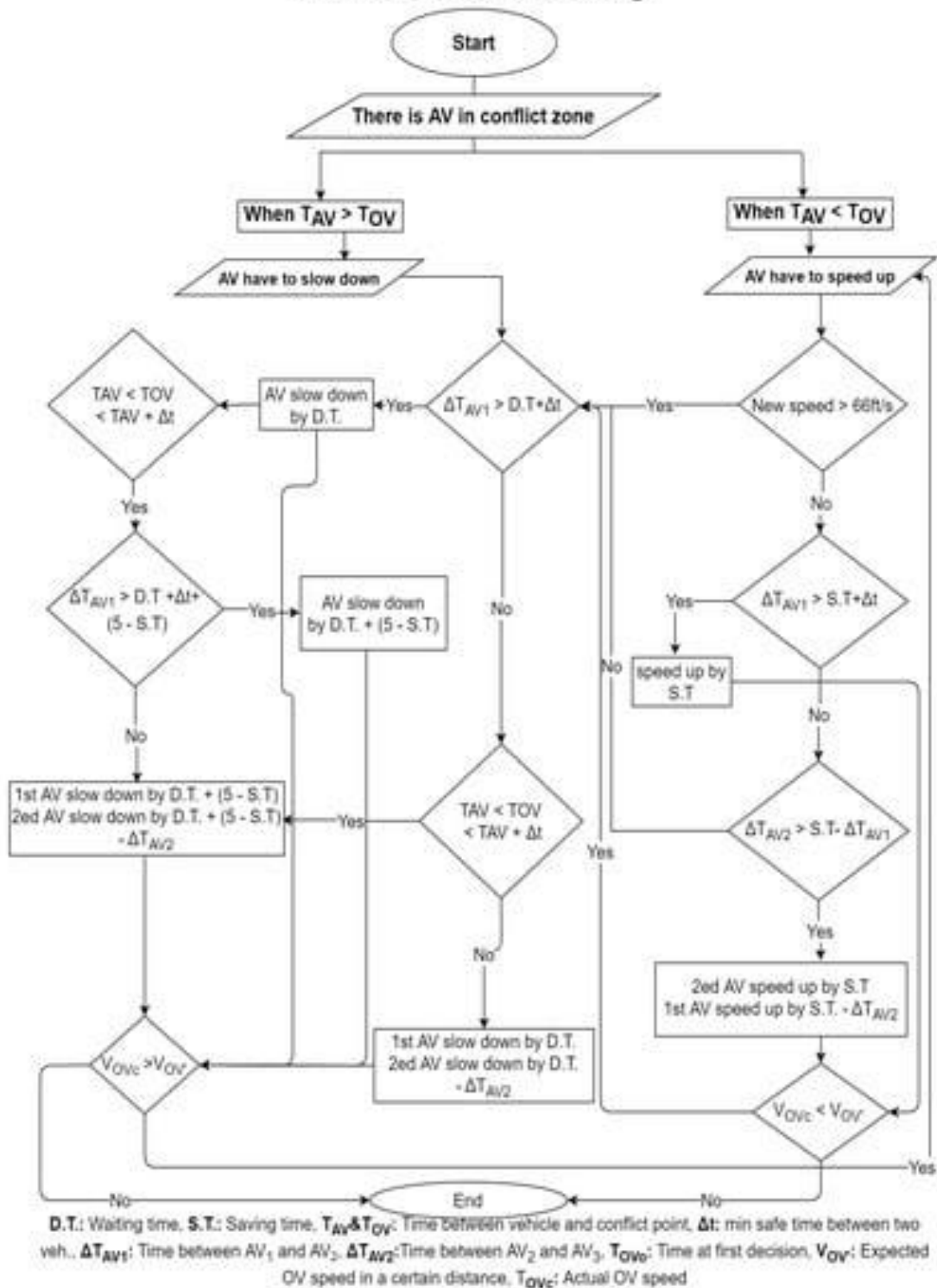
математичні символи, щоб система (у нашому випадку програмне забезпечення для моделювання) могла прочитати та застосувати її, як показано на рисунку 6.

AV/OV Decision Making



Малюнок 5. Case (II) Блок-схема прийняття рішень автономні транспортні засоби / звичайні транспортні засоби . [38].

AV/OV Decision Making



Малюнок 6. Випадок (II) автономні транспортні засоби /звичайні транспортні засоби математична блок-схема прийняття рішень. [41].

