

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення екомаршруту з використанням сучасних транспортних технологій

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МНм-61
спеціальності 275.03 Транспортні технології

(на автомобільному транспорті)

(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Коваль С.В. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Плекан У.М. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Плекан У.М. (прізвище та ініціали)
Зав. кафедри	(підпис)	Цьонь О.П. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	(прізвище та ініціали)

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання 11.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Коваль С. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Плекан У.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Коваль С. В. Розроблення екомаршруту з використанням сучасних транспортних технологій – Рукопис.

Кваліфікаційні робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 275.03 – транспортні технології (на автомобільному транспорті). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, – Тернопіль, 2024.

Робота присвячена розробці екомаршруту з використанням сучасних транспортних технологій. Дослідження спрямоване на створення методології вибору оптимальних маршрутів з урахуванням екологічних, соціальних та економічних факторів сталого розвитку.

Розроблено комплексну методику оцінки екомаршрутів з використанням ГІС, створено структуру моделювання для вибору найбільш сталого варіанту маршруту, запропоновано підхід до інтеграції екологічних факторів у системи інформації про дорожній рух.

Дослідження має важливе практичне значення для оптимізації міських транспортних потоків, зниження негативного впливу транспорту на довкілля, покращення безпеки дорожнього руху, впровадження принципів сталого розвитку в транспортну інфраструктуру.

Робота демонструє, що врахування факторів сталого розвитку при плануванні маршрутів може значно знизити негативний вплив транспорту на навколишнє середовище та якість життя міського населення

В розділі останньому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

ЕКОМАРШРУТ, СТАЛИЙ РОЗВИТОК, СУЧАСНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ГІС.

ABSTRACT

Koval S. V. Development of an eco-route using modern transportation technologies - Manuscript.

Qualifying work for the master's degree in the specialty 275.03 - transport technology (in road transport). - Ternopil Ivan Puluj National Technical University, - Ternopil, 2024.

The work is dedicated to the development of an eco-route using modern transportation technologies. The research focuses on creating a methodology for selecting optimal routes considering environmental, social, and economic factors of sustainable development.

A comprehensive methodology for evaluating eco-routes using GIS has been developed, a modeling structure for selecting the most sustainable route option has been created, and an approach for integrating environmental factors into traffic information systems has been proposed.

The research has significant practical importance for optimizing urban traffic flows, reducing the negative impact of transport on the environment, improving road safety, implementing sustainable development principles in transport infrastructure.

The work demonstrates that considering sustainability factors in route planning can significantly reduce the negative impact of transport on the environment and urban population's quality of life.

The final section addresses occupational safety and emergency situation management issues.

ECO-ROUTE, SUSTAINABLE DEVELOPMENT, MODERN
TRANSPORT TECHNOLOGIES, GIS

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	11
1.1. Автомобільний транспорт і його вплив на довкілля.....	11
1.2. Мета та завдання дослідження.....	12
1.3. Дослідження про стійкість.....	12
1.4. Недоліки автомобільного транспорту на стійкість.....	15
1.4.1. Споживання палива та забруднення повітря.....	15
1.4.2. Безпека.....	29
1.4.3. Шум.....	30
2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	33
2.1. Поняття про еко-маршрут.....	33
2.2. Дилеми вибору маршруту.....	34
2.3. Методика.....	36
2.3.1. Методологія дослідження еко-маршрутів.....	36
2.3.2. Розмежування та методологічні міркування.....	38
2.4. Пропонований робочий процес ГІС.....	42
2.4.1. Підготовка введення даних.....	42
2.4.2. Ударне моделювання.....	44
2.4.3. Міжударна накладка.....	48
3. ПРОЄКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ.....	50
3.1. Емпірична робота.....	50
3.1.1. Припущення та гіпотези.....	50
3.1.2. Емпіричний робочий процес ГІС.....	51
3.2. Результати.....	60
3.2.1. Емпіричні висновки.....	60
3.3. Обмеження та потенційні застосування.....	63
3.3.1. Обмеження запропонованої структури та робочого процесу моделювання ГІС.....	63
3.3.2. Обмеження емпіричної роботи.....	65

3.3.3. Потенційні застосування	68
3.4. Емпіричні висновки	69
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	72
4.1. Безпека праці при організації та моніторингу екомаршрутів з використанням ГІС-технологій	72
4.2. Безпека життєдіяльності при проектуванні та експлуатації екомаршрутів у міському середовищі	75
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	81
ДОДАТКИ.....	81
Додаток А.....	89

ВСТУП

У час, коли концепція сталого розвитку привертає все більше уваги серед громадськості, а також серед зацікавлених сторін і політиків, інформування людей про те, який вибір є найбільш стійким, має вирішальне значення для того, щоб вести людей у правильному напрямку.

Подорож — це діяльність, яка вимагає від мандрівника кількох варіантів, причому одним із виборів є вибір маршруту між двома місцями. Транспортний сектор також є значною причиною глобальних проблем, таких як зміна клімату, тому вибір, зроблений у зв'язку з транспортуванням, має велике значення для сталого розвитку.

До сьогодні більшість систем інформації про дорожній рух для користувачів легкових автомобілів надають мандрівникам лише пропозиції щодо найшвидшого або найкоротшого варіанту маршруту. Це дослідження має на меті запропонувати структуру моделювання з використанням програмного забезпечення ГІС, яка також може повернути найбільш стійку альтернативу маршруту.

Складність багатьох просторових впливів автомобільного транспорту детально обговорюється в огляді літератури разом із дилемами щодо поведінки вибору маршруту. Представлено пропоновану структуру моделювання, яка також досліджується емпірично як «доказ концепції». Емпірична робота проводиться в міському районі Хьорнефорс, Швеція, і результати підтверджують застосовність запропонованого робочого процесу.

У конкретному випадку в Тернополі досліджуються три різні варіанти маршруту по відношенню до чотирьох змінних впливу на стійкість. Досліджуваними змінними є споживання палива, забруднення повітря, шум і безпека. Результати показують, що, безумовно, найдовший маршрут, насправді повертається як найбільш стійкий варіант маршруту. Інші два варіанти маршруту демонструють вплив приблизно вдвічі більше, ніж найбільш стійкий. Узагальнена вартість сталого розвитку значною мірою визначається змінною забруднення повітря через її широкомасштабну

структуру просторового розсіювання, що створює вплив навіть на великій відстані від дороги.

Потенційне застосування включення стійкості в системи інформації про дорожній рух додатково розглядається відповідно до поведінкових механізмів, згаданих в огляді літератури. Також зроблені та оцінені оцінки того, в яких контекстах пропозиції щодо «найбільш стійкого маршруту» потенційно найімовірніше призведуть до змін у поведінці. Висновки свідчать про те, що включення моделювання «найбільш стійкого варіанту маршруту» в інформаційні системи подорожей має найвищий потенціал для впливу на вибір маршруту, коли користувач їде в місцях, які раніше не відвідував, через відсутність маршруту статус-кво в таких контекстах.

Актуальність дослідження: Зростаюча потреба в оптимізації транспортних маршрутів з урахуванням екологічних, соціальних та економічних факторів сталого розвитку. В умовах посилення уваги до проблем зміни клімату та якості життя міського населення, розробка методології вибору екологічно оптимальних маршрутів набуває особливого значення.

Мета роботи: Розробка структури моделювання з використанням ГІС-технологій для визначення найбільш екологічно сталого маршруту руху транспорту з урахуванням комплексу факторів впливу.

Об'єкт дослідження: Процеси організації та оптимізації транспортних маршрутів у міському середовищі з використанням сучасних транспортних технологій.

Предмет дослідження: Методи та засоби оцінки екологічної сталості транспортних маршрутів з використанням геоінформаційних систем.

Завдання дослідження:

- Провести аналіз сучасних методів оцінки впливу транспорту на довкілля
- Дослідити особливості моделювання транспортних потоків з використанням ГІС
- Розробити методику комплексної оцінки екомаршрутів
- Створити структуру моделювання для вибору оптимального маршруту

- Провести апробацію розробленої методології на прикладі конкретного маршруту

Методи дослідження:

- Методи геоінформаційного моделювання та аналізу
- Теорія нечітких множин для оцінки впливу різних факторів
- Методи математичного моделювання транспортних потоків
- Статистичні методи обробки даних
- Системний аналіз транспортних мереж

1. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Автомобільний транспорт і його вплив на довкілля

Автомобілі сьогодні стали справжньою проблемою для нашої планети. Вони не тільки псують довкілля, але й створюють реальні ризики для здоров'я людей і тварин через аварії, шум та світлове забруднення. Якщо подивитись на цифри, то транспорт "викидає" майже 25% всіх парникових газів у світі, і ледь частина цього (аж 80%) припадає саме на автомобілі.

Зараз, коли всі говорять про зміни клімату, люди все частіше замислюються над тим, як жити більш "зелено". Важливо розуміти, що навіть простий вибір маршруту поїздки впливає на довкілля та людей, які живуть біля доріг. Це допоможе нам робити кращий вибір щодня, особливо коли ми користуємося автомобілем.

Проблема вибору маршруту

Коли ми кудись їдемо, нам треба вирішити, яким шляхом дістатися до місця призначення. Сучасні навігатори, як-от Google Maps, зазвичай показують найшвидший або найкоротший шлях. Але уявіть, якби вони могли запропонувати ще й найбільш екологічний варіант?

Потреба в новому підході

Хоча вже є дослідження про еко-маршрути, які враховують витрати палива, досі ніхто не створив системи, яка б одночасно брала до уваги екологічні, соціальні та економічні фактори. Саме тому потрібно розробити новий підхід до оцінки впливу автомобільного транспорту на сталий розвиток. Це допоможе розширити наявну концепцію еко-маршрутів і зробити їх по-справжньому "зеленими".

1.2. Мета та завдання дослідження

Мета цього дослідження - з'ясувати, як можна використовувати геоінформаційні системи (ГІС) для аналізу та вибору найбільш екологічних маршрутів у міському середовищі. Розглянемо два ключові аспекти:

Використання ГІС для оцінки сталості маршрутів

ГІС дозволяє створювати комплексний аналіз транспортних маршрутів, враховуючи різні фактори:

- Планування й управління транспортною інфраструктурою
- Оцінку економічного та екологічного впливу транспорту
- Моніторинг дорожнього руху
- Оптимізацію маршрутів

Практичне застосування

Сучасні ГІС-технології дозволяють вирішувати транспортні завдання двома способами:

1. Удосконалення існуючих можливостей геоінформаційних систем з урахуванням специфіки транспортних даних
2. Розробка нових додатків на базі існуючих функцій ГІС для покращення:
 - Процесів перевезення
 - Планування маршрутів
 - Управління транспортними засобами

Для ефективного впровадження таких рішень необхідна тісна співпраця між фахівцями з ГІС та транспортних технологій.

1.3. Дослідження про стійкість

Концепція сталого розвитку стала однією з найважливіших парадигм сучасного світу. В її основі лежать три ключові компоненти, які нерозривно пов'язані між собою:

Економічна складова

Передбачає оптимальне використання обмежених ресурсів та застосування енергоефективних технологій. Основна мета - створення стабільного потоку доходів при збереженні сукупного капіталу.

В сучасних умовах особливого значення набуває розвиток "невагомої" економіки, заснованої на інформації та знаннях.

Екологічна складова

Спрямована на забезпечення цілісності та життєздатності природних систем. Ключовим аспектом є здатність екосистем до самовідновлення та адаптації, замість простого збереження у статичному стані.

Соціальна складова

Зосереджена на розвитку людського потенціалу, збереженні стабільності суспільних і культурних систем. Важливими елементами є справедливий розподіл благ, збереження культурного різноманіття та забезпечення широкої участі громадян у процесах прийняття рішень.

Успішна реалізація концепції сталого розвитку вимагає системного узгодження всіх трьох складових. Це складне завдання, яке потребує врахування взаємозв'язків між компонентами та забезпечення балансу між потребами сучасних і майбутніх поколінь.

Приклади різних малюнків, які зазвичай візуалізують концепцію сталого розвитку, що складається з трьох компонентів, показані на рисунку 1.1 нижче.

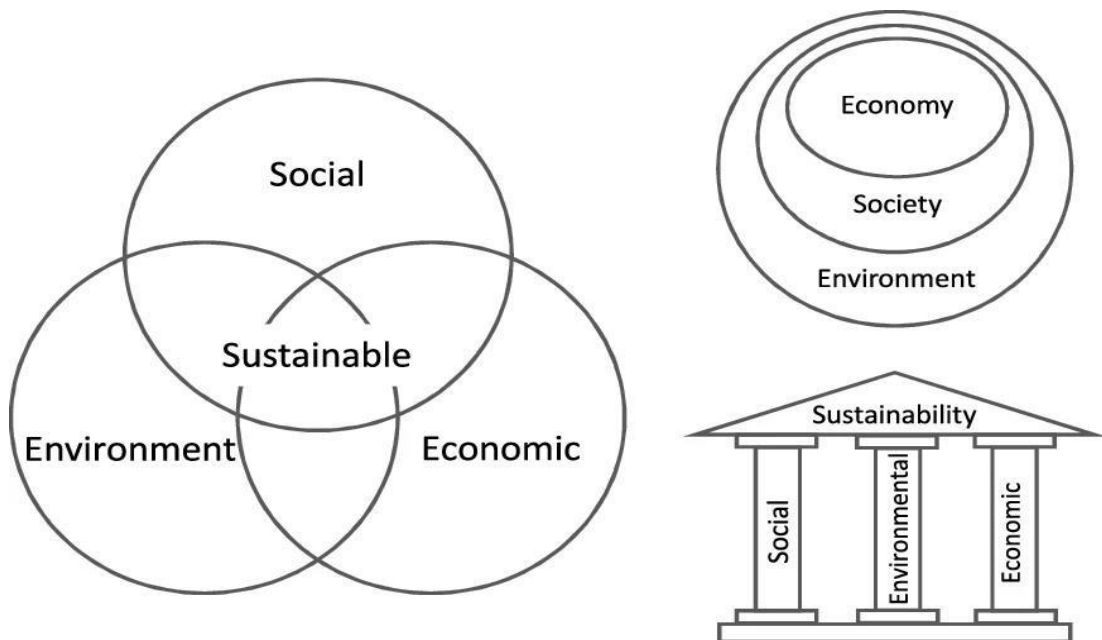


Рисунок 1.1 – Загальні візуалізації концепції сталого розвитку, що складається з трьох компонентів (Purvis, Mao & Робінсон 2019)

Концепція трьох стовпів сталого розвитку (екологічного, економічного та соціального) формувалася поступово, без чіткої відправної точки.

Її становлення відбувалося через два паралельні процеси:

Критика економічного зростання

В 1970-х роках з'явилася радикальна критика капіталістичної моделі економічного зростання, яка вважалася несумісною з екологічною та соціальною стійкістю.

Нафтова криза 1973 року та подальша світова рецесія допомогли закріпити ідею про обмеженість економічного зростання в академічному та суспільному дискурсі.

Переосмислення розвитку

Паралельно відбувалося переосмислення концепції розвитку через:

- Критику програм економічного розвитку за нехтування екологічними наслідками.
- Усвідомлення того, що обіцяний прогрес не призвів до подолання соціальної нерівності.

- Появу концепції "еко-розвитку", яка намагалася гармонізувати соціальні, економічні та екологічні цілі.

Таким чином, сучасне розуміння сталого розвитку як взаємодії трьох компонентів виникло в результаті тривалої еволюції поглядів на взаємозв'язок між економічним зростанням та екологічними й соціальними проблемами.

1.4. Недоліки автомобільного транспорту на стійкість

Було проведено багато досліджень стосовно впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище, наприклад забруднення повітря, споживання палива та фрагментації середовища проживання, а також деякі дослідження щодо шуму та питань безпеки, світлового забруднення, проблем вібрації та солі для боротьби з льодом (Klungboonkrong). & Taylor 1998; Phillips, Osborne & Gaston 2021).

1.4.1. Споживання палива та забруднення повітря

Теоретична витрата палива конкретним автомобілем є дуже складним питанням, і в літературі представлено низку різних моделей, за якими оцінюється витрата палива (KraschlHirschmann, Zallinger, Luz, Fellendorf & Hausberger 2011; Zhang, Wu & Chen 2021). Чжоу,

Jin & Wang (2016) класифікували змінні та фактори, що впливають на споживання палива одним автомобілем, на шість різних категорій: характеристики подорожі, транспортний засіб, погода, дорожня мережа, трафік і водій. Характеристики подорожі включають відстань і час, автомобіль включає такі речі, як двигун, швидкість і прискорення, а погодні фактори включають такі аспекти, як вітер, вологість і температура. Атрибути зв'язку, що стосуються дорожньої мережі, включають такі характеристики дороги, як рівень дороги, нерівність поверхні та горизонтальна кривизна. Категорія дорожнього руху включає транспортний потік, затори та сигналізацію, тоді як категорія водія фокусується на поведінці та агресивності водія під час водіння.

Факторами, які здебільшого наголошуються в літературі, є швидкість, час у дорозі, прискорення автомобіля, середня швидкість, розподіл швидкості та загальний час зупинки, також відомий як час простою (Kraschl-Hirschmann, Zallinger, Luz, Fellendorf & Hausberger 2011; Zhang, Wu & Chen 2021).

Різні моделі споживання палива використовують різні комбінації цих факторів у своїх розрахунках споживання палива, при цьому швидкість і прискорення є найбільш часто використовуваними. Обидві системи оцінки Ecomark і Ecomark 2.0, розроблені Гуо, Ма, Янгом, Дженсенем і Каулом (2012) і Гуо, Янгом, Андерсенем, Дженсенем і Торпом (2015a) відповідно, представляють ретельні огляди одинадцяти моделей оцінки споживання палива, де використовуються такі змінні, як швидкість і прискорення. Автори розділили моделі на дві основні категорії на основі їхніх модельних характеристик: миттєві моделі та агреговані моделі. Вони також оцінили зведені миттєві результати моделі та порівняли їх із результатами зведених моделей. Миттєві моделі вимагають у своїх розрахунках як значення прискорення, так і швидкості, тоді як більшість агрегованих моделей вимагають лише значення швидкості. Тільки агрегована модель Таварес розглядає дорожній клас. Загалом існують три різні рівні моделей, що оцінюють споживання палива та викиди транспортних засобів, а саме: мікроскопічне моделювання транспортного потоку та моделі миттєвих викидів, мезоскопічні моделі транспортної мережі та викидів, а також макроскопічні моделі інвентаризації (Kraschl-Hirschmann та ін. 2011; Guo et. 2012; Гуо та ін.

У дослідженні Joumard, Jost, Hickman & Hassel (1995) автори намагалися визначити найважливіші параметри транспортного засобу, коли йдеться про вплив на споживання палива та викиди легкових автомобілів, і відповідно розробили модель міських викидів. Вони згадують вік, розмір і тип двигуна як деякі з конкретних факторів автомобіля, що впливають на рівень викидів. Середня швидкість також сильно впливає на рівень викидів, а також на спосіб отримання середньої швидкості. Різні цикли водіння генерують різну кількість викидів, хоча середня швидкість може бути однаковою. Досягнення середньої

швидкості, отже, також має великий інтерес і важливе значення, оскільки прискорення є фактором, який найбільше впливає на споживання палива та викиди. Проте вплив прискорення та необхідна потужність двигуна також залежать від швидкості, з якою виконується прискорення. Швидкість і прискорення, таким чином, мають значення, і добуток цих факторів слід додати до середньої швидкості та параметрів транспортного засобу при оцінці рівнів викидів і споживання палива. Показано, що як збільшення швидкості, так і збільшення прискорення збільшують рівень викидів.

