

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

*“ Узагальнення досвіду макроскопічного моделювання ефектів автономного транспортного засобу на міській вулично-дорожній мережі ”*

ВИКОНАЛА:

Шевченко Анастасія Ігорівна

КЕРІВНИК:

Монастирський Юрій Анатолійович

Допущена до захисту

Зав. кафедри АТ

« \_\_\_\_\_ » червня 2024 р.

Ю.А.Монастирський

Кривий Ріг – 2024

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

*Шевченко Анастасії Ігорівні*

1. Тема проекту (роботи) “ *Узагальнення досвіду макроскопічного моделювання ефектів автономного транспортного засобу на міській вулично-дорожній мережі*” затверджена наказом по університету від « 12 » квітня 2024 р. № 264

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » червня 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *матеріали наукових досліджень з літературних джерел за темою роботи*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: *Вступ. Аналіз стану питання. Методологія побудова моделей. Постановка дослідження дорожнього руху. Дослідження зміни в операціях трафіку, викликані поширенням аудіовізуальних засобів. Методологія визначення впливу автономного автомобіля на підвищення вразливості дорожньої мережі. Аналіз вразливості дорожньої мережі. Висновки. Список використаних джерел*

5. Перелік графічного матеріалу Графіки та діаграми по результатам досліджень.

6. Дата видачі завдання - «    » квітня 2024 р.

Студентка

Шевченко Анастасія Ігорівна

Керівник

Монастирський Юрій Анатолійович

## Зміст

Анотація .....	4
1. Вступ.....	5
2. Аналіз стану питання.....	8
3. Методологія побудова моделей.....	11
4. Постановка дослідження дорожнього руху.....	15
5. Дослідження зміни в операціях трафіку, викликані поширенням аудіовізуальних засобів .....	19
6. Методологія визначення впливу автономного автомобіля на підвищення вразливості дорожньої мережі .....	29
7. Аналіз вразливості дорожньої мережі.....	42
Висновки .....	48
Список використаних джерел .....	50

# АНОТАЦІЯ

Зростаючий світовий попит на міські автомобільні транспортні системи вимагає більш обмежувальних заходів і політики для зменшення заторів, затримок у часі та забруднення. Послуги автономної мобільності транспортних засобів, як спільні, так і приватні, можливо, є хорошим кроком до кращого майбутнього автомобільних перевезень. Метою даної статті є дослідження очікуваного впливу приватних автономних транспортних засобів на параметри дорожнього руху на макроскопічному рівні. Запропонована методологія зосереджена на пошуку різних впливів різних комбінацій автономного проникнення транспортних засобів та одиниць легкових автомобілів (PCU) на обрану модель дорожнього руху. Вивчаються чотири параметри: пройдені добові кілометри, добові години, сумарна добова затримка і середня швидкість мережі. Аналіз по-різному покращує чотири параметри, впроваджуючи автономні транспортні засоби. Параметр сумарної затримки має найбільш значне зниження.

Аналіз чотирьох AV-сценаріїв з різним AV-проникненням і рівнем автоматизації показав відмінності в ефекті від 3,50% для простого рівня автоматизації AV до 28,53% для повністю автоматизованого парку.

Впровадження AV довело ефективність у зменшенні кількості затримок у дорозі у випадку аварії на дорозі. Виявлено, що кількість смуг руху залишається найбільш значущим параметром, що впливає на затримку поїздки. Основне питання полягає в тому, щоб виявити різницю розміру впливу проаналізованих атрибутів на мережеву вразливість через впровадження різних проникнень AV та рівнів автоматизації

Ключові слова: автономні транспортні засоби; макроскопічні; параметри трафіку; проникнення; одиниці легкових автомобілів

# 1. Вступ

Автоматизовані транспортні засоби (AV) у майбутньому стануть величезною частиною систем автомобільних перевезень. Аудіовізуальні засоби використовуватимуть інфраструктуру та спільно використовуватимуть її, а також взаємодіятимуть з користувачами-людьми (транспортними засобами та пішоходами) та іншими аудіовізуальними засобами одночасно. Впровадження перших електронних систем допомоги водієві, таких як електронна система курсової стійкості (ESC) і антиблокувальна система (ABS), була спрямована на підвищення безпеки дорожнього транспорту. Останнім часом основна увага приділяється автоматизації всього процесу водіння, починаючи від невеликої автоматизації (контроль смуги руху та круїз-контроль) і закінчуючи повністю автоматизованими автомобілями.

Перехід від звичайних транспортних засобів до автоматизованих транспортних засобів відбувається відповідно до шести рівнів автоматизації, представлених у транспортному потоці (0 – без автоматизації; 1 – Далекі руки; 2 – Руки геть; 3 – Очі вимкнені; 4 – Не думати; 5 - Кермо необов'язково) [1, 2]. Це також залежить від швидкості проникнення AV від загального трафіку. Аудіовізуальні засоби частково зменшать або навіть усунуть людський фактор з транспортного потоку, зменшуючи проміжок для зміни смуги руху, руху, часу реакції за допомогою 360-градусних датчиків і камер, які, як очікується, збільшать пропускну здатність дороги, що призведе до зниження заторів [3]. Зв'язок та обмін інформацією між аудіовізуальними пристроями та інфраструктурою, Кооперативною інтелектуальною транспортною системою (C-ITS), є цінними для визначення станів руху на міських дорогах [4,5]. Крім того, він надає більше інформації для контролю

перехрестя, застосовуючи найкращі дії для покращення дорожніх операцій [6].

Першій частині цієї роботи проаналізовані макроскопічні моделі моделювання транспортних потоків для оцінки впливу автономних транспортних засобів на кілька параметрів дорожнього руху для кращого розуміння очікуваного впливу впровадження аудіовізуальних засобів у більшому масштабі. У другій частині розробляються математичні моделі для прогнозування впливу AV на різні макроскопічні параметри, пов'язані з дорожнім рухом. Посилаючись на величезну кількість даних, представлених у використовуваній моделі (різні типи доріг, категорії транспортних засобів, швидкості дороги, матриці відправлення-призначення тощо), запропоновано методологію проникнення пасажирських автомобілів/AV за допомогою програмного забезпечення Visum [7].

Сьогодні нові технології автономних транспортних засобів (AV), кооперативних інтелектуальних транспортних систем (C-ITS) і інтелектуального водіння можуть бути найважливішими заходами для зменшення впливу катастроф на працездатність дорожнього транспорту. Комунікації між AV та інфраструктурою (автомобілем до автомобіля та автомобіль до інфраструктури) цінні для визначення стану руху міських доріг, надання додаткової інформації про стан доріг і контроль перехресть [26,41]. Обмін інформацією допомагає транспортним засобам вибрати та виконувати найкращі доступні дії для покращення дорожнього руху [25]. Проте було проведено мало досліджень щодо очікуваного впливу підключених AV на вразливість дорожньої мережі та того, як мережа працює, якщо дороги будуть ліквідовані.

У другій частині роботи виконано ідентифікацію критичних доріг на макроскопічній мережі доріг за характеристиками дороги та параметрами руху на працездатність усієї мережі; наприклад довжина, відстань від центру, швидкість, кількість смуг і кількість роз'ємів. Це може стати корисним інструментом для кращого розуміння того, які характеристики дороги мають більший вплив на вразливість мережі. Проаналізована симуляція прогнозованого впливу AV на вразливість мережі шляхом аналізу впливу різних сценаріїв AV на працездатність мережі в нормальних умовах і за умови усунення доріг. Для досягнення цих цілей базовою моделлю для дослідження було взято конкретне дослідження в місті Будапешті, Угорщина.

## 2. Аналіз стану питання

Було проаналізовано багато досліджень щодо майбутнього впливу AV, зосереджених на мікроскопічному та макроскопічному мережевому аналізі та моделюванні. [8] провели оцінку впливу AV-пропускної здатності автострад за допомогою мікроскопічного моделювання транспортних потоків для декількох рівнів проникнення. Їхні результати показують, що аудіовізуальні засоби дозволяють скоротити інтервали між транспортними засобами, збільшуючи пропускну здатність мережі автострад на 30% і значно зменшуючи затримки руху для більш високого рівня проникнення аудіовізуальних засобів. На противагу цьому, низькі проникнення не давали помітних переваг у потужності. Ще виявили, що трафік, що складається з 20% звичайних транспортних засобів, 60% кооперативного адаптивного круїз-контролю (CACC) і 20% адаптивного круїз-контролю (ACC), збільшив пропускну здатність смуги руху з 2100 автомобілів/годину для 100% звичайних транспортних засобів до 2900 автомобілів/год [9]. Вивчалася пропускну здатність автомагістралей для змішаного руху звичайних транспортних засобів та AV з урахуванням різних рівнів проникнення AV, мікроскопічних характеристик звичайних транспортних засобів та AV та інших політик щодо смуг руху (звичайні транспортні засоби, ексклюзивні та/або AV-смуги або змішані смуги) [10]. Каліфорнійське дослідження PATH показало, що AV у взводах можуть підтримувати розрив у часі лише 0,6 с порівняно з 1,5 с для звичайних транспортних засобів, що вказує на значне збільшення пропускної здатності доріг та зменшення заторів [11,12].

Автори [13] виявили, що введення транспортних засобів ACC в транспортний потік може призвести до збільшення транспортних потоків і зниження рівня заторів. У кількох дослідженнях вивчалися мікроскопічні



зміни поведінки водіння в AV, використовуючи такі симуляції, як прискорення та уповільнення, стабільність потоку та час реакції [14,15,16,17].

Комунікація між транспортними засобами (V2V), інфраструктурою (V2I та I2V) та центральною транспортною системою (C2I) також є важливим фактором, який слід враховувати при покращенні роботи високоавтоматизованих транспортних засобів [18,19]. Комунікації V2X довели, що вони можуть забезпечити стабільність локального транспортного потоку, значно згладити ударні хвилі транспортного потоку та зменшити викиди [20,21]. Автори [22] вивчали антивіруси, оснащені системами кооперативного адаптивного круїз-контролю (CACC) на неконтрольованих перехрестях. Вони показали зниження часу в дорозі транспортного засобу в діапазоні 49% і 89% для затримки, порівняно з керуванням знаком зупинки в повному напрямку. Інші дослідження CACC показали, що впровадження CACC повного проникнення на регіональну мережу автомобільних доріг зменшило загальну затримку на 12% [23,24]. Інші системи C-ITS, такі як системи Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA), які допомагають водіям проїжджати перехрестя з регульованим світлофором у зелений час, що залишився, показали покращений транспортний потік і знижений рівень CO<sub>2</sub> викидів [25,26]. Дослідження [27] щодо контролю перехресть та оптимізації затримки для потоку автономних транспортних засобів показало, що модель зв'язку AV-to-AV зменшила затримку на 65% порівняно з кільцевою розв'язкою та на 84% порівняно з чотириногим сигнальним перехрестям, а модель AV-to-звичайних транспортних засобів покращила їх на 30% та 89% відповідно.

Приватна власність на транспортні засоби продемонструвала стрімке зростання навіть з подальшим обмеженням регулювання, особливо у

великих містах [28,29]. Незважаючи на це, впровадження аудіовізуальних засобів також має потенціал для скорочення щоденних поїздок. Опитування щодо переваг показало, що, обираючи між різними видами приватного транспорту, 44% обирали звичайні приватні автомобілі, 32% – приватні, а 24% – спільні [30,31]. Дослідження [32] показало, що домогосподарства з одним або декількома автомобілями зменшать кількість власних транспортних засобів, коли аудіовізуальні послуги доступні, незалежно від вартості нової послуги. Ще одним рішенням для зменшення заторів на дорогах та зменшення кількості власників автомобілів є можливість використання аудіовізуальних засобів як сервісу спільних поїздок. [33] представили математичну основу впливу спільних поїздок на затори на затори та того, як затори впливають на спільну діяльність. [34] виявили, що спільне використання поїздок відповідно до стратегії ціноутворення на основі пункту відправлення зменшило вартість подорожі для мандрівників і навмисні альтернативні маршрути, які можуть бути застосовані до майбутніх аудіовізуальних засобів. Подальші дослідження встановили ту саму точку зору, а саме, що аудіовізуальні засоби зменшують щоденні поїздки за рахунок зменшення кількості приватних автомобілів і збільшення спільних поїздок на аудіовізуальних автомобілях, як для спільного використання автомобілів, так і для спільних поїздок [35,36,37,38].

### 3. Методологія побудова моделей

Методологія, прийнята для оцінки впливу АВ на параметри трафіку, фокусується на зміні двох характеристик АВ. Досліджуються два параметри дорожнього руху: щоденний пройдений автомобілем кілометраж і час руху у годинах. Ці два параметри оцінюються для різних видів приватного транспорту. Види транспорту включають три класи легкових автомобілів (легкові автомобілі, автоматизовані транспортні засоби та таксі) та чотири класи важких транспортних засобів (легкий, середній, автобусно-туристичний та важкий).