4. Моделювання, тестування та результати

Для демонстрації здійсненності запропонованого алгоритму використовується імітаційне моделювання для реалізації логіки керування пріоритетами. Моделювання було виконано на платформі VISSIM [39]. Кожна симуляція триває протягом п'ятнадцяти хвилин (900 с) для автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби Case (I) та автономні транспортні засоби /звичайні транспортні засоби Case (II). Проведено порівняльний аналіз запропонованого методу з іншими сучасними методами керування перехрестям, щоб показати ефективність, включаючи кільцеву розв'язку та чотириноге сигнальне перехрестя. Імітаційний тест, проведений для кожного методу, включає три різні об'єми [40], 750 об/год, 550 об/год і 250 об/год, а також три різні швидкості, 25 миль/год, 35 миль/год і 45 миль/год. Загалом було проведено двадцять сім тестів для кожного з двох випадків, у яких кожна комбінація об'єму ~ швидкості виконувалася тричі, щоб отримати середнє значення для презентації.

4.1. Випадок (I): Автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби

Використано метод оцінки вузлів в інструменті моделювання VISSIM. Він працює, вибираючи область на дорозі, яку потрібно оцінити, а потім вибираючи відповідні атрибути даних як вихідні дані. Найбільш критичними даними, на яких ми зосередилися, є загальна затримка, як показано в таблиці 3.

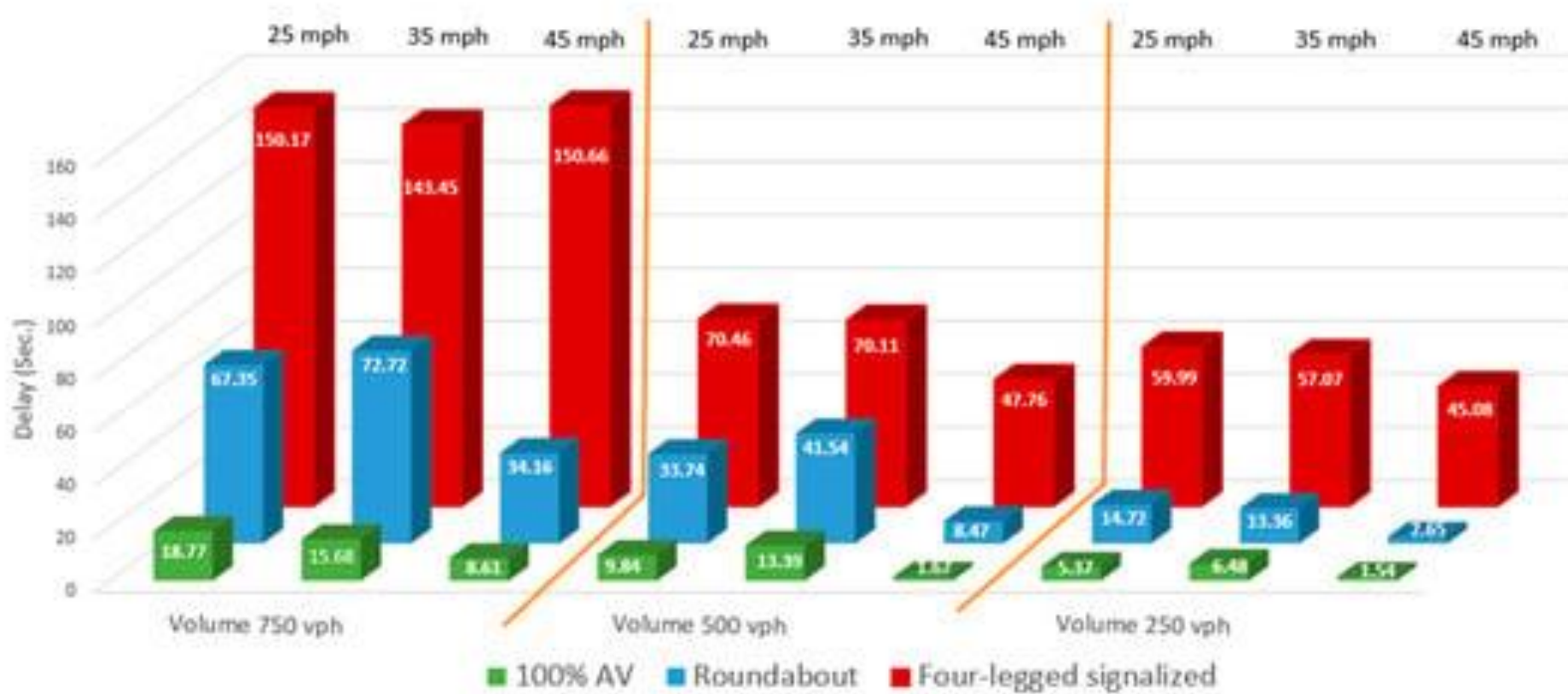
Таблиця 3.

Випадок (I) автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби
повна затримка (с).