Вплив кільцевих розв'язок на навколишнє середовище було чітко висвітлено в Mandavilli, Rys, & Russell (2019), де вони досліджували вплив кільцевих розв'язок, які замінюють перехрестя з контрольованими зупинками, такі як світлофорні перехрестя та знаки зупинки. Традиційні перехрестя вимагають від водія сповільнювати швидкість і зупинитися, що сприяє підвищенню рівня викидів і збільшенню споживання палива, ніж коли час простою мінімізується. Перехрестя з круговим рухом мають набагато більше можливостей скоротити час простою та покращити транспортний потік, отже потенційно є кращою альтернативою, ніж світлофори, щодо рівня викидів та споживання палива. Дослідження Mandavilli et al. (2019) проаналізували вплив кільцевих розв'язок і традиційних перехресть на навколишнє середовище, в основному дивлячись на рівень викидів, однак, згідно з розрахунками, проведеними Patella, Scrucca, Asdrubali & Carrese (2019), рівень викидів і споживання палива корелюють. Чотири типи викидів, проаналізовані Mandavilli та ін. (2019) були НС (вуглеводні), СО (монооксид вуглецю), NO_x (оксиди азоту) і CO₂ (вуглекислий газ). Інші викиди від транспортних засобів – це переважно PM₁₀ (тверді частки), SO_x (оксиди сірки) та леткі органічні сполуки. Основна проблема традиційних перехресть, яку піднімають автори, полягає в тому, що світлофори чи знаки зупинки завжди ставлять водіїв у чергу. Це, як правило, призводить до більшої сумарної кількості викидів і споживання палива, ніж для традиційних перехресть, замінених кільцевими розв'язками, які, порівняно, створюють черги лише в години пік, коли виникають затори (Crown 2001; Mandavilli et al. 2019).

Використовуючи для аналізу програмне забезпечення SIDRA, Mandavilli et al. (2019) виявили, що кільцеві перехрестя значно покращили транспортний потік, зменшивши затримки, черги та зупинки. В результаті цього кільцеві розв'язки зменшили всі чотири типи вимірних викидів порівняно з заміненними традиційними перехрестями. Зниження CO складо 21-42%, CO₂ 16-59%, NO_x 20-48%, HC 18-65%. Усі зменшення викидів були статистично значущими, і покращення транспортного потоку виявилось ключем до зниження викидів. Ці результати узгоджувалися з висновками британського експерта з кругових перехресть Баррі Крауна (2001), який заявив, що «коли транспортні засоби простоюють у черзі, вони викидають приблизно в 7 разів більше CO, ніж транспортні засоби, які рухаються зі швидкістю 10 миль/год. Викиди від зупиненого транспортного засобу приблизно в 4,5 рази більші, ніж від автомобіля, що рухається зі швидкістю 5 миль на годину». Крім того, Mustafa, Mohammed & Vougiaris (1993) зазначили, що світлофори можуть генерувати на 50% вищі викиди, ніж кругові перехрестя.

Ehmke, Campbell & Thomas (2016) наголошують на переконанні, що рівень викидів транспортних засобів залежить від часу та трафіку через те, що швидкість не завжди є детермінованою та змінюється залежно від умов руху та часового контексту. Швидкість і викиди є нелінійними у зв'язку, причому викиди вищі як на низьких, так і на високих швидкостях (Demir, Bektas & Laporte 2011).

При розгляді поведінки водіння, наприклад еко-водіння, важливо, чи існують припущення про вільний рух транспорту, оскільки вплив екологічного водіння на навколишнє середовище залежить від умов дорожнього руху (Alam & McNabola, 2018). Еко-водіння зазвичай застосовується для зменшення викидів CO₂ і споживання палива, і присутнє в ряді національних політичних документів щодо стратегій запобігання зміні клімату. Основою поведінки екологічного водіння є те, що прискорення та прискорення розглядаються та виконуються таким чином, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище. Наприклад, більш плавний стиль водіння зменшує викиди в порівнянні зі стилем водіння з різким прискоренням і

гальмуванням (Sivak & Schoettle 2012). Хоча загальне припущення полягає в тому, що екологічне водіння завжди є хорошою стратегією водія, Алам і Макнабола (2018) показали, що це не так. Там, де інтенсивний трафік, екологічне водіння потенційно може призвести до негативних наслідків у вигляді вищих загальних викидів мережі та споживання палива. Еко-водіння в умовах перевантажених доріг збільшує затори, і в результаті цього також збільшується загальний час водіння транспортних засобів у мережі. Прикладом наслідків, спричинених екологічним водінням, є те, що менше автомобілів пропускають на перехрестя з сигналом, що призводить до збільшення часу повної зупинки або простою. Таким чином, індивідуальні переваги екологічного водіння нівелюються і навіть перетворюються на негативні наслідки для мережі в цілому, з точки зору викидів і споживання палива. Екологічне водіння в перевантажених мережах також спричиняє активнішу зупинку та рух, що, як було доведено, збільшує споживання палива та викиди (Barth & Boriboonsomsin 2009; Alam & McNabola 2014). За даними Sivak & Schoettle (2012), у неперевантажених мережах екологічне водіння потенційно може зменшити споживання палива на 5-30% у порівнянні з неекологічним водінням.

Як типи доріг, характеристики водіїв і транспортних засобів впливають на звички водіння людей, було додатково досліджено Brundell-Freij & Ericsson (2005). Мета полягала в тому, щоб отримати більше розуміння та знань про змінні, які впливають на поведінку кожного водія. З моделями водіння вони посилалися на швидкість, прискорення, вибір передач тощо. Автори також намагалися кількісно визначити загальний ступінь, до якого кожна змінна впливає. У Ericsson (2001) було показано, що дев'ять факторів, які впливають на багатовимірне явище моделей водіння, також мають значний вплив на викиди та/або споживання палива. Для аналізу Brundell-Freij & Ericsson (2005) були обрані сім із них, які мають значний вплив, а саме: прискорення, що потребує великої потужності, стоп-фактор (% часу швидкості становить <2 км/год), коефіцієнт коливань швидкості, екстремальний коефіцієнт прискорення (% або час при прискоренні понад $1,5 \text{ м/с}^2$, пізніє перемикання

передач з 2-ї та 3-ї передач, частоти обертання двигуна >3500 об/хв та помірні обороти двигуна на 2-й та 3-й передачах. Середня швидкість була додатково обрана для аналізу. Незалежні змінні, що описують характеристики водія, вуличне середовище та дизайн вулиці, також були вибрані для подальшого аналізу, а саме вік, стать, характеристики автомобіля, тип району, функція вулиці, обмеження швидкості, кількість смуг, щільність несвітлофорів розв'язки, щільність світлофорних розв'язок та інтенсивність руху.

Дослідження показало, що вуличне середовище, наприклад кількість перехресть, обмеження швидкості, функція вулиці та тип району, найбільше впливає на поведінку. Характеристики транспортного засобу показали «досить великий» вплив, і єдиною суттєвою змінною характеристики водія, яка впливала на поведінку водіїв, здавалося, був вік, зі зниженням середньої швидкості та збільшенням часу зупинки на магістралях для літніх водіїв. Тим не менш, було показано, що єдиною змінною, що надає найбільшу пояснювальну силу моделі водіння, є середня швидкість (Brundell-Freij & Ericsson 2005).

Таким чином, на думку авторів, найбільш релевантні змінні характеристики вуличного середовища з точки зору впливу на споживання палива та викиди транспорту слід класифікувати наступним чином:

- Тип мікрорайону – КБР, житлова забудова, інші райони
- Вуличне призначення – місцеві вулиці, інші вулиці
- Обмеження швидкості – 90 км/год, нижні межі
- Щільність світлофорів – немає, інтервал більше 200м, більші інтервали

Для великих міст слід також враховувати обсяг трафіку (Brundell-Freij & Ericsson 2005).

Оптимізацію маршруту з метою зменшення споживання палива розглянули Ericsson, Larsson & Brundell-Freij (2006) у дослідженні, проведеному в Лунді, Швеція. Їхня мета полягала в тому, щоб оцінити здатність до зниження споживання палива, а також, як наслідок, здатність до зменшення викидів CO₂ шляхом оптимізації вибору маршруту за допомогою

навігаційної системи. Вони також вивчили екологічний потенціал використання транспортних засобів-зондів, які надають водіям дані про дорожній рух у реальному часі. Потенціали були виділені шляхом порівняння найкоротших і найшвидших маршрутів із маршрутом із найменшим споживанням палива за допомогою розширення ArcGIS Network Analyst. Вони виявили середній потенціал зниження споживання палива на 8,2 % для водіїв, які зараз не обирають найбільш економічний варіант маршруту. Крім того, у цьому дослідженні економія часу на 8,5% також була б результатом, якби використовувався найбільш економічний маршрут. Це вказує на те, що хоча найшвидший маршрут не був найбільш економічним, найбільш економічний маршрут також у середньому заощадив би час водія. Оскільки частота подій, що заважають руху, була низькою в досліджуваному районі, використання транспортних засобів-зондів для отримання інформації про дорожній рух у реальному часі не дало значної економії палива. Проте у великому місті з великими пробками автори заявили про потенційну здатність скорочувати паливо за допомогою дослідних транспортних засобів.

На основі попередніх досліджень Ericsson (2001) і Brundell-Freij & Ericsson (2005) було виконано класифікацію типів вулиць (Ericsson та ін. 2006). Було враховано п'ять різних статичних факторів, що призвело до 22 різних типів вулиць.

Факторами були:

- Функція вулиці (головна дорога, проїзна дорога, місцева дорога)
- Тип середовища (центр міста/центральний діловий район, житлові райони, інші райони)
- Обмеження швидкості
- Щільність перехресть, що контролюються світлофорами (немає, відрізки довше 200 м між двома такими перехрестями або відрізки довше 100 м між одним таким перехрестям та іншим перехрестям, відрізки коротше 100 м між одним таким перехрестям та іншим або відрізки менше 200 м між двома таких розв'язки)
- Заходи з уповільнення руху (з, без)

Після цього споживання палива було оцінено для кожного типу вулиці відповідно до моделей водіння, пов'язаних з кожним класом вулиці. Середнє споживання палива, виміряне в літрах/кілометр транспортного засобу, було розраховане для кожного класу, відповідно для годин пік і годин поза піком. 22 типи вулиць представлені на рисунку 1.2 нижче.

Деякі загальні спостереження дослідження показали, що сегменти з високою щільністю контрольованих світлофорами перехресть, як правило, споживають більше палива. Крім того, CBD та місцеві вулиці мали вищі показники споживання палива, ніж основні дороги, ймовірно, через різницю, наприклад, у смузі проїзду. Слід також помітити, що не лише середні значення споживання палива на різних вулицях можуть бути релевантними, але й діапазон, у якому значення споживання палива коливаються (Ericsson та ін. 2006).

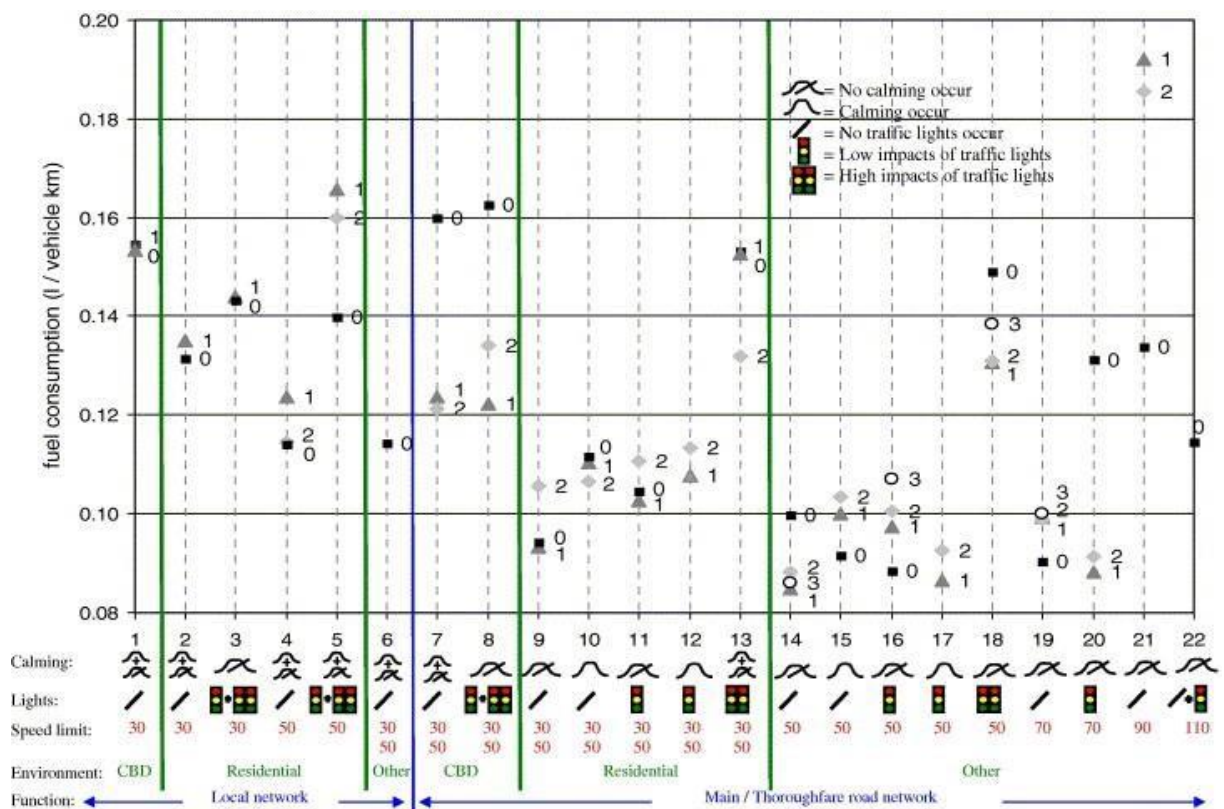


Рисунок 1.2 – Типи вулиць за класифікацією Ericsson та ін. (2006)

Традиційно середня швидкість була основним фактором, коли мова йде про споживання палива та оцінки викидів, а також розрахунки для великих

мереж. У статті Smit, Poelman & Schrijver (2008) вони досліджували, чи приведе врахування розподілу середньої швидкості замість цього до інших і більш точних оцінок. Їхні висновки показали, що використання традиційної середньої швидкості зазвичай недооцінює загальні викиди мережі, порівняно з використанням розподілу середньої швидкості, який дає більш реалістичні оцінки. Крім того, використовуючи одну середню швидкість, оцінка викидів має тенденцію бути більш чутливою до точності оціненої середньої швидкості, ніж коли використовуються розподіли середньої швидкості. Розподіл середньої швидкості явно не охоплює динаміку поведінки водіння, таку як постійна швидкість або значні коливання, але у великих мережах це неявно охоплюється. Однак для менших мереж це означає помилку.

Зв'язок між забрудненням повітря та ризиком впливу на здоров'я людей було зроблено в ході кількох досліджень. Астма, рак легенів, деменція та низка серцево-судинних захворювань були виявлені серед людей, які зазнали впливу підвищеного рівня забруднення повітря, при цьому діти були особливо чутливими (Lindgren та ін. 2009a; Lindgren та ін. 2009b; HEI 2010; Bowatte та ін., 2018; BOO3, 2018).

Оцінка викидів була темою дослідження, проведеного Kraschl-Hirschmann та ін. (2011). Через швидку зміну технології двигунів автомобілів, наприклад, автоматичний старт-стоп і зростаючий парк електричних і гібридних транспортних засобів, автори відзначили, що прогнозування викидів стає дедалі складнішим і складнішим. Їхнє дослідження мало на меті дослідити вплив різних стратегій керування дорожнім рухом на викиди транспорту за допомогою інструментарію моделювання, що поєднує симулятор VISSIM і миттєву модель викидів PHEM. Набір інструментів дає змогу оцінювати споживання палива та викиди на мікроскопічному рівні, моделюючи різні сценарії руху.

Падро-Мартінес та ін. (2012) у 2009-2010 роках провели мобільний моніторинг часток і забруднювачів повітря в міському районі поблизу шосе в Сомервіллі, США. Моніторинг проводився протягом 58 днів протягом одного року, в різних метеорологічних умовах, в різний час доби і в різні дні тижня, в

різних умовах руху і протягом усіх чотирьох сезонів. Були проведені вимірювання концентрації часток (PNC), розподілу частинок за розміром, маси дрібних частинок (PM_{2,5}), пов'язаних із частинками поліциклічних ароматичних вуглеводнів (рПАН), сажі (BC), монооксиду вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO і NO_x). У своєму дослідженні автори також розглянули, а в статті обговорили кореляцію між деякими забруднювачами повітря. Вони також визнали той факт, що в містах існують фонові рівні забруднення.

Найвищі концентрації забруднювачів повітря та часток були виміряні в межах 50-метрового буфера від досліджуваного шосе, і залежно від погоди та інтенсивності руху градієнти функції зменшення відстані змінювалися. Найбільш чіткі варіації концентрацій спостерігалися для PNC. Рівні PNC були, як правило, вищими в будні, суботи та взимку, і нижчими в неділю, а також влітку та восени. Крім того, вищі концентрації були виявлені в ранкову годину пік, ніж пізніше вдень. Для решти забруднювачів повітря були виявлені аналогічні тенденції зміни, за винятком PM_{2,5}. Стосовно просторових варіацій у градієнтах функції розпаду відстані, було показано, що вони нерівномірні (Padró-Martínez et al. 2012). Результати моніторингового дослідження були представлені на кількох малюнках, які показують, як різні типи забруднювачів повітря розпадаються з відстанню, і як ці градієнти функції розпаду змінюються залежно від сезону, дня тижня та часу доби. Форма цих кривих відстань-розпад буде включена в оцінку просторового впливу забруднення в поточному дослідженні. На рисунку 1.3 показано показники розпаду викидів NO_x, тоді як решта цифр Padró-Martínez et al. (2012) розміщено в додатку.

