

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження дорожньої мережі міста за умови впровадження стратегії
мікромобільності (комплексна тема)

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

(на автомобільному транспорті)

(шифр і назва спеціальності)

Митник І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Мостова К.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Гевко Б.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Плекан У.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зав. кафедри Цьонь О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультетінженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедраавтомобілів

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

(підпис)

Цьонь О.П.

«»2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступенямагістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(шифр і назва спеціальності)

студентуМитник Ірині Володимирівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботиДослідження дорожньої мережі міста за умови впровадження стратегії мікромобільності (комплексна тема)

Керівник роботиГевко Б.Р., к.е.н., асист.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «11» листопада 2024 року № 4/7-1081.

2. Термін подання студентом завершеної роботи22.12.2024

3. Вихідні дані до роботиІнформаційні матеріали, джерела з мережі Інтернет

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Вступ. 2. Теоретичний розділ. 3. Аналітико-дослідницький розділ. 4. Проектно-рекомендаційний розділ. 5. Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. 6. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Ілюстративний матеріал

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання 11.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Митник Ірина Володимирівна

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Гевко Б.Р.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра автомобілів

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(шифр і назва спеціальності)

студенту Мостовій Катерині Богданівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження дорожньої мережі міста за умови впровадження стратегії мікромобільності (комплексна тема)

Керівник роботи Гевко Б.Р., к.е.н., асист.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «11» листопада 2024 року № 4/7-1081.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22.12.2024

3. Вихідні дані до роботи Інформаційні матеріали, джерела з мережі Інтернет

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Вступ. 2. Теоретичний розділ. 3. Аналітико-дослідницький розділ. 4. Проектно-рекомендаційний розділ. 5. Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. 6. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Ілюстративний матеріал

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання 11.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Мостова Катерина Богданівна

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Гевко Б.Р.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

**Митник Ірина Володимирівна, Мостова Катерина Богданівна –
Дослідження дорожньої мережі міста за умови впровадження стратегії
мікромобільності (комплексна тема) – 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.

В теоретичному розділі проведено огляд літератури щодо впровадження стратегії мікромобільності в міському середовищі, проаналізовано досвід європейських міст, досліджено теоретичні передумови моделювання транспортних потоків та розподілу дорожнього простору.

В другому розділі проведено планування дослідження та експериментів, обґрунтовано створення сценаріїв моделювання для міст Тернопіль та Київ, проаналізовано методи оцінки чутливості транспортної мережі при впровадженні елементів мікромобільності.

В третьому розділі проведено обробку результатів моделювання, виконано аналіз часу подорожі, пройденої відстані та середньої швидкості руху для різних сценаріїв, досліджено розподіл поїздок за видами транспорту, проаналізовано еластичність попиту на переміщення, зроблено висновки щодо ефективності впровадження стратегії мікромобільності.

В четвертому розділі досліджено питання безпеки дорожнього руху при змішаному використанні проїжджої частини традиційним та мікромобільним транспортом, а також проаналізовано заходи зі зменшення негативного впливу на довкілля при будівництві та експлуатації об'єктів мікромобільної інфраструктури.

**ДОРОЖНЯ МЕРЕЖА, МІСТО, МІКРОМОБІЛЬНІСТЬ, ТРАНСПОРТ,
МОДЕЛЮВАННЯ.**

ABSTRACT

**Mytnyk Iryna Volodymyrivna, Mostova Kateryna Bohdanivna -
Research of the city road network under the implementation of micromobility
strategy (complex topic) - 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 theoretical section reviews literature on implementing micromobility strategy in urban environments, analyzes European cities' experience, and examines theoretical prerequisites for modeling traffic flows and road space distribution.

The second section covers research and experiment planning, justifies creating simulation scenarios for Ternopil and Kyiv cities, and analyzes methods for assessing transport network sensitivity when implementing micromobility elements.

The third section processes simulation results, analyzes travel time, covered distance, and average speed for different scenarios, examines trip distribution by transport modes, analyzes travel demand elasticity, and draws conclusions about the effectiveness of micromobility strategy implementation.

The fourth section investigates road safety issues in mixed use of roadways by traditional and micromobility transport, and analyzes measures to reduce negative environmental impact during construction and operation of micromobility infrastructure.

**ROAD NETWORK, CITY, MICROMOBILITY, TRANSPORT,
MODELING.**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	13
1.1. Огляд сучасних кругових розв'язок	13
1.2. Значні скорочення пропускної здатності міських мереж	17
1.3. Транспортна еластичність.....	19
2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	23
2.1. Опис проекту. Мета та інструменти	23
2.2. Аналіз чутливості.....	27
2.2.1. Методи та сценарії	27
2.2.2. Сценарій «Тернопіль»	29
2.2.3. Сценарій Е-Вело-Київ.....	31
2.3. Результати	31
2.3.1. Сценарій «Тернопіль»	32
2.3.2. Сценарій Е-Вело-Київ.....	43
2.4. Очікуваний та змодельований зсув режимів.....	54
2.5. Додаткові експерименти та аналізування.....	55
2.5.1. Початкова чисельність населення та стан заторів.....	55
2.5.2. Користь альтернативних режимів	60
2.5.3. Вплив обмежень перепланування	71
2.5.4. Час подорожі посилення	77
3. ПРОЄКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ	89
3.1. Оцінювання мереж з перерозподіленням дорожнім простором. Методи оцінювання мереж із перерозподіленням дорожнім простором .	89
3.1.1. Впровадження велосипедів та електровелосипедів у MATSim	89
3.1.2. Налаштування симуляції з велосипедами	91
3.1.3. Налаштування моделювання з електровелосипедами	92
3.2. Результати	92
3.2.1. Інфраструктура зв'язку	92
3.2.2. 25% населення, звичайні велосипеди	95

3.2.3. 25% населення, велосипеди та електровелосипеди.....	100
3.3. Електровелосипеди: швидкість	103
3.4. Велосипед розраховує	104
3.5. Обговорення та погляд	105
3.5.1. Зворотний зв'язок з процесом перерозподілу	105
3.5.2. Решта обмежень	106
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ..	108
4.1. Безпека дорожнього руху при впровадженні мікромобільного транспорту	108
4.2. Безпека життєдіяльності на транспорті. Реалізація державної політики моніторингу довкілля у сфері автомобільного транспорту ...	111
4.3. Запобігання антропогенному забрудненню атмосфери внаслідок функціонування суб'єктів господарювання автомобільного господарства	114
ВИСНОВКИ.....	117
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	119
ДОДАТКИ.....	119
Додаток А.....	122

ВСТУП

Мікромобільність та громадський транспорт вивчається як ключова стратегія досягнення цільових показників скорочення викидів у транспортному секторі в міському середовищі. Активні режими та мікромобільність узагальнюють ходьбу, їзду на велосипеді (з електротягою та без неї) та використання інших легких електромобілів. Ідея полягає в тому, щоб підштовхнути цю зміну шляхом перерозподілу вже існуючого дорожнього простору між різними видами транспорту. Передбачається, що відбирання дорожнього простору від автомобілів і надання його активним режимам і мікромобільності переверне ефект індукованого трафіку та запропонує привабливий альтернативний спосіб пересування без великих інвестицій у інфраструктуру та довгих горизонтів планування.

Ціль цієї оновленої мережі полягає в тому, щоб досягти частки 50% дорожнього простору, призначеного для активних видів транспорту та мікромобільності, зберігаючи при цьому необхідний доступ для транспортних засобів швидкої медичної допомоги та комунальних машин. Громадський транспорт розглядається як додатковий режим з низьким рівнем викидів до активних видів транспорту, щоб забезпечити триваліші поїздки та покрити періоди поганої погоди. З точки зору міського дизайну, інфраструктура мікромобільності повинна супроводжуватися захистом від погодних умов (наприклад, деревами), інфраструктурою зарядних станцій і безпечною парковкою для велосипедів і невеликих транспортних засобів.

Ідея перерозподілу дорожнього простору вже реалізована в містах Європи та в усьому світі, і результати цих проектів підсумовані в наступному розділі. Інший досвід роботи з міськими мережами, які зазнають раптових або екстремальних змін пропускної здатності, існує головним чином у зв'язку з будівельними майданчиками, які (частково) блокують важливі дороги. Ці зміни часто добре оголошуються. Крім того, раптова несправність доріг, як-от обвалення мостів або руйнування після дорожньо-транспортних пригод, може призвести до місцевого зменшення пропускної здатності. На відміну від

поодиноких постраждалих з'єднань, широко поширені раптові скорочення пропускної здатності виникають під час і після стихійних лих, таких як повені чи землетруси. У цьому випадку вони не оголошуються, і мешканці знаходяться в надзвичайній ситуації, яка не обов'язково відображає їх повсякденні моделі мобільності. Результати досліджень щодо цих типів змін пропускної здатності досліджуються як еталонні для перерозподілених мереж, пам'ятаючи, що обставини прийняття рішень не є повністю порівнюваними.

Мета дослідження: проведення моделювання на основі агентів з використанням мереж для оцінки впровадження стратегії мікромобільності в міському середовищі та порівняння результатів з базовим сценарієм із спрощеною мережею.

Актуальність дослідження.

Дослідження є актуальним, оскільки:

- Спрямоване на досягнення цільових показників скорочення викидів у транспортному секторі
- Пропонує рішення для ефективного перерозподілу існуючого дорожнього простору
- Досліджує альтернативні способи пересування без значних інфраструктурних інвестицій
- Сприяє розвитку сталої міської мобільності

Предмет дослідження.

Процеси впровадження стратегії мікромобільності в міському середовищі та їх вплив на транспортну мережу міста.

Об'єкт дослідження: Дорожня мережа міст Тернопіль та Київ в умовах впровадження елементів мікромобільності.

Завдання дослідження:

- Провести огляд літератури щодо впровадження стратегії мікромобільності
- Проаналізувати досвід європейських міст

- Дослідити теоретичні передумови моделювання транспортних потоків
- Створити сценарії моделювання для міст Тернопіль та Київ
- Проаналізувати методи оцінки чутливості транспортної мережі
- Провести обробку результатів моделювання
- Дослідити питання безпеки дорожнього руху при змішаному використанні проїжджої частини

Методи дослідження:

- Агентне моделювання з використанням MATSim
- Аналіз чутливості транспортної мережі
- Статистичний аналіз даних
- Порівняльний аналіз сценаріїв
- Дискретне моделювання вибору режиму транспорту
- Математичне моделювання транспортних потоків

1. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Огляд сучасних кругових розв'язок

Як продемонстрували Cairns та ін. (2002) ідея перерозподілу дорожнього простору на користь видів транспорту з низьким рівнем викидів сягає 1970-х років, коли були задокументовані перші подібні проекти. Всупереч загальній думці того часу, для переважної більшості прикладів, проаналізованих у цій роботі, загальний рівень моторизованого трафіку був знижений у мережі навколо локально змінених пропускних спроможностей або, принаймні, затори не були такими проблематичними, як очікувалося. Автори також підкреслюють важливість ретельного та цілісного планування та комунікації цих проектів для отримання визнання серед осіб, які приймають рішення, та моніторингу ефектів, оскільки їхній успіх залежить від поведінкових реакцій користувачів мережі. У наступному огляді літератури досліджуються новіші тематичні дослідження, дослідження зменшення пропускної здатності мережі великої зони. Нарешті, збираються еластичності транспортного попиту щодо часу подорожі.