		Швидкість		
		25 км/год	35 км/год	45 км/год
Обсяг	250 авто/год	5,37	6,48	1,54
	500 авто/год	9,84	13,39	1,67
	750 авто/год	18,77	21,39	8,61

З таблиці 3 видно, що сумарний час затримки збільшується за рахунок збільшення гучності при всіх трьох швидкостях. Цікаво помітити, що збільшення швидкості, що наближається, не завжди зменшує затримку.

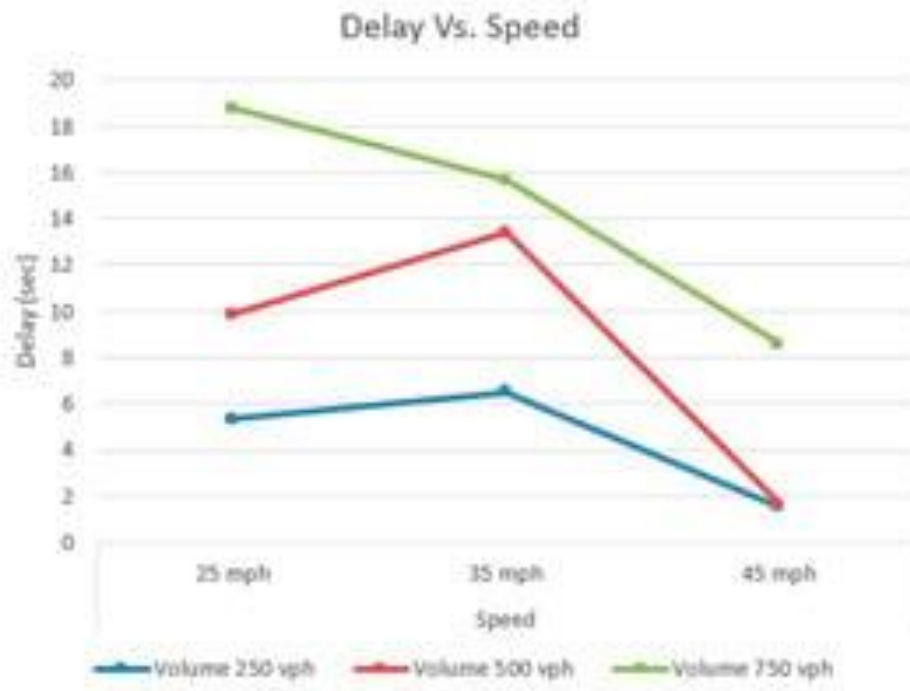
Також було проведено моделювання на кільцевій розв'язці та чотирилапому перехресті з сигналізацією, відповідно, з використанням однакових варіацій гучності та швидкості для порівняння результатів затримки. Вибір цих двох методів пояснюється тим, що вони в даний час є найбільш поширеними методами управління перетинами. Кільцева розв'язка включає в себе чотири ноги, і кожна нога управляється знаком поступливості. Чотириноге перехрестя включає в себе по одній смузі в кожную сторону з двофазним управлінням сигналом, а синхронізація сигналу отримана з програмного забезпечення Synchro (Trafficware, Sugar Land, TX, США). Було виконано дев'ять комбінацій гучності ~ швидкості для кожного методу управління, і кожна комбінація повторювалася тричі, як і раніше. Результати показані на малюнку 7.



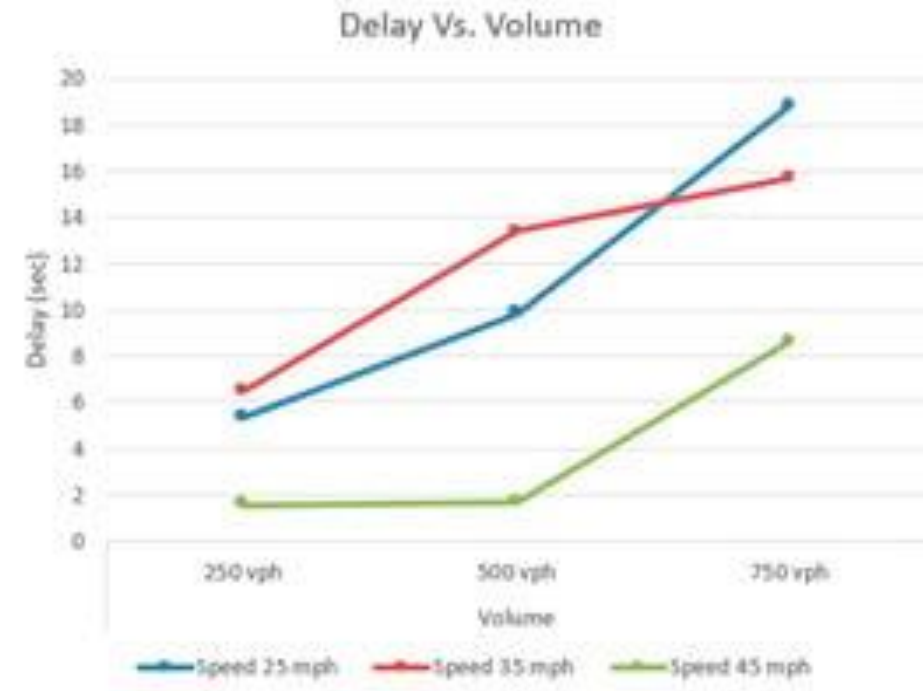
Малюнок 7. Порівняння затримки автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби для різних типів контролю дорожнього руху. [41].