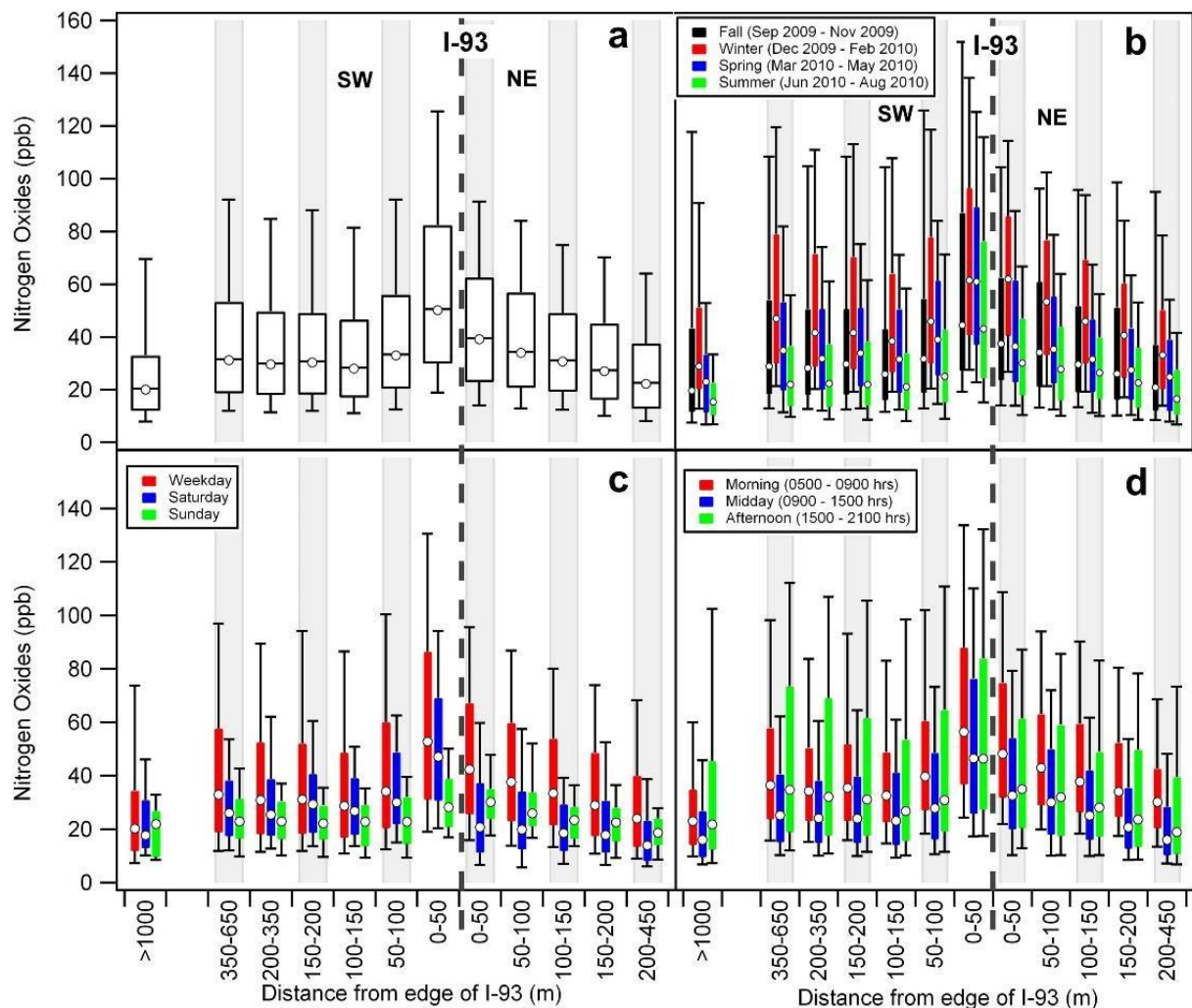


Рисунок 1.3 – Рівні викидів NO_x на різних відстанях від шосе I-93, протягом різних сезонів, днів тижня та часу доби (Padró-Martínez et al. 2012)

Асиметричні градієнти затухання на північно-східній і південно-західній стороні шосе, ймовірно, відображають відмінності в місцевому вуличному русі з кожної зі сторін, а також характер вітру. Що стосується розподілу частинок за розміром, результати моніторингу не виявили суттєвих відмінностей розподілу частинок за розміром ні в часі, ні в залежності від відстані від шосе (Padró-Martínez et al. 2012).

Як результати Padró-Martínez et al. (2012) показали, що вплив дорожнього руху виникає не лише в безпосередній близькості від дороги, а й утворює зону впливу на дорогу, яка простягається на різні відстані для різних впливів (Phillips et al. 2021). Слід, однак, знати, що інтенсивність ударів залежить від відстані, оскільки просторовий розподіл є нерівномірним і що

ослаблення відбувається з віддаленням від дороги. У дослідженні Філіпса та інших (2021) досліджено спад різних викидів дорожнього транспорту у Великобританії, а саме: викиди світла, шуму, важких металів (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), NO₂, PM_{2,5} і PM₁₀. За оцінками, зона впливу доріг у Великій Британії, враховуючи досліджені викиди, охоплює понад 70% усієї країни, і оскільки покриття доріг становило лише менше 1%, це чітко вказує на те, що дороги справляють великий просторовий вплив. Незважаючи на те, що найвищий рівень забруднення спостерігався найближче до найбільш завантажених доріг, низькі рівні викидів, потенційно спричиняючи значний вплив на людей і навколишнє середовище, були виявлені на набагато більших відстанях.

Послаблення викидів залежить як від типу забруднювача та обсягів руху, а також від того, чи складаються вони з енергетичних хвиль чи речовини. Світлове та шумове забруднення є прикладами викидів енергетичних хвиль, тоді як тверді частинки, метали та хімічні забруднювачі повітря складаються з речовини. Енергетичні хвилі поширюються через вібрацію з типом зворотного розпаду, тоді як забруднення, що містять речовину, транспортуються через дифузію з експоненціальним типом затухання (Attenborough 2014; Karner, Eisinger & Niemeier 2010; Forman et al. 2003).

У моделюванні Phillips et al. (2021), забруднення доріг зменшилося до нуля, а не до фонових рівнів, оскільки фонові рівні віднімали від потужності джерела забруднення. Причиною цього був винятковий інтерес до специфічних рівнів викидів на дорозі. Оскільки рівень забруднення доріг тісно пов'язаний з інтенсивністю руху, відносна потужність джерела забруднення була розрахована для кожного типу доріг. Автори зробили припущення та спрощення щодо моделювання окремих забруднюючих речовин через складність змінних, що залежать від простору та часу. Отже, середні значення були використані в часі та просторі. Вони визнали це обмеженням дослідження, оскільки як час, так і простір, а також метеорологічні умови сильно впливають на значення викидів. Крім того, у дослідженні не розглядалися функції пом'якшення викидів, такі як рослинність, рельєф або

бар'єри, а також вплив потоків на транспортування забруднення (Phillips et al. 2021).

Щоб знайти значення параметрів кожного типу джерела забруднювача, рівня фону, швидкості розпаду та зв'язку з інтенсивністю руху, які використовуються для розрахунку просторових розподілів, Phillips та ін. провели пошук літератури. (2021). У деяких випадках швидкість розпаду потрібно було оцінити на основі інформації про рівень забруднення на різних відстанях, а в деяких випадках потрібно було припустити силу джерела.

Просторовий розподіл забруднення речовиною було представлено у вигляді рівнів, що відповідають конкретним порогам залишкової частки потужності джерела на автомагістралях. Порогові значення становили 50%, 25%, 10%, 1% і 0,1%, і хоча 0,1% здається малим, для металів це дорівнює рівням, подібним до максимальних рекомендацій для питної води. Для забруднення енергетичними хвилями порогові значення становили 10%, 1%, 0,1%, 0,01% і 0,001%, оскільки логарифмічна шкала краще відображає зміни в рівнях світла та шуму, які сприймаються людьми та тваринами. 0,001% потужності джерела світла відповідає світлу повного місяця, тоді як 0,001% потужності джерела шуму дорівнює 30 дБ, що відповідає рівню, вище якого сон людини може бути перерваний. Рівні забруднення вище найнижчого порогу, 0,1% і 0,001% відповідно, вважалися підвищеними (Phillips et al. 2021).

Забруднювачі доріг виникають не лише від викидів транспортних засобів, але й від фізичного водіння дорогою, оскільки частинки також виділяються з самої дороги та від операцій з управління дорогами, таких як видалення льоду доріг сіллю. Все це призводить до взаємозв'язку між потужністю джерела забруднення та інтенсивністю руху на конкретній дорозі, але сила зв'язку різна для забруднювачів (Forman et al. 2003).

Літературні дані про те, як зміни швидкості на дорозі впливають на різні типи рівнів забруднення повітря, дуже суперечливі. Результати деяких досліджень показали, що концентрація викидів зростає, коли швидкість зменшується (Federal Highway Administration 2000; Gatley, Hutyra, Peterson & Wing 2017; Tang, McNabola, Misstear, Pilla & Alam 2019), деякі дослідження

показали, що зниження швидкості призводить до нижчих рівнів викидів (Keuken et al., 2008; Wilmink & Wesseling 2010; Madireddy et al 2011), тоді як деякі дослідження не виявили істотного зв'язку між рівнями забруднення та швидкістю (Bel, Bolancé, Guillén & Rosell 2015; Folgerø, Harding & Westby 2020).

У HEI (2010) обговорюється складність встановлення єдиної функції відстані загасання з точки зору погодних умов, таких як вітер, що сильно впливає на швидкість розсіювання. У певний момент відстань у 500 метрів згадується як загальна відстань розсіювання в денних умовах, тобто рівні викидів досягають фонових рівнів викидів на цій відстані. Однак в інших розділах книги згадується багато інших дистанцій, як довших, так і коротших, у діапазоні від 30 м до 1500 м. У Gilbert, Woodhouse, Stieb & Brook (2003) було показано, що концентрація NO₂ знижується найшвидше в межах 200 м від шосе, і тому, що градієнти розпаду NO₂, VOC і UFP (ультрадисперсних частинок) демонструють подібні закономірності в дослідженні. Beckerman et al. (2008), модель зменшення відстані NO₂ може використовуватися як проксі для загальної функції зменшення відстані викидів.

Ghafghazi & Hatzopoulou (2014) змоделювали вплив на навколишнє середовище різних типів заходів із заспокоєння дорожнього руху за допомогою мікроскопічного моделювання викидів у місті Монреаль, Канада. Метою заходів з уповільнення дорожнього руху є, головним чином, підвищення безпеки пішоходів і велосипедистів, і вони можуть бути або фізичними бар'єрами, такими як лежачі поліцейські та лежачі поліцейські, або керування швидкістю, або їх поєднання (Lockwood 1997). Мета авторів полягала в тому, щоб кількісно визначити вплив як на рівні зв'язку, так і на рівні мережі, а також дослідити вплив ізольованих заходів на рівні коридору та схем заспокоєння на території всієї території (Ghafghazi & Hatzopoulou 2014).

Їхні висновки показали, що вздовж окремих коридорів із заходами щодо заспокоєння руху можна відчувати локальне збільшення рівня викидів до 83%. Схоже, що це відбувається, навіть якщо заходи зі зменшення трафіку певною

мірою зменшують загальний трафік у цьому коридорі через те, що коридори зі сповільненим трафіком є більш непривабливими, ніж коридори без них. Рівень викидів CO₂ на кілометри, пройденого транспортним засобом (VKT), таким чином, зростає, і причиною цього збільшення, згідно з Ghafghazi & Hatzopoulou (2014), повинні бути зміни в циклах водіння, з більш частими коливаннями швидкості, що призводить до збільшення прискорень і деакселерації.

1.4.2. Безпека

Безпека на дорогах залишається одним з найважливіших питань автомобільного транспорту. Вона стосується не лише водіїв та пасажирів, але й усіх учасників дорожнього руху - від пішоходів до велосипедистів.

Фактори безпеки руху

Інфраструктурні рішення

Кругові розв'язки довели свою ефективність як один з найбезпечніших способів організації перехресть. Вони значно знижують ризик серйозних аварій порівняно зі звичайними перехрестями.

Швидкісний режим

Зниження швидкості навіть на 1,61 км/год зменшує ймовірність аварії на 5%. Це пов'язано з кількома факторами:

- Краща контрольованість автомобіля
- Зменшення інтенсивності трафіку
- Підвищена уважність водіїв

Суспільні витрати

Дослідження в місті Патри виявило цікаву залежність між швидкістю руху та суспільними витратами:

- При швидкості менше 18 км/год суспільні витрати надзвичайно високі через збільшення часу подорожі
- Оптимальним є рух зі швидкістю понад 18 км/год при помірному гальмуванні

- При високих швидкостях та різкому прискоренні зростають екологічні витрати, що призводить до збільшення загальних суспільних витрат
- Загальна вартість транспортування включає чотири ключові компоненти: витрати палива, забруднення довкілля, аварійність та час у дорозі.

1.4.3. Шум

Шумове забруднення від автотранспорту є однією з ключових проблем міського середовища (Klungboonkrong & Taylor, 1998; Andersson et al., 2020; Lan & Cai, 2021).

Кругові розв'язки як засіб зменшення шуму

Кругові розв'язки виявилися ефективним методом зниження шумового навантаження завдяки оптимізації транспортного потоку (IHS, 2001). Вони не тільки зменшують рівень шуму, але й сприяють зниженню забруднення та економії палива.

Ключові фактори шумового забруднення

Дослідження Lan & Cai (2021) виявило, що основними чинниками, які впливають на рівень шуму від транспортних засобів, є:

- Інтенсивність транспортного потоку
- Швидкість руху

При цьому швидкість руху на певній ділянці дороги може опосередковано вказувати на рівень шумового забруднення.

Оцінка рівнів шуму

Murphy & King (2016) представили графік, який демонструє оцінені рівні шуму від дороги на відстані 15 м від джерела. Ця інформація, що базується на даних Федеральної адміністрації автомобільних доріг (1998), стала основою для аналізу просторового впливу шуму в емпіричній частині дослідження.

Розуміння факторів, що впливають на рівень шумового забруднення, та використання ефективних інфраструктурних рішень, таких як кругові розв'язки, може значно покращити акустичну ситуацію в міських районах.

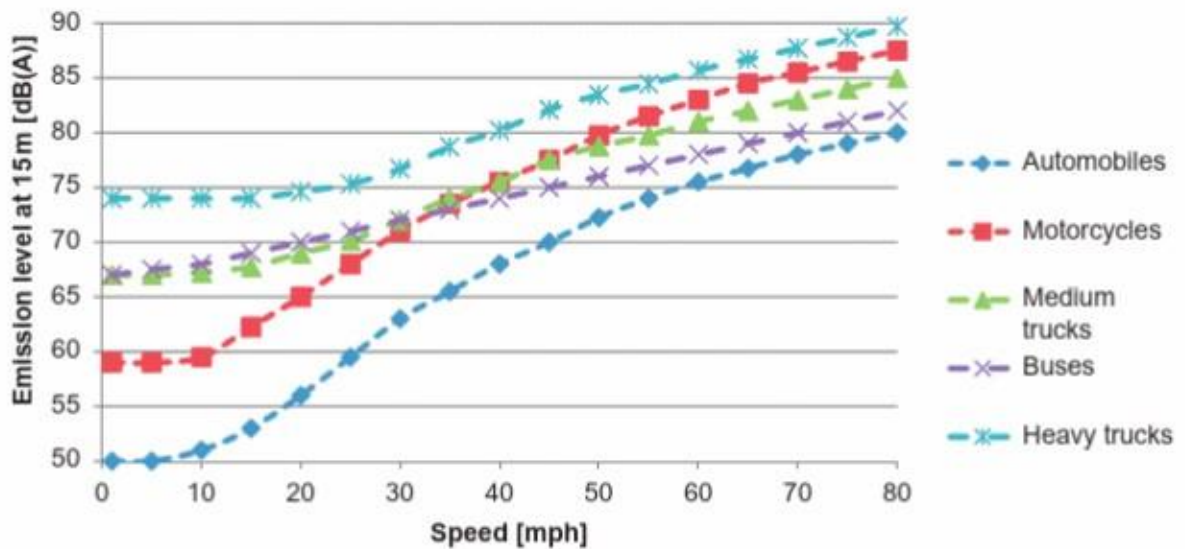


Рисунок 1.4 – Рівні шуму на відстані 15 м від дороги, на різних швидкостях і для різних типів транспортних засобів

Джерело: (Murphy & King, 2016, с. 187).

Розраховане ослаблення шуму може бути засноване на вимірюваннях рівня шуму ACS Nordic AB (nd), відповідно до того, що доступно на рисунку 1.5.

m	dB																											
1	65	70	75	80	85	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130		
2	59	64	69	74	79	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120	122	124		
3	55	60	65	70	75	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120		
5	51	56	61	66	71	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116		
10	45	50	55	60	65	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110		
20	39	44	49	54	59	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104		
30	35	40	45	50	55	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100		
50	=	36	41	46	51	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96		
100		=	=	40	45	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90		
200				=	39	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84		
300					=	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80		
500						=	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76		
1000							=	=	=	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70		
2000								=	=	=	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64				
3000													=	=	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60		
5000															=	=	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56		

Рисунок 1.5 – Шумопоглинання (ACS Nordic AB, nd).

Масштабне дослідження шведських науковців (Andersson et al., 2020) охопило період з 1970 по 2011 рік, вивчаючи вплив екологічних факторів на здоров'я чоловіків віком 47-55 років.

Дослідники зосередились на впливі транспортного шуму на серцево-судинну систему, враховуючи також забруднення повітря. Як індикатор забруднення використовувався оксид азоту (NO_x), який є надійним показником транспортного забруднення повітря, особливо щодо PM_{2.5} (Beckerman et al., 2008; Kwasny, Madl & Гофманн, 2010).

Stansfeld (2015) виявив, що шум і забруднення повітря мають незалежні ефекти впливу на здоров'я. Brook et al. (2010) визначили основні механізми впливу:

Шумове забруднення:

- Психологічний стрес
- Порушення сну

Забруднення повітря:

- Локальне запалення
- Системне запалення низького ступеня

Дослідження Andersson et al. (2020) виявило:

- Підвищений ризик серцево-судинних захворювань при рівні шуму понад 60 дБ
- Зв'язок між шумовим забрудненням та серцево-судинними захворюваннями (включаючи смертність, ішемічну хворобу серця та інсульт)
- Незначне, але статистично значуще збільшення ризику при тривалому впливі транспортного шуму

2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Поняття про еко-маршрут

Концепція еко-маршрутів представляє інноваційний підхід до вибору оптимальних маршрутів з урахуванням екологічних факторів.

Основні концепції

Еко-маршрут - це підхід, що дозволяє водіям обирати найбільш екологічно чисті маршрути, враховуючи такі фактори як споживання палива та викиди транспортних засобів (Hu, Yang, Jensen & Ma, 2017).

Системи еко-маршрутизації

EcoTour

Система, розроблена Andersen, Jensen, Torp & Yang (2013), використовує GPS та дані про споживання палива для:

- Визначення найекономнішого маршруту
- Пошуку найшвидшого шляху
- Розрахунку найкоротшого маршруту

EcoSky

Розширена система (Guo, Yang, Andersen, Jensen & Torp, 2015b) пропонує три типи еко-маршрутів:

- Базові (оптимізація споживання палива)
- Горизонтальні (врахування часу та відстані)
- Персоналізовані (на основі поведінки водія)

Обробка неповних даних

Yang, Kaul & Jensen (2014) запропонували методи роботи з неповною інформацією через:

- Використання пар "поїздка-вартість"
- Застосування сегментних моделей
- Впровадження моделей відключення

Ці системи демонструють значний потенціал для зниження екологічного впливу транспорту через оптимізацію маршрутів.

2.2. Дилеми вибору маршруту

Системи підтримки вибору маршруту

Удосконалені інформаційні системи подорожей (ATIS), включаючи Google Maps, надають комплексну підтримку в плануванні маршруту. Вони не лише допомагають знайти шлях між точками, але й забезпечують актуальною інформацією про затори та інші перешкоди (Ben-Elia, Erev & Shiftan, 2008; Ben-Elia, Di Pace, Bifulco & Shiftan, 2013).

Типи інформаційної підтримки

ATIS надає три види інформації:

- Описову (стан доріг)
- Інструкційну (вказівки щодо руху)
- Зворотний зв'язок (час у дорозі, альтернативні маршрути)

Теоретичні засади

Schneider (2013) розробив "Теорію рутинних рішень щодо вибору способу подорожі", яка пояснює процес прийняття рішень при виборі транспорту. Хоча теорія спочатку розроблялася для вибору виду транспорту, її принципи успішно застосовуються і для моделювання вибору маршруту.

На рисунку 2.1 нижче представлено структуру.