Локальні скорочення пропускної здатності в міських мережах.

Міські мережі часто відчувають локальні (тимчасові) скорочення пропускної здатності, коли є будівельні майданчики. Смуги руху можуть бути зменшені або повністю перекриті в одному чи обох напрямках, що подібно до того, що може статися з перерозподілом дорожнього простору. Одним із прикладів вивчення наслідків часткового закриття доріг у реальному житті та поведінки пасажирів є проект BYTRANS в регіоні Осло, Норвегія, оцінений Tønnesen і Hagen (2020).

У період з 2015 по 2020 рік три тунелі довелося частково закрити через реабілітаційні роботи, зменшивши їх з чотирьох до двох смуг (все ще працюють у двох напрямках). Для першого тунелю (Сместад) було виявлено лише невелике збільшення затримок, ймовірно через те, що пропускна здатність тунелю є надмірною, коли він повністю відкритий. Але цікаво

спостерігати, що завдяки широким інформаційним кампаніям попит на тунель міг бути зменшений приблизно на третину в години пік у перший день закриття без збільшення трафіку на альтернативних маршрутах, тобто пасажирів, мабуть, працювали з дому або вибрали інший режим.

Для тунелю з найбільшою інтенсивністю руху скорочення транспортних засобів, що проїжджають у години пік, склало 26-34%. Під час ремонтних робіт у тунелі максимальну швидкість знизили з 70 км/год до 50 км/год. Коли зазвичай рух йшов на вільній швидкості та становив приблизно 30 км/год у денний пік, під час зменшення пропускної здатності середні швидкості були від 30 до 40 км/год, зменшуючись до 20 км/год у денний пік. На альтернативних маршрутах інтенсивність руху зросла на 12-37%, а затори навколо тунелю Брін вплинули на мережу доріг у безпосередній близькості з точки зору затримок у години пік. У результаті половина поїздки на машині займає в середньому на 9 хвилин більше. Пасажирів відреагували на ці зміни пропускної спроможності в поєднанні з відновленням роботи станції метро, використовуючи більше громадського транспорту та велосипедів для своїх поїздки, тому частка транспортних поїздки на автомобілі зменшилася з 39% до 21-29% у період скорочення пропускної здатності та через рік. Частка громадського транспорту зросла з 40% до 4650%, а велосипедів – з 11% до 14-18%. Повторне відкриття станції метро, мабуть, було важливим фактором у прийнятті рішення, оскільки лише 10% пасажирів відповіли, що зменшення пропускної здатності тунелю було основною причиною перемикання режиму. Загалом у рік, коли почалося скорочення пропускної здатності, близько 25% пасажирів повідомляють, що ситуація з поїздками на роботу погіршилася. Підсумовуючи підрахунок транспортних засобів на досліджуваній території, загальний обсяг руху за добу зменшився на 2,2% під час зменшення пропускної спроможності, що свідчить про принаймні тимчасове «зникнення» руху.

Також для України численні скорочення пропускної здатності були зібрані Vetterli (2023), і деякі з них також задокументовані з даними підрахунку трафіку. Прикладом для міста Києва є перетворення Limmatquai з

головної дороги на трамвайний і велосипедний маршрут без автомобілів у 2004 році, щоб запобігти наскрізному руху. Моніторинг Пітцінгера (2006) засвідчує, що в години пік близько 1000 моторизованих транспортних засобів пересувалися по цьому сполученню. Невдовзі після закриття близько 720 з них відхилялися на дороги поблизу Ліматкваї, а інші більше не рухалися цим коридором. Завдяки заходам з організації дорожнього руху пропускна спроможність на альтернативних маршрутах може бути збільшена, але збільшення використання решти мережі спричинило затримки, також і для громадського транспорту. Через два роки після закриття було проведено повторний моніторинг, і було виявлено загальне зниження інтенсивності трафіку в центрі міста на 7,5%, а затримки громадського транспорту відновилися до рівня до закриття. Для альтернативних маршрутів навколо Ліматкваї скорочення трафіку було навіть вищим, ніж у середньому у центрі міста. Рішення про закриття дороги було темою для обговорення з 1980-х років, і в 1999 році 60% проголосували за розвиток проекту (Meier, 2004) і близько 70% за фінансування заходів на альтернативних маршрутах (Statistik Stadt Zürich, 2023).). Це вказує на загальне визнання жителями Києва скорочення моторизованого (прохідного) руху. У 2006 році відбулося оновлення дорожнього покриття з додатковим редизайном бічних доріжок і громадського простору вздовж Limmatquai, про що було оголошено Stadtrat von Zürich (2005). Звіт про моніторинг Sauter (2009) показує, що це також збільшило привабливість Limmatquai для велосипедів, оскільки кількість велосипедистів зросла в 2008 році порівняно з 2004 роком до закриття дороги, особливо в години поїздки, як показано на рисунку 1. Також спостерігалось що із закриттям для моторизованого руху менше велосипедистів користується пішохідними доріжками та алеями поблизу Limmatquai, зменшуючи можливість конфліктів між пішоходами та велосипедистами.

Таблиця 1.1 – Розвиток розподілу транспортних засобів (поїздок) у місті Київ

Розвиток режимної частки (поїздки)	2000 рік	2005 рік	2010 рік	2015 рік
ходьба	26%	26%	27%	26%
автомобіль	40%	36%	30%	25%
громадський транспорт	30%	34%	39%	41%
велосипед	4%	4%	4%	8%

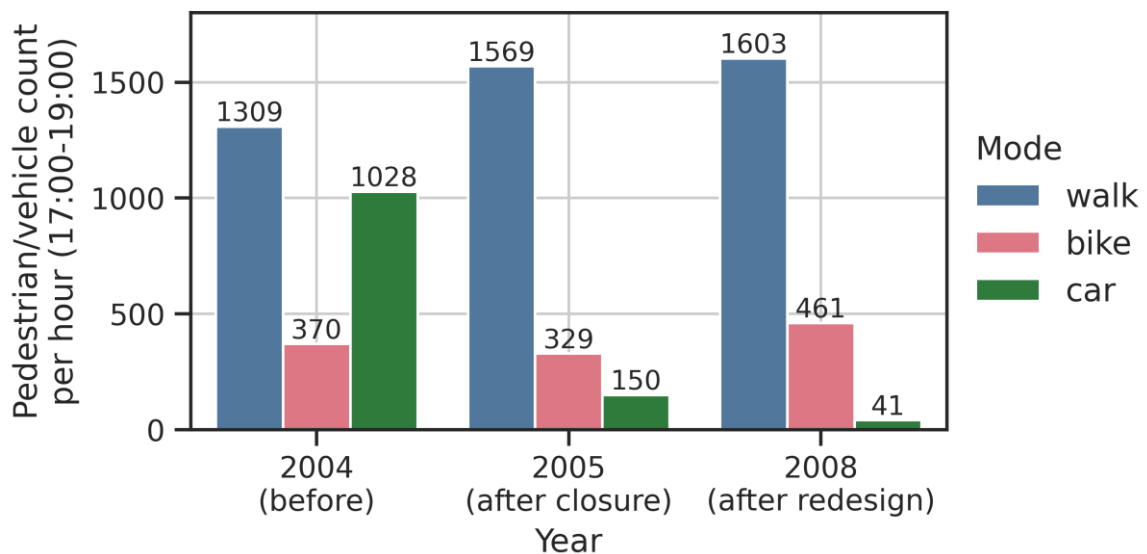


Рисунок 1.1 – Трафік на Ліматкві за видами транспорту після редизайну, виміряний як середньогодинний показник у вечірні години пік (17:00 – 19:00)

Дивлячись на розвиток частки транспорту в Києві в таблиці 1.1, скорочення використання автомобілів було поглинено в основному громадським транспортом у 2005 та 2010 роках, тому збільшення велосипедного руху у 2008 році досить результат вибору маршруту, ніж вибір режиму. Однак у 2015 році частка велосипедів у виді транспорту подвоїлася з 4% до 8%, але це, ймовірно, результат інших заходів, вжитих містом після визначення концепції дорожнього руху для центральної частини міста у 2011 році, яка надає пріоритет усунення прогалин у велосипедній мережі.

1.2. Значні скорочення пропускної здатності міських мереж

Не лише для окремих доріг, але й у великих районах або коридорах пропускна спроможність для моторизованого руху може бути зменшена навмисно для зміни дорожнього простору або через природні небезпеки. Приклади прикладів наведені нижче.

В Осло були застосовані заходи щодо великих територій, включаючи скорочення потужностей між 2017 і 2019 роками, описані Tønnesen і Hagen (2020). Місця для паркування на вулицях було зменшено, рух транспорту вдалося заблокувати, а простір було перерозподілено на користь тротуарів, пішохідних вулиць, місць для сидіння, велосипедної інфраструктури та паркування для людей з обмеженими можливостями. До вжиття цих дій частка поїздок на роботу в режимі автомобіля була вже низькою – 4%, а в наступні роки навіть зросла до 5% і 7%. Передбачається, що це пов'язано з тим, що більше роботодавців пропонують безкоштовне паркування замість міської парковки для 36% пасажирів порівняно з 19% у 2017 році. Тут стає зрозуміло, що не лише умови дорожнього руху та затори впливають на вибір транспорту, але й навколишні фактори, такі як паркування. значний вплив, тому ці заходи необхідно впроваджувати комплексно за участю якомога більшої кількості зацікавлених сторін і осіб, які приймають рішення. Що стосується їзди на велосипеді, опитування показують, що заходи вплинули на робочі поїздки більше позитивно, ніж негативно, і в 2019 році 87% пасажирів були принаймні задоволені поїздкою на роботу на велосипеді. Тим не менш, заходи в Осло викликали менш екстремальну реакцію, ніж очікувалося, тому збільшення труднощів подорожі до центру міста та до центру міста на автомобілі, здається, в межах допустимого вибору способу поїздки (на роботі), і лише 13% водіїв автомобілів були незадоволені їхні поїздки на роботу і назад у 2019 році.

Кількість велосипедистів також збільшується всередині периметра з понеділка по суботу, як показано на рисунку 1.2.