Для оцінки впливу параметрів дорожнього руху в модель вводяться два представлення характеристик АВ. По-перше, АВ-проникнення – це відсоток щоденних поїздок легкових автомобілів класу АВ у порівнянні із загальною кількістю щоденних поїздок моделі. Значення проникнення варіюються від мінімуму нуля спрацьовувань, здійснених АВ. Всі автомобілі є традиційними легковими транспортними засобами (0% проникнення), максимум всі щоденні поїздки здійснюються АВ (100% проникнення), де інтервал досліджуваного домену ділиться на 10%.

Другою досліджуваною характеристикою АВ є зниження значення насиченості дороги, представлене коефіцієнтом модифікації вантажопідйомності легкових автомобілів (PCU) в моделі Visum EFM. ППУ різних транспортних засобів зобов'язаний перевести змішаний транспортний потік в однорідний еквівалент, тим самим виразивши змішаний транспортний потік в термінах еквівалентного числа легкових автомобілів [39]. PCU відображає, наскільки сильно впливає певний вид транспорту на змінні трафіку в порівнянні з одним звичайним легковим автомобілем. Модифікація значень ПЦУ для класу АВ структурована на основі очікуваного позитивного впливу підключених АВ на пропускну

здатність та характеристики насичення доріг [40]. Зниження насиченості в основному досягається за рахунок зменшення дистанції та інтервалу руху між транспортними засобами та інших факторів, таких як:

- Рівень автоматизації
- Зв'язок V2V та V2I
- Нижчий рівень дистанції стеження та шляху руху
- Менший необхідний проміжок для зміни смуги руху
- Коротший час реакції гальмування
- Датчики та камери з оглядом на 360 градусів
- Коротший час ходьби
- Коротший час паркування

Значеннями PCU для класу AV прийнято вважати 0,50-0,90 з кроком 0,05 і PCU 0,98. Вибрані значення вибираються таким чином, щоб покрити очікуваний діапазон AV-ефекту, що покращує пропускну здатність дороги та має великий набір даних для розробки статистичних моделей параметрів дорожнього руху. Рівноважне призначення вибирається для вивчення того, як різні комбінації проникнення і PCU впливають на мережу, яка розподіляє попит відповідно до першого принципу Уордропа [41]. Рівноважне призначення обчислює первинні обсяги транспортних засобів на кожній ланці, послідовно ділячи попит на встановлену кількість ітерацій. Потім система шукає альтернативні маршрути з нижчим опором, де транспортні засоби будуть переведені на нові лінії зв'язку для покращення роботи мережі. Процедура завершується, якщо досягнуто збалансованого стану, що означає, що транспортні засоби більше не повинні переміщатися між маршрутами [42].

Процес розрахунку вибраних параметрів трафіку моделі оцінюється шляхом виконання декількох задач призначення статичної рівноваги для

різних сценаріїв. Кожне завдання має на меті вибрати найкращий маршрут для кожної поїздки з найнижчою вартістю подорожі. Сценарії варіюються шляхом збереження зовнішніх значень проникнення AV і зміни значень PCU класу AV з кожним запуском моделювання. Після цього пенетрація змінюється на наступне значення і виконується для кожного значення ПКУ. Ці кроки повторюються до тих пір, поки всі значення проникнення і PCU не будуть покриті 100 сценаріями, забезпечуючи аналіз для більш широкого діапазону.

Угорський EFM (Egységes Forgalmi Modell, уніфікована модель руху), реалізована в програмному забезпеченні PTV Visum, була використана для побудови моделі в цьому дослідженні. Матриці вихідного попиту в EFM представляють реальні дані про трафік для Будапешта та зовнішніх зон, пов'язаних із містом. Модель також містить матриці даних приватного транспорту та матриці даних громадського транспорту. Матриці приватного руху включають чотири різні категорії транспортних засобів: автомобілі, завдання розподіляє поїздки на кілька етапів відповідно до першого принципу Wardrop [40]. Призначення рівноваги аналізує кількість транспортних засобів на кожній дорозі шляхом постійного розподілу попиту на кілька ітерацій. Потім система шукає альтернативні маршрути з меншим опором, де транспортні засоби будуть переміщені на нові дороги для покращення працездатності мережі. Процедура завершується, коли досягається збалансований стан, що означає, що транспортні засоби більше не будуть переміщатися між маршрутами [29].

З моделі EFM було вивчено 1000 зон усередині Будапешта та менших групових зон навколо міста, зосереджуючись лише на приватному транспорті. Оскільки більшість вибраних доріг працюють лише для

приватних транспортних засобів і тих, які не мають смуг для приватного громадського транспорту (автобусні смуги). Чутливість дорожньої мережі вимірювалася зміною параметра загального часу затримки мережі. Поліпшення, спричинене AV, також відображається кілометрами та кілометрами годин за категоріями автомобіля.

Таблиця 3.1.

Параметри трафіку базового сценарію моделі EFM

Параметр	Одиниця	Загальна вартість
Загальний час у дорозі автомобіля	транспортний засіб×година/день	582,739
Загальна відстань шляху автомобіля	транспортний засіб ×км/день	30,750,166
Щоденний загальний обсяг автомобілів	автомобіль/добу	81,686,075
Всього затримка мережі	транспортний засіб×година/день	136,911

Модель складається з понад 30 000 доріг, що відповідають усій мережі доріг Будапешта, включаючи головні дороги, колектори та житлові вулиці. малюнок1нижче показано модель EFM. Призначення було виконано за допомогою процесу присвоєння рівноваги PTV Visum, у якому таксі, велосипеди та вантажні транспортні засоби, розділені на чотири інші вантажні підкатегорії. Параметри моделі базового сценарію наведені в табл1нижче. Оскільки дослідження зосереджено на виявленні зміни з макроскопічної точки зору, загальну затримку всієї мережі було обрано як ключовий параметр для вивчення змін у продуктивності всієї мережі.

## 4. Постановка дослідження дорожнього руху

Будапешт - столиця Угорщини, що має більшість станцій автомобільних терміналів, де закінчуються всі основні автомагістралі і залізниці. Дорожня мережа в основному складається з кільцевих доріг і проспектів, що простягаються від центру міста. Дорожня мережа Будапешта має довжину 4500 км, а дороги поділяються на чотири категорії доріг: шосе, головна дорога, другорядна головна дорога та дороги місцевого значення. Громадський транспорт Будапешта складається з чотирьох ліній метро, 260 автобусних маршрутів і 30 трамвайних ліній, які обслуговують близько п'яти мільйонів поїздок на день [43].

Для дослідження обрано Єдину модель руху Будапешта (EFM), яка створена та підтримується Транспортною корпорацією Будапешта та розробляється з використанням програмного забезпечення PTV Visum. Модель використовує реальні зібрані дані про дорожній рух Будапешта. Транспортні дані моделі включають приватні та публічні набори даних, такі як щоденний обсяг трафіку, матриці пунктів відправлення та призначення, види громадського транспорту та маршрути. Модель також складається з усіх дорожніх характеристик і допустимого режиму для використання різних доріг.

Модель складається з понад 30 000 доріг, що відповідають усій мережі доріг Будапешта, включаючи головні дороги, колектори та житлові вулиці. нижче показано модель EFM. Призначення було виконано за допомогою процесу присвоєння рівноваги PTV Visum, у якому годин за категоріями автомобіля. Параметри моделі базового сценарію наведені в таблиці нижче. Оскільки дослідження зосереджено на виявленні зміни з

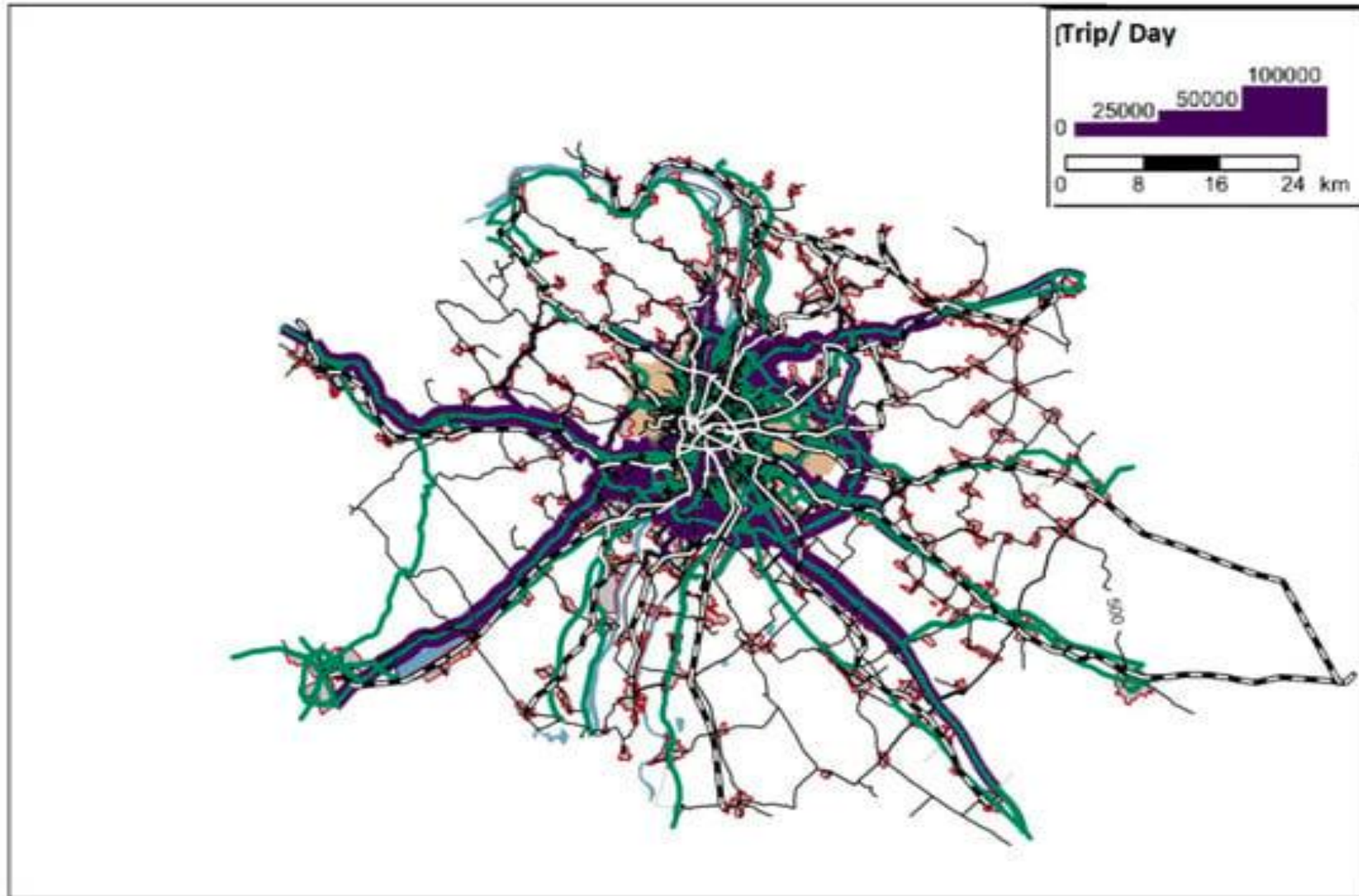
макроскопічної точки зору, загальну затримку всієї мережі було обрано як ключовий параметр для вивчення змін у продуктивності всієї мережі.

Схема міста та модель міста проілюстровані на [рисунку 4.1](#) та [4.2](#).





Рисунок 4.1. Схема міста Будапешт



Рисунок

4.2.

Модель

EFM

міста

Будапешт.

## 5. Дослідження зміни в операціях трафіку, викликані поширенням аудіовізуальних засобів

Результати моделювання та аналіз зосереджені на чотирьох параметрах трафіку: щоденний пройдений транспортним засобом кілометраж, щоденний пройдений транспортним засобом години, загальна затримка для всієї мережі та середня швидкість для класу легкових автомобілів для всієї мережі. Для аналізу чотири параметри класифікуються на два класи: клас легкових транспортних засобів (PC) і клас важких транспортних засобів (HV).