З малюнка 7 бачимо, що спостерігається значне зниження загальної затримки при порівнянні моделі автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби з кільцевою розв'язкою та сигналізованим перехрестям для всіх комбінацій швидкостей та гучності. Результати вказують на те, що кільцева розв'язка створює меншу затримку, ніж перехрестя з сигналом, хоча для чотириноного перехрестя не було докладено суворих зусиль з оптимізації сигналу. Тим не менш, отриманих результатів достатньо, щоб показати перевагу автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби моделі без управління сигналом.

З малюнка 8 видно, що загальний час затримки збільшується за рахунок збільшення гучності з усіма трьома швидкостями, на відміну від швидкості, де затримка не обов'язково збільшується збільшенням швидкості.



(a)



(b)

Малюнок 8. Випадок (I) автономні транспортні засоби /автономні транспортні засоби : (a) затримка проти швидкості (b) затримка проти гучності. [41].

4.2. Випадок (II) Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби

У випадку (II) була проведена така ж кількість тестів, як і у випадку (I), для тих самих комбінацій швидкості та об'єму. Основна відмінність у моделюванні від Випадку (I) полягає в тому, що автономний транспортний засіб включено лише на одній дорозі, а загальний транспортний засіб – на іншій дорозі, і вони однаково розподілені на одному рівні гучності.

З таблиці 4 ми бачимо, що змішаний трафік важче обробляти, оскільки обсяг трафіку стає великим, але затримка, як правило, менша при низьких обсягах. У деяких випадках є негативний час затримки. Це через опцію прискорення для AV, що означає, що за ці конкретні 15 хвилин загальний прибуток від прискорення транспортних засобів є більшим, ніж втрати через уповільнення транспортних засобів. Іншими словами, весь процес економить час.

Таблиця 4.

Випадок (II) Загальна затримка Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби (с).

		Швидкість		
		25 км/год	35 км/год	45 км/год
Обсяг	250 авто/год	-2,93	6,03	-2,47
	500 авто/год	0,96	13,54	0,03
	750 авто/год	89,32	11,49	21,88

Подібним чином було проведено моделювання на кільцевому перехресті та чотиристоронньому перехресті з сигналізацією, щоб порівняти затримки та ефективність, коли на перехресті немає повороту, як показано на малюнку 4. У цьому випадку вимога початкового пункту призначення (OD) для кільцевої розв'язки та чотирикутного перехрестя змінюється, оскільки всі транспортні засоби мають проїхати через перехрестя без повороту. Подібним чином було виконано дев'ять тестових

комбінацій для кожного методу контролю, щоб порівняти результати для всіх швидкостей і рівнів гучності. Результати показано на рисунку 9.