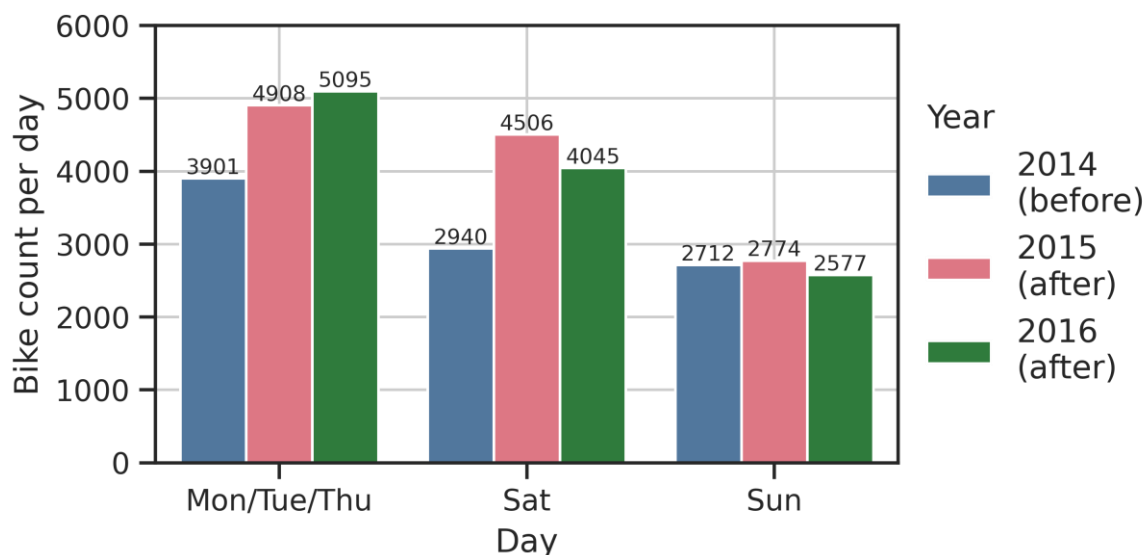


Рисунок 1.2 –Кількість велосипедистів до та після закриття для моторизованого транспорту

Таблиця 1.2 – Розвиток розподілу транспортних засобів (поїздок) у місті Базель

Розвиток режимної частки (поїздки)	2010 рік	2015 рік	2021 (COVID-19)
ходьба	54,6%	51,1%	52,6%
автомобіль	12,8%	14,6%	15,0%
громадський транспорт	21,3%	22,5%	16,9%
велосипед	10,3%	10,7%	14,5%
інші	1,0%	1,1%	1,0%

Дивлячись на частку транспорту для всього міста Базель (див. таблицю 1.2), яка спостерігалася в опитуваннях подорожей домогосподарств, після заходів 2015 року не можна спостерігати зниження для поїздок на моторизованих транспортних засобах. використання громадського транспорту навіть скоротилося, а поїздки на велосипеді зросли. Тут важко зрозуміти, наскільки пандемія Covid-19 затьмарює прийняття рішень щодо способу транспорту порівняно з пропускнуою здатністю мережі. У цьому випадку з цих даних не можна зробити суттєвого висновку, чи вплинуло відносно велике скорочення пропускнуої здатності у центрі міста на все місто Базель.

Інші дослідження, що стосуються значного скорочення пропускної спроможності в містах, існують щодо впливу природних небезпек на мобільність і доступність. Для міста Льєж, Бельгія, Saadi et al. (2018) провели моделювання MATSim, що зменшує пропускну здатність на лініях зв'язку, щоб змодельовати труднощі подорожі у разі річкових паводків. Тут у центрі уваги не вибір транспорту, а час у дорозі та розподіл транспортних засобів у мережі внутрішньоміських поїздок. Більша інтенсивність поведінки, змодельована меншою пропускну здатністю доріг, призводить до більш тривалого часу в дорозі та затримки прибуття через затори або об'їзди. У разі зменшення пропускної спроможності до 50% час подорожі збільшується на 44%, а більше результатів можна знайти в таблиці 1.2. Також збільшується кількість транспортних засобів, які не можуть виконати свої щоденні плани, особливо для симуляцій зі зниженою пропускну здатністю до 10% і 25 %. Аналіз чутливості, запланований для Е-Вело-Київ, використовує порівняльний метод, але моделюються не лише внутрішньоміські поїздки, а це означає, що також транспортні засоби прохідного руху та поїздки, які в'їжджають і виїжджають з периметра, заповнюють мережу. Таким чином, два дослідження не аналізують лише ті самі типи поїздок.

Таблиця 1.3 – Відносне збільшення середньої тривалості поїздки для різних рівнів зменшення пропускної спроможності за сценарієм Льєжа

Ємність на критичних ланках	10%	25%	50%	75%	100%
Збільшення часу в дорозі	+144%	+127%	+44%	+16%	+0%

1.3. Транспортна еластичність

Результати згаданих вище досліджень можна узагальнити у значеннях еластичності. Еластичність виражається як безрозмірні значення, отже, якщо еластичність поїздок автомобіля відносно часу в дорозі автомобіля дорівнює -

0,5, це означає, що при збільшенні часу в дорозі автомобіля на 1% кількість поїздок на автомобілі зменшиться на 0,5%.

Попит на подорожі залежить від багатьох факторів, таких як демографія, економічна активність, географія та землекористування, пропозиція транспорту, транспортна політика та грошові витрати. У моделюванні, що використовується для цього проекту, модель дискретного вибору, вбудована в розширення eqasim, застосовується для вибору режиму. Він відкалібрований за даними обстеження подорожей домогосподарств, щоб представити територію Києва, Швейцарія. Час у дорозі враховується як основний фактор прийняття рішення для всіх видів транспорту, тому це цікаві еластичності з літератури, які також можуть бути відображені в моделюванні.

Перерозподіл дорожнього простору впливає на час у дорозі для автомобілів, тому що затори ведуть або до довшого часу, витраченого на перевантажені зв'язки, або до об'їздів із ймовірно більшим часом у дорозі. Літман (2023) зібрав багато показників еластичності подорожей з досліджень у всьому світі та останніх десятиліть. Для часу в дорозі він висвітлює значення TRACE (1999), які показують еластичність кілометрів, пройдених різними видами транспорту, відносно часу в дорозі автомобіля в регіонах Європи з великою кількістю автомобілів. Вони наведені в таблиці 1.3, і повільні режими там підсумовують ходьбу та велосипед. У довгостроковій перспективі для периметрів із часткою громадського транспорту від 15 до 50% вони оцінюються як -0,39 для кількості поїздок автомобілями та +0,48 для кількості поїздок громадським транспортом. Вибрані результати TRACE (1999) для Нідерландів, Італії та регіону Брюссель, Бельгія представлені де Йонгом і Ганном (2001). Для України запропоновано значення, наведені в таблиці 1.4, на основі заявлених даних про переваги та додаткових досліджень.

Таблиця 1.4 – Еластичність довгострокової відстані подорожі щодо часу подорожі автомобіля в Україні

Призначення	Водій автомобіля	Легковий автомобіль	Громадський транспорт	Повільні режими
Поїздка на роботу	-0,96	-1,02	+0,70	+0,50
Бізнес	-0,12	-2,37	+1,05	+0,94
Освіта	-0,78	-0,25	+0,03	+0,03
інше	-0,83	-0,52	+0,27	+0,21
Всього	-0,76	-0,60	+0,39	+0,19

Таблиця 1.5 – Еластичність відстані подорожі щодо часу подорожі автомобіля в Україні

Режим	короткий пробіг	довгий пробіг
автомобіль	-0,40	-0,90
громадський транспорт	0,50	0,60

Це означає, що існує результат для еластичності попиту на автомобіль щодо часу подорожі автомобілем і для еластичності попиту на громадський транспорт щодо часу подорожі громадським транспортом. Таким чином, з представленого аналізу невідомо, яка частка скорочення попиту пов'язана зі зміною режиму або «зникненням» поїздок. Тим не менш, особливо значення для автомобіля є важливим орієнтиром тут і показано на рисунку 1.3.

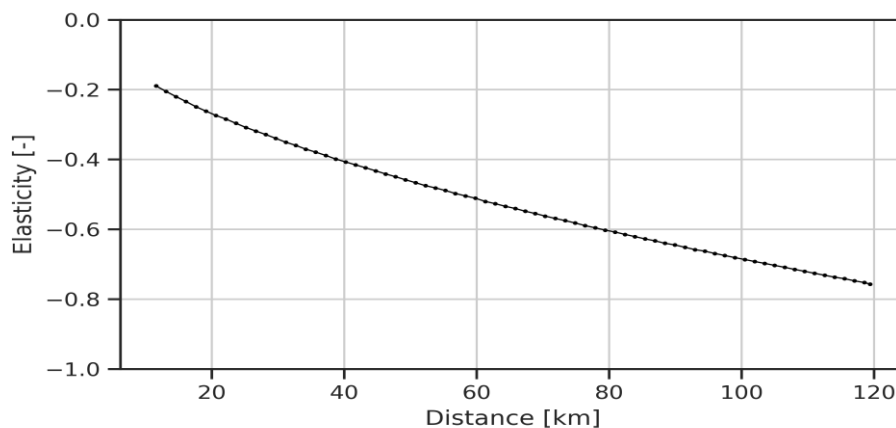


Рисунок 1.3 – Еластичність попиту щодо часу подорожі автомобілем

Попередня публікація містить дані для оцінки зміни кількості поїздок залежно від зміни часу в дорозі, представлені на рисунку 1.4. Це показує, що навіть за 90-хвилинного збільшення часу в дорозі в середньому лише 5% поїздок усуваються з порядку денного людей. . Зазначені дані про адаптацію для реакції на зміни часу подорожі також показують, що найпоширенішою реакцією (62%) є вибір місця, за яким слідує 31% вибір способу і лише низька частка для реакції більшою чи меншою кількістю поїздок і діяльності.

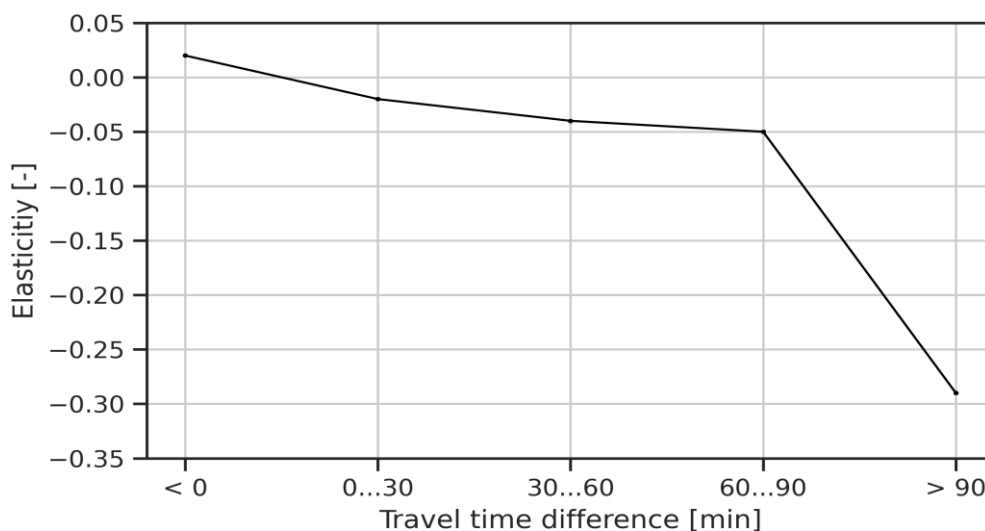


Рисунок 1.4 – Еластичність кількості поїздок щодо різниці в часі подорожі

2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Опис проекту. Мета та інструменти

Метою цієї кваліфікаційної роботи є проведення моделювання на основі агентів з використанням мереж, розроблених у контексті проекту мікромобільності, і порівняння результату з базовим сценарієм із спрощеною мережею встановлене моделювання. Ці симуляції проводяться з використанням MATSim. Щоб оцінити придатність встановленої установки моделювання MATSim для міста, перед аналізом перерозподіленої мережі виконується аналіз чутливості. Результати аналізу ефективності служать зворотним зв'язком для подальшого розвитку та інтеграції процесу перерозподілу.



MATSim — це агентна модель, яка виконує симуляцію трафіку та мобільності. Вхідними даними для моделювання MATSim є інформація про мережу, а також про місця, де відбуваються дії (об'єкти), і популяція агентів, що представляють людей, які працюють у досліджуваній області (Horní et al., 2016). Дані сукупності містять атрибути агентів, такі як місце проживання та роботи або володіння певними інструментами мобільності, наприклад автомобілями чи підпискою на громадський транспорт. Плани агентів визначаються як ланцюжок діяльності, і в залежності від обраної моделі рішення (стратегії) вони можуть вибирати в певних межах режим, маршрут і час відправлення для поїздок, що з'єднують їх діяльність. Оскільки MATSim розроблений як коеволюційний алгоритм, на кожній ітерації певній частині населення дозволяється оптимізувати свій вибір, тому симуляція збігається та досягає стану рівноваги.