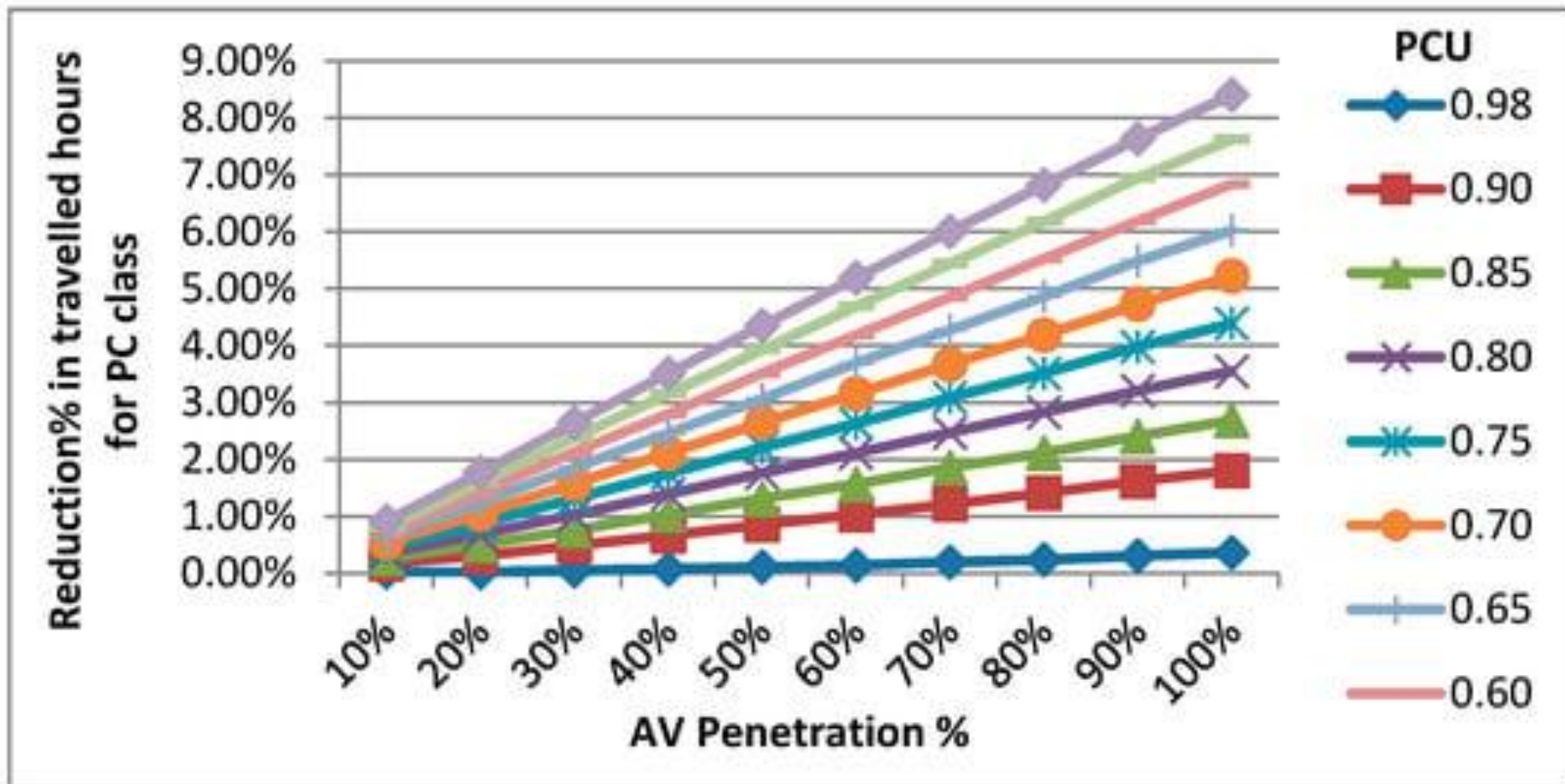
Результати порівнюються у відсотковому співвідношенні від початкового моделювання або базового сценарію. Базовим сценарієм є модель без будь-яких передбачуваних AV, реалізованих у моделі (проникнення AV дорівнює нулю). Таблиця 1 показує пройдені кілометри та пройдені години (у тисячах) для кожного типу транспортного засобу за базовим сценарієм, а також показує загальну щоденну затримку та середню швидкість мережі. У таблиці 5.1 також наведено PCU для кожного типу транспортного засобу, що використовується для моделювання.

Таблиця 5.1.

Параметри трафіку базового сценарію.

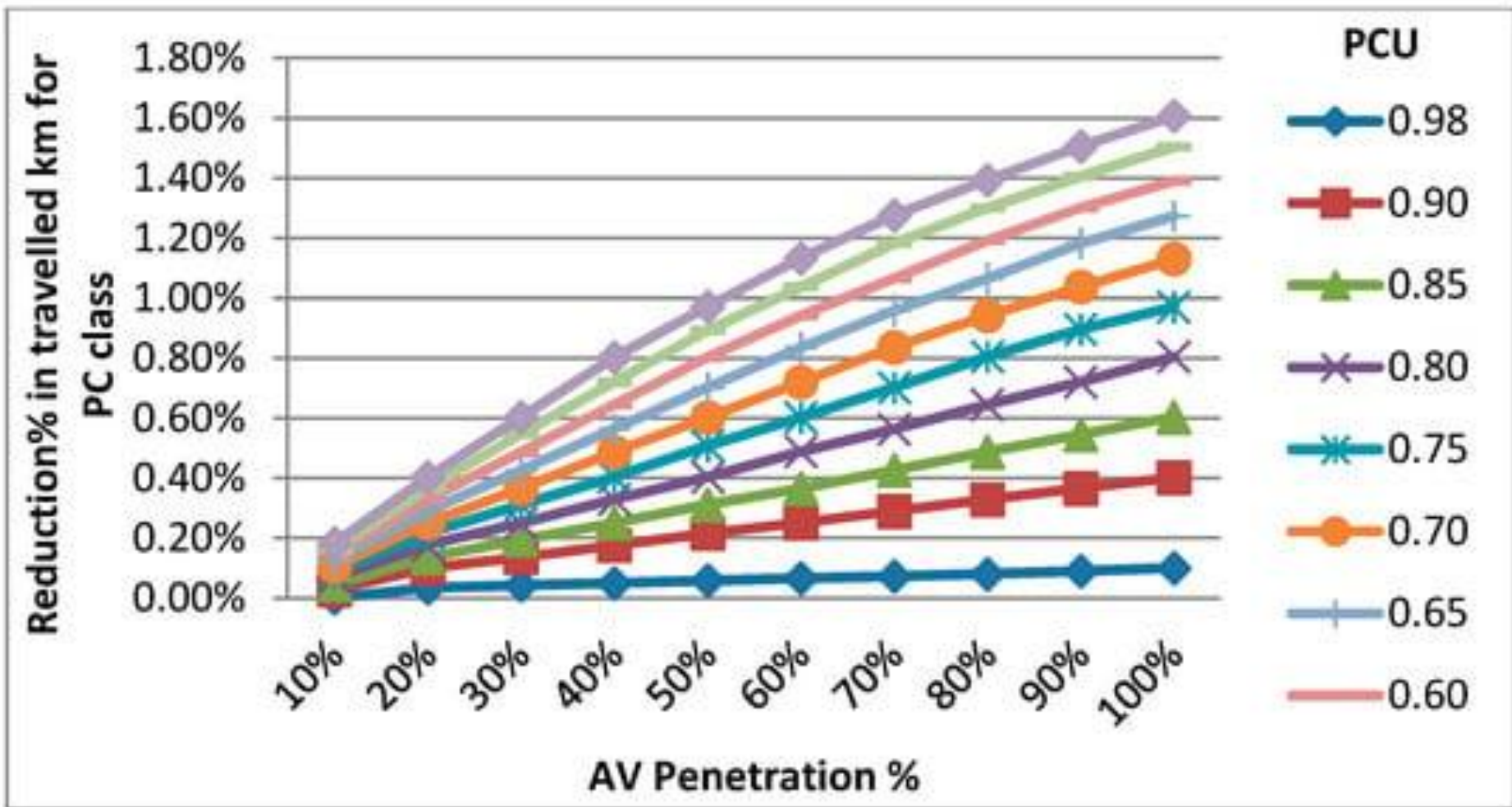
Клас	Легкові	Таксі	Мало-вагові	Мікро-автобуси	Автобуси	Вантажівки	Разом
Відстань, тис.км	323,7	616	6069	581	6271	2865	48771
Час, тис.год	624,4	14,42	115,41	8,71	123,96	40,85	927,71
PCU	1,0	1,0	1,0	1,4	1,8	2,5	
Загальна щоденна затримка	166,053 год						
Середня швидкість мережі	43,43 км/год						

Запропонована методика використання підключених AV в мережі при різних ПЦУ і проникнення при однаковій кількості щоденних поїздок скорочує добові пройдені години і добові пройдені кілометри для класу легкових автомобілів. Результати варіюються від незначного зниження при більш низьких значеннях PCU і проникнення (111 збережених пройдених годин і 926,5 збережених пройдених кілометрів при 0,98 PCU і 10% проникнення AV) до набагато більших знижень при більш високих значеннях PCU і проникнення (537 000 збережених пройдених годин і 530 186 збережених пройдених кілометрів при 0,50 PCU і 100% проникненні AV). Другий клас, що досліджується, - це важкий транспортний засіб з чотирма різними категоріями. З'ясовано, що спостерігається незначне покращення параметрів мережевого трафіку, навіть незважаючи на те, що в жодному моделюванні не додаються модифікації для будь-якого параметра важкого транспортного засобу. Це показує, що поширення AV в мережі покращує роботу мережі для всіх транспортних потоків і всіх класів транспортних засобів (40 збережених пройдених годин і 2855 збережених пройдених кілометрів при 0,98 PCU і 10% проникнення AV) Набагато більші зниження спостерігаються при більш високих значеннях PCU і проникнення (176 650 збережених пройдених годин і 778 420 збережених пройдених кілометрів при 0,50 PCU і 100% проникненні AV). Рисунок 5.1-5.4 краще ілюструють покращення роботи мережі, представляючи відсоток скорочення пройдених годин та кілометрів як для легкових автомобілів, так і для важких транспортних засобів відповідно. Скорочення годин у дорозі коливається від 0,02% до 8,41% для легкових автомобілів і від 0,01% до 6,11% для великовантажних транспортних засобів. Зменшення пройдених кілометрів варіюється від 0,03% до 1,61% та від 0,02% до 0,49% для класів легкових автомобілів та великовантажних транспортних засобів відповідно.

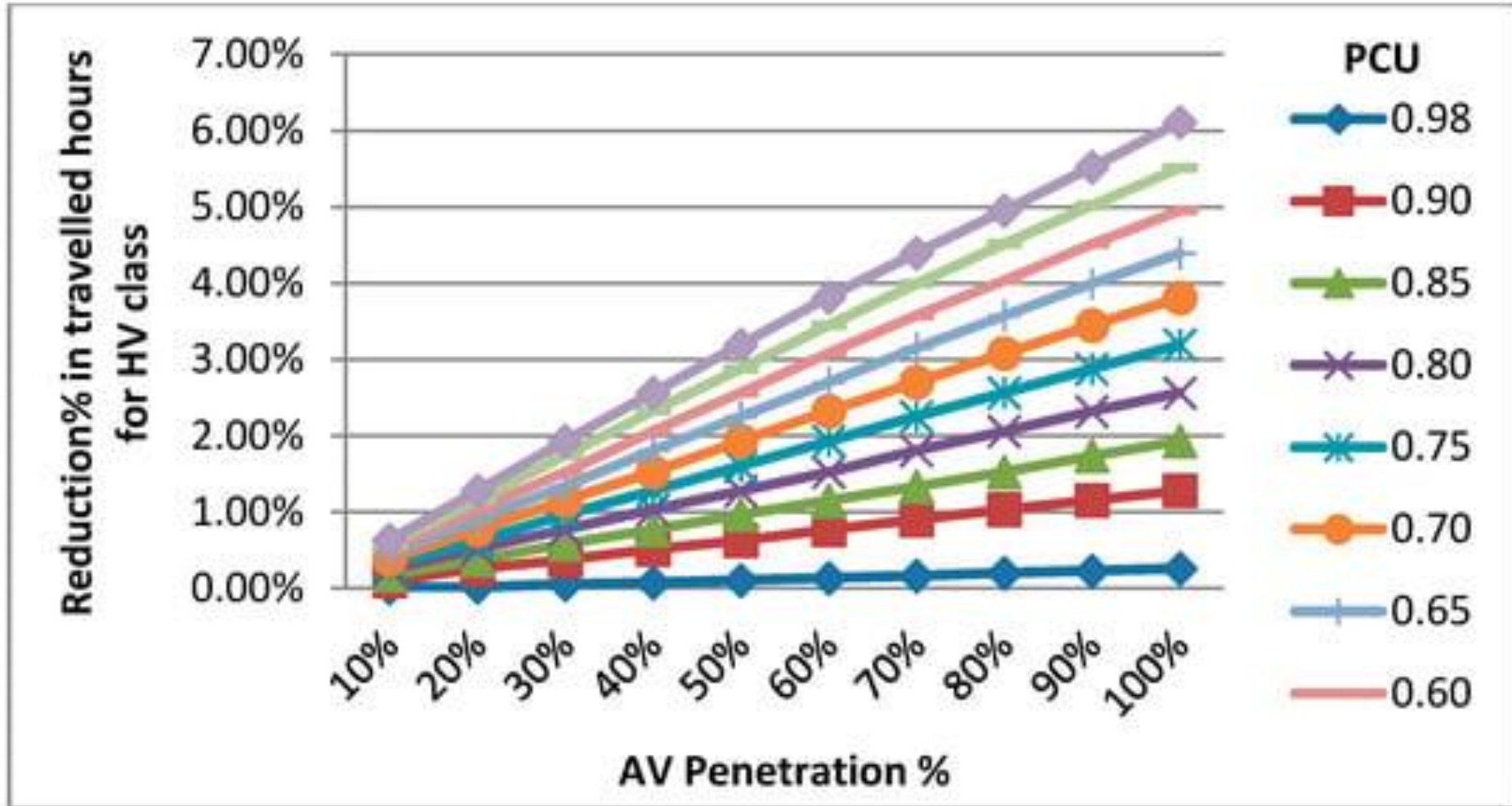


Малюнок 5.1. Зменшення відсотка пройдених годин для класу легкових автомобілів.