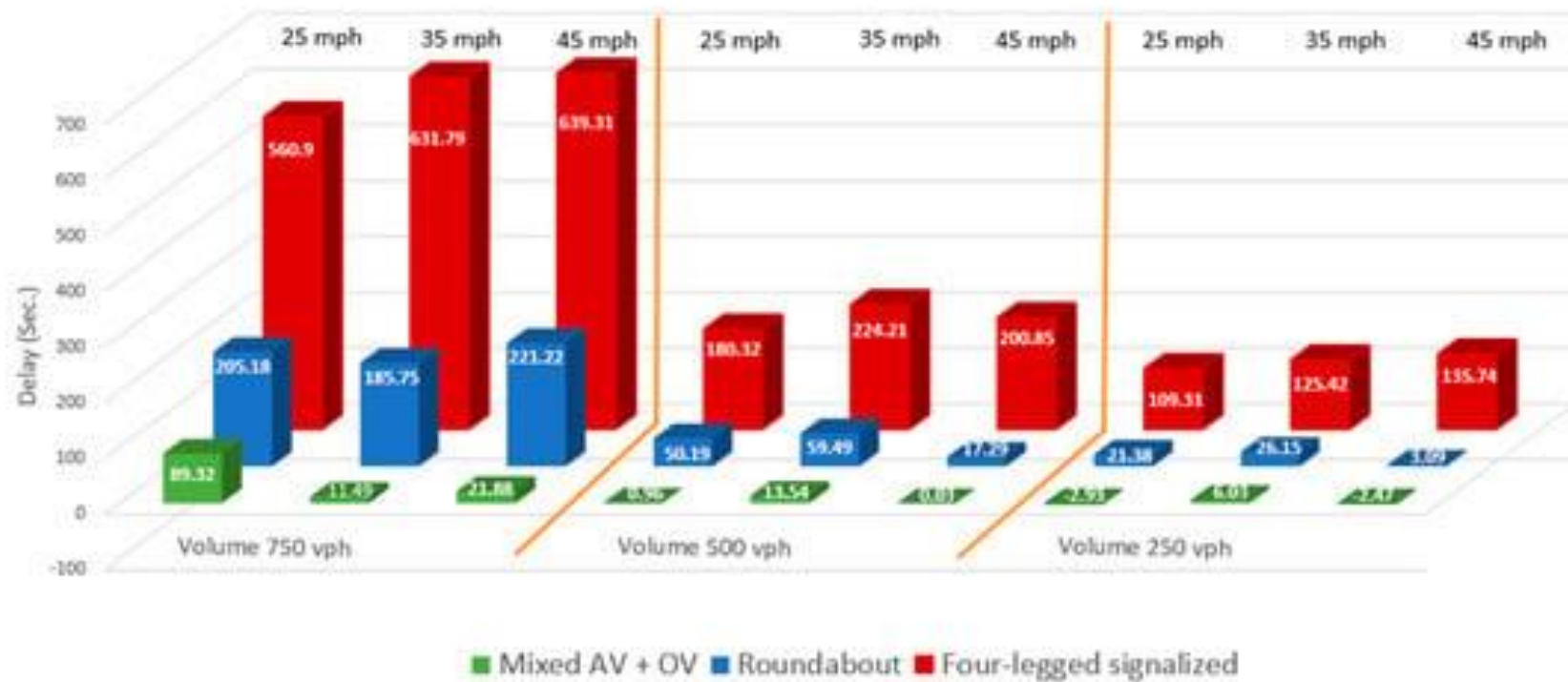
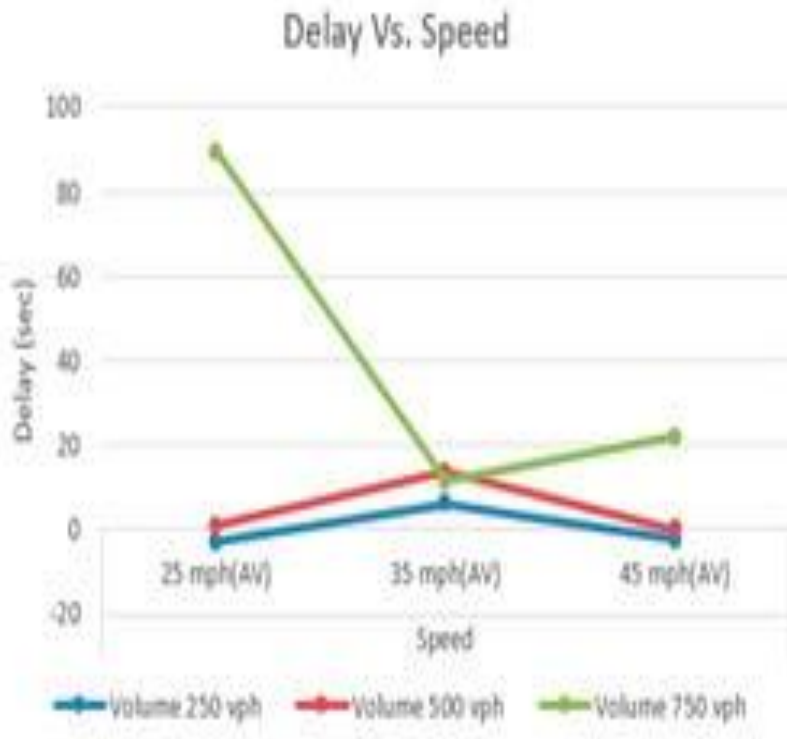