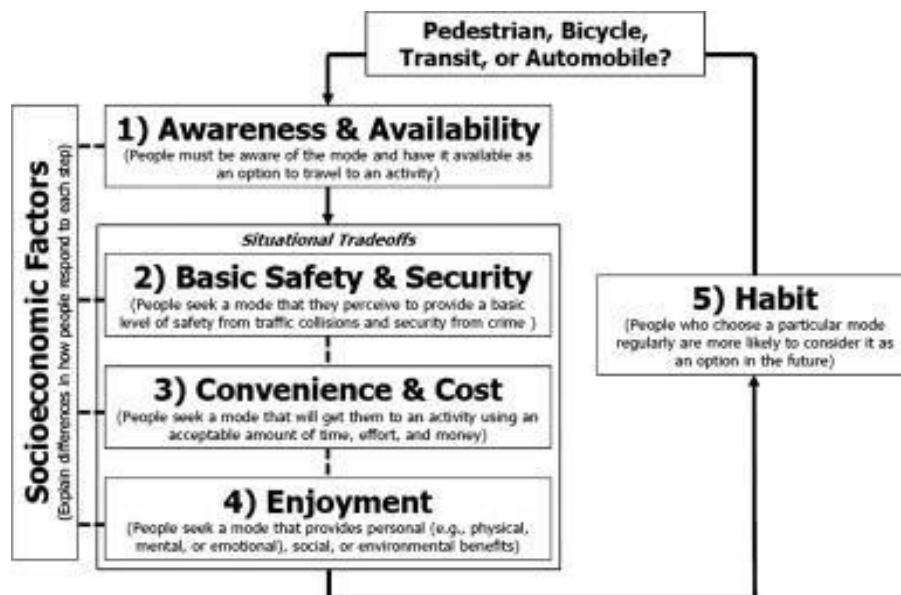


Рисунок 2.1 – Запропонована теорія рішень про вибір звичайного режиму (Schneider 2013)

Раціональність у виборі маршруту

Традиційно вважалося, що водії завжди обирають оптимальний маршрут з найменшим опором (Wardrop, 1952; Sheffi, 1984; Ben-Akiva & Lerman, 1985). Однак дослідження показують, що значна частина людей не обирає найкоротший шлях (Simon, 1957; Morikawa et al., 2005).

Обмежена раціональність

Люди частіше шукають задовільне, а не ідеальне рішення через:

- Брак повної інформації
- Складність ситуації
- Обмеження когнітивних ресурсів (Simon, 1987; Hiraoka et al., 2002)

Інерція та поріг змін

Водії часто дотримуються звичного маршруту, навіть якщо існують кращі альтернативи (Simon, 1987; Lotan, 1997). González Ramírez et al. (2021) встановили, що середня "смуга байдужості" становить 31.3% - це той поріг покращення, який має запропонувати новий маршрут.

Дослідження Ben-Elia et al. (2008) показало, що:

- Інформація про трафік має більший вплив при відсутності особистого досвіду
- Актуальна інформація прискорює процес навчання при несподіваних заторах
- 29% водіїв постійно використовують інформацію про трафік у реальному часі

Сприйняття маршруту

Vreeswijk et al. (2013) виявили цікаві закономірності:

- Прямі маршрути сприймаються як швидші
- 41% водіїв прагнуть мінімізувати час у дорозі
- 80% водіїв намагаються мінімізувати відстань

2.3. Методика

2.3.1. Методологія дослідження еко-маршрутів

Еволюція методів оцінки впливу транспорту

Система SIMESEPT, розроблена для оцінки впливу транспорту на довкілля в Джилонгу, поєднує різні технології:

- Теорію нечітких множин
- Метод прийняття нечітких багатоатрибутних рішень
- ГІС-технології

(Klungboonkrong & Taylor, 1998)

Історичні підходи до оцінки

Чутливість зручностей (AS)

Метод базується на суб'єктивних оцінках від 1 до 5, що надаються експертами для різних критеріїв впливу (Loder & Bayly, 1980).

Ємність навколишнього середовища (EC)

Визначає максимально допустиму кількість транспортних засобів для дороги без шкоди довкіллю (Holdsworth & Singleton, 1979). Однак метод має обмеження через:

- Можливість оцінки лише кількісних критеріїв
- Використання єдиного екологічного стандарту
- Нереалістичність єдиного мінімального значення EC (Holdsworth & Singleton, 1980; Gilbert, 1988; Chadwich, 1990)

Метод екологічної чутливості (ESM)

Розроблений Singleton & Twiney (1985) для подолання обмежень EC, метод:

- Включає як кількісні, так і якісні критерії
- Враховує різні типи землекористування:
 - Тип 1: житлові райони, школи, лікарні
 - Тип 2: торгові та комерційні зони
 - Тип 3: промислові зони та залізниці

Klungboonkrong & Taylor (1998) вдосконалили метод, створивши таблицю рішень з комбінованими показниками факторів для розрахунку зведеного індексу екологічної чутливості (CESI).

Методи прийняття рішень при виборі маршруту

Процес аналітичної ієрархії (АНР)

Метод дозволяє визначати пріоритети альтернативних рішень через попарне порівняння елементів (Saaty, 1980). Базується на трьох принципах:

- Декомпозиція
- Пріоритетність
- Синтез

Удосконалені підходи

Нечіткі методи

Некомпенсаційний метод нечіткої композиції АНР (FCAHR) використовує теорію нечітких множин для створення індексу чутливості навколишнього середовища, враховуючи лише найкритичніші критерії (Zadeh, 1965; Kumar & Ganesh, 1996; Klungboonkrong & Taylor, 1998).

Гібридні підходи

Dai, Yang, Guo, Jensen & Hu (2016) запропонували використання гібридного графа, де витрати пов'язані з цілими маршрутами замість окремих ділянок.

3D-моделювання маршрутів

Tavares, Zsigraiova, Semiao & Carvalho (2009) продемонстрували важливість врахування рельєфу при плануванні маршрутів:

- Нахил впливає на продуктивність та ефективність двигуна
- Вага транспортного засобу збільшує чутливість до рельєфу
- 3D-моделювання показує значні відмінності в споживанні палива порівняно з 2D-підходом

Li & Lai (2019) підкреслили важливість розгляду дорожньої мережі на концептуальному рівні, а не на рівні окремих з'єднань.

2.3.2. Розмежування та методологічні міркування

Для того, щоб поточне дослідження можна було завершити протягом заданого періоду часу, було зроблено деякі розмежування, щоб обмежити область дослідження. Деякі подальші методологічні міркування також були зроблені щодо того, що було знайдено в попередніх дослідженнях.

Хоча можна було створити нову концепцію сталого маршруту, було вирішено розширити вже існуючу та науково визнану концепцію екологічного маршруту. Побоювання полягало в тому, що абсолютно нова концепція приверне менше уваги колег у цій галузі, оскільки ніхто ще не знає про її існування. Через важливість і високу релевантність теми дослідження ризик потенційно низького академічного розповсюдження вважався недоцільним.

У поточному дослідженні концепція екологічного маршруту, представлена Ху та ін. (2017), отже, розглядається в ширшому сенсі, включаючи, окрім екологічних аспектів, також соціальні (і певною мірою економічні) аспекти, формуючи концепцію екологічного маршруту, засновану на найпоширенішому визначенні стійкості, трьох Концепція опори (Purvis et al. 2019). Чотири змінні впливу були обрані в емпіричній роботі для представлення загальної вартості впливу на стійкість, це споживання палива, забруднення повітря, безпека та шум. Інші можуть захотіти вибрати інші змінні, але запропонований робочий процес має бути приблизно однаковим, незалежно від змінних.

Соціальний аспект сталого розвитку в поточному дослідженні в основному представлений змінними шуму та безпеки, а також змінною забруднення повітря. Усі ці три змінні можуть призвести до негативних наслідків для здоров'я людей, наприклад, через підвищений ризик різних захворювань серця, нещасних випадків та/або респіраторних захворювань (Klungboonkrong & Taylor 1998; Lindgren et al. 2009a; Lindgren et al. 2009b; Брук та ін., 2010; ВООЗ та ін., 2021). Потенційний негативний вплив на інші види також може виникнути, наприклад шум, що заважає дикій природі, або нещасні випадки з дикою природою, але, хоча це було визнано, через труднощі

з моделюванням просторового розташування нелюдських видів у певний час, вони були виключені в емпіричному дослідженні “proof of concept” робота.

Екологічні наслідки автомобільних перевезень переважно покривалися змінним споживанням палива. Забруднення повітря також можна розглядати як ознаку екологічних аспектів через численні викиди, що погіршують навколишнє середовище, спричинені зносом доріг, а також згорянням двигуна, що призводить до різноманітних проблем, таких як зміна клімату, підкислення та накопичення важких металів у як рослинність, так і інші види (Phillips et al. 2021). Через велику кореляцію між споживанням палива та деякими видами викидів парникових газів змінну забруднення повітря в поточному дослідженні було вирішено представити комбінацією лише двох типів локально шкідливих викидів (Patella et al. 2019). Типи викидів, які використовувалися для моделювання загального впливу забруднення повітря, були оксиди азоту (NO_x) і тверді частинки (PM). Це схоже на те, що було використано як проксі викидів Andersson та ін. (2020), а згідно з Gilbert et al. (2003), Beckerman et al. (2008) та Kwasny, Madl & Hofmann (2010), ці типи викидів можна використовувати як потенційні проксі для впливу забруднення повітря та ослаблення викидів загалом. Натомість географічно ширший вплив на навколишнє середовище викидів парникових газів, спричинених автомобільним транспортом, натомість припускається як частина змінної споживання палива, і, отже, є причиною надання більшої ваги цій змінній. Негативний вплив на навколишнє середовище, спричинений споживанням палива, включає, але не обмежується цим, буріння нафтових свердловин, що змінює ландшафт, ризики аварійного розливу нафти та викиди CO₂, що сприяють зміні клімату.

У поточному дослідженні економічний аспект був лише неявно включений у запропоноване визначення сталого екологічного маршруту, але не включений явно. Можна стверджувати, що економічний аспект споживання палива частково пов'язаний з тим фактом, що фінансове становище людей впливає на економіку в ширшому сенсі через коливання попиту, внаслідок того, що люди можуть витрачати гроші на інші речі, ніж просто на паливо.

Крім того, оскільки споживання палива сприяє зміні клімату, витрати на пом'якшення наслідків зміни клімату, які оплачує суспільство, також пов'язані з автомобільним транспортом. Крім того, можна стверджувати, що люди, які потребують медичної допомоги, грошової допомоги та/або фізичної допомоги через захворювання або нещасні випадки, спричинені транспортуванням автомобіля, також потребують фінансування з боку суспільства в країнах, де такі витрати частково покриваються платниками податків. Таким чином, економічний аспект був опосередковано включений у всі чотири змінні, вибрані в емпіричній роботі поточного дослідження, але не мав власної змінної.

У поточному дослідженні розглядалися лише ефекти на рівні зв'язку, оскільки структура моделювання вибору маршруту була зосереджена виключно на окремих транспортних засобах, що рухаються по конкретних зв'язках. Були зроблені припущення про незалежність руху, тобто час і умови руху не впливають на те, як

Проводиться моделювання вибору «найбільш стійкого» маршруту. Однак слід пам'ятати про можливі наслідки, які це може мати для можливості перенесення структури моделювання у великі міста, де в певний час можуть виникати затори. Крім того, оскільки емпірична робота поточного дослідження проводилася в неперевантаженій мережі, екологічне водіння також вважалося позитивною поведінкою водіння в запропонованій структурі моделювання. Якби затори, натомість, виникли на місці, яке використовувалося для емпіричної роботи, відмінності в тому, чи дає поведінка екологічного водіння позитивні чи негативні результати з точки зору споживання палива та викидів транспортних засобів, як пояснюють Алам і Макнабола (2018), були б тоді також включені в структуру моделювання.

Оскільки водій перетинає будь-яке з доступних зв'язків і варіантів маршруту в одному і тому самому транспортному засобі, специфічні параметри транспортного засобу, згадані Mandavilli et al. (2019) та Joumard та ін. (1995), такі як маса, вік і показники ефективності двигуна, стали незначними і дещо нерелевантними для включення. Натомість загальну увагу

було приділено атрибутам зв'язку та характеристикам мережі, таким як ухил дороги, лежачі поліцейські та обмеження швидкості.

Для цього дослідження доцільність включення попередніх досліджень впливу кільцевих розв'язок і лежачих поліцейських полягала у встановленні того, чи виникають удари в результаті кільцевої розв'язки або лежачого поліцейського як такого, чи впливи пов'язані зі зниженням швидкості, простоем, деакселерації та прискорення, у порівнянні з мережевими зв'язками без перетинів. Відповідно до Crown (2001), Ghafghazi & Hatzopoulou (2014) і Mandavilli et al. (2019), основним фактором цих атрибутів, як позитивних, так і негативних впливів, є кінцева зміна швидкісних циклів. Таким чином, ніяких додаткових витрат або прибутку не було додано до атрибутів дороги.

Через очевидну непослідовність у попередніх дослідженнях, деякі дослідження вказують на те, що концентрація викидів зростає, коли швидкість зменшується (Federal Highway Administration 2000; Gately, Hutyra, Peterson & Wing 2017; Tang, McNabola, Misstear, Pilla & Alam 2019), деякі дослідження показують, що зменшення швидкості призводить до нижчих рівнів викидів (Keller et al. 2008; Keuken, Wilminck & Wesseling 2010; Madireddy et al. У поточному дослідженні припущено, що рівень забруднення повітря в джерелі, яким є дорога бути постійним, незалежно від швидкості з'єднання. Таким чином, для вивчення впливу забруднення повітря на людину різними альтернативними маршрутами була використана функція зниження середньої відстані можливих викидів дороги.

У поточному дослідженні тривимірні відстані використовувалися, щоб підкреслити потенційну необхідність використання тривимірної моделі місцевості для отримання реалістичних результатів. Включення 3D-відстаней відповідає пропозиціям Tavares et al. (2009). Однак, оскільки емпірична досліджувана область Тернопіль у поточному дослідженні є досить плоскою, тому відмінності у споживанні палива залежно від схилу будуть незначними, схил також був виключений із запропонованого процесу моделювання та подальшого аналізу. У дослідженнях, проведених на більш різноманітних і горбистих місцевостях, слід додатково враховувати нахил.

2.4. Пропонований робочий процес ГІС

Щоб знайти найбільш стійкий варіант маршруту серед альтернативних маршрутів у мережі доріг, було розроблено запропоновану структуру та порядок аналізу в програмному забезпеченні ГІС ESRI. Три етапи включають підготовку введення даних, моделювання впливу та накладення між впливами. Теорія нечітких множин застосована на запропонованому в дослідженні етапі моделювання впливу як основна основа, на якій базується весь робочий процес.

2.4.1. Підготовка введення даних

Перш за все, необхідно отримати релевантні просторові дані, включаючи дорожню мережу з кількома атрибутами дорожньої мережі, цифрову модель рельєфу, а також будівлі або території, відповідні для аналізу впливу. Це можуть бути, наприклад, житлові будинки, будинки, що містять комунальні послуги, або спортивні споруди на відкритому повітрі.

Після вилучення даних наступним кроком є оцифрування альтернативних маршрутів, враховуючи два напрямки можливого пересування між двома місцями. Якщо не існує очевидних чи чітких альтернатив маршруту, а опори для всіх шляхових зв'язків у мережі доріг мають значення, цей крок буде проігноровано, а наступні аналізи будуть скориговані відповідно. Однак у випадку запропонованої структури моделювання, розробленої в цьому дослідженні, передбачається, що принаймні кілька запропонованих і чітких варіантів маршруту відомі заздалегідь.

Після цього точність даних має бути перевірена та підтверджена. Щоб забезпечити повний зв'язок між об'єктами в кожному альтернативному класі об'єктів маршруту та отримати геометричну точність, топологію слід налаштувати за кількома правилами. Наприклад, звисання, перекриття та елементи ліній, що перетинаються, повинні бути досліджені та виправлені у

випадках виникнення помилок. Потім необхідно додати або об'єднати обмеження на односторонній рух до таблиць атрибутів маршрутів для дорожніх об'єктів, які не дозволяють рух в обох напрямках. Обмеження швидкості або реальні швидкості на певних посиленнях також слід ввести в таблицю атрибутів. Крім того, необхідно реєструвати реальну швидкість у певних поворотах або на певних перехрестях, а також фактичну швидкість на дорожніх атрибутах, таких як вибоїни, кругові розв'язки тощо. Завдяки розділенню функцій, які мають кілька швидкостей, на менші частини, які відповідають лише одній швидкості, майбутній аналіз мережі буде полегшено. Функції також слід розділити на функції прискорення та уповільнення, де швидкість, призначена цій ділянці, має відповідати середньому значенню початкової та кінцевої швидкостей. Крім того, подібних результатів також можна досягти шляхом подальшого використання лінійних бар'єрів мережевого аналізу з масштабованими витратами та застосуванням окремих функцій повороту. Цей альтернативний спосіб, однак, не застосований у запропонованій моделі.

Швидкості можна розглядати або як окремі детерміновані значення, або як частину діапазонів розподілу швидкості, які краще відображають той факт, що кожен водій їде з індивідуальною швидкістю, а не всі зберігають однакову швидкість. Відповідно, узагальнена вартість стійкості буде створена як інтервал, з ймовірними імпедансами, розподіленими в межах діапазону замість детермінованого значення. Однак у запропонованій структурі моделювання для спрощення використовуються окремі значення. Модель може бути ще більше ускладнена, якщо використовувати залежні від часу швидкості або змінні впливу.

Якщо попередні кроки виконано правильно, кожен альтернативний маршрут має бути розділений на два класи функцій, кожен з яких представляє один із двох напрямків руху. Повинні бути встановлені односторонні обмеження, а об'єкти в кожному класі об'єктів варіанта маршруту мають бути пов'язані один з одним. Кожен варіант маршруту також слід розділити на кілька елементів, кожна з яких представляє певну швидкість.

Щоб врахувати потенційні впливи місцевості, 3D-інформація повинна бути додана до кожного класу об'єктів маршруту. Для цього необхідно використати два інструменти; спочатку інструмент «Інтерполяція форми», який повинен включати цифрову модель рельєфу як вхідний растр, а потім «Додати інформацію Z». Якщо існують значні нахили, це слід враховувати при призначенні витрат на споживання палива для цієї ланки, оскільки необхідна потужність автомобіля збільшується при позитивних нахилах і зменшується при від'ємних нахилах. Однак у цьому запропонованому робочому процесі моделювання не передбачається значних нахилів, тому включення 3D є релевантним лише через використання 3D-довжин об'єктів.

2.4.2. Ударне моделювання

Наступним кроком і основною частиною запропонованого робочого процесу є моделювання впливу відповідних змінних. Які змінні включати, вирішує користувач, але оскільки найбільш поширене визначення сталого розвитку включає екологічні, економічні та соціальні аспекти, було б рекомендовано певне поєднання таких факторів.

Коли змінні визначені, настає час для фактичного моделювання та призначення змінних імпедансів/вартості кожному об'єкту дороги маршруту. Нижче на рисунку ModelBuilder, Рисунок 2.2, показано, які різні ГІС-інструменти слід використовувати, а також подальший порядок геообробки. У запропонованій моделі нечіткі функції приналежності використовуються для призначення змінних значень впливу в залежності від ступеня впливу. Альтернативним способом можна було б призначити кожній змінній лише просторово залежні значення $1 = \text{вплив}$ і $0 = \text{відсутність впливу}$, таким чином повністю ігноруючи різні рівні впливу.