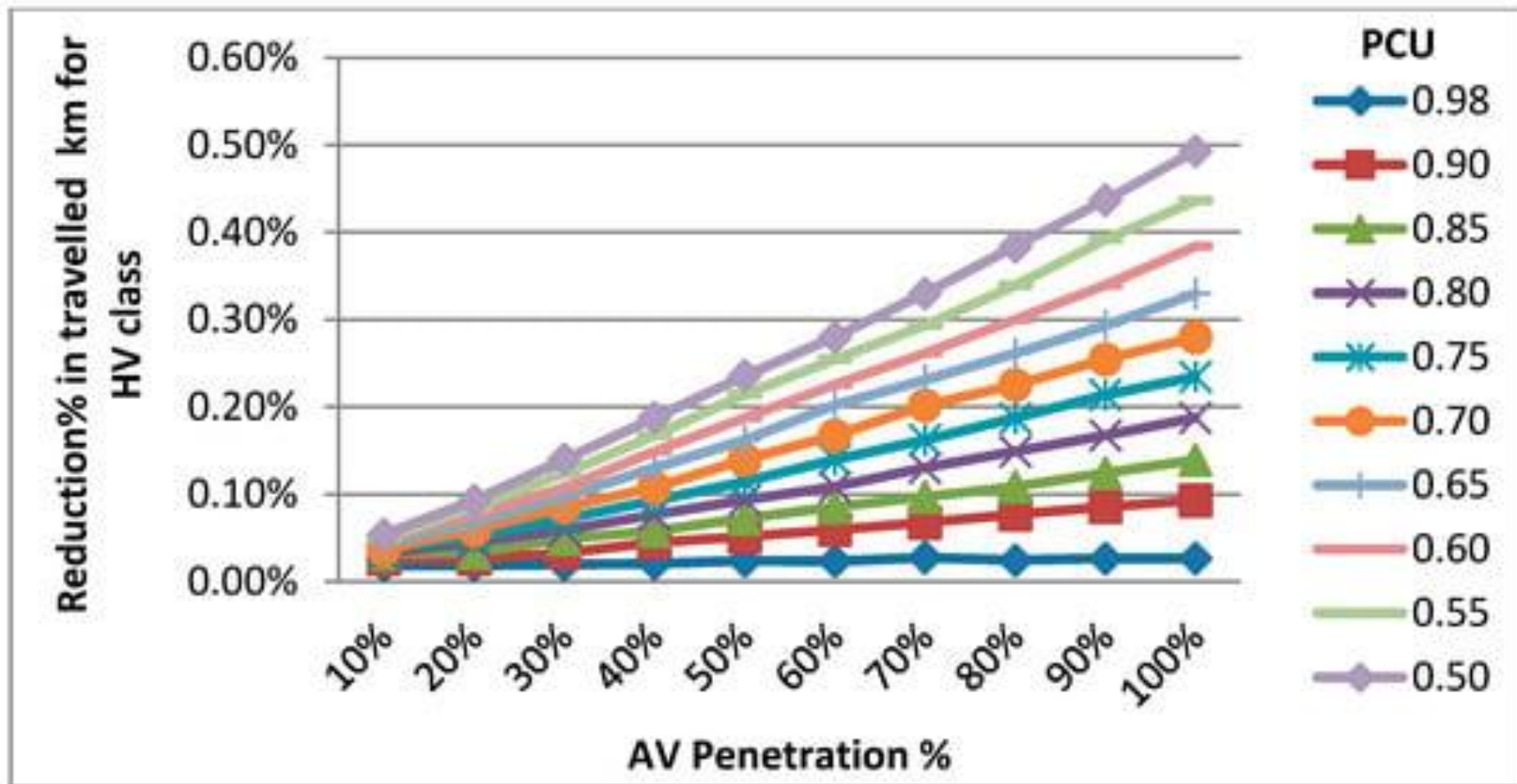




Малюнок 5.2. Зменшення відсотка пройдених кілометрів для класу легкових автомобілів.



Малюнок 5.3. Зменшення відсотка пройдених годин для класу великовагових транспортних засобів.



Малюнок 5.4. Зменшення відсотка пройдених кілометрів для класу великовантажних транспортних засобів.



Розкид AV у транспортному потоці також значно зменшує загальну добову затримку всієї мережевої моделі, досягаючи скорочення 62 881 год для 100% проникнення AV і 0,5 PCU, що дорівнює 37,87% затримки базового сценарію. Впровадження аудіовізуальних засобів з різними факторами також збільшило середню швидкість мережі на 4,08%, досягнувши 45,20 км/год порівняно з 43,43 км/год у базовому сценарії. Результати для затримки та швидкості показані на рисунку 5.5, 5.6 відповідно.

Наступна частина аналізу полягає в розробці різних моделей для чотирьох обраних параметрів трафіку в дослідженні. Для розробки моделей використовується мультилінійна регресія. Значення проникнення та PCU є незалежними змінними, а покращення параметрів трафіку є залежною змінною. Шість розроблених моделей показані нижче, з розрахунковим R у квадраті для кожної моделі. У таблиці 5.2 наведено *p*-значення, пов'язані з оцінкою кожного параметра. Всі моделі вказують на те, що PCU має більш значний вплив на відсоток впливу. Проникнення AV має прямий зв'язок, тоді як PCU має зворотну залежність із залежними змінними.

$$PC\ h\% = 0.0447AV - 0.0917PCU + 0.0683 \quad R^2 = 0.86 \quad (1)$$

$$PC\ km\% = 0.0094AV - 0.0188PCU + 0.0144 \quad R^2 = 0.88 \quad (2)$$

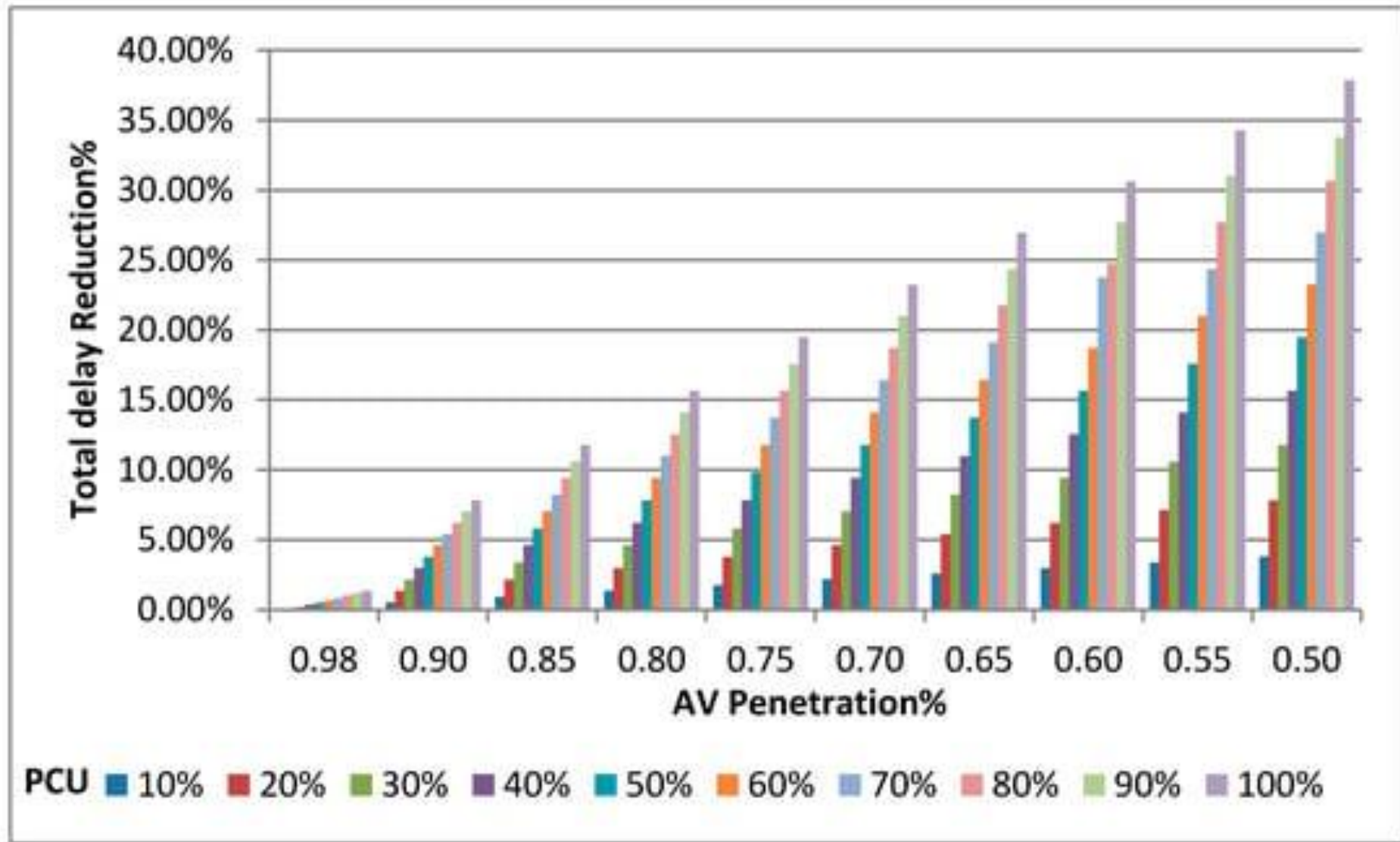
$$HV\ h\% = 0.0326AV - 0.0667PCU + 0.0498 \quad R^2 = 0.86 \quad (3)$$

$$HV\ km\% = 0.0240AV - 0.0049PCU + 0.0037 \quad R^2 = 0. \quad (4)$$

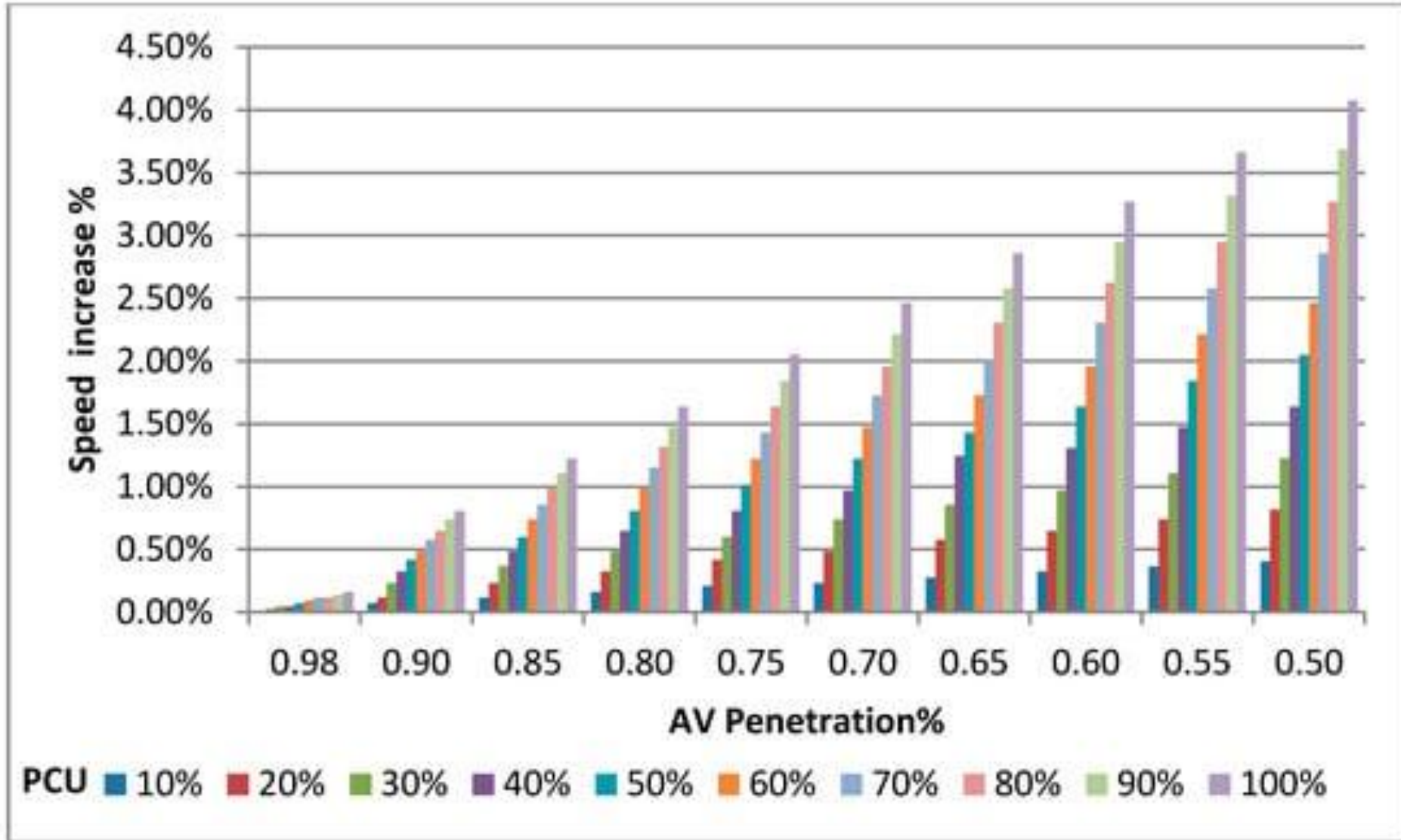
$$Delay\% = 0.2082AV - 0.4127PCU + 0.3066 \quad R^2 = 0.87 \quad (5)$$

$$Speed\% = 0.0201AV - 0.0436PCU + 0.0323 \quad R^2 = 0. \quad (6)$$

де



Малюнок 5.5. Зменшення відсотка загальної затримки для різних AV-проникнень і PCU.