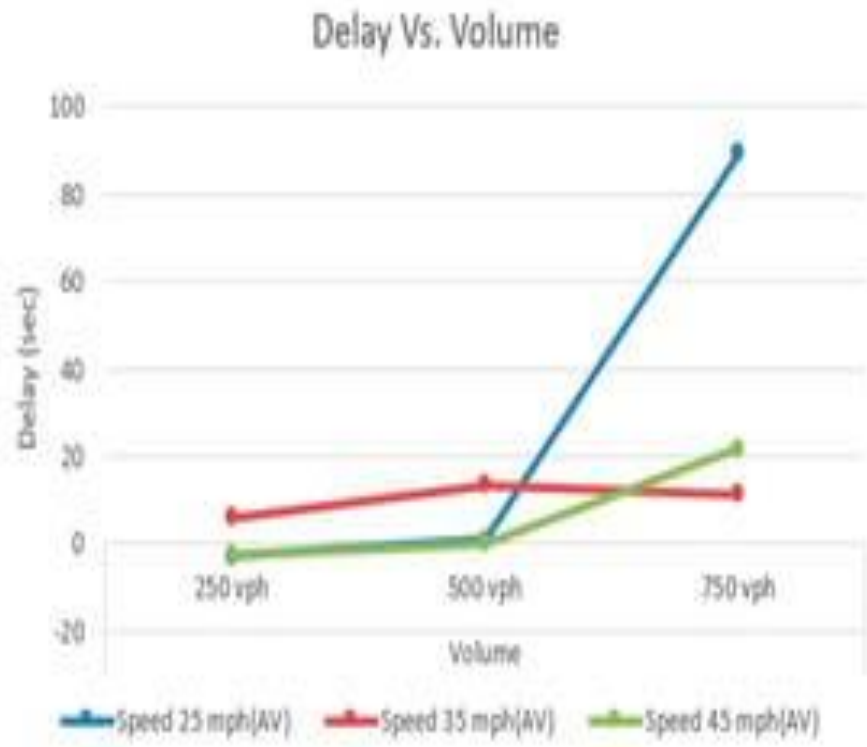
Рисунок 9. Випадок (II) Порівняння затримки Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби для різних типів керування трафіком. [41].

Як показано на малюнку 9, існує значне скорочення загального часу затримки в порівнянні з кільцевим перехрестям і перехрестям із сигналом для всіх швидкостей і обсягів, як показано на гістограмі. Результати показують, що кільцеве перехрестя створює меншу затримку, ніж перехрестя з перехрестям із сигналом, що має сенс, оскільки світлофори змушують транспортні засоби повністю зупинятися, а не як при кільцевому перехресті, де транспортні засоби поступаються лише транспортним засобам, які вже знаходяться на кільцевій розв'язці, і у випадку (II), перехрестям можна керувати, сповільнюючи та прискорюючи. Це пояснило б прогресування затримки від високого до низького. Незважаючи на те, що затримка збільшується для сценарію Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби на рівні гучності 750 кадрів на годину через наявність OV, перевага моделі Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби чітко показана на малюнку 9, де показано велику різницю в затримці порівняно з контролем за кільцевим рухом і сигналізованим перехрестям. На нижчих рівнях гучності модель Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби продемонструвала свою здатність зменшувати затримку завдяки використанню параметрів прискорення для AV.

На малюнку 10b ми можемо побачити, що загальний час затримки збільшується завдяки збільшенню гучності з усіма трьома швидкостями, на відміну від швидкості на малюнку 10a, де затримка не обов'язково збільшується зі збільшенням швидкості. Ще один момент, який можна побачити на діаграмах, полягає в тому, що затримка з гучністю 750 кадрів на годину є відносно високою порівняно з іншими обсягами. Крім того, існує деяке негативне значення затримки, яке є результатом опції прискорення. Це означає, що за загальний час моделювання (900 с) транспортні засоби фактично економлять час, а не витрачають час.



(a)



(b)

Рисунок 10. Випадок (II) Автономні транспортні засоби /загальні транспортні засоби: (а) затримка проти швидкості (б) затримка проти гучності. [41].

5. ВИСНОВКИ

У результаті дослідження було розроблено алгоритм пріоритетного керування для оптимізації руху транспортних засобів на перехрестях у контексті застосування автономних транспортних засобів. Запропонований алгоритм використовує теорію ігор та ідентифікацію конфліктних точок на основі траєкторії для зменшення затримки на перехресті при забезпеченні безпеки руху. Запропонована структура використовує інфраструктуру V2I для обміну даними з метою контролю руху автономних транспортних засобів з перешкодами від звичайних транспортних засобів і без них. Відтепер формується таблиця виплат для пошуку найкращих стратегій для техніки в різних умовах. Розроблено дві різні математичні моделі; Один зі 100% автономними транспортними засобами, а інший зі змішаним рухом автономних транспортних засобів і звичайних транспортних засобів. Була створена імітаційна модель для реалізації алгоритму прийняття рішень в кожному конкретному випадку. Порівняння двох запропонованих моделей проводилося на різних рівнях гучності та швидкості, з двома іншими широко використовуваними методами контролю перехрестя, що включають кільцеву розв'язку та чотириноге перехрестя з сигналізацією. Результати показують, що запропонована система здатна скоротити загальну затримку до 65% в порівнянні з кільцевою розв'язкою, і до 90% в порівнянні з сигналізованим перехрестям.