Період моделювання — це один робочий день, подовжений на шість годин, тобто 30 годин.

Синтетична популяція використовується та розрізається за допомогою модуля eqasim, щоб включити лише осіб, які переміщуються в межах або за межі досліджуваної території.

Не всі агенти повинні бути детально змодельовані в мережі як частина потоку транспортних засобів, для певних режимів можна вибрати телепортацію агентів або транспортних засобів із затримкою, еквівалентною прогнозованому часу подорожі. Цей час у дорозі для вантажівок і легкових автомобілів залежить від поточного стану мережі, а для громадського транспорту розраховується згідно з розкладом громадського транспорту. Для пішки та велосипеда оцінюється на основі евклідової відстані та типової швидкості для цих режимів.

ReRoute — стратегія перепланування в MATSim. Перепланування — це етап MATSim після симуляції трафіку під час ітерації, де частина агентів може переглянути частину свого вибору мобільності та прийняти нові рішення. Коли агентам дозволено та вибрано вибір маршруту, найменш дорогий шлях для кожної поїздки розраховується за допомогою алгоритму FastAStarLandmarks, реалізованого Лефевром і Бальмером (2007). На етапі перепланування враховує умови за посиланнями на момент входу агента. Умови оцінюються на основі інформації попередньої ітерації про вартість подорожі залежно від зв'язку та моменту часу.

Тут час у дорозі використовується як параметр вартості.

Оскільки велосипед — це активний режим, у якому агенти не подорожують у комфорті автомобіля, вплив таких характеристик зв'язку, як нахил і безпека велосипедної інфраструктури, є більшим, ніж під час поїздки на автомобілі. Тому їх слід враховувати при виборі маршруту. Детальна модель вибору маршруту знаходиться в розробці, але поки використовується спрощений метод. Усі параметри об'єднані у значення відстані, що описує, наскільки привабливим є сполучення для велосипедистів, як визначено Meister et al. (2023). Потім під час вибору маршруту ця вага застосовується до довжини

кожної ланки та вибирається поїздка з найкоротшою загальною зваженою довжиною. Для симуляції трафіку знову використовується реальна довжина посилянь.

Для вибору режиму вибирається дискретна модель вибору режиму, вбудована в розширення під назвою *eqasim* (розроблена Hörl і Balac (2021)). Всередині мультиноміальної логіт-моделі використовується для прийняття рішення на основі корисностей, розрахованих для різних альтернатив режиму. Моделі витрат для розрахунку корисності різних варіантів режиму враховують прогнози поїздки та атрибути агента, який приймає рішення. Параметри витрат відкалібровано відповідно до регіональних умов, а отже, до типової поведінки прийняття рішень у Україні та Києві. Для досягнення рівноваги протягом ітерацій 5% частці населення дозволяється перепланувати свій день. Тури, які перетинають кордон, виключаються з цього пулу, оскільки їх точки перетину фіксовані та визначені режимами їх початкових планів під час розрізання.

Щоб налаштувати аналіз результатів моделювання, Python використовується для створення агрегованих таблиць і графіків.

Якщо під час симуляції змінюється потужність мережі, агенти можуть адаптуватися в короткостроковій та середньостроковій перспективі, змінюючи маршрут або режим своїх запланованих подорожей. Це дослідження не дозволяє агентам реорганізовувати час і порядок їхньої діяльності, а також змінювати, наприклад, місце роботи чи дім або купувати підписку на громадський транспорт, щоб зменшити свої витрати. Щоб охарактеризувати, як моделювання із застосованими стратегіями вибору маршруту та режиму реагує на зміни пропускну здатності доріг, перед моделюванням із перерозподіленими мережами проводиться аналіз чутливості.

Можна або масштабувати чисельність населення, або ємність мережі, щоб дослідити вплив зміни співвідношення населення та ємності мережі. Для MATSim звичайною практикою є зменшення масштабу генеральної сукупності, щоб заощадити час виконання моделювання та відповідно

адаптувати потужності, щоб результати точно представляли результати з повною генеральною сукупністю. Зменшення масштабу сукупності виконується шляхом вибору випадкової частки повної генеральної сукупності відповідно до підходу «Один представляє кілька». Правила можна знайти у Ben-Dor et al. (2021) для масштабування потужностей автомобільного зв'язку для компенсації зменшення чисельності населення та результуючого зміщення щодо демографічних показників субпопуляції вважається прийнятним для зменшення частки до 10%. Критичні зауваження щодо мультимодальних мереж полягають у тому, що громадський транспорт не можна масштабувати так легко, оскільки розклад часу та взаємодія на спільних з'єднаннях повинні залишатися, але пропускна здатність транспортних засобів має бути адаптована. Розширення чисельності населення з метою дефіцитності можливостей не є широко дослідженим випадком.

Оскільки врешті-решт вибір режиму в мультимодальній мережі є суттєвим фактором у проекті Е-Вело-Київ, було вирішено не масштабувати населення, щоб уникнути невизначеності щодо демографічних упереджень і непропорційного впливу на автомобілі та громадський транспорт. Змінюється лише пропускна здатність дорожньої мережі.

Пропускна здатність мережі зменшується шляхом зміни пропускної здатності кожної ланки. Це може статися через глобальний коефіцієнт пропускної здатності потоку, який застосовується до кожного посилення, або шляхом безпосереднього зменшення пропускної здатності, збереженої як атрибут посилення. Коефіцієнти зменшення, обрані для дослідження, становлять 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 і 0,9. Потім застосовуються три різні стратегії для кількісної оцінки ефектів зміни маршруту та вибору режиму для адаптації до зменшених потужностей. Для першої стратегії агенти змушені підтримувати маршрути та режими з рівноважного стану мережі з повною пропускною здатністю. У другій стратегії допускається зміна маршруту, а потім у третій стратегії також додається вибір режиму.

При моделюванні перерозподілених мереж вводиться явне моделювання велосипедів у мережі. На другому кроці також стає можливим моделювання електровелосипедів як окремого режиму.

Основними показниками, які використовуються для характеристики продуктивності мережі, є час у дорозі, пройдена відстань і середня швидкість поїздки. Щоб оцінити достовірність результатів моделювання, оцінений час у дорозі під час моделювання порівнювали з часом у дорозі змодельованих поїздки. Також можна було б спостерігати за продуктивністю певних з'єднань, але оскільки основний інтерес полягає в тому, щоб вплинути на вибір режиму, який ґрунтується на передбачених поїздках, важливо зрозуміти, як на поїздки впливають зміни мережі.

2.2. Аналіз чутливості

2.2.1. Методи та сценарії

Для аналізу чутливості головним чином цікавить вплив на автомобілі, тому явно моделюються лише поїздки на автомобілі, а інші способи (пішохідна прогулянка, велосипед, громадський транспорт, вантажівка, легковий пасажир) телепортуються.

Деякі початкові експериментальні установки з окремо збільшеним і зменшеним потоком і накопичувальною здатністю були змодельовані для району Тернопіль. Тут стало зрозуміло, що збільшення потоку або накопичувальної ємності та зменшення накопичувальної ємності впливає на умови руху, але це було набагато менше, ніж вплив зменшення потокової ємності. Таким чином, для аналізу чутливості було прийнято рішення аналізувати лише вплив зменшеної пропускної здатності.

Оригінальна пропускна спроможність для кожної дороги є значеннями за замовчуванням, встановленими під час створення мережі MATSim з файлу OSM (Poletti, 2016), тому вони залежать від типу дороги, визначеного в тезі «osm:highway:...», і підсумовані в таблиці 2.1. Значення за замовчуванням

вибрано для представлення доріг як у міських, так і в сільських районах. Оскільки дані вузла в мережі MATSim не містять інформації про сигнали трафіку чи інші перешкоди потоку, це зменшення пропускної здатності також має бути включено до стандартної пропускної здатності каналів.

Таблиця 2.1 – Стандартні значення пропускної спроможності на смугу руху в MATSim за типом дороги (Poletti, 2016)

Тег OSM	Пропускна здатність за замовчуванням	Ліміт швидкості за замовчуванням
	авт/год (авт/сек)	км/год (м/с)
motorway	2000 (0,556)	120 (33,33)
trunk	2000 (0,556)	80 (22,22)
autoway_link	1500 (0,417)	80 (22,22)
trunk_link	1500 (0,417)	50 (13,88)
primary	1500 (0,417)	80 (22,22)
primary_link	1500 (0,417)	60 (16,67)
secondary, secondary_link	1000 (0,278)	30 (8,33)
tertiary, tertiary_link, unclassified	600 (0,167)	25 (6,94)
residential	600 (0,167)	15 (4,17)
living_street	300 (0,083)	10 (2,78)

Для аналізу чутливості мережа аналізується в статус-кво без будь-яких перерозподілених посилянь. Використовується базовий сценарій, який розрізається до відповідної досліджуваної області за допомогою eqasim, і варіація цього сценарію зі спрощеною мережею під назвою «спрощене перед». Для обох цих сценаріїв пропускна здатність мережі глобально зменшується з кроком 10%, тому коефіцієнт пропускної здатності потоку встановлюється на 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 і 0,9. В іншому сценарії, заснованому на базовому сценарії та мережі, пропускна здатність потоку зменшується лише для міських з'єднань,

так що пропускна здатність на автомагістралях, магістральних і первинних з'єднаннях (з'єднання високого рівня) залишається на рівні за замовчуванням.

Для всіх цих сценаріїв застосовуються три різні стратегії, як показано в таблиці 2.2. Їх мета полягає в тому, щоб кількісно визначити, яка частина продуктивності при зниженій потужності залежить від двох можливих адаптацій, які можуть мати агенти: знайти інший маршрут або вибрати інший режим. Тому в стратегії 1 ті самі маршрути, що й у базовому сценарії, змушені представляти найгірший випадок. Тоді для стратегії 2 допускається вибір маршруту, а для стратегії 3 – вибір режиму.

Таблиця 2.2 – Стратегії для аналізу чутливості

Стратегія	1	2	3
Ітерації	1	до рівноваги	до рівноваги
Вибір маршруту	немає	так	так
Вибір режиму	немає	немає	так

Основою цього аналізу є файл `output_trips.csv`, тобто поїздки, які були успішно завершені під час останньої ітерації моделювання. Це означає, що для транспортних засобів, які застрягли та не доїхали до місця призначення до 30 години, їх статистика не включається. Для сценаріїв із незміненими потужностями майже немає застряглих автомобілів (20 із базовою мережею та 16 зі спрощеною мережею за 30 годин), тому кількість поїздок із цих симуляцій можна прийняти як еталон для «успішної» симуляції з точки зору завершення поїздок.