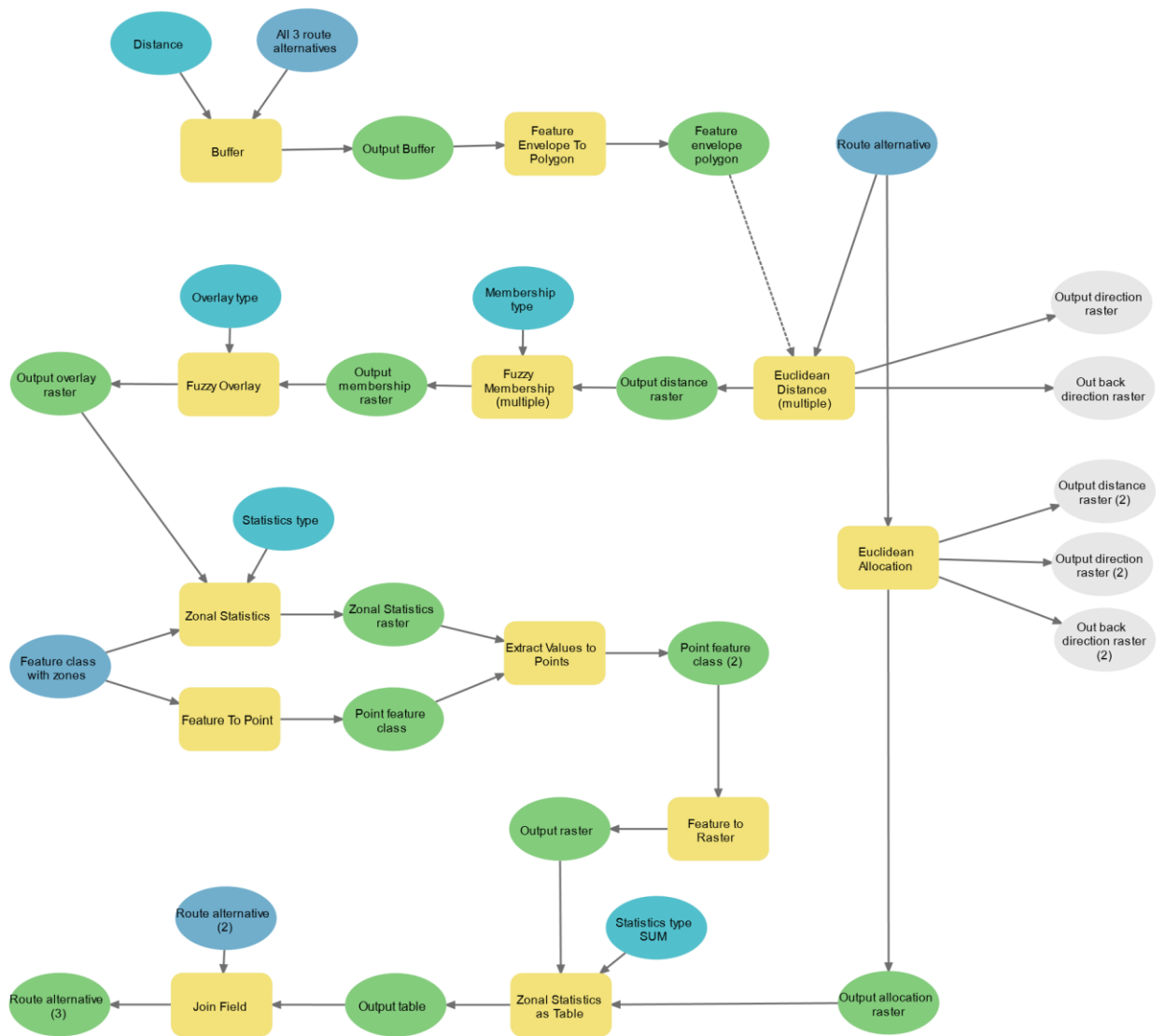


Рисунок 2.2 – Візуалізація інструментів ModelBuilder і порядок геообробки для моделювання змінних імпедансів/вартості

Робочий процес моделювання починається з визначення обсягу аналізу впливу. Це важливо для повного покриття різних шарів нечіткої приналежності та є передумовою для належної роботи операцій нечіткого накладання. Протяжність визначеної зони впливу слід потім ввести в параметр протяжності налаштувань середовища під час обчислення евклідових відстаней від кожної комірки растру до кожного з варіантів маршруту. Евклідові відстані необхідно розраховувати для кожної швидкості, кожного варіанту маршруту та кожного напрямку, що призводить до кількох растрів евклідових відстаней. Якщо для одного з варіантів маршруту зустрічаються швидкості 30 км/год і 50 км/год, усі об'єкти, що мають ці швидкості

відповідно, слід вибрати та використовувати як вхідні об'єкти в інструменті. Це має бути зроблено в обох напрямках руху, що призведе до чотирьох растрів евклідових відстаней. Те ж саме слід зробити для всіх інших маршрутів і відповідних їм швидкостей.

Наступний крок включає призначення нечітких значень належності кожній клітинці растру на основі растрів евклідових відстаней. Усі растри можна використовувати для всіх змінних, але оскільки розподіл значень нечіткої належності відрізняється залежно від змінної, для кожної швидкості, кожного варіанта маршруту та кожної змінної необхідно створити окремий растр нечіткої належності. Якщо в прикладі альтернативного маршруту зі швидкостями 30 км/год і 50 км/год аналізуються дві змінні, на цьому етапі необхідно обчислити вісім нечітких растрів приналежності. Залежно від типу змінної, нечітка функція приналежності, яку найкраще використовувати, буде різною, тому не можна зробити загальних пропозицій щодо цього параметра. Таким чином, користувач повинен отримати знання про те, як працює нечітка приналежність, щоб знайти найбільш відповідні налаштування для своєї конкретної змінної. Нечітка належність 1 має відповідати найвищому впливу, а 0 має відповідати відсутності впливу. Незважаючи на наявність фонових рівнів, наприклад, шуму, ризиків для безпеки та забруднення повітря, у цій запропонованій моделі передбачається, що вплив від конкретної дороги послаблюється до нуля. Після створення всіх нечітких членств для параметра маршруту їх слід накладати за допомогою однієї з функцій нечіткого накладання. Яку функцію використовувати, також остаточно вирішує користувач, але операція АБО пропонується через її некомпенсаційні математичні характеристики в ситуації, коли високі значення нечіткої належності вважаються гіршими, ніж низькі значення. Важливо зазначити, що оператор АБО в інших контекстах був би інклюзивним, отже, даючи компенсаційні результати. У аналізі придатності, наприклад, де високі нечіткі значення приналежності вказують на вищу придатність, оператор АБО недоцільно використовувати, якщо бажані некомпенсаційні результати. У такому випадку замість нього слід використовувати оператор І (Мітчелл 2012).

Перед запуском інструменту «Зональна статистика» необхідно вирішити, у яких місцях слід аналізувати вплив на дорогу. Чи слід використовувати всі житлові будинки, усі будівлі, усі будівлі громадських служб, усі школи, усі місця існування дикої природи чи будь-які інші місця, повністю залежить від користувача. Якщо використовуватимуться житлові будинки, цей клас об'єктів слід спочатку ввести на крок зональної статистики як об'єкти зони. Залежно від змінної найкраще використовувати різні типи статистики. Для деяких змінних, таких як безпека, усі комірки всередині будівлі можна найкраще визначити за максимальним значенням для цієї будівлі, тоді як для деяких змінних, таких як шум, середнє значення краще представлятиме вплив, якому піддається під час перебування в будівлі.

Потім клас об'єктів місць впливу слід перетворити на точки, щоб потім мати можливість витягувати значення із зон будівель у точки. Точки слід перетворити на растри, одержуючи одну клітинку растру на точку, із значенням нечіткої приналежності, що використовується як значення растру.

Щоб мати можливість призначити імпеданси/витрати найближчій ділянці/об'єкту дороги маршруту, евклідове розподіл обчислюється для всієї досліджуваної області впливу з растровими комірками, призначеними для кожної дороги та кожного напрямку окремо. Потім евклідові растри розподілу включаються в

Інструмент «Зональна статистика у вигляді таблиці» як зону, для якої потрібно обчислити статистику, зі значенням зони в цій таблиці, що відповідає ідентифікатору кожного об'єкта дороги. Растр, створений з точок, слід підсумувати по зонах за допомогою типу статистики SUM. Нарешті, таблиця об'єднується з класом об'єктів альтернативного маршруту, що включає всі об'єкти, незалежно від швидкості, для даного напрямку та маршруту. Нульові значення для об'єкта дороги слід розглядати так само, як значення 0, оскільки цей об'єкт не впливає на нього, тому всі нульові значення можна перетворити на нулі.

Вищезазначений робочий процес слід виконати та повторити для кожної змінної, яку користувач вважає релевантною та яка має просторовий вплив на навколишню територію.

2.4.3. Міжударна накладка

Коли витрати для всіх включених змінних були встановлені та призначені найближчій ділянці лінії кожного альтернативного маршруту, настав час додати їх разом, щоб обчислити загальну вартість стійкості для кожної ділянки лінії та підсумкову вартість для кожного маршруту. Оскільки деякі змінні можуть не мати негайного просторового впливу на території навколо доріг і, таким чином, не мати вихідних відносних значень у діапазоні від 0 до 1 в результаті нечітких обчислень приналежності, до цих змінних слід ставитися обережно та приділяти їм додаткову увагу. Залежно від змінної, деякі найкраще конвертувати у відносні значення. Інші змінні мають бути злегка скориговані в той чи інший спосіб, щоб вони розглядалися однаково в накладенні/підсумку впливу. Наприклад, щодо впливу споживання палива, воно зазвичай вимірюється в літрах, спожитих під час перетину дороги. Однак, оскільки ці числа для коротких сегментів дуже малі, вони не дуже добре відповідають числам, отриманим за допомогою нечіткого членства та нечіткого накладання. Альтернативою, використаною в емпіричній роботі цього дослідження, було перетворення споживання палива з літрів на децилітри. Можливо, це не найкращий спосіб зробити це, але кращих альтернатив на даний момент не знайдено.

Значення нечіткого накладення для кожної змінної для сегмента дороги слід потім додати разом і підсумувати зі значеннями «непросторових» змінних, таких як споживання палива. Одну або більше змінних можна зважити, якщо це здається доцільним і необхідним для отримання більш реалістичного опору стійкості/вартості. Якщо змінній присвоєно будь-яку вагу $\neq 1$, накладення між впливами також може бути відоме як зважена СУМА.

Необхідно створити мережевий набір даних і налаштувати з'єднання кінцевої точки для різних класів об'єктів маршруту. Коли потім використовується тип аналізу мережі «ROUTE», програма розв'язання маршруту має повернути варіант маршруту з найменшою сумарною вартістю стійкості. Необхідно пам'ятати про імпорт масштабованих лінійних бар'єрів або додаткових бар'єрів у точці вартості, якщо такі потрібні, щоб більш реалістично представити будь-який тип імпедансу. Якщо на будь-якому з маршрутів існує час простою, це також необхідно врахувати за допомогою додаткових витрат.

3. ПРОЄКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Емпірична робота

3.1.1. Припущення та гіпотези

Через велику складність теми цього дослідження необхідно було зробити ряд загальних припущень до та під час емпіричної роботи. По-перше, оскільки затори в Тернопіль нечасті, було зроблено припущення про вільний рух транспорту, тобто будь-який водій у будь-який час міг би їздити згідно з максимальним обмеженням швидкості або встановленою реалістичною швидкістю на будь-якій даній ланці. Отже, припускалася незалежність від часу, дня та сезону. Водії також мали дотримуватись встановлених обмежень швидкості, не перевищуючи та не перевищуючи їх.

По-друге, через низький рівень трафіку в Тернополі екологічне водіння вважалося сприятливим (Alam & McNabola 2018). Таким чином, розрахункові швидкості та дистанції прискорення/уповільнення на перехрестях, кільцевих розв'язках, лежачих поліцейських тощо базувалися на припущенні, що водій буде застосовувати поведінку екологічного водіння. Крім того, через доволі рівнинний рельєф на досліджуваній території не було враховано вплив рівня дороги на витрати на споживання палива. Однак 3D-відстані використовувалися для досягнення більш реалістичних результатів і для того, щоб представлені результати краще відображали довжину маршруту в реальному світі.

Нарешті, також було зроблено припущення, що водій керував бензиновим або дизельним автомобілем, що призвело до того, що такі фактори, як шум і викиди, є більш актуальними, ніж, наприклад, для електричних або гібридних транспортних засобів. Тому вплив шуму та забруднення повітря було змодельовано на рівнях, що відповідають рівням, що виникають від бензинових або дизельних транспортних засобів.

Моделювався лише особистий автомобільний транспорт, виключаючи всі види інших автомобільних перевезень.

3.1.2. Емпіричний робочий процес ГІС

Під час емпіричної роботи в цьому дослідженні використовувалося програмне забезпечення ArcGIS від ESRI, включаючи розширення Network Analyst і 3D Analyst. Область дослідження була обмежена околицями міського району Тернополя, причому розрахунки проводилися на території, що відповідає зоні характеристик 1500-метрового буфера навколо трьох альтернативних маршрутів. Область дослідження візуалізовано на рисунку 3.1. Дані про дорожню мережу було завантажено з транспортної служби.

За відсутності власних вимірювань числові значення шуму, споживання палива та рівнів забруднення повітря були взяті з літератури та використані як вхідні дані для різних інструментів.

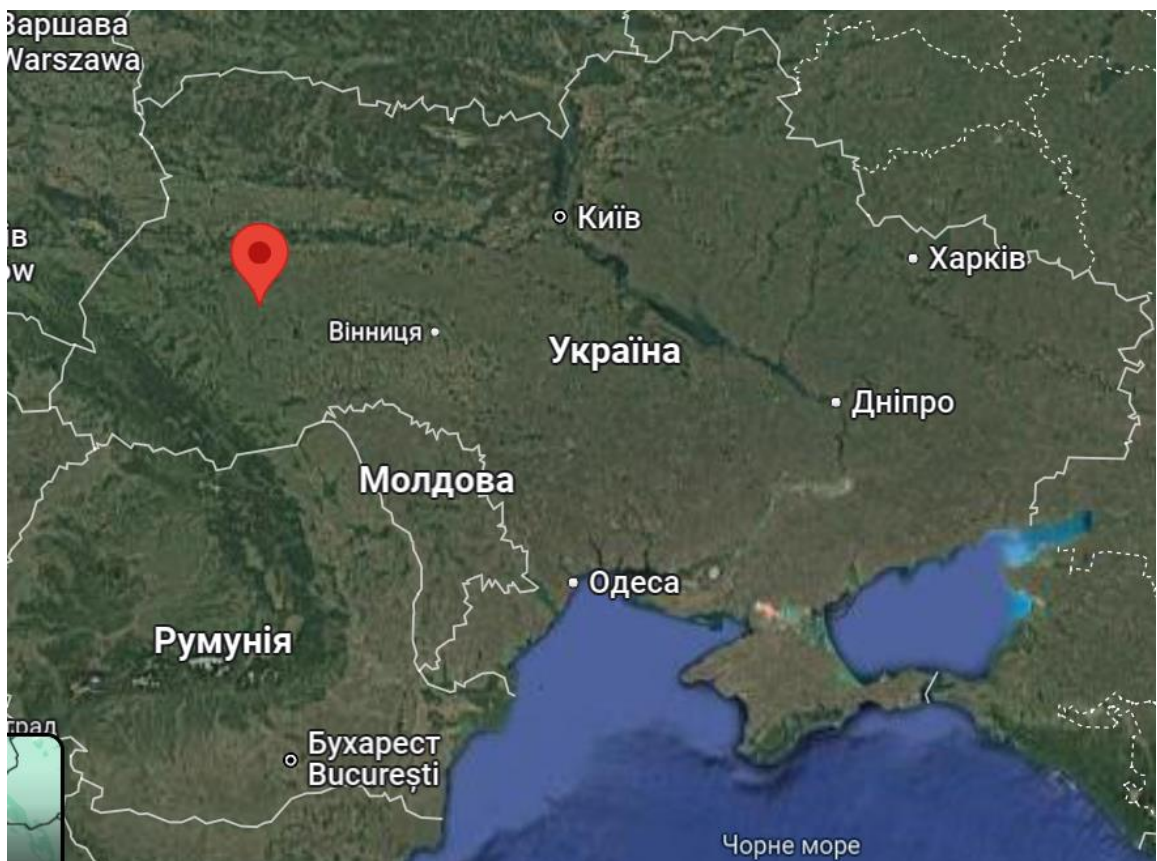


Рисунок 3.1 – Розташування досліджуваної території

Загалом запропонований робочий процес, представлений раніше, дотримувався, тому в цьому розділі акцент зосереджений на детальній інформації про змінні, параметри та конкретні числові значення.

Спочатку три альтернативи маршруту були оцифровані на основі існуючих даних про дороги відповідно до запропонованого робочого процесу моделювання з одним класом функцій для альтернативи маршруту та напрямку руху.

Оскільки обмеження швидкості, доступні з даними, були неактуальними, точні дані потрібно було зібрати емпіричним шляхом, проїжджаючи навколо Тернополя, відзначаючи місця, де швидкість змінюється, і які обмеження швидкості існують. Також під час цієї поїздки були записані швидкості виконання/виконання різних поворотів. Крім того, були оцінені та виміряні відстані прискорення та уповільнення для різних комбінацій початкової та кінцевої швидкостей. Прискорення та прискорення в Тернопіль в основному пов'язані з перехрестями, круговими розв'язками, лежачими поліцейськими та змінами обмеження швидкості. У таблиці 3.1 представлені оцінки відстаней прискорення та уповільнення, використані в цьому аналізі. Це слід розглядати лише як узагальнення, і залежно від того, наскільки інтенсивно гальмує чи прискорює окремий водій, застосовуються різні відстані. Тим не менш, оскільки припускається, що водії в цьому дослідженні мають поведінку екологічного водіння, під час оцінки відстаней використовувалась помірна інтенсивність прискорення та деакселерації.

Три маршрути показано на рисунку 3.2 нижче, з доданими спеціальними атрибутами кожного альтернативного маршруту для цілей візуалізації. В аналізі використовувалися тривимірні відстані, але шкала масштабу відображає двовимірні відстані. Однак через рівнинну місцевість відмінності між 2D і 3D відстанями були незначними.