Результати моделювання та випробувань наочно продемонстрували доцільність та перевагу автономних транспортних засобів як нової технології для безпечної та ефективної роботи в умовах змішаного руху.

Список використаних джерел

1. Goodall, N. Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2014, 2424, 58–65.
2. Kockelman, K.; Boyles, S.; Stone, P.; Fagnant, D. An Assessment of Autonomous Vehicles: Traffic Impacts and Infrastructure Needs. Final Report (FHWA 0-6847-1). Cent. Transp. Res. Univ. Texas Austin 2016. Available online: <http://library.ctr.utexas.edu/ctr> .
3. NHTSA. What are the Advantages of V2V? U.S. Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2014; pp. 1–4.
4. Au, T.; Zhang, S.; Stone, P. Autonomous Intersection Management for Semi-Autonomous Vehicles. *Handb. Transp.* 2015, 88–104.
5. Malikopoulos, A.A.; Cassandras, C.G. A Decentralized Optimal Control for Connected and Automated Vehicles at an Intersection. *arXiv* 2016, arXiv:1602.03786. Available online: <http://arxiv.org/abs/1602.03786> .
6. Sun, W.; Zheng, J.; Liu, H.X. A capacity maximization scheme for intersection management with automated vehicles. *Transp. Res. Procedia* 2016, 23, 121–136.
7. Timmerman, R.W.; Boon, M.A.A. Platoon forming algorithms for intelligent street intersections. *Transportmetrica Transp. Science* 2019. [] [] []
8. Zohdy, I.H.; Kamalanathsharma, R.K.; Rakha, H. Intersection Management for Autonomous Vehicles using iCACC. In *Proceedings of the 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation System, Anchorage, AK, USA, 16–19 September 2012*; p. 6. [] []
9. Hausknecht, M.; Au, T.C.; Stone, P. Autonomous Intersection Management: Multi-Intersection Optimization. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, 25–30 September 2011*; pp. 4581–4586. [] [] []

10. Manzini, R.; Accorsi, R.; Baruffaldi, G.; Cennerazzo, T.; Gamberi, M. Travel time models for deep-lane unit-load autonomous vehicle storage and retrieval system (AVS/RS). *Int. J. Prod. Res.* 2016, 7543, 1–19. [] []
11. Dresner, K.; Stone, P. Sharing the Road: Autonomous Vehicles Meet Human Drivers. In *Proceedings of the 20th IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence, Hyderabad, India, 6–12 January 2007*; pp. 1263–1268. []
12. Ahn, H.; Colombo, A.; Del Vecchio, D. Supervisory Control for Intersection Collision Avoidance in the Presence of Uncontrolled Vehicles. In *Proceedings of the American Control Conference, Portland, OR, USA, 4–6 June 2014*; pp. 867–873. [] [] []
13. Xia, X.; Ma, X.; Wang, J. Control method for signalized intersection with integrated waiting area. *Appl. Sci.* 2019, 9, 968. [] [] []
14. Debra, P.E.; Kennaugh, A. *Intersection Safety A Manual for Local Rural Road Owners*; FHWA-SA-11-08; U.S. Department of Transportation FHWA: Washington, DC, USA, 2006; Volume 1, pp. 1–43.
15. Macioszek, E. The Influence of Motorcycling and Cycling on Small One-Lane Roundabouts Capacity. In *Proceedings of the International Conference on Transport System Telematics, Uston, Poland, 19–22 October 2011*; Volume 239 CCIS, pp. 291–298. [] []
16. Bulla-Cruz, L.A.; Laureshyn, A.; Lyons, L. Event-based road safety assessment: A novel approach towards risk microsimulation in roundabouts. *Measurement* 2020, 165, 13. [] []
17. Bagdatli, M. Vehicle Delay Modeling at Signalized Intersections with Gene-Expression Programming. *J. Transp. Res. Part A Syst.* 2020, 146, 13. [] []
18. Tandelis, S. *Game Theory*. Ph.D. Thesis, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 2013; p. xv 396.