2.2.2. Сценарій «Тернопіль»

Щоб заощадити обчислювальний час, спочатку проводяться експерименти з меншим сценарієм, тут для міста Тернопіль (включаючи громади В. Березовиця і Підгороднє). Популяція містить 225004 агенти, які

генерують близько 409 000 поїздок всередині периметра за базовим сценарієм, з яких приблизно 80400 (приблизно 20%) мають внутрішню початкову та кінцеву діяльність і не є вантажними. Діаметр мережі складає близько 15 км. Для базового сценарію мережа розрізана eqasim таким чином, що вона лише трохи перевищує периметр населення. Алгоритм розрізання знаходить мінімальну зв'язану мережу для планів із внутрішніми діями. Для спрощеної мережі плани розрізання мережі не враховуються, тому додається буфер розміром 5 км, щоб забезпечити з'єднання важливих з'єднань. Для автомагістралей, які можуть бути довгими відрізками як односторонні зв'язки без з'єднань з наземною мережею, також може знадобитися включити найближче перехрестя після буфера, щоб гарантувати, що зв'язки перекладаються на MATSim, як у перетворенні прямого та зворотного з'єднання вузлів перевіряється. Ці дві мережі показані на рисунку 2.1.

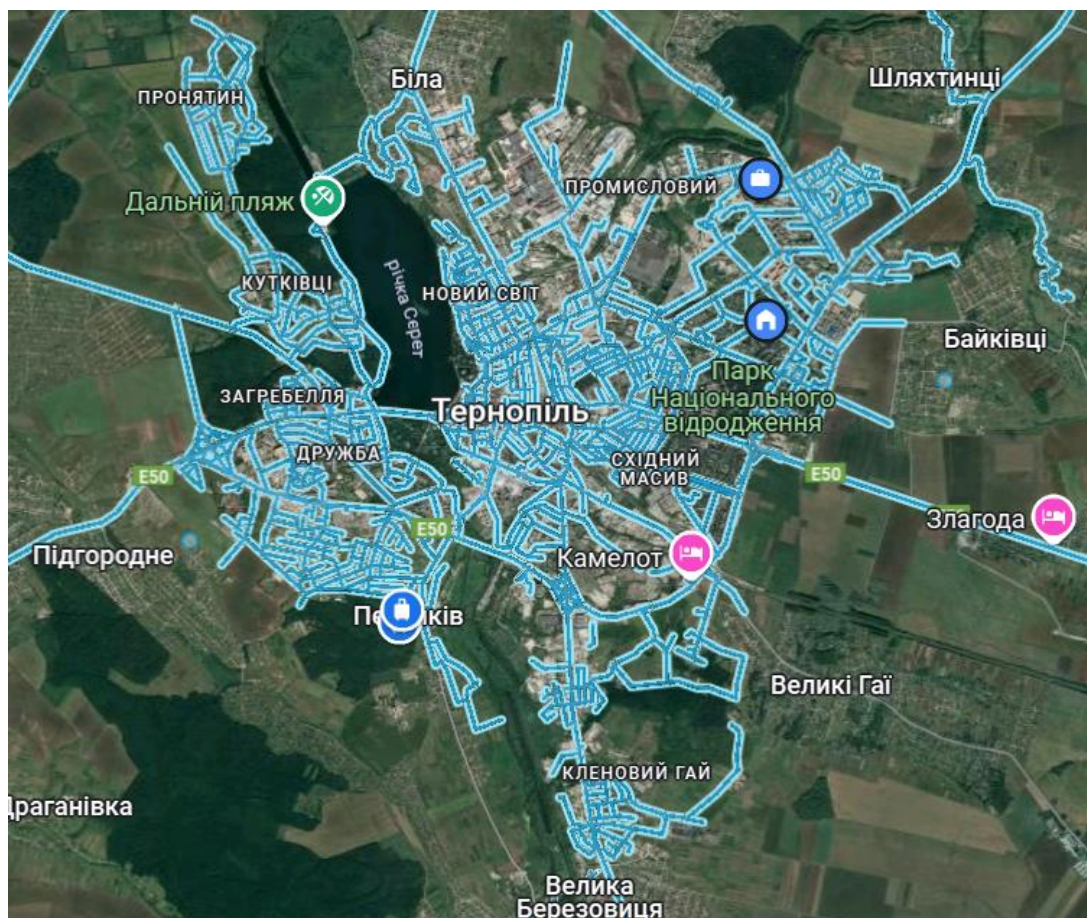


Рисунок 2.1 - Мережі для сценаріїв «Тернопіль»

2.2.3. Сценарій Е-Вело-Київ

Для сценарію Е-Вело-Київ периметр включає місто Київ і всі громади, де принаймні 15% жителів їздять на роботу до Києва, охоплених 5-кілометровим буфером, як показано на рисунку 6. Діаметр вирізу в мережі коливається від 65 до 85 км. Населення, яке працює в цій зоні, складається з 2 967 360 агентів, які здійснюють близько 8 100 000 поїздок всередині периметра. Майже 7 030 000 (приблизно 81%) поїздок мають внутрішню початкову та кінцеву діяльність і не є вантажними.

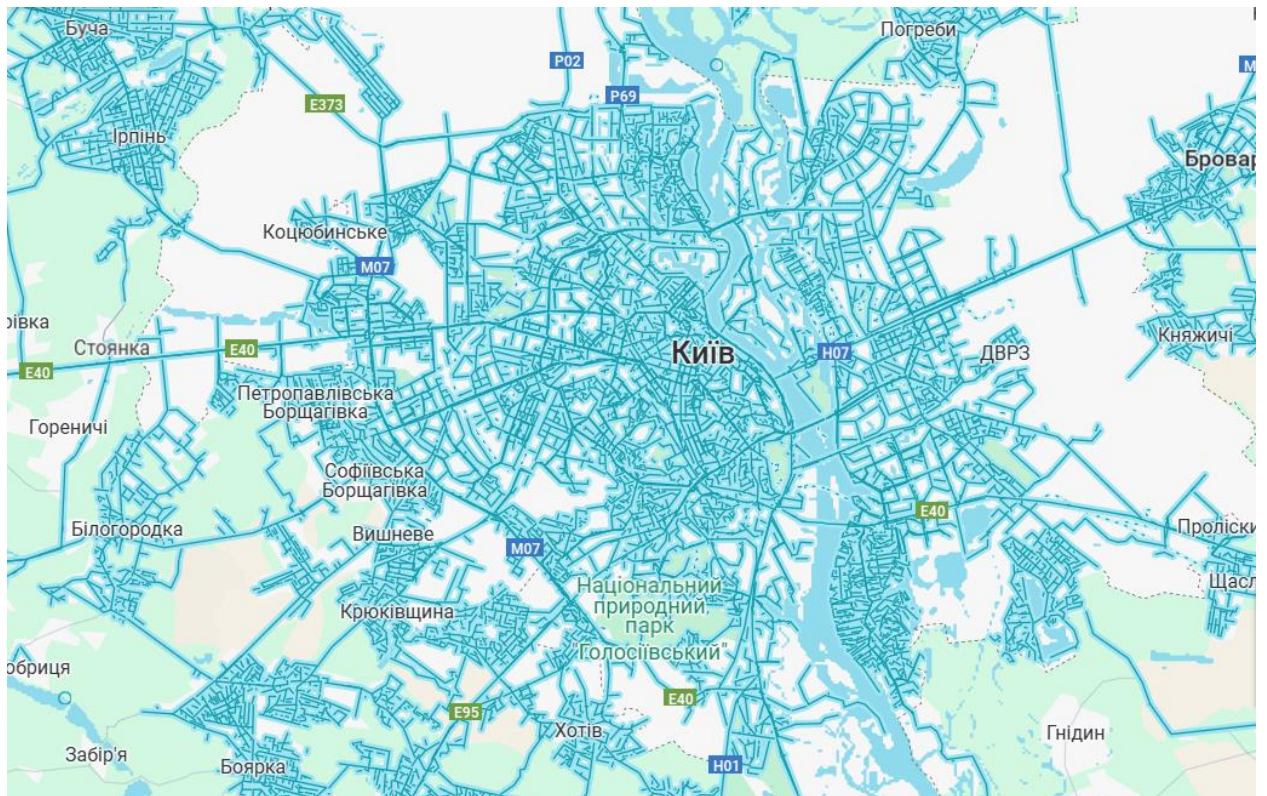


Рисунок 2.2 – Мережі для сценаріїв Е-Вело-Київ

2.3. Результати

Оскільки основною метою аналізу чутливості є кількісна оцінка впливу на поїздки автомобіля, коли пропускна здатність доріг зменшується, візуалізуються та описуються лише результати для автомобіля в режимі. Інші режими телепортуються, і транспортні засоби не взаємодіють, тому лише для

стратегії 3 на результати аналізу поїздок інших режимів можуть вплинути, але не безпосередньо умови на дорозі, а вибір режиму агентами. Таким чином, частки режимів для цих симуляцій зі стратегією 3 представлені та порівняні. Подробиці про те, як час подорожі, відстань і середня швидкість подорожі змінюються для інших режимів, не включені.

2.3.1. Сценарій «Тернопіль»

Інфраструктура дорожнього сполучення

Індикатори, наведені в таблиці 8, використовуються для характеристики мереж і порівняння базової мережі, розрізаної за допомогою eqasim (скорочено «bl»), із спрощеною мережею до перерозподілу дорожнього простору (скорочено «sb»). Для цього порівняння враховуються лише зв'язки в межах популяції. Для цього сценарію цілком очевидно, що під час процесу спрощення для з'єднання, об'єднаного з двох з'єднань різного рівня, використовуються вищі швидкість і пропускна здатність, що спричиняє збільшення середньої вільної швидкості мережі на 6% (зваженої за мілями смуги руху) і на 3% збільшення загальної потужності. Це можна пояснити, дивлячись на довжину та пропускну спроможність доріг високого рівня (автомагістралі, магістральні, первинні) і міських доріг (другорядні, третинні, некласифіковані, житлові, житлові_вулиці). З порівняння довжини з базовим сценарієм стає очевидним, що завдяки об'єднанню деякі міські зв'язки стали частиною зв'язків високого рівня. Це більше збільшує пропускну спроможність у мережі високого рівня, ніж зменшує в міській мережі, спричиняючи зсув коефіцієнта пропускну здатності на високому рівні, поділеному на пропускну здатність міських каналів з 0,74 до 1,00.

Таблиця 2.3 – Характеристики дорожнього зв'язку мереж для сценарію Тернопіль

Мережа Тернопіль	bl	sb
N link	3,448	2,637
Загальний кілометраж смуги руху, км	349	346
Середнє вільна швидкість, км/год	40.4	43,0
Загальна місткість, авто/год*км	308,672	316,492
Ємність відносно bl	100%	103%
Спільна смуга руху автобус+автомобіль	18%	17%
Довжина верхнього рівня, км	60.7	71.9
Довжина в місті, км	265.3	246,0
Верхній рівень пропускної спроможності, авто/год*км	130823	157566
Пропускна спроможність у місті, авто/год*км	175174	157636
Співвідношення пропускної спроможності верхній рівень / міський	0,74	1,00

Транспортні засоби в заторах

Для всіх симуляцій, виконаних для сценарію Тернопіль, кількість поїздок не зменшується нижче 99,8% від кількості поїздок у немодифікованому сценарії, що вказує на те, що майже всі поїздки можуть бути завершені в моделюванні з мережами зі зниженою пропускною здатністю. Тому передбачається, що вони достатньо добре представляють генеральну сукупність, а поїздки еталонного моделювання додатково не

фільтруються, щоб відповідати результатам моделювання зі зниженою пропускною здатністю.