Малюнок 5.6. Збільшення відсотка середньої швидкості мережі для різних AV-проникнень і PCU.

- $PC\ h\%$  - відсоток зменшення добової пройденої години для класу легкових автомобілів;
- $PC\ km\%$  - відсоток зменшення пройдених кілометрів для класу легкових автомобілів;  $HV\ h\%$  - відсоток зниження добової пройденої години для класу великовантажних транспортних засобів;
- $HV\ km\%$  - відсоток зменшення пройдених кілометрів для класу великовантажних транспортних засобів;
- $Delay\%$  - це відсоток зменшення загальної затримки всієї мережі;
- $Speed\%$  - відсоток збільшення швидкості всієї мережі;  $AV$  - відсоток проникнення автоматизованого транспортного засобу;
- $PCU$  - передбачувана одиниця легкових автомобілів автоматизованих транспортних засобів.

Таблиця 2.

*p*-значення, пов'язані з кожним параметром шести статистичних моделей.

	PCU	AV
PC h	$7.37 \times 10^{-33}$	$2.73 \times 10^{-31}$
PC km	$2.28 \times 10^{-34}$	$2.84 \times 10^{-33}$
HV h	$9.15 \times 10^{-33}$	$3.7 \times 10^{-31}$
HV km	$2.97 \times 10^{-29}$	$6.3 \times 10^{-28}$
Delay	$1.78 \times 10^{-32}$	$7.88 \times 10^{-31}$
Speed	$7.66 \times 10^{-32}$	$2.53 \times 10^{-30}$

## 6. Методологія визначення впливу автономного автомобіля на підвищення вразливості дорожньої мережі

Дорожні мережі вразливі до катастроф, як природних, так і антропогенних (землетруси, повені, протести, терористичні атаки та катастрофи). Пошкодження, спричинені стихійними лихами на даному наборі елементів мережі, можуть вплинути на працездатність усієї транспортної системи. Однак не всі компоненти мережі однаково загрожують системі. Як правило, деякі елементи є більш критичними для функціонування мережі, ніж інші. Критичні компоненти мережі – це ті, втрата яких найбільше впливає на систему [37]. Визначення найбільш критичних

Компоненти системи є найважливішими для рятувальних операцій у разі катастрофи, а також надзвичайно важливо підтримувати працездатність мережі, щоб зменшити значні соціальні та економічні втрати [22]. Ідентифікація критичних компонентів інфраструктури (зв'язків і вузлів) є вирішальним фактором в аналізі вразливості, оскільки це може допомогти зміцнити ці компоненти, визначити пріоритети їх обслуговування або побудувати нові альтернативні паралельні шляхи [7,23]. Розлад і переривання зв'язків можуть змінити найкоротші шляхи між парами вузлів і збільшити відстань подорожі між ними, що призводить до більшого часу подорожі та затримки.

Сьогодні нові технології автономних транспортних засобів (AV), кооперативних інтелектуальних транспортних систем (C-ITS) і інтелектуального водіння можуть бути найважливішими заходами для

зменшення впливу катастроф на працездатність дорожнього транспорту. Комунікації між AV та інфраструктурою (автомобілем до автомобіля та автомобіль до інфраструктури) цінні для визначення стану руху міських доріг, надання додаткової інформації про стан доріг і контроль перехресть [26,41]. Обмін інформацією допомагає транспортним засобам вибрати та виконувати найкращі доступні дії для покращення дорожнього руху [25]. Проте було проведено мало досліджень щодо очікуваного впливу підключених AV на вразливість дорожньої мережі та того, як мережа працює, якщо дороги будуть ліквідовані.

Це дослідження спрямоване на ідентифікацію критичних доріг на макроскопічній мережі доріг за характеристиками дороги та параметрами руху на працездатність усієї мережі; наприклад довжина, відстань від центру, швидкість, кількість смуг і кількість роз'ємів. Це може стати корисним інструментом для кращого розуміння того, які характеристики дороги мають більший вплив на вразливість мережі. У другій частині статті обговорюється симуляція прогнозованого впливу AV на вразливість мережі шляхом аналізу впливу різних сценаріїв AV на працездатність мережі в нормальних умовах і за умови усунення доріг. Для досягнення цих цілей базовою моделлю для дослідження було взято конкретне дослідження в Будапешті, Угорщина.

### 6.1. Вразливість мережі

Дослідження вразливості виконують два завдання: деякі оцінюють зниження продуктивності транспортної мережі в умовах декомпозиції та визначають критичні компоненти транспортної мережі [19,27]. Останнє завдання вирішується шляхом оцінки зниження індексів продуктивності

мережі при виключенні даного компонента в [15]. Експертна оцінка застосована [10,28]. Дослідження Гарсія Паломареса та його колег в Іспанії розробило методологічну основу для оцінки критичних ділянок дороги з точки зору часу в дорозі. Їхній аналіз зробив висновок, що радіальні магістралі є найбільш критичними ланками [12]. Команда Акбарзаде також вивчила вразливість дорожньої мережі, проаналізувавши зміну часу в дорозі, показавши, що зв'язки, що з'єднують сусідні кластери, є найбільш критичними порівняно з лініями з найбільшим затором [1].

У дослідженні вразливості Геккеле та ін. використовувалась модель, заснована на діяльності, для оцінки змін попиту на подорожі через закриття зв'язку та визначено критичність зв'язку за допомогою набору показників вразливості [14]. Порівняли Кюї та Левінсона кумулятивну можливість доступності до та після видалення сегментів автостради в міській зоні в їх моделі. Вони виявили, що критичні зв'язки знаходяться поблизу автомагістралей або на ділянці автостради [9]. Калверт і Снелдер представили індикатор ефективності зв'язку для стійкості (LPIR), який оцінює рівень стійкості окремих ділянок доріг у більш комплексній мережі доріг [6]. Готьє та його колеги вибрали збільшення загальної вартості подорожі як параметр для вимірювання ефективності дорожньої мережі за наявності перебоїв [13].

Іншим ключовим питанням, пов'язаним з ідентифікацією критичної дороги, є прогнозування поведінкових реакцій мандрівника на несправність дороги. Несправність дороги спричиняє зміни в невизначеності часу подорожі та поведінці подорожі щодо вибору виду транспорту, маршруту подорожі або скасування всієї поїздки [34]. Водії в умовах невизначеності щодо часу подорожі, як правило, вибирають надійний найкоротший шлях із більшою економією часу в дорозі та

зменшенням варіабельності часу в дорозі, що може мати зворотний ефект у разі несправності дороги, показуючи, що найкоротші маршрути не завжди є найкращими. вибір економії часу в дорозі в разі аварії [7]. AV, пов'язані один з одним та з інфраструктурою, можуть допомогти знайти кращі маршрути, щоб зменшити невизначеність у разі аварії дороги [26].

## 6.2. Підключений автономних транспортних засобів

Було проведено багато досліджень, зосереджених на майбутньому впливі AV на дорожню мережу. Дослідження розглядають шість різних рівнів автоматизації, вивчаючи вплив базових рівнів автоматизації на повністю автоматизовані транспортні засоби [17,33]. Іншим фактором, що впливає на вплив AV на мережу, є відсоток AV у загальному потоці трафіку (проникнення AV) [8]. Очікується, що людський фактор, що керує транспортною мережею, буде частково усунутий за допомогою інноваційних AV-технологій, таких як 360-градусні камери та датчики [38]. AV platooning продемонстрував 60% скорочення часу між транспортними засобами, демонструючи значне покращення пропускну здатності дороги та зменшення заторів [24,31]. Кілька інших досліджень досліджували вплив AV на мережу за допомогою різних параметрів, включаючи реакцію, прискорення та уповільнення, а також потік трафіку [16,35,36,39].

Дослідження підключення AV та використання зв'язку між транспортним засобом та іншими елементами мережі (V2X: інші транспортні засоби, інфраструктура та центральна система дорожнього руху) показали покращення стабільності транспортного потоку, значно згладили ударні хвилі транспортного потоку, зменшили затримки та дорогу. забруднювачі транспорту [5,20,25,32]. Дослідження перехресть



показали значне скорочення часу в дорозі транспортного засобу та затримки в дорозі в середовищі підключеного транспортного засобу [3,11]

Наведені вище дослідження були зосереджені або на вразливості мережі, або на оцінці впливу майбутнього АВ на мережі автомобільного транспорту. У цьому дослідженні буде розроблено структуру для пошуку критичних компонентів за різними параметрами трафіку доріг у макроскопічній мережі доріг і прогнозування того, як АВ вплинуть на вразливість мережі

### 6.3. Ідентифікація AV-параметра

Як зазначено в огляді літератури, очікується, що впровадження АВ у транспортний парк вплине на пропускну спроможність і насиченість мережі через різні фактори: рівень автоматизації SAE (Товариства автомобільних інженерів), V2V і Комунікація V2I, менша відстань слідування (простір), менші необхідні проміжки для зміни смуги руху, менший час реакції на водіння, час ходьби та паркування. Зв'язок між транспортними засобами є, мабуть, одним із найсильніших засобів протидії втраті доступу до частини мережі. Зв'язок V2V і V2I надає АВ іншу альтернативу, замінюючи дороги, які були ліквідовані через надзвичайні ситуації, зменшуючи затори, що виникають через застрягання транспортних засобів на/поблизу ліквідованих доріг. Ці типи зв'язку наразі забезпечуються декількома навігаційними програмами та додатками, такими як Waze і Google Maps.

Параметр пасажирської одиниці (PCU) в моделі PTV Visum використовувався для відображення очікуваних змін у насиченості мережі та скороченні часу подорожі. PCU відображає, наскільки великий вплив на змінні мережі дорожнього руху має певний вид транспорту, наприклад

важкі вантажівки чи автобуси, порівняно з одним невеликим легковим автомобілем [4].

Таблиця 6.1.  
Передбачувані одиниці легкового автомобіля, пов'язані з кожною категорією SAE [2]

Категорія SAE	SAE PCU
SAE 0	1.00
SAE 1	0.98
SAE 2	0.95
SAE 3	0.90
SAE 4	0.80
SAE 5	0.65

Модифікація значень PCU для класу AV базується на очікуваному позитивному впливі підключених AV на пропускну здатність дороги та характеристики насичення. Методологія, розроблена Тьорьком та його колегами, була прийнята для п'яти різних сценаріїв, включаючи базовий сценарій без повністю автоматизованих транспортних засобів [2]. Методологія зосереджена на зміні значення PCU залежно від рівня SAE та значення AV проникнення. Просту поліноміальну регресію використовували для визначення значення PCU, пов'язаного з кожним рівнем SAE, як показано в табл.6.2. Ми очікуємо позитивного впливу у випадку різних ключових показників ефективності, однак головне питання полягає в тому, щоб виявити різницю в розмірі впливу проаналізованих атрибутів на вразливість мережі через впровадження різних AV-проникнень і рівнів автоматизації.

Сценарії поєднують різні фактори AV PCU з п'ятьма значеннями проникнення SAE. В табл. 6.3 нижче показано вибрані сценарії з відповідною часткою SAE та значеннями PCU.

Таблиця 6.3.

## Пропорція рівня SAE у кожному сценарії [2]

Категорія SAE	SAE0	SAE1	SAE2	SAE3	SAE4	SAE5	Сценарій PCU
AV0	1	0	0	0	0	0	1000
AV30	0,70	0,18	0,07	0,03	0,02	0	0,986
AV50	0,50	0,19	0,12	0,11	0,06	0,02	0,960
AV80	0,20	0,08	0,13	0,13	0,26	0,20	0,856
AV100	0	0	0	0	0	1	0,650

## 6.4. Структура аналізу чутливості мережі

Для дослідження чутливості різних доріг транспортної мережі було відібрано 30 доріг з різними характеристиками, показаних на рис.2. Малюнок зосереджений переважно на показі розподілу вибраних доріг, оскільки деякі дороги дійсно розташовані близько, і їх можна ідентифікувати як одну. Перша характеристика вибраних доріг – це кількість смуг руху в кожному напрямку. 30 відібраних доріг були розділені на три групи з однією, двома та трьома смугами руху в кожному напрямку по десять доріг у кожній групі. Другою характеристикою є відстань від середини дороги до центру моделі. Ще однією характеристикою є кількість роз'ємів. Це точки, в яких транспортні засоби можуть в'їжджати/виїжджати на вибрану дорогу з/на іншу дорогу дороги. Дві останні характеристики є максимальними дозволені швидкість і довжина доріг. Таблиця4 підсумовує вибрані характеристики дороги.