19. Osborne, M. An Introduction to Game Theory; Oxford University Press: New York, NY, USA, 2003; p. 560. []
20. Bui, K.-H.N.; Jung, J.E.; Camacho, D. Game theoretic approach on Real-time decision making for IoT-based traffic light control. *Concurr. Comput. Pract. Exp.* 2017, 29, e4077. [] []
21. Pantaleão, L.H.; Azevedo, M.H.; Antunes, J.A.V., Jr. Use of a non-zero-sum game as a teaching tool about organizational indicators: Optimum local X Nash equilibrium. In *Proceedings of the Second World Conference on POM and 15th Annual POM Conference, Cancun, Mexico, 30 April–3 May 2004*; Wiley: New York, NY, USA, 2004. []
22. Arora, S. *Nonzero Sum Games and Nash Equilibria*; Princeton University: Princeton, NJ, USA, 2006; Volume 0, pp. 1–6. []
23. Zohdy, I.; Rakha, H. Enhancing roundabout operations via vehicle connectivity. *Transp. Res. Rec.* 2013, 2381. [] []
24. Osborne, M.; Rubinstein, A. *A Course in Game Theory*. MIT 2011, 368. Available online: <http://ebour.com.ar/pdfs/ACourseinGameTheory.pdf> (accessed on 26 June 2018).
25. Anonymous. 4 Bimatrix Games. pp. 27–64. Available online: http://euler.fd.cvut.cz/predmety/game_theory/games_bim.pdf (accessed on 18 September 2017).
26. Rakha, H.A.; Zohdy, I.H.; Kamalanathsharma, R.K. *Agent-Based Game Theory Modeling for Driverless Vehicles at Intersections*; U.S. Department of Transportation UTC: Washington, DC, USA, 2013; Volume VT-2010-02, p. 44.
27. Banjanovic, L.-M.; Halilovic, E.; Bosankic, I.; Kantardzic, M.; Kasapovic, S. Autonomous Vehicle-to-Vehicle (V2V) Decision Making in Roundabout using Game Theory. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2016, 7, 292–298. [] []

28. Khoury, J.; Khoury, J. Passive, Decentralized, and Fully Autonomous Intersection Access Control. In Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation System ITSC 2014, Qingdao, China, 8–11 October 2014; pp. 3028–3033. [] [] []

29. Chapter 10—Signalized Intersections: Informational Guide, August 2004, FHWA-HRT-04-091. 2004. Available online: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/04091/10.cfm> (accessed on 19 July 2018).

30. Levin, M.W.; Rey, D. Conflict-point formulation of intersection control for autonomous vehicles. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2017, 85, 528–547. [] []

31. Divion, T.; Divion, S. Traffic Sign Design, Placement, and Application Guidelines Prepared by Traffic and Safety Design Division, Michigan DoT. 2017. Available online: https://mdotcf.state.mi.us/public/tands/Details_Web/mdot_signing_design_placement_application_guidelines.pdf (accessed on 19 July 2018).

32. Tupper, S.M. Safety and Operational Assessment of Gap Acceptance Through Large-Scale Field Evaluation. Ph.D. Thesis, University of Massachusetts Amherst, Amherst, MA, USA, May 2011. []

33. Dixit, V.V.; Chand, S.; Nair, D.J. Autonomous Vehicles: Disengagements, Accidents and Reaction Times. *PLoS ONE* 2016, 11, e0168054. [] [] [PubMed] []

34. Layton, R.; Dixon, K. Stopping Sight Distance. 2012. Available online: <http://cce.oregonstate.edu/sites/cce.oregonstate.edu/files/12-2-stopping-sight-distance.pdf> (accessed on 18 July 2018).

35. Sena, P.; D'amore, M.; Brandimonte, M.A.; Squitieri, R.; Fiorentino, A. Experimental Framework for Simulators to Study Driver Cognitive Distraction: Brake Reaction Time in Different Levels of Arousal. *Transp. Res. Procedia* 2016, 14, 4410–4419. [] [] []

36. Reis, A.B.; Sargento, S.; Neves, F.; Tonguz, O.K. Deploying roadside units in sparse vehicular networks: What really works and what does not? *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2014, 63, 2794–2806. [] []

37. Doshi, A.; Trivedi, M.M. Examining the Impact of Driving Style on the Predictability and Responsiveness of the Driver: Real-world and Simulator Analysis. In *Proceedings of the 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego, CA, USA, 21–24 June 2010*; Available online: <http://cvrr.ucsd.edu/LISA> (accessed on 19 July 2018).

38. Mayer, R.E. Models for Understanding. *Rev. Educ. Res.* 1989, 59, 43–64. Available online: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3102/00346543059001043> (accessed on 19 July 2018). []

39. PTV Vissim. Available online: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/> (accessed on 9 June 2018).

40. What is the Traffic Volume Cut off between High-Volume and Low Volume? Available online: <https://www.clrp.cornell.edu/q-a/151-low-volume.html> (accessed on 19 July 2018).

41. Baz, A.; Yi, P.; Qurashi, A. Intersection Control and Delay Optimization for Autonomous Vehicles Flows Only as Well as Mixed Flows with Ordinary Vehicles. *Vehicles* 2020, 2, 523–541. <https://doi.org/10.3390/vehicles2030029>