Час подорожі

Спочатку результати середнього часу подорожі, представлені на рисунку 7, аналізуються для різних мереж і стратегій. Для стратегії 1 агенти змушені використовувати той самий маршрут, що й у стані рівноваги, знайденому в базовому сценарії або спрощеному попередньому сценарії відповідно, тому збільшення часу подорожі є найбільш екстремальним. Найбільше збільшення спостерігається для базового сценарію та зменшення пропускної здатності всієї мережі на 0,5, що призводить до 1240 додаткових секунд або майже 21 хвилини середнього часу в дорозі, що в 2,7 рази перевищує середній час у дорозі за немодифікованим базовим сценарієм. Стратегія 2 (дозволяє зміну маршруту) і стратегія 3 (дозволяє змінювати маршрут і вибір режиму) можуть дещо буферизувати зменшену пропускну здатність. Для зменшення пропускної здатності на 0,5 додатковий середній час у дорозі зменшується до 498 і 399 секунд. Тим не менш, це в 1,1 і 0,9 рази перевищує середній час у дорозі за немодифікованим базовим сценарієм, що означатиме, що тут половина потужності означає подвійний час у дорозі. Для вищих коефіцієнтів пропускної спроможності, тобто менш надзвичайно зниженої пропускної здатності, зі стратегією 1 збільшення часу подорожі також є менш екстремальним і може бути зменшене далі за допомогою вибору маршруту та способу.

При зменшенні пропускної здатності лише в міській мережі час у дорозі щодо коефіцієнта пропускної здатності потоку нижчий, ніж при зменшенні пропускної здатності всієї мережі. Наприклад, при зменшенні пропускної здатності на 30% (коефіцієнт пропускної здатності 0,70) час у дорозі збільшується лише на 10% з дозволеним вибором маршруту та режиму, тоді як при зменшенні пропускної здатності по всій мережі він збільшується на 16%.

Для спрощеного сценарію середній час у дорозі без зміни потужності становить 349 с і на 24% менше, ніж для базового сценарію з 457 с. Ймовірно, це пов'язано з більшою часткою доріг високого рівня з вищою вільною швидкістю. Крім того, із застосуванням коефіцієнта зменшення пропускної спроможності середній час подорожі нижчий, ніж для базової мережі, а можливість вибору маршруту наближає час подорожі до базового сценарію, ніж для базової мережі. Немає помітного додаткового скорочення часу в дорозі при дозволі вибору режиму.



Рисунок 2.3 – Результати часу в дорозі для сценарію Тернопіль, базової лінії (bl), міської зменшеної базової лінії (bl_u) і спрощеної до (sb) мереж

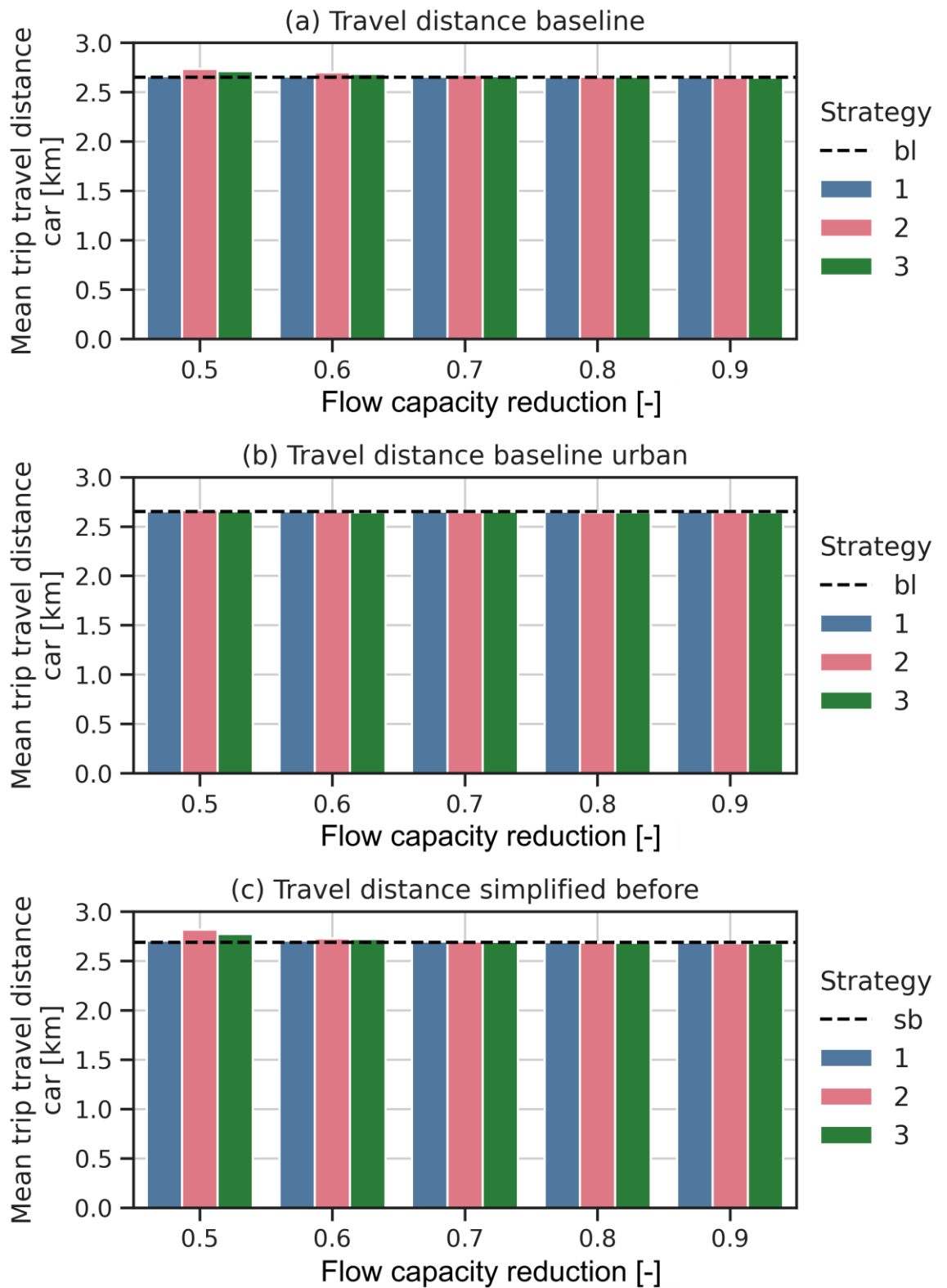


Рисунок 2.4 – Результати відстаней для сценарію Тернопіль, базова лінія (bl), міська зменшена базова лінія (bl_u) і спрощена до (sb) мережі

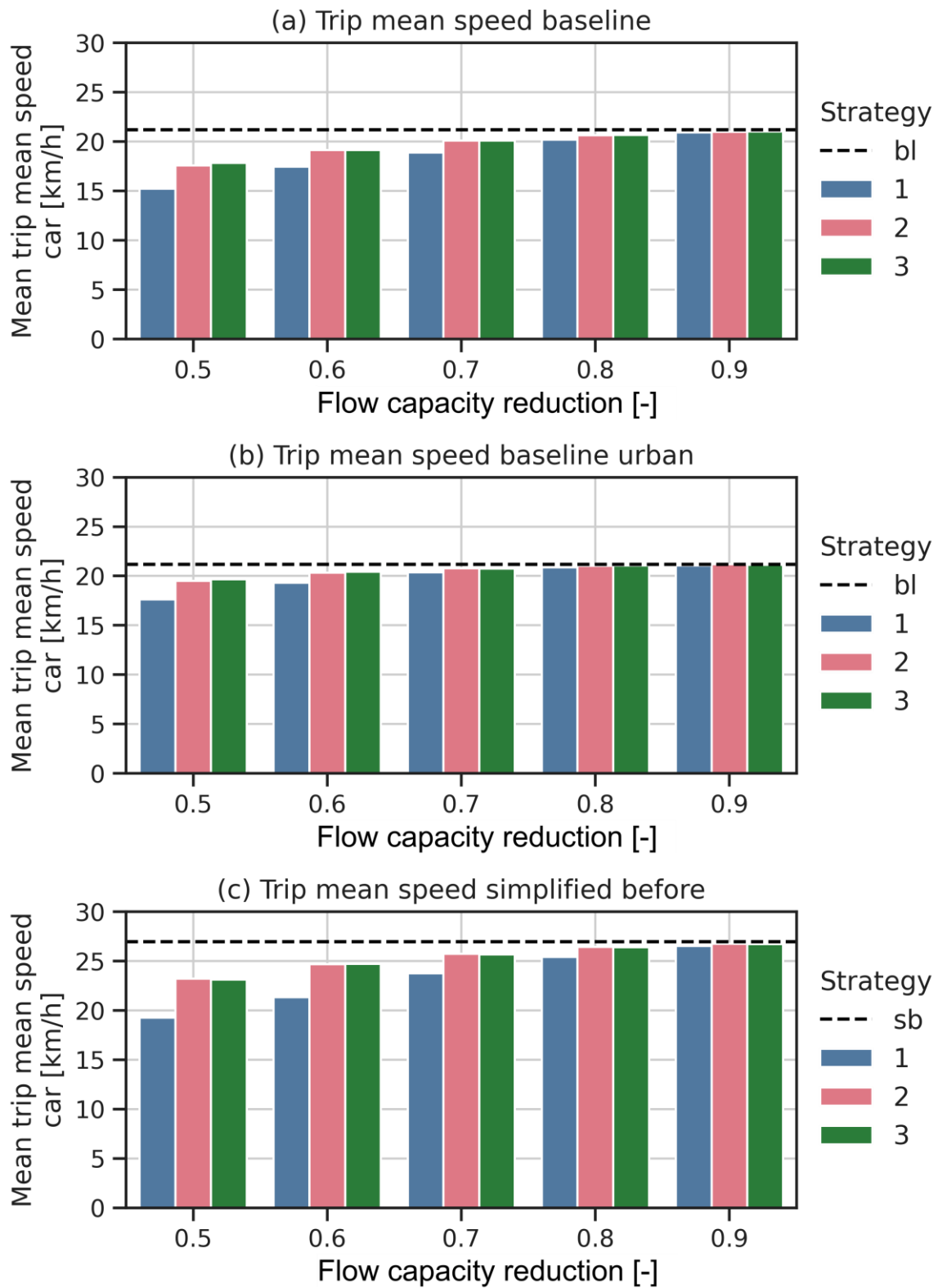


Рисунок 2.5 – Результати середньої швидкості поїздки для сценарію Тернопіль, базової лінії (bl), міської скороченої базової лінії (bl_u) і спрощеної до (sb) мереж