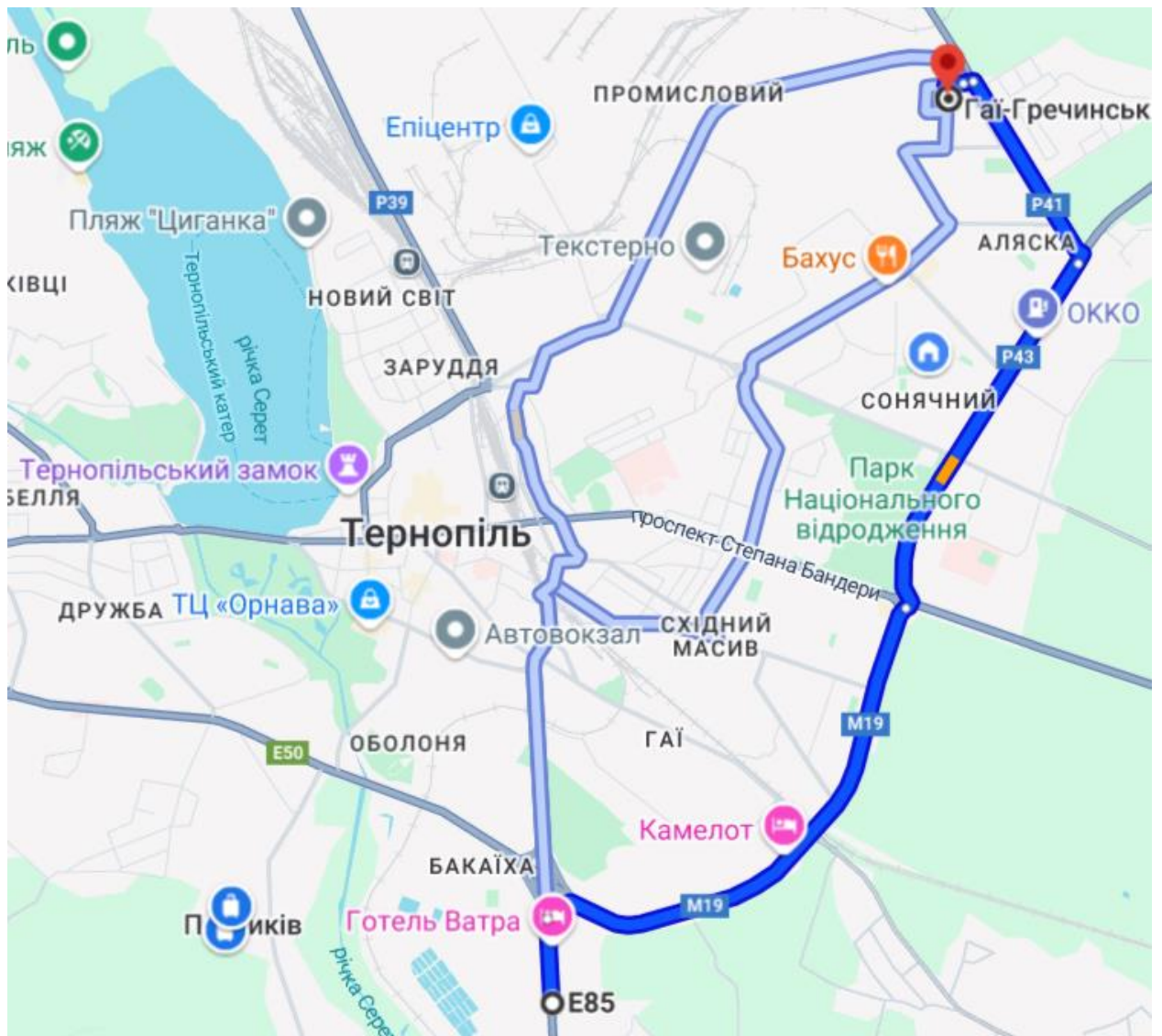


Рисунок 3.2 – Три альтернативи маршруту при проїзді через Тернопіль

Для забезпечення повного зв'язку між функціями для кожного маршруту та геометричної точності було створено топологію з декількома правилами. До таблиць атрибутів додано односторонні обмеження для дорожніх об'єктів, які не дозволяють рух в обох напрямках. Це було помітно лише на головній дорозі та на кільцевій розв'язці.

Таблиця 3.1 – Дистанції прискорення та уповільнення при різних комбінаціях швидкостей

Від швидкості (км/год)	До швидкості (км/год)	Дистанція гальмування	Від швидкості (км/год)	До швидкості (км/год)	Відстань прискорення
110	80	50м	0	80	300м
80	40	50м	20	40	50м
80	30	50м	20	50	100м
60	40	25м	20	60	100м
60	20	25м	20	80	150м
60	0	50м	30	40	25м
50	40	25м	30	50	50м
50	20	25м	30	60	100м
50	0	50м	40	50	25м
40	30	25м	40	60	50м
40	20	25м	40	80	150м
			80	110	100м

При призначенні швидкості ланці дороги, де відбувається прискорення або уповільнення, ланці призначається середня швидкість. Це означає, що на ділянці дороги, де відбувається прискорення від 0 км/год до 80 км/год, було задано середню швидкість 40 км/год, тобто припускається постійна інтенсивність прискорення/уповільнення. Це узагальнення може бути не зовсім точним, оскільки чотири різні окремі витрати, включені в це дослідження, сильно залежать від швидкості. Проте в межах часу, доступного для завершення цього дослідження, це було прийнято як прийнятне подання.

Чотири змінні були обрані для представлення визначення стійкості, а саме безпека, шум, забруднення повітря та споживання палива. Для всіх змінних, окрім споживання палива, швидкість є головним фактором, що впливає на просторовий ступінь впливу на дорогу для конкретної змінної. Що стосується змінного споживання палива, різні впливи, що виникають через високу витрату палива, з'являються в іншому просторовому вимірі, ніж здебільшого локально, як інші три. Проте швидкість, природно, також включається як параметр під час обчислення споживання палива під час

перетину дороги, оскільки витрати палива в літрах/кілометри автомобіля залежать від швидкості.

Як передбачалося, що змінна безпека змінюється залежно від відстані від джерела, яким є дорога, представлено в таблиці 3.2. Змінна безпека в цьому контексті визначається як ризик збиття автомобіля для пішоходів або велосипедистів до, під час або після відвідування громадських служб, магазинів, спортивних споруд тощо. Серйозність травми, яка врешті-решт була отримана, не враховується, лише ризик аварії. Аспект безпеки також оцінює ризик, що виникає через те, що люди, які відвідують місця на певній відстані від маршруту, змушені проїжджати, йти пішки або їздити на велосипеді поблизу ділянки дороги маршруту, щоб дістатися до цього місця. Тому в даному випадку були використані відносно великі відстані. Ця ширша оцінка місць ризику не розглядалася Ewing (1999) або Taylor et al. (2000), але вони визнають, що збільшення швидкості пов'язане з вищими ризиками. Це також відображено в таблиці 3.2 через більші відстані ризику.

Таблиця 3.2 – Просторове співвідношення змінної безпеки

Обмеження швидкості (км/год)	Інтервал дистанції з максимальним ризиком	Відстань, вище якої немає ризику
0-50	0-50м	>100 м
51-80	0-75м	>200 м
81-110	0-100м	>300 м

Просторовий рівень шумового впливу представлено в таблиці 3.3 і базується на даних, представлених у огляді літератури, наданих ACS Nordic AB (nd) і Murphy & King (2016). У літературі 60 дБ згадується як пороговий рівень шуму, вище якого може бути поширеним підвищений ризик впливу на здоров'я людини (Andersson et al. 2020). У нічний час порушення сну, що потенційно може призвести до негативних наслідків для здоров'я людей, якщо його неодноразово турбувати, має відбуватися також за нижчих рівнів шуму. Однак у цьому дослідженні передбачається загальна подорож у денний час,

тому вплив, пов'язаний із впливом рівня шуму, розглядався як підвищений для рівнів шуму 60 дБ або більше.

Таблиця 3.3 – Просторове співвідношення змінного шуму

Обмеження швидкості (км/год)	Відстань, вище якої рівень шуму знижується нижче 60 дБ
110	100м
95	80м
80	70м
65	40м
60	30м
50	20м
45	20м
40	15м
35	10м
30	8м
25	6м
20	5м

Змінна забруднення повітря за визначенням є величезною, оскільки багато різних типів викидів виникають у результаті автомобільного транспорту (Padró-Martínez et al. 2012; Mandavilli et al. 2019; Phillips et al. 2021). Акцент у цьому дослідженні було зроблено на типах викидів, які мають прямий вплив на навколишні території, а забруднення повітря в основному впливає на людей. Комбінація викидів оксидів азоту (NO_x) і твердих частинок (PM) використовувалася при прийнятті рішення щодо просторового масштабу впливу забруднення повітря.

Останньою з чотирьох змінних, включених до складу узагальнених витрат на стійкість, було споживання палива. Оцінки споживання палива в літрах/кілометри автомобіля під час руху з різними швидкостями в різних контекстах дорожньої мережі були взяті з рисунка 2.2 (Ericsson та ін. 2006). Причини використання результатів, знайдених Ericsson et al. (2006) були як обширність їхнього дослідження, відсутність саморобних вимірювань у поточному дослідженні, так і географічний контекст, у якому воно

проводилося. Оскільки емпірична робота в поточному дослідженні також проводилася у Швеції, висновки Ericsson et al. (2006) були визнані актуальними та доречними для використання.

Оцінки представлені в таблиці 3.4 нижче та включають лише ті діапазони швидкостей, які існують уздовж будь-якого з альтернативних маршрутів, отже, наприклад, ігнорування оцінок для швидкостей 51-59 км/год та 81-94 км/год. Негативні наслідки споживання палива включають, але не обмежуються ними, буріння нафти, що змінює ландшафт, ризики аварій при бурінні нафти, викиди CO₂, що сприяють зміні клімату, і економічну вартість палива для людини.

Таблиця 3.4 – Приблизні рівні споживання палива, виміряні в літрах на кілометр автомобіля

Діапазон швидкостей	Варіант маршруту (обидва напрямки руху)		
	1	2	3
20-50км/год	0,09	0,11	0,11
60-80км/год	0,10	0,10	0,10
95-110 км/год	0,19		

Щоб оцінити просторовий вплив на безпеку та рівень шуму, необхідно було розрахувати евклідові відстані для кожного маршруту, кожного напрямку руху та кожної швидкості, що дало загалом 52 евклідові растри. Що стосується змінної забруднення повітря, то передбачалося, що вона не залежить від швидкості, тому одного растру евклідової відстані для кожного маршруту та напрямку руху було достатньо.

Крім того, концепція нечіткої належності (FuzzyMe) була використана для кожної зі змінних, для кожного з растрів евклідових відстаней. Оскільки швидкість не враховувалася для змінної забруднення повітря, для цієї змінної потрібно було створити лише один нечіткий растр належності для кожного маршруту та напрямку руху. Таблиця 3.5. представляє короткий виклад різних

нечітких налаштувань членства, які використовувалися в емпіричній роботі цього дослідження.

Таблиця 3.5 – Нечіткий підсумок налаштувань членства

Змінна	Функція Fuzzy Me	Налаштування Fuzzy Me	Fuzzy Me = 1 (максимальний вплив)	Fuzzy Me = 0 (без впливу)
Безпека	Лінійний		Залежить від швидкості, див. таблицю 3.2	Залежить від швидкості, див. таблицю 3.2
Шум	Лінійний		0м	Залежить від швидкості, див. таблицю 3.2
Забруднення повітря	Маленький	Середня точка = 100 Спред = 1	0м	За межами всього обсягу дослідження область

«Малий» використовувався як тип нечіткої функції належності для забруднення повітря, щоб краще відобразити сильно експоненціальну спадну функцію цієї змінної. Для двох інших змінних використовувалися лінійні функції. Під час накладання різних нечітких растрів приналежності для кожного маршруту та напрямку руху використовувався оператор нечіткого накладання АБО незалежно від змінної, що призвело до того, що вплив не вважався компенсаційним.

При уявленні про те, в яких місцях вплив кожної змінної є цікавим або вважається доцільним для дослідження, було припущено, що безпека буде здебільшого актуальною по відношенню до місць розміщення різних громадських послуг, які люди зазвичай відвідують для оздоровлення, дозвілля, догляду, , релігійні причини, покупки або навчання, як у приміщенні, так і на вулиці. Тому комунальні послуги та місця були виділені в окремий клас функцій, який потім використовувався для обчислення зональної статистики для кожного маршруту та напрямку руху. Таким чином, одна послуга була

представлена однією зоною, причому максимальне значення визначало значення для всієї зони.

Що стосується змінних шуму та забруднення повітря, всі будівлі використовувалися як вхідні дані для зони, включаючи нежитлові будинки, житлові будинки та будівлі комунальних служб. Вважалося, що середнє значення найкраще відображає вплив для кожної будівлі, тому це було використано як тип статистики.

Паралельно з попереднім кроком було створено евклідові растри розподілу для кожного маршруту та кожного напрямку, що призвело до шести растрів. Об'єкти впливу, які використовуються для введення зони, також були перетворені в шість точкових класів об'єктів із відповідними значеннями зональної статистики, витягнутими до точок відповідно. Після цього точки були перетворені назад у растровий формат, а потім підсумовані для кожного евклідового значення розподілу, використовуючи статистику SUM під час створення таблиці зональної статистики. Нарешті, табличні значення були приєднані до відповідних дорожніх об'єктів у вихідних шарах маршруту.

Об'єднання змінних у узагальнену вартість сталого розвитку було здійснено шляхом додавання трьох нечітких змінних приналежності разом, а потім підсумовування зі змінною споживання палива, перетвореною в децилітри та зваженою 1,5.

Коли на цій стадії все було готово і кожна функція мала змінні витрати, шари маршрутів було включено в мережевий набір даних із додаванням односторонніх обмежень і встановленим підключенням кінцевої точки. Кілька шарів аналізу мережі ROUTE для кожного напрямку руху було виконано для різних імпедансів, що дало різні пропозиції щодо маршруту. Точкові бар'єри з додатковою вартістю часу були імпортовані, щоб показати короткий час простою на знаках зупинки при виїзді на дорогу E4, але жодні інші бар'єри не використовувалися. Загальна вартість кожного маршруту представлена в розділі емпіричних результатів.

3.2. Результати

Частиною результату цього дослідження є запропонована структура моделювання. Через свою методологічну природу ця частина представлена в методологічному розділі, розділі 3. Тому розділ, присвячений результатам, включатиме лише висновки виконаної емпіричної роботи.

3.2.1. Емпіричні висновки

Емпіричні висновки щодо моделювання маршруту в Тернопіль представлені в таблиці 3.6 і 3.7. Як видно, час і тривалість також включені в таблицю, хоча вони не є частиною узагальнених витрат на стійкість. Маршрут із найменшим значенням впливу на змінну виділено зеленим кольором. Для змінної витрати палива, часу та довжини додатково представлено відсоткове співвідношення того, наскільки гіршим/повільнішим/довшим за оптимальний маршрут є варіант маршруту.

Таблиця 3.6 – Вплив на північний напрямок, на маршрут і на змінну

Напрямок руху		північ	
Альтернативний маршрут	1	2	3
Безпека	2,8735	23,3310	10,5633
Шум	3,7675	7,8619	0,0578
Забруднення повітря	423,0266	823,7891	901,1676
Витрата палива (дл)	6,1802	4,2806	4,2086
Відсоток гірше найкращого варіанту	46,848%	1,712%	Найкращий
Накладка з ФК вагою 1,5	438,9379	861,4030	918,1015

<i>Відсоток гірше найкращого варіанту</i>	<i>Найкращий</i>	96,247%	109,164%
Час (с)	266,0225	295,5586	307,6388
<i>Відсоток повільніше, ніж найшвидший варіант</i>	<i>Найшвидший</i>	11,103%	15,644%
3D довжина (м)	4952,9380	4015,2811	3975,7033
<i>Відсоток довший за найкоротший варіант</i>	24,580%	0,995%	<i>Найкоротший</i>

Таблиця 3.7 – Вплив на південний напрямок, на маршрут і на змінну

Напрямок руху		Південь	
Альтернативний маршрут	1	2	3
Безпека	2,8240	22,9389	10,4798
Шум	3,4990	8,9714	0,0578
Забруднення повітря	421,4248	822,4999	901,4394
Витрата палива (дл/км)	6,2879	4,2340	4,2010
<i>Відсоток гірше найкращого варіанту</i>	49,675%	0,784%	<i>Найкращий</i>
Накладка з ФК вагою 1,5	437,1796	860,7610	918,2785
<i>Відсоток гірше найкращого варіанту</i>	<i>Найкращий</i>	96,890%	110,046%
Час	247,0070	277,8490	297,4595
<i>Відсоток повільніше, ніж найшвидший варіант</i>	<i>Найшвидший</i>	12,486%	20,426%
3D довжина	4961,2601	3993,3845	3988,9443

<i>Відсоток довший за найкоротший варіант</i>	24,375%	0,111%	<i>Найкоротший</i>
---	---------	--------	---------------------------

Результати показують, що при дослідженні узагальнених витрат на стійкість маршрут 1 дає найнижчий загальний імпеданс в обох напрямках руху. Під час подорожі на північ маршрут 2 на 96% гірший за маршрут 1, а маршрут 3 на 109% гірший. Під час подорожі на південь відповідне значення для маршруту 2 на 97% гірше, а для маршруту 3 – на 110% гірше. Це очевидно, навіть незважаючи на те, що маршрут 1 є найдовшим в обох напрямках. Маршрут 1, незалежно від напрямку, майже на 1 кілометр довший за варіанти 2 і 3.

Дивлячись на таблиці, єдиною змінною, яка найбільше впливає на вартість сталого розвитку в обох напрямках, є забруднення повітря. Оскільки безпека, шум і забруднення повітря базуються на нечітких значеннях приналежності, числа для цих змінних відносяться одне до одного. Наприклад, загальний вплив забруднення повітря для маршруту 1, спрямованого на північ, більш ніж у 150 разів перевищує вплив змінної безпеки того самого маршруту.

Емпіричні результати також вказують на те, що зосередження лише на споживанні палива під час оцінки того, наскільки стійким є варіант маршруту, має свої недоліки. В обох напрямках маршрут 1 споживає найбільше пального. Майже на 50% більше пального споживається, якщо вибрати варіант маршруту 1 замість будь-якого з двох інших варіантів маршруту під час руху на південь. Якщо включити інші змінні впливу, які більш сильно впливають на людину, такі як шум, безпека та забруднення повітря, концепція стійкості таким чином посилюється.

Якщо врахувати не лише екологічні, а й соціальні та економічні аспекти, маршрути, які переважно пролягають за межами міських районів, можна вважати більш стійкими, незалежно від довжини та часу. Це може бути просто пов'язано з тим, що, як правило, менше людей живе поблизу автомагістралей або магістралей, ніж біля інших типів доріг, наприклад житлових доріг. Це був

факт для варіанту маршруту 1 в емпіричній роботі. На рисунку 4.1 чітко видно, що на відміну від варіантів маршруту 2 і 3, варіант маршруту 1 не проходить безпосередньо через територію міста. Оскільки вплив змінних безпеки, шуму та забруднення повітря в поточному дослідженні було узагальнено для нежитлових будинків, житлових будинків і будівель, в яких розміщені комунальні послуги, відмінності в наявності таких будівель, розташованих поблизу кожного варіанту маршруту, є значною причиною до варіанту маршруту 1, який має найменший вплив на безпеку та забруднення повітря. Щодо змінної шуму, обмеження низької швидкості 40 км/год уздовж більшої частини варіанту маршруту 3, і, як наслідок, коротка відстань впливу шуму, запобігає впливу на будівлі, розташовані поблизу варіанту маршруту 3. Незважаючи на те, що варіант маршруту 1 розташований порівняно далеко від більшості будівель, високі обмеження швидкості до 110 км/год і збільшення шуму, пов'язаного з вищими швидкостями, створюють більші зони шумового впливу, ніж для варіанту маршруту 3.