Прийнята методологія для вивчення чутливості мережі щоразу усуває одну дорогу, зменшуючи пропускну спроможність ліквідованої дороги до нуля, щоб нею не могли користуватися транспортні засоби. І запускає п'ять вибраних сценаріїв AV, змінюючи PCU, і виконує призначення рівноваги для кожного сценарій. Зміни в параметрах трафіку аналізуються кожен сценарій. Потім вибирається та видаляється інша

дорога, доки не будуть видалені всі 30 доріг. Малюнок 6.1 показує рамки використаної методології.

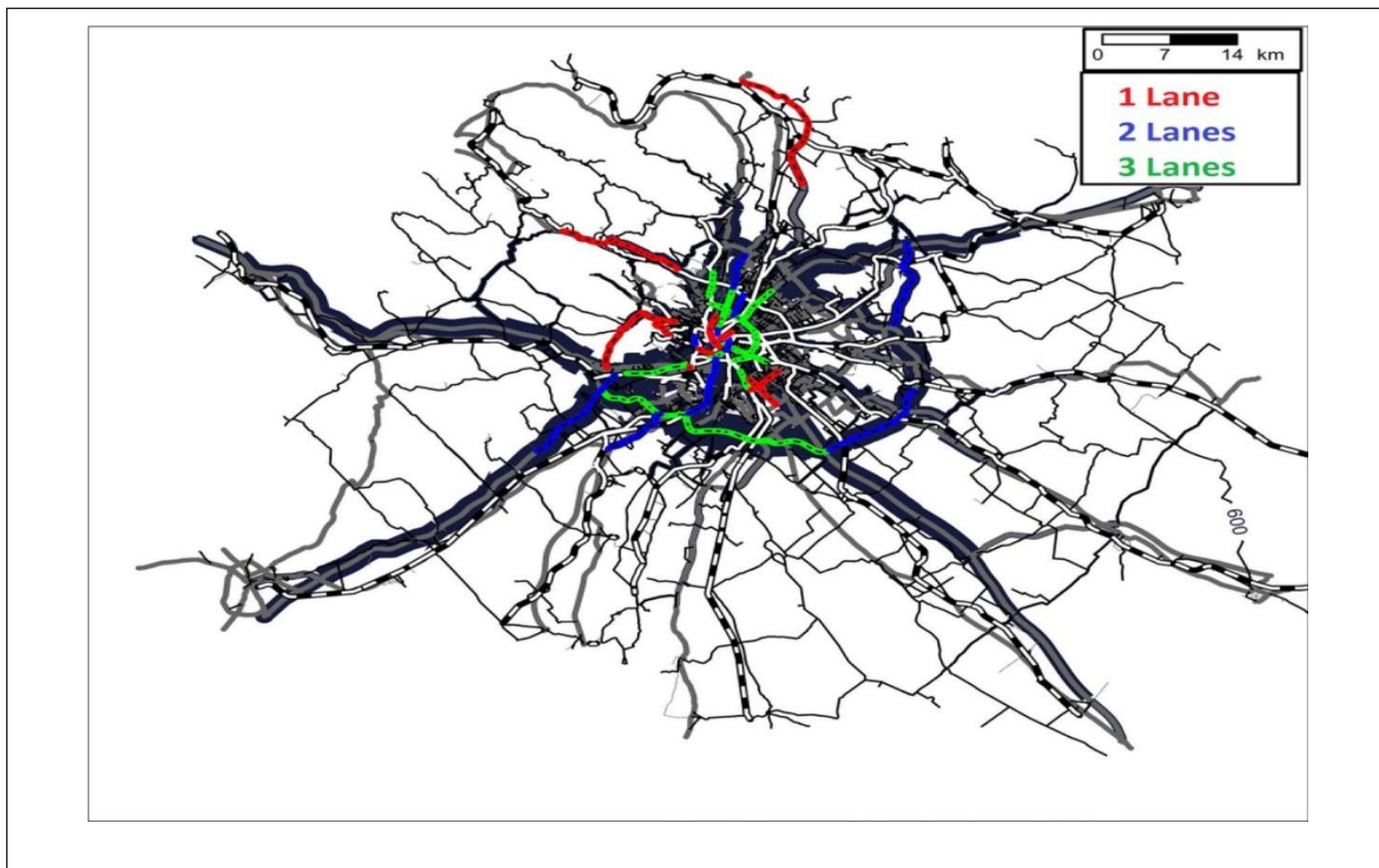


Рисунок 6.1. Транспортна мрежа

## 6.5. Регресійна модель і її перевірка

Множинна лінійна регресія була застосована для оцінки найбільш значущого параметра, що впливає на критичність дороги. Були перевірені умови нормальності, колінеарності та гетероскедастичності, щоб переконатися, що лінійна регресія застосовна. Дані були введені в матрицю коефіцієнтів кореляції, щоб перевірити колінеарність між параметрами. Матриця не показала високої колінеарності між параметрами, з найвищим значенням 0,63 між швидкістю та довжиною дороги, що нижче прийнятого максимального значення 0,80. Нормальний графік Р-Р використовувався для перевірки нормальності, а діаграма розсіювання залишків використовувалася для перевірки гетероскедастичності [21]. Через часту появу зв'язувальних значень у вибірці та через нашу мету застосувати прозорі та явні методи ми вирішили використати тест Шапіро-Вілка та тести Жарке-Бера [18]

Через часту появу зв'язувальних значень у вибірці та через нашу мету застосувати прозорі та явні методи ми вирішили використати тест Жарке-Бера [18]. З іншого боку, що стосується тестів для нормального розподілу, Шапіро-Вілка є одним із найпопулярніших і широко використовуваних тестів для малих розмірів вибірки, відповідно, ми також досліджували зразок за допомогою тесту Шапіро-Вілка [30]. У той же час ми вважали результати тесту Жарке-Бера більш релевантними в цьому випадку, оскільки тест Жарка-Бера є одним із найбільш прозорих і ясних, оскільки він фіксує комбінацію Асиметрії та Ексцесу, які є двома вимірами, які фіксувати відхилення від нормального розподілу. Значення  $p$  для тестів Жарке-Бера та Шапіро-Вілка наведено в табл. 6.1 нижче. Критерій Жарка-Бера показує значення  $p$  вище за 0,05, показуючи, що дані узгоджуються з нульовою асиметрією та надлишковим ексцесом, тоді як

Шاپіро–Вілка дає переважно нижче значення  $p$  ніж 0,05, що викликає певні сумніви щодо нормальності залишків.

Було обрано 80/20 відсотків для розробки/перевірки моделі, де для розробки моделі було обрано 24 дороги. Дороги 2, 8, 13, 16, 28 і 30 були вибрані випадковим чином для перевірки кожної розробленої моделі. Значення середньоквадратичної помилки (RMSE) було розраховано, щоб дати середню відстань між прогнозованою загальною затримкою з розроблених моделей і загальними значеннями затримки з моделювання в наборі даних для процесу валідації.

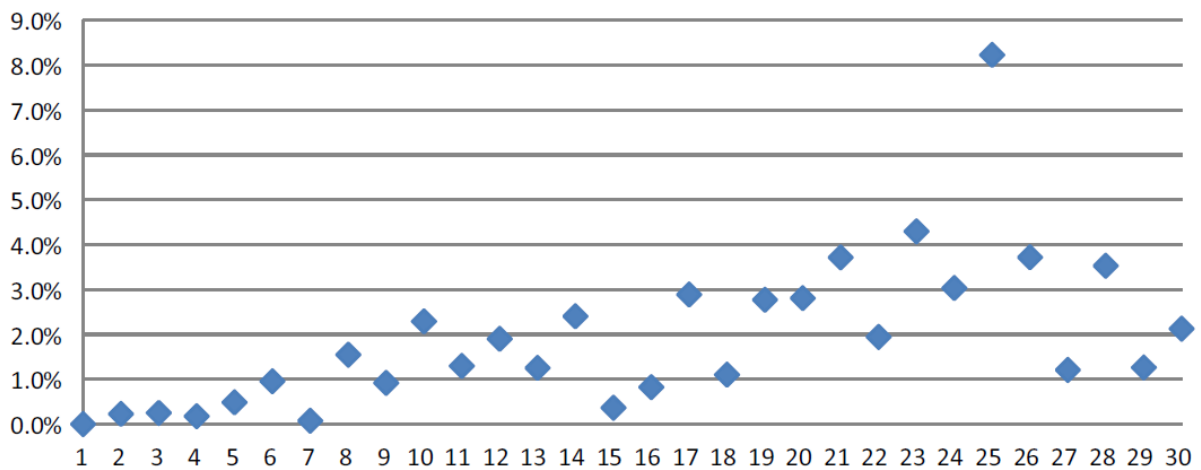


Рисунок 6.2. Залежність затримки у % для кожної дороги

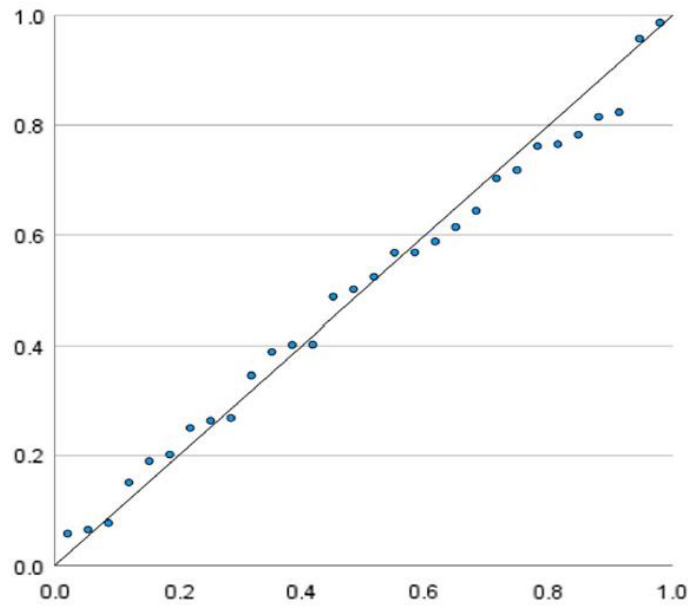


Рисунок 6.3. Нормальний P–P графік залишку незалежної регресії змінни збільшення загальної затримки



Таблиця 6.1

## Параметри вибраних доріг

№	Довжина	№ смуги	Швидкість	Відстань	Ємність	№ роз'єму
1	1,80	1	40	2.18	900	5
2	4.39	1	45	6.01	1000	7
3	3,87	1	50	7,97	1200	15
4	1.54	1	40	1.11	900	9
5	22.41	1	65	24.51	1000	8
6	19.73	1	90	31,65	1500	6
7	4.34	1	45	8,84	1000	14
8	4.57	1	50	0,82	1200	8
9	12.84	1	50	10.29	1400	7
10	15.44	1	80	16.41	1400	7
11	1.60	2	50	0,22	2400	12
12	8.80	2	60	6.69	2800	15
13	12.19	2	115	21.25	4000	3
14	1.87	2	50	1.64	2400	16
15	7,89	2	100	15.31	3200	4
16	2,97	2	55	5.38	2400	9
17	14.45	2	115	21.39	4000	6
18	5.04	2	60	9.35	2800	11
19	13.55	2	115	18.06	4000	6
20	1.05	2	50	0,56	2600	5
21	6.26	3	100	7,82	5100	7
22	4.57	3	60	6.29	4200	10
23	6.90	3	60	4.21	4200	14
24	3.63	3	60	3.92	4200	16
25	24.93	3	100	13.27	4800	9
26	5.07	3	50	3.41	3900	19
27	1.26	3	50	2.66	3900	6
28	5.63	3	60	4.72	4200	31
29	2.62	3	60	6,95	4200	5
30	3,88	3	60	7.45	4200	11

## 7. Аналіз вразливості дорожньої мережі

Перша частина аналізу була зосереджена на визначенні збільшення загальної затримки шляхом усунення кожної дороги, щоб знайти найважливіші характеристики дороги, що впливають на мережу для сценаріїв AV0. Розраховано загальну добову затримку (годин) для всієї мережі. Таким чином, вихідне значення загальної добової затримки становить 136 911 год. Кожен сценарій порівнювався з цим значенням.

Розроблена функція вразливості з використанням мультилінійної регресії показана нижче зі значенням R у квадраті 89,1%. Нормальний P–P графік залежної змінної подано на рис.7.1, і табл 7.1 представлено оцінене значення r кожного параметра, показуючи, що залишки є приблизно лінійними, що підтверджує умову, що помилка нормально розподілена. Табл також показує значення VIF, усі від 1 до 5, що вказує на помірну кореляцію між заданими змінними в режимі. Результат вказує на те, що довжина дороги, кількість смуг руху, швидкість і кількість роз'ємів позитивно впливають на затримку. Навпаки, відстань від центру негативно впливає на загальне збільшення затримки. Регресія також показала, що кількість смуг має найбільший вплив на мережеву затримку, на другому місці довжина та відстань, які мають майже подібний вплив, і всі вони були очікуваними результатами.