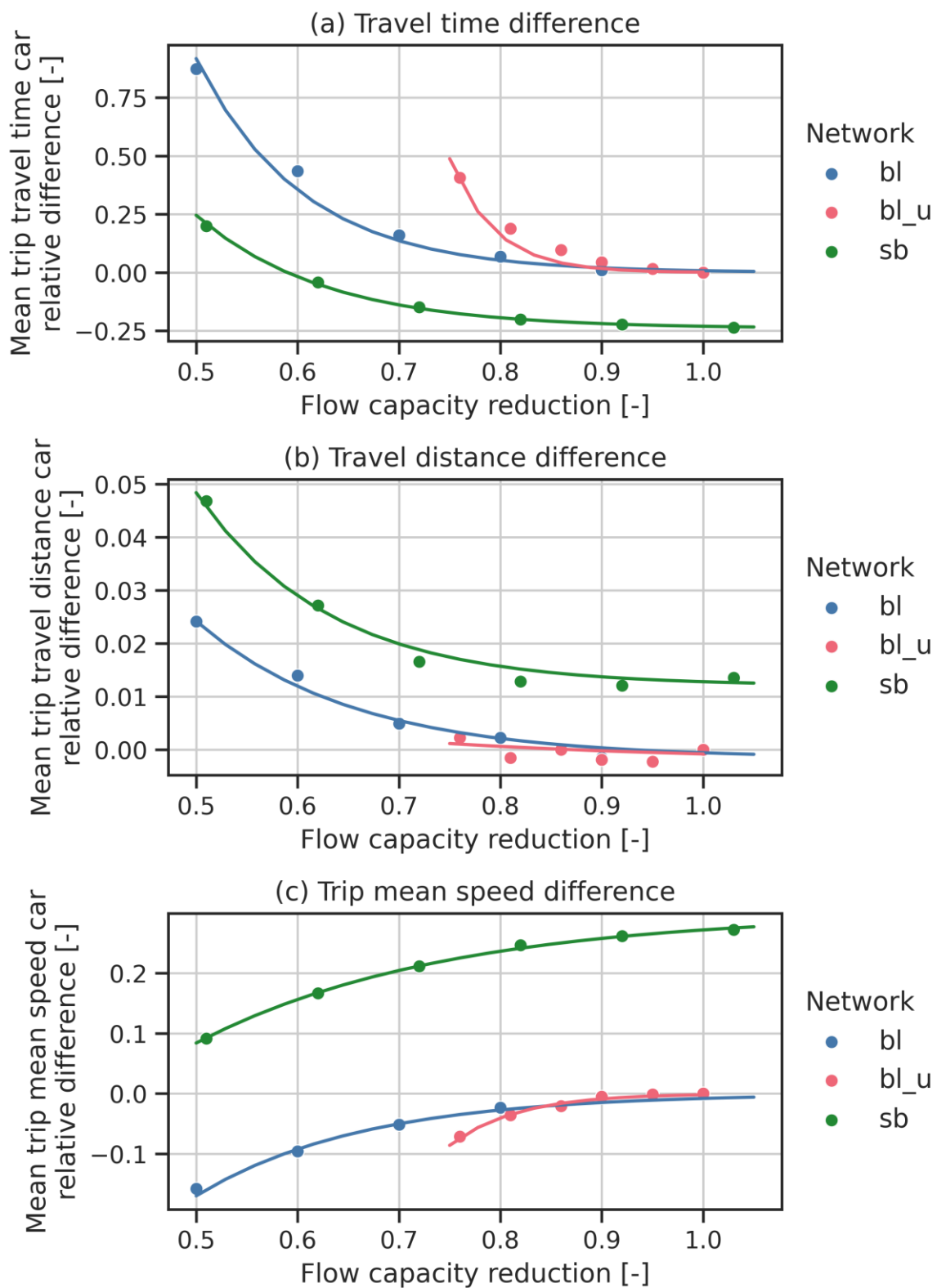


Рисунок 2.6 – Відносні результати для сценарію Тернопіль, стратегія 3, базова лінія (bl), міська зменшена базова лінія (bl_u) і спрощена до (sb) мережі

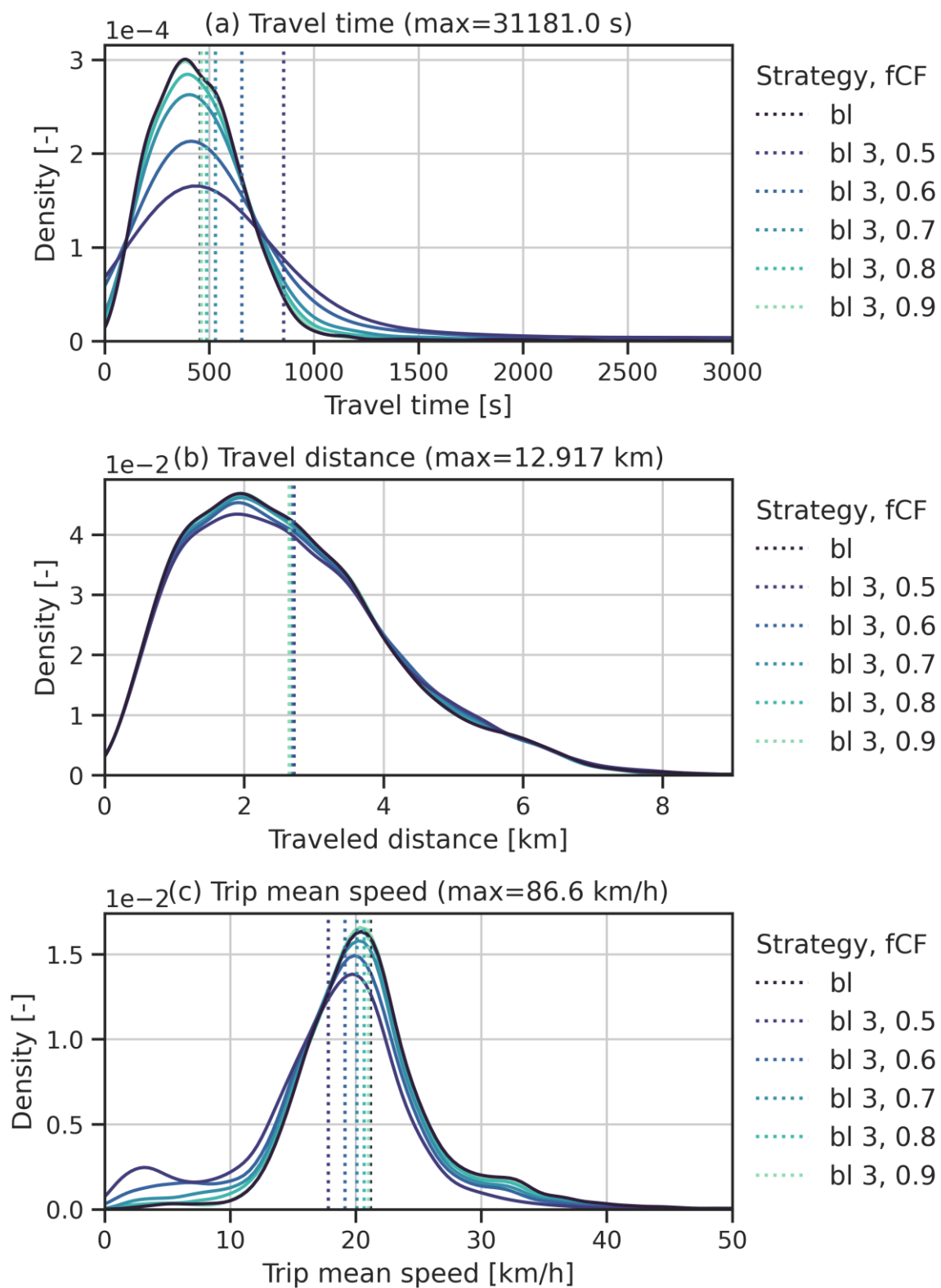


Рисунок 2.7 – Розподіл поїздок для сценарію Тернопіль, стратегія 3, базова мережа (пунктирні лінії: середнє)

Відстань подорожі

Як показано на рисунку 2.4, у всіх симуляціях як з базовою лінією, так і зі спрощеною мережею середня відстань поїздки становить приблизно від 2,65 до 2,70 км з невеликими збільшеннями для симуляцій зі зменшенням пропускної здатності на 0,5 і 0,6 і дозволеним вибором маршруту, що вказує на те, що агенти обходять шляхи, щоб уникнути заторів. . Максимальне збільшення 133 м знайдено для спрощеної мережі зі зменшенням пропускної здатності на 0,5 і дозволеним вибором лише маршруту, що становить 5% порівняно з базовим сценарієм зі спрощеною мережею.

Середня швидкість поїздки

Результати, наведені на рисунку 2.5, показують, що середня середня швидкість поїздки зменшується для всіх сценаріїв зі зниженою пропускною спроможністю та подібно до часу подорожі, зміни є найбільш екстремальними для стратегії 1, що передбачає застосування маршрутів із базового сценарію, і їх можна зменшити, дозволивши маршрут і вибір режиму. Знову ж таки, додатковий вплив вибору режиму не дуже великий. Для спрощеної мережі можна спостерігати, як середня швидкість поїздки зростає разом із вільною швидкістю мережі, для базової мережі вона становить 21,2 км/год, а для спрощеної мережі 26,9 км/год, що становить збільшення на 27%, що вище, ніж приріст вільної швидкості мережі на 6%.

Еластичність

Щоб показати еластичність, представлення даних змінено на відносні значення на рисунку 2.6. Потужність потоку виражена відносно пропускної здатності базової мережі, що призводить до вищих значень, ніж коефіцієнт пропускної здатності потоку для зменшення на міській мережі, оскільки лише частина потужностей згортається. Крім того, для спрощеної мережі з більшою сумарною пропускною здатністю масштабована пропускна здатність є вищою відносно потужності базової мережі. Збільшення або зменшення середнього часу в дорозі, відстані в дорозі та середньої швидкості в дорозі також виражається відносно значень базового сценарію з базовою мережею. Експоненціальна регресія використовується для підгонки кривої через точки

даних, згенеровані в результаті моделювання. Тут представлені результати для стратегії 3, де допускається вибір маршруту та режиму, оскільки це стратегія, яка є найближчою до реальності. Для всіх трьох характеристик поїздки ми бачимо, що спрощення мережі (sb_3) зміщує криву, і поїздки автомобілями, як правило, мають коротший час подорожі, трохи більшу відстань поїздки та вищу середню швидкість поїздки. Але, крім цього зсуву, крива майже паралельна тій, де використовується базова мережа, а пропускна здатність рівномірно зменшується по всій мережі. Дивлячись на криві, де зменшується лише пропускна здатність міської мережі (bl_u_3), поїздки зазнають більшого впливу, ніж рівномірне масштабування пропускної здатності (bl_3). Візуалізація подій симуляції підтверджує це. Раптове зниження пропускної спроможності для транспортних засобів, що рухаються з дороги вищого рівня на міську дорогу, провокує надзвичайну перевантаженість на цьому переході, яка може повернутися до зв'язків вище за течією. Навпаки, коли вже на дорогах вищого рівня пропускна здатність знижується і транспортні засоби там затримуються, таких раптових скорочень пропускної здатності та, як наслідок, заторів стає менше.

Дивлячись на масштаби осі y, ми бачимо, що час подорожі, відстань подорожі та середня швидкість подорожі впливають у різних діапазонах. У той час як максимальне збільшення відстані становить близько 5%, середня швидкість поїздки зменшується більш ніж на 10%, а час подорожі збільшується до 75%. Якщо всі поїздки будуть сповільнені однаково шляхом зменшення пропускної здатності при приблизному збереженні відстані поїздки, середня швидкість поїздки повинна зменшуватися обернено пропорційно збільшенню часу подорожі. Але тут середня швидкість поїздки реагує менше, ніж середній час подорожі, і розгляд розподілу поїздок має допомогти це пояснити.