3.3. Обмеження та потенційні застосування

3.3.1. Обмеження запропонованої структури та робочого процесу моделювання ГІС

Одним із головних обмежень запропонованої структури моделювання є спосіб обчислення узагальнених витрат на стійкість та узагальнення змінних. Хоча теорія метушливих множин включена в моделювання кожної змінної впливу, коли впливи накладаються між впливами, це робиться простим додаванням. Узагальнення різних змінних, ймовірно, в оптимальному варіанті має здійснюватися іншим способом, додатково включаючи ідею та концепцію чутливості навколишнього середовища (ES), результатом чого є зведений індекс чутливості навколишнього середовища (CESI). Однак використання ES і CESI, як представлено Singleton & Twiney (1985) і Klungboonkrong & Taylor

(1998), вимагає більш глибоких знань про концепції, ніж те, що автор міг отримати протягом періоду цього дослідження. .

На відміну від пропозиції Smit et al. (2008), у поточному дослідженні для оцінки впливу різних змінних використовувалися окремі детерміновані значення. Це накладає обмеження, оскільки результати сильно залежать від точності кожної змінної, точності, яку неможливо отримати, оскільки багато факторів впливають на ступінь впливу. Використання єдиного детермінованого значення швидкості для ланки дороги також є потенційним обмеженням для моделі, і якщо можна зібрати достатньо даних про розподіл швидкості вздовж дороги, цього обмеження можна уникнути.

Одним із обмежень, про які вже згадувалося, є використання середніх швидкостей для ділянок доріг, де відбуваються прискорення або уповільнення. Використовуючи лише середні швидкості, вартість удару просто пов'язана із середньою швидкістю, хоча на половині ділянки їздитиметься швидше, а на половині – повільніше, ніж призначена швидкість. У разі прискорення від 0 км/год до 80 км/год рівень шуму, наприклад, буде занижений для ділянки, де використовується висока швидкість, і завищений для ділянки, де використовується нижча швидкість. Занижені та завищені оцінки не завжди врівноважені, але у випадку поведінки екологічного водіння, з припущенням постійної інтенсивності збільшення та зменшення швидкостей, використання середніх швидкостей на ділянці прискорення або уповільнення вважалося прийнятним.

Крім того, витрата палива автомобіля залежить від потужності, необхідної двигуну, і, природно, прискорення потребують більшої потужності, ніж уповільнення. Використовуючи лише середні швидкості та не враховуючи, чи відбувається прискорення чи уповільнення, різницею у споживанні палива нехтують. Можливо, це можна було врахувати, призначивши вартість точкового або лінійного бар'єру кожній ділянці прискорення. Використання узагальнених витрат, як з точки зору змінних, що не залежать від часу, так і параметрів, не пов'язаних із транспортним засобом, для бензинових і дизельних автомобілів є ще одним обмеженням, яке

потенційно може вплинути на результати, про що також говорили Емке та ін. (2016).

У запропонованій моделі дорожні атрибути, такі як кільцеві розв'язки та вибоїни, включені в робочий процес лише через відповідні зміни фактичної швидкості порівняно з обмеженнями швидкості. Потенційний вплив самого атрибута можна було б додатково визнати шляхом призначення певного штрафу, якщо витрати збільшуються, або відрахування, якщо витрати зменшуються, просто в результаті передачі атрибута. Більшість впливів, пов'язаних із круговими перехрестями та лежачими поліцейськими, однак, пов'язані зі зниженням швидкості, яке в запропонованій моделі вже розглядається через використання реалістичних швидкостей.

Нарешті, слід ще раз підкреслити той факт, що запропонований робочий процес моделювання маршруту не враховує рівні фонового впливу. Модель не має на меті врахувати абсолютний загальний рівень впливу від автомобільного транспорту, а лише обчислити загальний вплив, що виникає від будь-якого з варіантів маршруту. Інші дороги потенційно також можуть мати вплив, отже сприяючи вищим рівням абсолютного загального впливу, ніж загальний вплив, отриманий лише з альтернативних маршрутів. Значення впливу, що дорівнює 0, для будівлі, таким чином, відображає лише відсутність впливу однієї з доріг маршруту, а не те, що в цьому місці немає впливу дорожнього транспорту в цілому.

3.3.2. Обмеження емпіричної роботи

Багато обмежень емпіричної роботи такі ж, як і обмеження запропонованої моделі та робочого процесу, які щойно обговорювалися. Деякі, однак, можна додати.

По-перше, внаслідок того, що змінна забруднення повітря має значно більший вплив, ніж інші змінні, загальна вартість сталого розвитку сильно залежить від вартості забруднення повітря. Це можна розглядати як обмеження, оскільки відмінностями між маршрутами для інших змінних легко

знехтувати або втратити їх, якщо розглядати лише узагальнену вартість. Тим не менш, оскільки більшість значень справді відносяться одне до одного, великий вплив забруднення повітря фактично правильно представлено великим загальним змінним впливом.

Крім того, обмеження застосовуються до нечітких операцій призначення членства. Змінна шуму насправді не зменшується лінійно з відстанню, а скоріше зменшується обернено пропорційно. Використання лінійної нечіткої функції приналежності було застосовано для того, щоб мати можливість встановити максимальне порогове значення, коли відстані, що перевищують цей поріг, повинні мати нечітку приналежність, рівну 0. Її також було застосовано для отримання трохи вищих рівнів впливу, щоб відобразити вищі вплив шуму на дітей.

Чи слід вважати, що змінна ризику для безпеки зменшується лінійно чи іншим чином, це також може бути предметом сумніву. У цьому дослідженні лінійна функція вважалася найбільш реалістичною, але інше дослідження могло б вибрати інший тип функції для безпеки, якщо потрібно відобразити зростаючу серйозність потенційних аварій на вищих швидкостях. Змінна безпеки також може бути зроблена таким чином, щоб вона включала ризик безпеки не лише для пішоходів і велосипедистів, а й для водіїв і людей в автомобілі.

Функція нечіткої належності «Small» була використана для рівнів забруднення повітря, при цьому 100 м встановлено як середню відстань, нижче якої рівні забруднення повітря вважаються більш високими та шкідливими, ніж для відстаней понад 100 м. Середня точка 100 м також використовувалася, щоб вказати, що рівні викидів NO_x і PM швидко зменшуються протягом перших 50-200 м. Використане значення розкиду дорівнювало 1, і це було встановлено для того, щоб досягти певної міри спадної експоненціальної кривої, що відображає середні функції розпаду викидів. Обмеженням у зв'язку з цим є те, що ці налаштування можуть бути не найоптимальнішими. Обмеження також можуть стосуватися вибору цих двох конкретних типів викидів як представлення змінної забруднення повітря,

а також неврахування функцій спаду, що залежать від швидкості. Однак швидкістю просто знехтували через невідповідність, знайдену в літературі, про що вже говорилося.

Щодо споживання палива, основне обмеження стосується того, як ця змінна накладається на інші три змінні. Кращі альтернативи можуть існувати, але їх не було знайдено протягом періоду цього дослідження. Коефіцієнт ваги також може бути змінений, хоча у випадку досліджуваної території Горнефорс помірні зміни цього не змінили б висновку про те, який варіант маршруту є найбільш стійким, через високий вплив змінної забруднення повітря. Можна також стверджувати, що включення впливів, які є результатом викидів CO₂, певною мірою вже може бути охоплено змінною забруднення повітря.

Значення споживання палива на різних швидкостях, взяті з рисунка 2.2, представлено на сторінці 16 (Ericsson та інші, 2006), також сильно залежать від їх точності. Інші значення давали б інші витрати на споживання палива, і через постійне покращення споживання палива в автомобілях слід використовувати найновіші цифри, доступні на момент моделювання, і з подібних контекстів, як той, який збирається змоделювати.

Обмеження також стосуються емпіричної роботи через численні зроблені припущення та оцінки, які вже були розглянуті в розділі про методологію. Однак через складність необхідно було зробити припущення та оцінки, щоб дослідження було можливим протягом заданого терміну. Одним із зроблених припущень була незалежність від часу. У поточному дослідженні ступінь місцевого впливу безпеки, шуму та забруднення повітря в основному пов'язаний з людьми, які живуть або відвідують місця поблизу дороги. Той факт, що багато людей не залишатимуться вдома протягом робочих днів, до Корони, тобто не будуть піддаватися впливу шуму чи викидів від доріг кілька годин на день, не враховувався ні в запропонованій структурі моделювання, ні в емпіричній роботі. Для змінної безпеки рівні ризику досліджувалися лише в різних громадських службах, таких як школи, будинки для людей похилого віку, центри охорони здоров'я та спортивні споруди, тому краще фіксували відвідувані та потенційно постраждалі місця вдень. Щоб включити вплив

шуму та забруднення повітря як у будинках людей, так і на громадських службах, ці змінні впливи були узагальнені як такі, що відбуваються між 7 ранку. і 10 вечора. Як зазначалося раніше, вплив у нічний час буде зовсім іншим, оскільки дуже небагато людей піддаються ризикам безпеки вночі, а також тому, що навіть нижчі рівні шуму, ніж 60 дБ, можуть призвести до серйозних порушень сну, що є особливо шкідливим для зростаючих дітей.

3.3.3. Потенційні застосування

Потенційні переваги сталого розвитку, з точки зору вартості впливу, від вибору найбільш стійкого варіанту маршруту у випадку Тернопіль, представлені в таблиці 4.1 і 4.2. Однак дуже складним питанням є ймовірність того, що люди дійсно виберуть найбільш екологічний маршрут. Як показано в дослідженні Wardrop (1952), Mahmassani & Chang (1987), De Borger & Fosgerau (2008) і Wang & Ehrgott (2013), поведінка вибору маршруту ґрунтується на багатогранних поведінкових механізмах, що пояснюють не завжди раціональні поведінки людей. , поведінка в контекстах вибору. Те, що, здається, є ключовим фактором впливу на прийняті рішення щодо маршруту – це точна, надійна та легкодоступна інформація про те, які варіанти маршруту існують між двома місцями (Hadjidimitriou та ін. 2015). Необхідно надати не лише описову інформацію, а й пропозиції щодо того, який шлях вибрати, оскільки люди, як правило, більш чутливі до інформації, що містить приписи (Ben-Elia та ін. 2013; González Ramírez та ін. 2021). Іншим ключовим фактором для того, щоб змусити людей вибрати найкращий варіант маршруту, може бути кількісна оцінка того, наскільки більше впливів на стійкість буде, якщо буде обрано інший маршрут. Прикладом емпіричних висновків може бути заява про те, що під час подорожі на південь маршрут 2 на 97% гірший за маршрут 1, тоді як маршрут 3 на 110% гірший.

Крім того, інерція статус-кво є ключовим питанням щодо того, чи захочуть люди змінити свій сьогоdnішній маршрут на більш стійку альтернативу. Порогові значення інерції часто залежать від контексту, тому

передбачити, хто потенційно може змінити маршрут, важко зробити (Ben-Elia та ін. 2008). Щоб подолати цю надзвичайно складну тему, необхідно провести більше досліджень щодо витрат на сталість.

Тому через інерцію узагальнену вартість стійкості, швидше за все, найефективніше застосовувати до подорожей невідомими територіями чи регіонами. У місцях, які водій раніше не відвідував, жодна існуюча інерція вибору маршруту не завадить водієві розглянути можливість вибору найбільш екологічного варіанту маршруту (Ben-Elia та ін. 2008). У результаті цього найбільш стійкий варіант маршруту повинен мати більші шанси бути обраним. Тим не менш, люди не завжди раціональні у прийнятті рішень, тому поведінку мандрівників у реальному житті необхідно ретельно вивчати в контексті екологічних маршрутів.

3.4. Емпіричні висновки

Емпіричні результати показують, що варіант маршруту 1 дає найнижчу загальну вартість сталості, хоча це, безперечно, найдовший варіант маршруту. Можна лише уявити, як той факт, що водієві доводиться їхати набагато довше, ніж він/вона за будь-яким із двох інших варіантів маршруту, впливає на бажання водія фактично вибрати варіант маршруту 1. За словами Vreeswijk та ін. (2013), приблизно 40% водіїв прагнуть мінімізувати час у дорозі, тоді як 80% водіїв прагнуть мінімізувати відстань. Однак у цьому прикладі варіант маршруту 1 також є найшвидшим, тому той факт, що він є найдовшим, ймовірно, міг би помітити більшість водіїв. Однак різні обмеження швидкості вздовж різних маршрутів можуть призвести до неправильного сприйняття фактичного часу руху, а оскільки різниця в часі в секундах порівняно мала, не перевищує 50 секунд для будь-якого з маршрутів або напрямків, навіть менші помилки можуть призвести до сприйняття оптимальний маршрут значно відрізняється від фактично оптимального маршруту.

Інші фактори, які потенційно можуть впливати на готовність водіїв їхати по маршруту 1, включають різні атрибути доріг, що надають кожному

альтернативному маршруту власні характеристики. Деякі атрибути, такі як лежачі поліцейські, кругові розв'язки та низька швидкість, можуть змусити деяких водіїв уникати такого альтернативного маршруту. У випадку варіантів маршруту, що пролягає через Хьорнефорс і повз нього, маршрут 1 має найменшу кількість типів атрибутів, яких люди повинні уникати. Уздовж маршруту 2, з іншого боку, можна було б проїхати через кільцеву розв'язку та кілька нерівностей. Уздовж маршруту 3 можна також проїхати через кільцеву розв'язку, подолати кілька нерівностей, але додатково матиме досить довгу ділянку з обмеженням швидкості 40 км/год, порівняно з обмеженням швидкості 60 км/год для більшої частини маршруту 1 і 50 км/год для більшої частини маршруту 2. Причини уникнення таких атрибутів, як лежачі поліцейські та кільцеві перехрестя, можуть, серед іншого, включати відсутність гальмування та прискорення, дорогу не сприймають як пряму, часте перемикавання передач тощо. Геометрія дороги також залежить від сприйняття часу, при цьому більш прямі маршрути сприймаються як швидші (Vreeswijk та ін. 2013).

Фактором, який не було враховано в запропонованому робочому процесі моделювання, є той факт, що люди можуть не тільки пройти через Тернопіль за один раз, але й виконувати доручення по дорозі. У таких випадках, природно, найбільш стійкий варіант маршруту не буде найбільш стійким для використання. Якщо, наприклад, хтось хоче відвідати супермаркет, найкраще використовувати варіанти маршруту 2 або 3, оскільки обидва супермаркети в Тернопіль розташовані вздовж варіантів маршруту 2 і 3. Частота, з якою водій проїжджає повз або через Тернопіль, також має потенційну роль у визначенні або впливі на готовність вибору найбільш стійкого варіанту маршруту. Люди, які часто проїжджають повз, можуть вибрати оптимальний варіант маршруту, тоді як люди, які проїжджають рідше, швидше за все, оберуть лише задовільний варіант.

Оскільки подібні дослідження в Тернопіль раніше не проводилися, неможливо провести порівняння з іншими результатами. Також не можна

провести жодної паралелі між запропонованою структурою моделювання та будь-якою існуючою структурою, оскільки такої структури ще не існує.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Безпека праці при організації та моніторингу екомаршрутів з використанням ГІС-технологій

Сучасне планування екологічних маршрутів неможливе без використання геоінформаційних систем та спеціалізованого програмного забезпечення. При цьому важливо забезпечити безпечні умови праці для всіх учасників процесу - від операторів ГІС до фахівців, що проводять польові дослідження.

Організація робочого місця оператора ГІС

Тривала робота з геоінформаційними системами вимагає особливої уваги до організації робочого простору. Основні вимоги включають:

- Розташування монітора на відстані 60-70 см від очей під кутом 15-20° нижче рівня очей
- Забезпечення освітленості робочої поверхні 300-500 лк
- Використання ергономічного крісла з регульованими параметрами
- Наявність підставки для ніг з регульованим кутом нахилу
- Розміщення клавіатури на відстані 10-15 см від краю стола

Технічні вимоги до обладнання

Комп'ютерне обладнання

Для безпечної роботи з ГІС необхідно забезпечити:

- Використання моніторів з частотою оновлення не менше 75 Гц
- Застосування антивідблискових фільтрів
- Заземлення всього електрообладнання
- Регулярне технічне обслуговування техніки

Програмне забезпечення

Важливо використовувати:

- Ліцензійне ПЗ з регулярними оновленнями
- Антивірусний захист
- Системи резервного копіювання даних

- Програми для нагадування про перерви
- Організація режиму праці та відпочинку

Регламентовані перерви

При роботі з ГІС рекомендується:

- Робити 15-хвилинні перерви кожні 2 години
- Виконувати комплекс вправ для очей
- Проводити фізкультурні паузи
- Чергувати різні види діяльності

Мікроклімат приміщення

Необхідно забезпечити:

- Температуру повітря 21-23°C
- Відносну вологість 40-60%
- Швидкість руху повітря до 0,1 м/с
- Регулярне провітрювання кожні 2 години

Безпека польових досліджень

Підготовка до польових робіт

Перед виїздом необхідно:

- Пройти інструктаж з техніки безпеки
- Перевірити справність GPS-обладнання
- Підготувати аптечку першої допомоги
- Забезпечити засоби зв'язку

Робота на місцевості

При зборі даних важливо:

- Використовувати світловідбиваючі жилети
- Дотримуватися правил дорожнього руху
- Працювати групами мінімум по 2 особи
- Уникати роботи в умовах поганої видимості

Профілактика професійних захворювань

Профілактика зорового напруження

Для збереження зору необхідно:

- Дотримуватися оптимальної відстані до екрану

- Регулярно виконувати гімнастику для очей
- Використовувати спеціальні комп'ютерні окуляри
- Забезпечити правильне освітлення робочого місця

Профілактика опорно-рухового апарату

Для запобігання проблем з опорно-руховим апаратом слід:

- Використовувати ергономічні меблі
- Регулярно змінювати положення тіла
- Виконувати виробничу гімнастику
- Дотримуватися правильної постави

Психофізіологічні аспекти безпеки

Управління стресом

Для зниження психоемоційного навантаження рекомендується:

- Планувати роботу з урахуванням складності завдань
- Робити регулярні перерви
- Чергувати різні види діяльності
- Використовувати техніки релаксації

Організація комунікації

Важливо забезпечити:

- Чіткий розподіл обов'язків
- Ефективну систему обміну інформацією
- Регулярні наради команди
- Зворотний зв'язок від керівництва

Дотримання всіх вищезазначених вимог дозволить забезпечити безпечні умови праці при роботі з ГІС-технологіями та проведенні польових досліджень, що є необхідною умовою для успішної розробки та впровадження екомаршрутів.

4.2. Безпека життєдіяльності при проектуванні та експлуатації екомаршрутів у міському середовищі

Сучасне міське середовище характеризується складною взаємодією транспортних, пішохідних та велосипедних потоків, що створює специфічні виклики для безпеки життєдіяльності. При проектуванні та експлуатації екомаршрутів необхідно враховувати комплекс факторів, що впливають на безпеку всіх учасників руху.