Збільшення загальної затримки:

$$T=352,49L+ 1017,3N+ 55,69S - 319D+ 127,6Co- 4109,5$$

Де *L*- довжина ліквідованої дороги, км.

*N* - Кількість смуг ліквідованої дороги.

*S* - Максимально дозволена швидкість на ліквідованій дорозі, км/год.

*D* - Відстань середини дороги від центру моделі, км.

*Co* - Кількість роз'ємів уздовж ліквідованої дороги.

Таблиця 7.1

## Оцінка достовірності параметрів

Параметр	значення Жарке–Берастор	значення Шапіро – Вілкстор
Довжина	0,1065	0,0022
Кількість смуг	0,3247	0,0003
Швидкість	0,1636	0,0010
Відстань	0,0721	0,0136
Кількість роз'ємів	0,4956	0,2685

Друга частина аналізу зосереджена на пошуку впливу впровадження AV у модель. Чотири AV сценарії порівнювали з базовим сценарієм, описаним у табл1 у розділі методології (AV0). Кількість пройдених кілометрів за день показала скорочення в діапазоні від 0,19 до 1,29%, а також скорочення кількості пройдених годин становило від 0,73 до 5,78% від загальної кількості годин за день. Найбільш значне покращення, викликане AVs, спостерігається у загальній добовій затримці. Сценарій AV30 показав, що навіть із запровадженням лише 30% AV від усього транспортного парку з нульовим рівнем автоматизації SAE5 було досягнуто зниження на 3,5%. AV50 і AV80 зменшили затримку на 6,89% і 14,81% відповідно, що також ввело низький відсоток SAE5 AV. Найбільш суттєве зниження затримки досягається впровадженням цілого парку SA5 AV, що зменшує загальну добову затримку на 28,52% ( рис.7.2).

Аналіз впровадження АВ в транспортний парк також зменшив зростання затримки у випадку перешкод на дорозі та усунення. Для кожного з представлених AV-сценаріїв загальна щоденна затримка була оцінена для всієї мережі, а також розрахована для процесу ліквідації 30 доріг і порівняна. Результати показано на рис.7.3. Наприклад, найбільше збільшення затримки спостерігається на дорозі № 25, з підвищенням на 8,26% у випадку нульових AV (AV0). Це збільшення зменшується до 7,68%, 7,14%, 5,95% і 4,26% для AV30, AV50, AV80 і

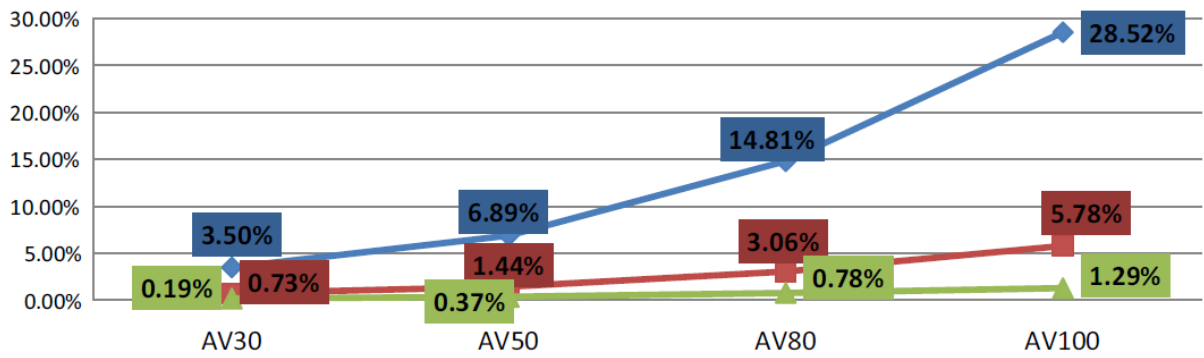
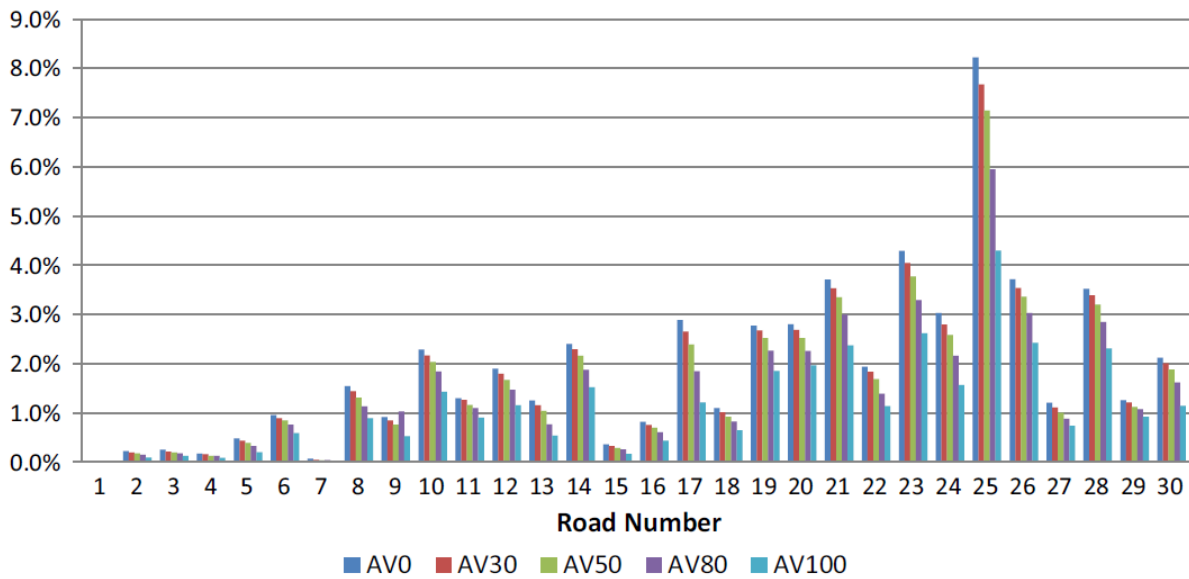


Рисунок 7.1. Відсоток зменшення затримки, годин і пройдених

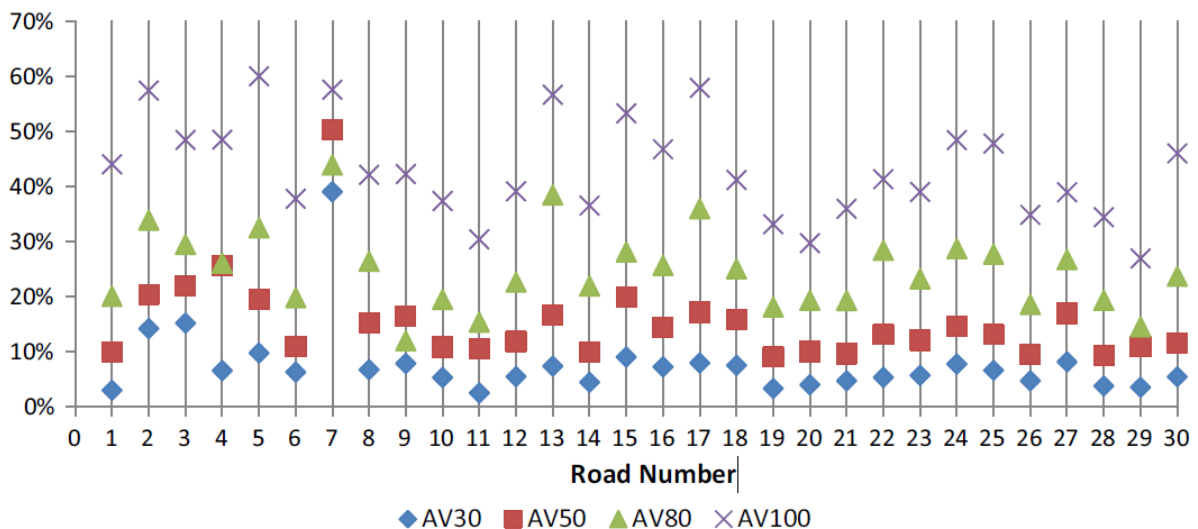


кілометрів для кожного сценарію

Рисунок 7.2. Затримка збільшує відсоток різних сценаріїв AV для кожної вилученої дороги

Рисунок 7.3. Порівняння відсотка зменшення затримки між усіма сценаріями

Сценарії AV100, відповідно, показують 50% зменшення зростання



затримки. Покращення на 60% досягається за допомогою повністю SA5 AV для дороги № 5. Середнє зменшення затримки становить 7,78%, 15,43%, 24,96% і 43,08% для AV30, AV50, AV80 і AV100 відповідно. малюнок8показує результати для кожного AV сценарію та дороги.

Функції вразливості для збільшення загальної затримки були розроблені для кожного сценарію AV, щоб зрозуміти покращення, спричинені AV на чутливість мережі у випадку блокування дороги. Чотири розроблені регресійні моделі показані нижче зі значеннями R у квадраті 86,5%, 88,6%, 87,6% і 83,9% для AV30, AV50, AV80, та AV100 відповідно. Таблиця 7.2 показує розрахунковий значення для кожної розробленої моделі. Подальший аналіз ваги кожної незалежної змінної порівняно з усіма значеннями змінної показано на рис.7.4 Швидкість, відстань і кількість ваг конекторів майже не змінюються, якщо реалізовано AV. Найбільш суттєва зміна показана у збільшенні ваги кількості смуг ліквідованої дороги в рівнянні вразливості з більшою кількістю AV у транспортному потоці та довжині дороги – вазі зменшення для того самого стану. Зміни вагових коефіцієнтів означають, що дороги з більшою кількістю смуг більш чутливі до повністю автоматизованої мережі потоків, ніж до довжини дороги. Інша полягає в тому, що кількість смуг значно впливає на затримку мережі.

Таблиця 7.2

Значення, пов'язане з кожним параметром моделі AV0

Параметр	P - значення	VIF - значення
Довжина	$3.03 \times 10^{-6}$	3.70
Кількість смуг	0,006	1,97
Швидкість	0,0019	3,46
Відстань	$2.28 \times 10^{-5}$	4.68
Кількість роз'ємів	0,0266	1.30

Перевірка для п'яти розроблених математичні моделі були створені з використанням 20% із 30 відібраних доріг. Значення RMSE, розраховані

для шести доріг, були оцінені, по-перше, шляхом їх порівняння зі значеннями RMSE набору даних, використаного для розробки моделі, а по-друге, шляхом розрахунку нормалізованих значень RMSE. Таблиця 8 нижче представлені результати процесу перевірки. Перше порівняння між RMSE набору даних перевірки та набору даних навчання показує низьку різницю. Нормалізований RMSE показує значення 0,23 і нижче; ці два висновки з обчисленим R2 вказують на те, що розроблені моделі можуть відносно точно передбачити дані.

Таблиця 7.3

Значення, пов'язане з кожним параметром моделей  
AV30, AV50, AV80 і AV100

Параметр	AV30	AV50	AV80	AV100
Довжина	0,0001	$4.83 \times 10^{-6}$	$6.22 \times 10^{-6}$	$8.83 \times 10^{-5}$
Кількість смуг	0,0104	0,0075	0,001	0,0133
Швидкість	0,0021	0,002	0,0038	0,0107
Відстань	0,0001	$2,91 \times 10^{-5}$	$3,64 \times 10^{-5}$	0,00024
Кількість роз'ємів	0,016	0,029	0,045	0,101

Кількість пройдених кілометрів і годин за день також зменшилася на 0,19–1,29% і 0,73–5,78% відповідно за різними сценаріями AV.

Нарешті, запропонована модель вразливості на основі затримки була перевірена для всіх 30 вибраних доріг для чотирьох сценаріїв AV. Запровадження AV призвело до значного скорочення збільшеної затримки, спричиненої ліквідацією доріг. Середнє зниження склало до 43,08% від базового сценарію для всіх звичайних транспортних засобів. Отримані дані були додатково проаналізовані шляхом розробки статистичної моделі затримки для чотирьох сценаріїв AV та у порівнянні з нульовою статистичною моделлю AV. Було знайдено що вплив параметра кількості смуг на дорозі на затримку значно збільшився з вищим AV проникненням.

При цьому найбільшою в цьому плані залишається кількість смуг.