Фактори ризику в міському середовищі

Основними факторами ризику при експлуатації екомаршрутів є:

- Перетин транспортних та пішохідних потоків
- Недостатня видимість у темний час доби
- Погодні умови (дощ, сніг, ожеледиця)
- Психофізіологічний стан учасників руху

Організація безпечного руху на екомаршрутах

Інфраструктурні рішення

При проектуванні екомаршрутів необхідно передбачити:

- Розділення пішохідних та транспортних потоків
- Облаштування безпечних пішохідних переходів
- Встановлення відповідного освітлення
- Створення "острівців безпеки" на широких перехрестях

Технічні засоби організації руху

Важливим елементом безпеки є правильне застосування технічних засобів:

- Світлофорне регулювання з урахуванням інтенсивності потоків
- Дорожні знаки та розмітка
- Системи відеоспостереження
- Інформаційні табло

Моніторинг та оцінка безпеки

Система моніторингу

Для забезпечення безпеки необхідно впровадити:

- Регулярний аналіз дорожньо-транспортних пригод
- Оцінку інтенсивності руху в різний час доби
- Моніторинг стану дорожнього покриття
- Контроль роботи технічних засобів

Оцінка ризиків

При оцінці ризиків слід враховувати:

- Статистику ДТП на подібних ділянках
- Особливості планування території
- Наявність об'єктів, що генерують значні потоки людей
- Сезонні фактори впливу

Заходи з підвищення безпеки

Превентивні заходи

Основні напрямки превентивної роботи:

- Регулярне обстеження маршрутів
- Своєчасний ремонт покриття
- Очищення від снігу та льоду
- Підтримка в робочому стані технічних засобів

Інформаційне забезпечення

Важливим аспектом безпеки є інформування учасників руху:

- Встановлення інформаційних щитів
- Розміщення схем маршрутів
- Позначення небезпечних ділянок
- Оповіщення про зміни в організації руху

Особливості експлуатації в різні сезони

Зимовий період

Специфіка забезпечення безпеки взимку:

- Своєчасне очищення від снігу
- Протиожеледна обробка
- Додаткове освітлення
- Коригування режимів світлофорного регулювання

Літній період

Особливості літньої експлуатації:

- Контроль стану покриття при високих температурах
- Забезпечення видимості при яскравому сонці
- Врахування збільшення велосипедного руху
- Додаткові заходи безпеки при дощах

Надзвичайні ситуації

План реагування

Необхідно розробити чіткий план дій при:

- Дорожньо-транспортних пригодах
- Несприятливих погодних умовах
- Масових заходах
- Технічних несправностях

Взаємодія служб

Організація взаємодії:

- Координація дій екстрених служб
- Інформування учасників руху
- Забезпечення об'їзних маршрутів
- Відновлення нормального режиму руху

Рекомендації щодо вдосконалення системи безпеки

Короткострокові заходи

Першочергові дії для підвищення безпеки:

- Аудит наявних технічних засобів
- Оновлення розмітки та знаків
- Ремонт пошкоджених елементів
- Встановлення додаткового освітлення

Довгострокові заходи

Стратегічні напрямки розвитку:

- Модернізація системи управління рухом
- Впровадження інтелектуальних технологій
- Реконструкція небезпечних ділянок
- Створення єдиного центру моніторингу

Таким чином, забезпечення безпеки життєдіяльності при проектуванні та експлуатації екомаршрутів вимагає комплексного підходу та постійної уваги до всіх аспектів організації руху. Тільки системна робота у цьому напрямку дозволить створити безпечні умови для всіх учасників дорожнього руху.

ВИСНОВКИ

Моделювання вибору маршруту є дуже складною галуззю дослідження, яка включає як моделювання мережі, так і розподіл витрат на зв'язки, а також різноманітні дилеми щодо потенційних наслідків, застосувань і механізмів поведінки. Крім того, це дослідження було спрямоване на те, щоб запропонувати структуру моделювання, здатну знайти найбільш стійкий варіант маршруту серед кількох альтернатив. Запропонована структура моделювання має деякі обмеження з точки зору застосовності в різних умовах, наприклад, у перевантажених мережах, але кінцева ідея базування структури на основі метушливої теорії множин повинна бути також перенесена в інші контексти та інші змінні. Які змінні слід включити до узагальненої вартості стійкості, по-перше, залежить від того, яке визначення стійкості автор вважає відповідним або відповідним. Однак важливо також розглянути, в якому географічному масштабі планується провести дослідження, і в якому просторовому масштабі слід моделювати вплив. Нарешті, наявність точних даних, таких як числові значення просторових впливів змінних, також слід брати до уваги. Хоча деякі змінні спочатку можуть здатися дуже цікавими для включення в узагальнену вартість сталого розвитку, насправді їх неможливо кількісно визначити або просторово змоделювати.

Підсумовуючи, запропонована структура моделювання має на меті працювати як загальне керівництво, яке необхідно адаптувати до кожного нового контексту, у якому воно використовується. У контексті Тернопіль запропоновану структуру можна застосувати безпосередньо, і програмне забезпечення ArcGIS пройшло через це, здатний знайти найбільш стійкий варіант маршруту серед трьох запропонованих альтернатив.

Майбутні дослідження.

Необхідно провести подальші дослідження, щоб дослідити потенційні застосування включення стійкості в системи інформації про дорожній рух. Виявлено, що поведінка вибору маршруту сильно залежить від контексту, тому дослідження в контексті сталого розвитку стануть важливим внеском у

сферу географії. Крім того, розробка кращого способу узагальнення як відносних, так і невідносних змінних у загальну вартість стійкості допомогла б підвищити точність і надійність результатів.

Глибші знання про те, як і в якій мірі вплив дорожнього транспорту змінюється залежно від відстані від доріг з різними обмеженнями швидкості, також були б корисними для досягнення кращих оцінок таких змінних під час проведення просторового моделювання. Саморобні вимірювання рівня шуму та забруднення повітря в контексті, який вивчається, можуть, наприклад, допомогти підвищити точність числових значень, які використовуються як вихідні дані для моделювання. На даний момент більшість моделювання просторових впливів проводилося навколо автомагістралей. Використання бортових витратомірів або подібних пристроїв для точного вимірювання специфічних для транспортного засобу факторів, таких як рівень споживання палива на різних швидкостях, прискорення, уповільнення та холостий хід, також допомогло б надати водіям точніші пропозиції щодо того, який маршрут дає найменшу витрату вартість стійкості та навіть зробити їх більш індивідуальними для кожного типу автомобіля.

Майбутні дослідження також повинні спробувати глибше вивчити концепції чутливості навколишнього середовища (ES) і композитного індексу чутливості навколишнього середовища (CESI), і, отже, націлитися на застосування цих основ для моделювання екологічних маршрутів багатьох змінних стійкості.

Враховуючи соціально-економічні чинники, майбутні дослідження щодо моделювання маршрутів також можуть допомогти визначити, чи пов'язані соціально-економічні фактори із сильним впливом автомобільного транспорту від певних альтернативних маршрутів чи ні, і чи повинні бути відмінності в тому, на кого це впливає. брати до уваги при розрахунку найкращого маршруту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- Barth, M., Boriboonsomsin, K., (2009) Traffic Congestion and Greenhouse Gases, *Access Magazine*, Vol. 1 (35)
- Beckerman, B., Jerrett, M., Brook, J. R., Verma, D. K., Arain, M. A., Finkelstein, M. M., (2008)
- Bel, G., Bolancé, C., Guillén, M., Rosell, J., (2015) The environmental effects of changing speed limits: a quantile regression approach, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 36, p. 76-85
- Ben-Elia, E., Erev, I., Shiftan, Y., (2008) The combined effect of information and experience on drivers' route-choice behavior, *Transportation*, Vol. 35, p. 165–177
- Brown, B. J., Hanson, M. E., Liverman, D. M., Merideth, R. W., (1987) Global sustainability: Toward definition, *Environmental Management*, Vol. 11 (6) p. 713–719
- Buchanan, C., (1963) *Traffic in Towns*, London: HMSO
- Chadwick, N., (1990) *Computer aided environmental traffic design*, Proceedings of Seminar G, P 334. The 16th PTRC Summer Annual Meeting on Traffic Management and Road Safety, p. 95–106
- Conlisk, J., (1996) Why bounded rationality? *Journal of Economic Literature*, Vol. 34 (2) p. 669-700
- Correlation of nitrogen dioxide with other traffic pollutants near a major expressway, *Atmospheric Environment*, Vol. 42 (2) p. 275-290
- Crown. B., (2001) *Report on Roundabouts*, January 2001
- De Borger, B., Fosgerau, M., (2008) The trade-off between money and travel time: A test of the theory of reference-dependent preferences, *Journal of Urban Economics*, Vol. 64 (1) p. 101–115
- Demir, E., Bektas, T., Laporte, G., (2011) A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 16 (5) p. 347-357

Drożdż, W., Vovk, Y., Widera, K., Łopatka, A., & Gawlik, A. (2023). Sustainability assessment of the energy generation systems. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 8(2), 249-258.

Ehmke, J. F., Campbell, A. M., Thomas, B. W., (2016) Vehicle routing to minimize timedependent emissions in urban areas, *European Journal of Operational Research*, Vol. 251 (2) p. 478-494

Ericsson, E., Larsson, H., Brundell-Freij, K., (2006) Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool, *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, Vol.14 (6) p.369-383

Ewing, R., (1999) *Traffic Calming: State of the Practice*. Institute of Transportation Engineers, Washington

Federal Highway Administration, (2000) *The quality improvement program: the congestion mitigation and air*, Publication No. FHWA-EP-00-020

Folgerø, I. K., Harding, T., Westby, B. S., (2020) Going fast or going green? Evidence from environmental speed limits in Norway, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 82, 102261

Forman, R. T. T., Sperling, D., Bissonette, J. A., Clevenger, A. P., Cutshall, C. D., Dale, V. H., Fahrig, L., France, R. L., Goldman, C. R., Heanue, K., Jones, J., Swanson, F., Turrentine, T., Winter, T. C., (2003) *Road Ecology*, Island Press

Gately C. K., Hutyra, L. R., Peterson, S., Wing, I. S., (2017) Urban emissions hotspots: quantifying vehicle congestion and air, *Environmental Pollution*, Vol. 229, p. 496-504

Guo, C., Yang, B., Andersen, O., Jensen, C. S., Torp, K., (2015a) EcoMark 2.0: empowering eco-routing with vehicular environmental models and actual vehicle fuel consumption data, *GeoInformatica*, Vol.19, p. 567–599

Health Effects Institute (HEI) (2010) *Traffic-Related Air Pollution: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects*. Health Effects Institute; Boston, MA, USA: 2010

Hiraoka, T., Iritani, I., Okabe, K., Kumamoto, H., (2002) *Route choice behavior model based on bounded rationality*, Proceedings of the 9th ITS World Congress 2002

Insurance Institute of Highway Safety, (IIHS) (2001) *Status Report*, Vol. 36 (7)

IPCC, (2014) *Transport, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jiang, G., Fosgerau, M., Lo, H. K., (2020) Route choice, travel time variability, and rational inattention, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 132, p. 188-207

Joumard, R., Jost, P., Hickman, J., Hassel, D., (1995) Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration, *Science of The Total Environment*, Vol. 169 (1–3) p. 167-174

Kraschl-Hirschmann, K., Zallinger, M., Luz, R., Fellendorf, M., Hausberger, S., (2011) "A method for emission estimation for microscopic traffic flow simulation" 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, p. 300-305

Kumar, N. V., Ganesh, L. S., (1996) An empirical analysis of the use of the Analytic Hierarchy Process for estimating membership values in a fuzzy set, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 82, p. 1–16

Lan, Z., Cai, M., (2021) Dynamic traffic noise maps based on noise monitoring and traffic speed data, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 94, 102796

Li, J., Lai, X., (2019) Modelling travellers' route choice behaviours with the concept of equivalent impedance, *Transportation*, Vol. 46, p. 233–262

Liu, K., Xu, Y., (2019) Route Choice Behavior: Understanding the Impact of Asymmetric Preference on Travelers' Decision Making, *Symmetry*, Vol. 11 (1), 66

- Lockwood, I. M., (1997) ITE Traffic calming definition, *ITE Journal*, Vol. 67, p. 22–24
- Loder, Bayly, (1980) *Road/Amenity Classification—A Practical Tool for Traffic Management*, Hawthorn: Road Safety and Traffic Authority
- Lotan, T., (1997) Effects of familiarity on route choice behavior in the presence of information, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 5 (3-4) p. 225-243
- Madireddy, M., De Coensel, B., Can, A., Degraeuwe, B., Beusen, B., De Vlieger, I., Botteldooren, D., (2011) Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 16 (7) p. 504-508
- Mahmassani, H., Chang, G., (1987) On boundedly rational user equilibrium in transportation systems, *Transportation Science*, Vol. 21 (2) p. 89-99
- Mandavilli, S., Rys, M. J., Russell, E. R., (2008) Environmental impact of modern roundabouts, *International journal of industrial ergonomics*, Vol.38 (2) p. 135-142
- Marousi, K. P., Koukounaris, A. I., Stephanedes, Y. J., (2019) Methodology for societal travel cost estimation in urban road networks, *Transportation Research Procedia*, Vol. 41, p. 405409
- Mitchell, A., (2012) *The Esri Guide to GIS Analysis. Modeling Suitability, Movement, and Interaction*. ESRI Press 2012: Redlands CA
- Murphy, E., King, E., (2014) *Environmental Noise Pollution: Noise Mapping, Public Health, and Policy*, Elsevier, 2014.
- Padró-Martínez, L. T., Patton, A. P., Trull, J. B., Zamore, W., Brugge, D., Durant, J. L., (2012) Mobile monitoring of particle number concentration and other traffic-related air pollutants in a near-highway neighborhood over the course of a year, *Atmospheric Environment*, Vol. 61, p. 253-264
- Patella, S. M., Scrucca, F., Asdrubali, F., Carrese, S., (2019) Carbon Footprint of autonomous vehicles at the urban mobility system level: A traffic simulation-

based approach, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 74, p. 189-200

Phillips, B. B., Bullock, J. M., Osborne, J. L., Gaston, K. J., (2021) Spatial extent of road pollution: A national analysis, *Science of The Total Environment*, Vol. 773, 145589

Pope, J., Annandale, D., Morrison-Saunders, A., (2004) Conceptualising sustainability assessment, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 24 (6) p-595–616

Rodrigue, J-P. (2020) *The Geography of Transport Systems: fifth edition*, New York: Routledge

Russell, E., Rys, M. J., Greg, L., (2000) *Modeling Traffic Flows and Conflicts at Roundabouts*, MBTC FR-1099. Mac-Blackwell National Rural Transportation Study Center, University of Arkansas

Saaty, T. L., (1980) *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, New York: McGraw-Hill

Samuelson, W., Zeckhauser, R., (1988) Status quo bias in decision making, *Journal of Risk and Uncertainty*, Vol. 1 (1) p. 7-59

Schneider, R. J., (2013) Theory of routine mode choice decisions: An operational framework to increase sustainable transportation, *Transport Policy*, Vol. 25, p. 128-137

Sheffi, Y., (1984) *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ

Simon, H. A., (1987) *Bounded rationality*, The New Palgrave: Utility and Probability, Emerald Group Publishing, p. 15-18

Sims, C. A., (2003) Implications of rational inattention, *Journal of Monetary Economics*, Vol. 50 (3) p. 665-690

Sims, C. A., (2010) *Rational inattention and monetary economics*, Handbook of Monetary Economics, Vol. 3, p. 155-181

Sivak, M., Schoettle, B., (2012) Eco-Driving: Strategic, Tactical, and Operational Decisions of the Driver that Influence Vehicle Fuel Economy, *Transport Policy*, Vol. 22, p. 96–99

Small, K. A., (2012) Valuation of travel time, *Economics of Transportation*, Vol. 1 (1-2) p. 2– 14

Smit, R., Poelman, M., Schrijver, J., (2008) Improved road traffic emission inventories by adding mean speed distributions, *Atmospheric Environment*, Vol. 42 (5) p. 916-926

Stansfeld, S. A., (2015) Noise effects on health in the context of air pollution exposure, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 12 (10) p. 12735-12760

Tang, J., McNabola, A., Misstear, B., Pilla, F., Alam, Md. S., (2019) Assessing the impact of vehicle speed limits and fleet composition on air quality near a school, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16 (149)

Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., Carvalho, M. G., (2009) Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling, *Waste Management*, Vol. 29 (3) p. 1176-1185

Taylor, M., Lynam, D., Baruya, A., (2000) *The effects of drivers speed on the frequency of road accidents*, TRL Report 421. Crowthorne, Transport Research Laboratory, UK

Tversky, A., Kahneman, D., (1981) The framing of decisions and the psychology of choice, *Science*, Vol. 211 (4481) p. 453-458

UN (1987) *Report of the world commission on environment and development: Our common future*. Oxford University Press, Oxford

Vovk, I., Tson, O., Vovk, Y., Vovk, Y., & Rozhko, N. (2024). Mobility as a Service for tourism: Challenges and opportunities for meeting the needs of tourists in urban environments. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 9(2), 137-149.

Vovk, Y. Y., Vovk, Y. Y., Petrenko, O. A., & Veres, A. O. (2023). Impact of smart technologies on road traffic safety: study of technological innovations. *Збірник Матеріалів*, 69.

Wang, J. Y. T., Ehrgott, M., (2013) Modelling route choice behaviour in a tolled road network with a time surplus maximization biobjective user equilibrium model, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 57, p. 342–360

Wardrop, J., (1952) *Some theoretical aspects of road traffic research*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 1, p. 325-378

World Health Organization (WHO) (2018) *Burden of Disease from Ambient Air Pollution for 2016*, World Health Organization; Geneva, Switzerland: 2018

Yang, B., Kaul, M., Jensen, C. S., (2014) *Using Incomplete Information for Complete Weight Annotation of Road Networks*, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 26 (5) p. 1267-1279

Yang, Y., Lu, H. P., Yin, Y., Yang, H., (2013) Optimization of variable speed limits for efficient, safe, and sustainable mobility, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2333 (1) p. 37–45

Yu-qin, F., Jun-qiang, L., Zhong-Yu, X., Gui-e, Z., Yi, H., (2013) *Route Choice Model Considering Generalized Travel Cost Based on Game Theory*, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2013

Zadeh, L. A., (1965) Fuzzy sets, *Information and Control*, Vol. 8, p. 338–353

Zhou, L., Zhong, S., Ma, S., Jia, N., (2014) Prospect theory based estimation of drivers' risk attitudes in route choice behaviors, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 73, p. 1-11

Zhou, M., Jin, H., Wang, W., (2016) A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol 49, p. 203-218

Вовк Ю.Я., Ляшук О.Л., Мосейко Ю.В., Хавтур П.В., Заривенний А.Р. Дорожній рух та його безпека: Програма «нульова смертність на дорогах» // Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти: матеріали XIV

Міжнародної науково-практичної конференції (в авторській редакції), (м. Кривий Ріг, 12 листопада 2019 року). Кривий Ріг, 2019. 346 с. – С. 71-74.

Вовк, Ю. Я., & Худобей, Р. В. (2021). Контроль дотримання безпеки перевезень на громадському транспорті в умовах карантинних обмежень з використанням інтелектуальних транспортних систем. Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти: матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (в авторській редакції), (м. Кривий Ріг, 19 листопада 2021 року). Кривий Ріг, 2021. 238 с.

Вовк, Ю. Я., Вовк, І. П., Худобей, В. Р., Питлик, С. В., & Вовк, Я. Ю. (2023). Мобільність як послуга (МaaS): доцільність впровадження у малих міських або сільських районах. *ЗБІРНИК МАТЕРІАЛІВ*, 62.

Вовк, Ю. Я., Вовк, Я. Ю., Губич, Н. В., & Іванунь, В. В. (2023). Аналіз ролі транспортної телематики та інтернету речей (IoT) в транспорті. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “*, 134-135.

Вовк, Ю. Я., Матвіїшин, А. Й., & Вовк, Я. Ю. (2022). Паратранзитні та мікроперевезення в системі надання транспортних послуг у військовий період. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин „Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики “*, 161-162.

Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» дипломної роботи (для студентів спеціальності 275 «Транспортні технології») / Укл.: Вовк Ю.Я., Цьонь О.П., Вовк І.П. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 28 с.

Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С. Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