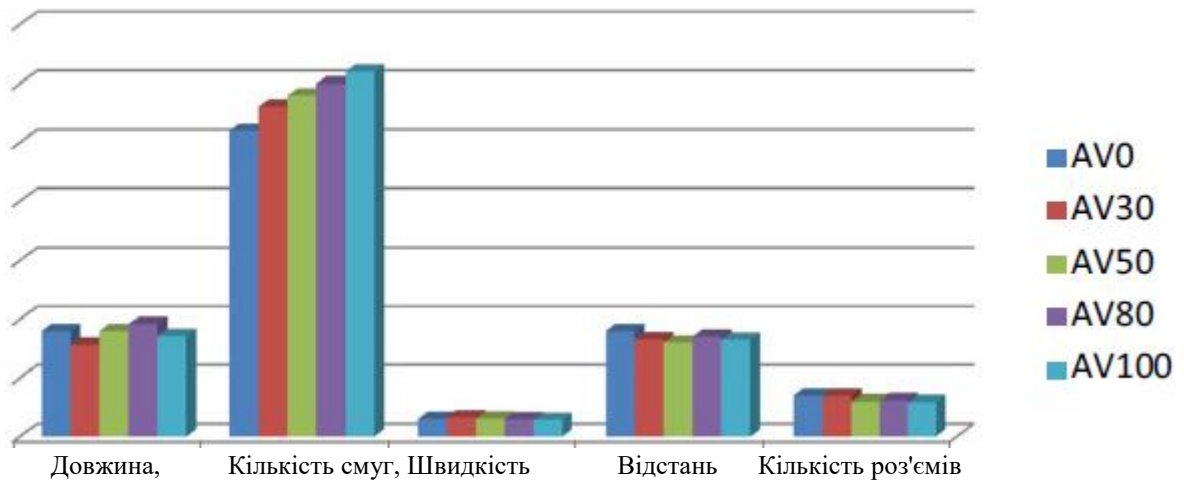


Рисунок 7.4. Незалежна вага змінної порівняно зі значеннями всіх змінних

Таблиця 7.4

Валідація моделей з результатами

Модель	RMSE набір даних перевірки	RMSE навчальний набір даних	Нормалізований RMSE	R2 (%)
AV0	832,5	806,8	0,18	89.1
AV30	989,9	889,8	0,23	86.5
AV50	695,0	728.4	0,17	88.6
AV80	516.2	640,9	0,14	87.6
AV100	376,8	556,9	0,12	83.9

# Висновки

Першій частині роботи досліджується передбачувана очікувана зміна в операціях трафіку, викликана поширенням аудіовізуальних засобів на різних рівнях проникнення в мережу. Розслідування зосереджене на пошуку різниці між пройденими годинами та пройденими кілометрами, припускаючи, що для AV різні PCU відрізняються. Прийняті зміни параметрів AVs пояснюються рівнем автоматизації, що призводить до більш плавного водіння, зв'язку між транспортними засобами та інфраструктурою тощо.

Отримані результати свідчать про покращення роботи мережі для обох досліджуваних класів транспортних засобів для одних і тих самих щоденних поїздок. Коефіцієнт посилення збільшується зі збільшенням проникнення AV і зниженням передбачуваного PCU для AV. Сценарії моделювання показують вищий відсоток скорочення пройдених щоденних годин, ніж пройдених кілометрів, що оцінюється як 8,41% та 1,61% відповідно, при вищому проникненні PCU та AV для класу легкових автомобілів. Покращення зумовлене розумнішим розподілом поїздок у мережі, що призводить до скорочення часу поїздки, але в майбутньому необхідно провести додаткові дослідження.

Ще один висновок полягає в тому, що, незважаючи на те, що PCU змінено лише для звичайної категорії автомобілів, а проникнення розглядається лише як частина класу легкових автомобілів, спостерігається незначне покращення експлуатації класу важких транспортних засобів. За оцінками, викиди класу важких транспортних засобів зменшаться на 6,11% для пройдених годин і на 0,49% для пройдених кілометрів. Це свідчить про те, що поширення аудіовізуальних засобів призведе до поліпшення транспортної мережі в цілому, а не тільки для AV.

Аудіовізуальні засоби суттєво вплинули на загальну затримку всієї мережі, скоротивши її на 37,87% і збільшивши середню швидкість на



4,08%. Заключною частиною статті є розробка шести моделей шести параметрів трафіку. У моделях наводиться відсоток зниження або збільшення кожного параметра для різних значень проникнення PCU і AV.

У другій частині даної роботи вивчалася вразливість дорожньої мережі з точки зору щоденних годин у дорозі, щоденних пройдених кілометрів і загальної затримки шляхом усунення доріг з різними характеристиками (довжина, відстань від центру, швидкість, кількість смуг руху та сполучення). Моделювання та розробка мультилінійної регресійної статистичної моделі 26 різних ліквідованих доріг показали, що кількість смуг на дорозі має найбільший вплив на затримку. Другими важливими характеристиками впливу є довжина дороги та відстань від центру міста, за якими йдуть інші характеристики.

Було прийнято методологію для вивчення впливу автономних транспортних засобів (AV) на модель мережі з використанням різних значень легкових автомобілів (PCU) для AV. Було обрано чотири сценарії з різною комбінацією рівнів автоматизації SAE та пропорції AV у транспортному потоці. Загальна затримка продемонструвала значне покращення, досягнувши скорочення на 28,52% у сценарії повністю автоматизованого парку.

Дослідження також було зосереджено на ліквідації однієї дороги за раз; гарним розширенням є вивчення способів усунення поєднання доріг або регіону впливу за допомогою впровадження AV; отже, можна було б змоделювати AV за допомогою більш динамічної методології. Така робота також може пояснити взаємозв'язок між впровадженням AV, кількістю ліквідованих дорожніх смуг і співвідношенням затримки, знайденим у цьому документі.

## Список використаних джерел

1. Di, X.; Ma, R.; Liu, H.X.; Ban, X.J. A link-node reformulation of ridesharing user equilibrium with network design. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2018, 112, 230–255. [ ]
2. Heinzelmann, B.; Indinger, T.; Adams, N.; Blanke, R. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. *SAE Int. J. Commer. Veh.* 2012, 5, 42–56.
3. Tilg, G.; Yang, K.; Menendez, M. Evaluating the effects of automated vehicle technology on the capacity of freeway weaving sections. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2018, 96, 3–21.
4. Yang, K.; Menendez, M. A Convex Model for Queue Length Estimation in a Connected Vehicle Environment. In *Proceedings of the Transportation Research Board 96th Annual Meeting, Washington DC, USA, 8–12 January 2017.*
5. Obaid, M.; Szalay, Z. A novel model representation framework for cooperative intelligent transport systems. *Period. Polytech. Transp. Eng.* 2019, 48, 39–44.
6. Yang, K.; Guler, S.I.; Menendez, M. Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2016, 72, 109–129.
7. Árpád, T.; Zsolt, S.; Gábor, U.; Bence, V. Modelling Urban Autonomous Transport System in Budapest. In *Proceedings of the 8th international scientific conference CMDTUR 2018, Žilina, Slovakia, 4–5 October 2018.*
8. Hartmann, M.; Krause, S.; Hoffmann, S.; Motamedidehkordi, N.; Vortisch, P.; Busch, F. Impact of Automated Vehicles on Capacity of the German Freeway Network. In *Proceedings of the ITSWorld Congress, Montreal, QC, Canada, 29 October–2 November 2017.*

9. Vanderwerf, J.; Shladover, S.E.; Miller, M.A. Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity. *Transp. Res. Rec.* 2003, 1800, 78–84.
10. Chen, D.; Ahn, S.; Chitturi, M.; Noyce, D.A. Towards vehicle automation: Roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2017, 100, 196–221.
11. Shladover, S.E.; Su, D.; Lu, X.-Y. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow. *Transp. Res. Rec.* 2012, 2324, 63–70.
12. Milanés, V.; Shladover, S.E.; Spring, J.; Nowakowski, C.; Kawazoe, H.; Nakamura, M. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2013, 15, 296–305.
13. Jerath, K.; Brennan, S.N. Analytical prediction of self-organized traffic jams as a function of increasing ACC penetration. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2012, 13, 1782–1791.
14. Talebpour, A.; Mahmassani, H.S.; Bustamante, F.E. Modeling driver behavior in a connected environment: Integrated microscopic simulation of traffic and mobile wireless telecommunication systems. *Transp. Res. Rec.* 2016, 2560, 75–86.
15. Talebpour, A.; Mahmassani, H.S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2016, 71, 143–163.
16. Kesting, A.; Treiber, M. Influence of Reaction Times and Anticipation on the Stability of Vehicular Traffic Flow; IFAC: New York, NY, USA, 2006; Volume 6, ISBN 9783902661111.
17. Szalay, Z. Next generation X-in-the-loop validation methodology for automated vehicle systems. *IEEE Access* 2021, 9, 35616–35632.
18. Obaid, M.; Szalay, Z.; Török, Á. Reconsidering the cybersecurity framework in the road transportation domain. *Acta Polytech. Hung.* 2020, 17, 57–83. *Vehicles* 2021, 3 196

19. Rizopoulos, D.; Esztergár-Kiss, D. A method for the optimization of daily activity chains including electric vehicles. *Energies* 2020, 13, 906.

20. Jia, D.; Ngoduy, D. Enhanced cooperative car-following traffic model with the combination of V2V and V2I communication. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2016, 90, 172–191.

21. Ferreira, M.; D'Orey, P.M. On the impact of virtual traffic lights on carbon emissions mitigation. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2011, 13, 284–295.

22. Elhenawy, M.; Elbery, A.A.; Hassan, A.A.; Rakha, H.A. An Intersection Game-Theory-Based Traffic Control Algorithm in a Connected Vehicle Environment. In *Proceedings of the 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 15–18 September 2015*; pp. 343–347.

23. Calvert, S.C.; Klunder, G.; Steendijk, J.L.L.; Snelder, M. The impact and potential of cooperative and automated driving for intelligent traffic signal corridors: A field-operational-test and simulation experiment. *Case Stud. Transp. Policy* 2020, 8, 901–919.

24. Alkharabsheh, A.; Moslem, S.; Oubahman, L.; Duleba, S. An integrated approach of multi-criteria decision-making and grey theory for evaluating urban public transportation systems. *Sustainability* 2021, 13, 2740.

25. Zöldy, M. Fuel properties of butanol—Hydrogenated vegetable oil blends as a diesel extender option for internal combustion engines. *Period. Polytech. Chem. Eng.* 2019, 64, 205–212.

26. Suzuki, H.; Marumo, Y. A New Approach to Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) Systems for High-Density Traffic Flow. In *Proceedings of the 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, USA, 4–7 November 2018*; pp. 362–367.

27. 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.

28. Le Vine, S.; Wu, C.; Polak, J. A nationwide study of factors associated with household car ownership in China. *IATSS Res.* 2018, 42, 128–137.

29. Zöldy, M.; Szalay, Z.; Tihanyi, V. Challenges in homologation process of vehicles with artificial intelligence. *Transport* 2020, 35, 435–446.

30. Haboucha, C.J.; Ishaq, R.; Shiftan, Y. User preferences regarding autonomous vehicles. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2017, 78, 37–49.

31. Varga, B.; Szalai, M.; Fehér, A.; Aradi, S.; Tettamanti, T. Mixed-reality Automotive Testing with SENSORIS. *Period. Polytech. Transp. Eng.* 2020, 48, 357–362.

32. Kay, W.; Becker, F.; Axhausen, K.W. Predicting the use of automated vehicles [First results from the pilot survey]. In *Proceedings of the Institute for Transport Planning and Systems, Ascona, Switzerland, 17–19 May 2017*.

33. Xu, H.; Pang, J.-S.; Ordóñez, F.; Dessouky, M. Complementarity models for traffic equilibrium with ridesharing. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2015, 81, 161–182.

34. Ma, J.; Xu, M.; Meng, Q.; Cheng, L. Ridesharing user equilibrium problem under OD-based surge pricing strategy. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2020, 134, 1–24.

35. Ortega, J.; Tóth, J.; Péter, T.; Moslem, S. An integrated model of park-and-ride facilities for sustainable urban mobility. *Sustainability* 2020, 12, 4631.

36. Menon, N.; Barbour, N.; Zhang, Y.; Pinjari, A.R.; Mannering, F. Shared autonomous vehicles and their potential impacts on household vehicle ownership: An exploratory empirical assessment. *Int. J. Sustain. Transp.* 2018, 13, 111–122.

37. Pettigrew, S.; Dana, L.M.; Norman, R. Clusters of potential autonomous vehicles users according to propensity to use individual versus shared vehicles. *Transp. Policy* 2019, 76, 13–20.

38. Stoiber, T.; Schubert, I.; Hoerler, R.; Burger, P. Will consumers prefer shared and pooled-use autonomous vehicles? A stated choice experiment with Swiss households. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2019, 71, 265–282.

39. Mehar, A.; Chandra, S.; Velmurugan, S. Passenger car units at different levels of service for capacity analysis of multilane interurban highways in india. *J. Transp. Eng.* 2014, 140, 81–88.

40. Friedrich, B. The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic. In *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*; Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B., Winner, H., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016; pp. 317–334.

41. Wardrop, J.G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proc. Inst. Civil Eng.* 1952, 1, 325–362.

42. Piątkowski, B.; Maciejewski, M. Comparison of traffic assignment in visum and transport simulation in MATSim. *Transp. Probl.* 2013, 8, 113–120.

43. BKK Budapesti Közlekedési Központ Zrt. Budapest Transport Development Strategy; BKK Budapesti Közlekedési Központ Zrt: Budapest, Hungary, 2014.

44. Obaid, M.; Torok, A. Macroscopic Traffic Simulation of Autonomous Vehicle Effects. *Vehicles* 2021, 3, 187-196.  
<https://doi.org/10.3390/vehicles3020012>