На рисунку 2.7 показано щільність розподілу значень часу подорожі, відстані подорожі та середньої швидкості поїздки для різних скорочень пропускної здатності базової мережі, дозволяючи вибір маршруту та режиму. Для часу в дорозі здебільшого зменшується щільність поїздок із часом у дорозі

від 2 до 14 хв. У спектрі часу подорожі, показаному на рисунку 11.а), здається, що не всі ці поїздки перерозподіляються на трохи коротший і довший час подорожі, а на набагато більший час подорожі. Ці кілька, але надзвичайно тривалих поїздок підвищують середній час у дорозі. Для мережі з пропускнуою здатністю 0,5 середній час подорожі зображених значень нижче 3000 с становить 581 с, але для всіх поїздок він становить 856 с. Для базового сценарію ця різниця набагато нижча – 452 с і 457 с. Що стосується відстані поїздок, подорожі довжиною близько 2 км стають меншими із меншою пропускнуою здатністю, але вони не перерозподіляються до таких екстремально високих значень, тому середнє значення не зміщується так сильно. Поїздки з надзвичайно великим часом подорожі з'являються в (с) зі збільшенням щільності нижче середньої швидкості поїздки 10 км/год. Через обернену залежність між часом у дорозі та середньою швидкістю в дорозі, ці кілька нижчих швидкостей впливають на середню швидкість у дорозі менше, ніж середній час у дорозі, але якби середня швидкість у дорозі зменшувалася б рівномірніше для всіх поїздок, це було б інакше.

Режим частки

Навіть незважаючи на значне збільшення часу в дорозі для автомобільних поїздок, викликане зменшенням пропускнуї спроможності, немає майже ніяких змін режиму з автомобіля на інші види при застосуванні стратегії 3 щодо поїздок і лише незначні зміни щодо відстані. На рисунку 12 показані результати для найбільш екстремальних випадків (результати для пасажирів автомобіля приховані, оскільки вони не можуть змінити режим). Для спрощеної мережі розподіл режиму на основі поїздок дуже подібний до базової мережі, але для режиму спільного використання автомобіля, пішки та велосипеда довші, а поїздки громадським транспортом коротші, ніж у базовій мережі. Ймовірно, це збільшення автомобільних кілометрів викликано вищою вільною швидкістю на дорозі, що дозволяє здійснювати довші поїздки за той самий час і робить автомобіль більш привабливим. На рисунку 2.9 поїздки відфільтровано, щоб включати лише поїздки, які відбуваються в турах, де

дозволений вибір режиму, що для сценарію Тернопіль становить лише близько 16% поїздки. Але і тут реакції на зменшення потужності мінімальні.

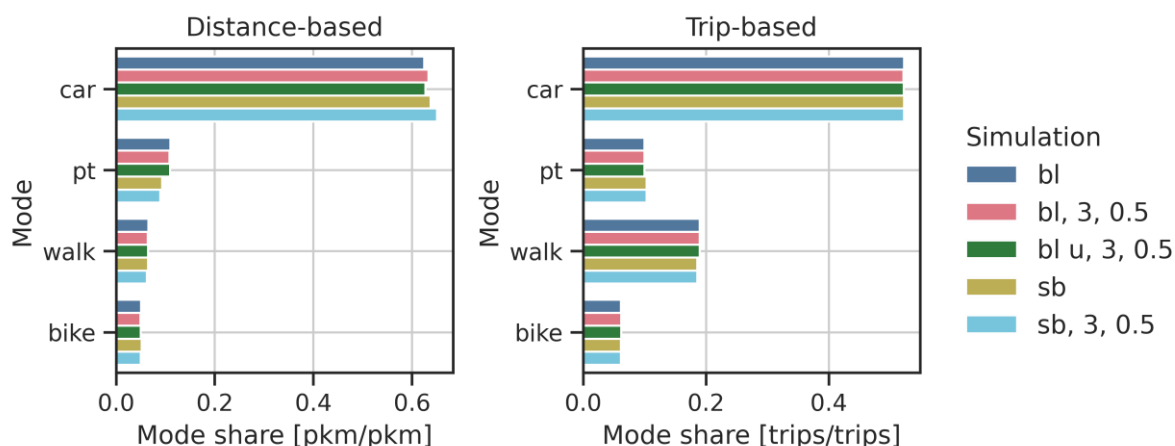


Рисунок 2.8 – Результати розподілу режимів для сценарію Тернопіль; еталонний сценарій і стратегія 3; базова лінія 0,5 пропускної здатності (bl), міська скорочена базова лінія (bl u) і спрощена мережа до (sb)

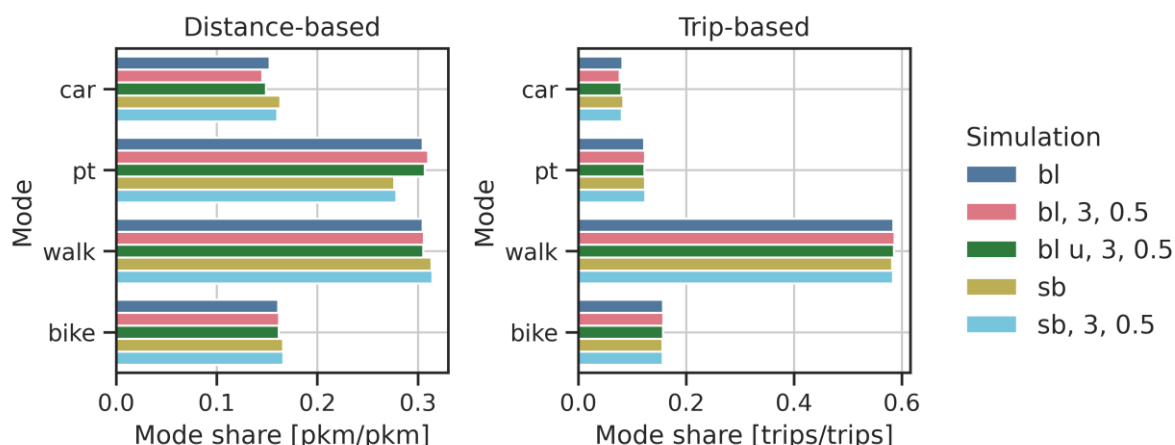


Рисунок 2.9 – Результати частки режиму для необмежених поїздки вибору режиму для сценарію Тернопіль; еталонний сценарій і стратегія 3; базова лінія 0,5 пропускної здатності (bl), міська зменшена базова лінія (bl u) і спрощена до (sb) мережа

2.3.2. Сценарій Е-Вело-Київ

Інфраструктура дорожнього сполучення

Крім того, для периметра Е-Вело-Київ як базова мережа, розрізана за допомогою eqasim (bl), так і спрощена мережа до перерозподілу дорожнього простору (sb), використовуються для аналізу чутливості, а їхні характеристики мережі наведено в таблиці 2.4. Кількість зв'язків у спрощеній мережі

зменшується, а милі смуги також трохи нижчі. Для цього більшого периметра збільшення середньої вільної швидкості становить 8%, а місткість навіть зменшується, але лише на 1%. Загалом відношення пропускної здатності високого рівня до пропускної здатності міського зв'язку становить від 0,37 до 0,39 і нижче, ніж у сценарії Тернопіль.

Таблиця 2.4 – Характеристики дорожнього сполучення мереж для сценарію Е-Вело-Київ

Мережі Е-Вело-Київ	bl	sb
N link	170,827	131,615
Загальний кілометраж смуги руху, км	22,225	22,419
Середнє вільна швидкість, км/год	38.4	41.2
Загальна місткість, авто/год*км	17,434,914	17,336,225
Ємність відносно bl	100%	99%
Спільна смуга руху автобус+автомобіль	20%	21%
Довжина верхнього рівня, км	0,37	0,39

Транспортні засоби в заторах

Для всіх симуляцій, виконаних для сценарію Е-Вело-Київ, кількість поїздок здебільшого не зменшується нижче 99% від кількості поїздок у немодифікованому сценарії. Тільки для стратегії 1 (фіксований маршрут і вибір режиму) з пропускною здатністю 0,5 і 0,6 кількість поїздок зменшується до мінімуму 97,4%. Для порівняння цих результатів моделювання з іншими слід мати на увазі, що було здійснено менше поїздок.

Час подорожі

Рисунок 2.10 показує, що середній час подорожі збільшується найбільше для стратегії 1, де не дозволяється вибір маршруту чи способу. Для базового сценарію та зменшення пропускної здатності всієї мережі на 50% збільшення є найвищим із 3436 додатковими секундами або 57 хвилинами середнього часу в дорозі, що в 2,3 рази перевищує середній час у дорозі за немодифікованим базовим сценарієм. Дозвіл на зміну маршруту (стратегія 2) і вибір режиму (стратегія 3) може дещо послабити вплив зменшеної пропускної здатності. Таким чином, для коефіцієнта зменшення пропускної спроможності 0,5 додатковий середній час у дорозі становить лише 1904 та 1081 секунду, але це означає, що середній час у дорозі за немодифікованим базовим сценарієм у 1,3 та 0,74 рази залишається як збільшення. Для менш надзвичайно зниженої пропускної спроможності, як правило, збільшення часу в дорозі також є менш екстремальним і може бути зменшено ще більше шляхом вибору маршруту та способу.

Для мереж зі зниженою пропускнуою спроможністю лише на міських з'єднаннях час подорожі щодо коефіцієнта пропускної здатності потоку нижчий, ніж при рівномірному зменшенні пропускної здатності. Наприклад, при зменшенні пропускної здатності на 30% (коефіцієнт пропускної здатності 0,70) час у дорозі збільшується лише на 11% із дозволеним вибором маршруту та режиму, тоді як при зменшенні пропускної здатності по всій мережі він збільшується на 34%.

Для еталонної спрощеної мережі середній час у дорозі без зміни пропускної здатності становить 1168 с і на 20% нижче, ніж для базового сценарію з 1463 с. Ймовірно, це пов'язано з вищою вільною швидкістю. З коефіцієнтами зменшення пропускної здатності, застосованими до спрощеної мережі, середній час у дорозі все ще нижчий, ніж для базової мережі, а можливість вибору маршруту наближає час у дорозі до базового сценарію, ніж для базової мережі. Для цих мереж немає помітного додаткового скорочення часу в дорозі при дозволі вибору режиму.

Відстань подорожі

На рисунку 2.11 видно, що відстань подорожі зменшується у випадку стратегії 1 із меншою потужністю, тому що поїздки, які не завершені в кінці часу моделювання, не зберігаються у вихідних даних моделювання та не включаються в цей аналіз. Якщо дозволити зміну маршруту в стратегії 2, середня відстань подорожі збільшується зі зменшенням пропускної здатності, оскільки об'їзди використовуються для уникнення перевантажених з'єднань із максимальним збільшенням середнього маршруту на 5,3% у спрощеній мережі з пропускною здатністю 0,5. Коли на додачу до цього вибору режиму дозволено в стратегії 3, ці обхідні шляхи знову майже виключаються.

Середня швидкість поїздки

Результати для середньої швидкості поїздки представлені на рисунку 2.12. Для стратегії 1 середня швидкість поїздки зменшується для всіх симуляцій зі зниженою пропускною здатністю порівняно з відповідним базовим сценарієм повної потужності. Якщо дозволити вибір маршруту та режиму, швидкість поїздок навіть збільшується для мереж із пропускною здатністю 0,9, а потім зменшується із меншою пропускною здатністю. Для меншої потужності вибір режиму допомагає наблизити середню швидкість поїздки до базового сценарію, але все одно залишається значне зниження на 8–10% для сценаріїв зменшення пропускної здатності на 0,5.

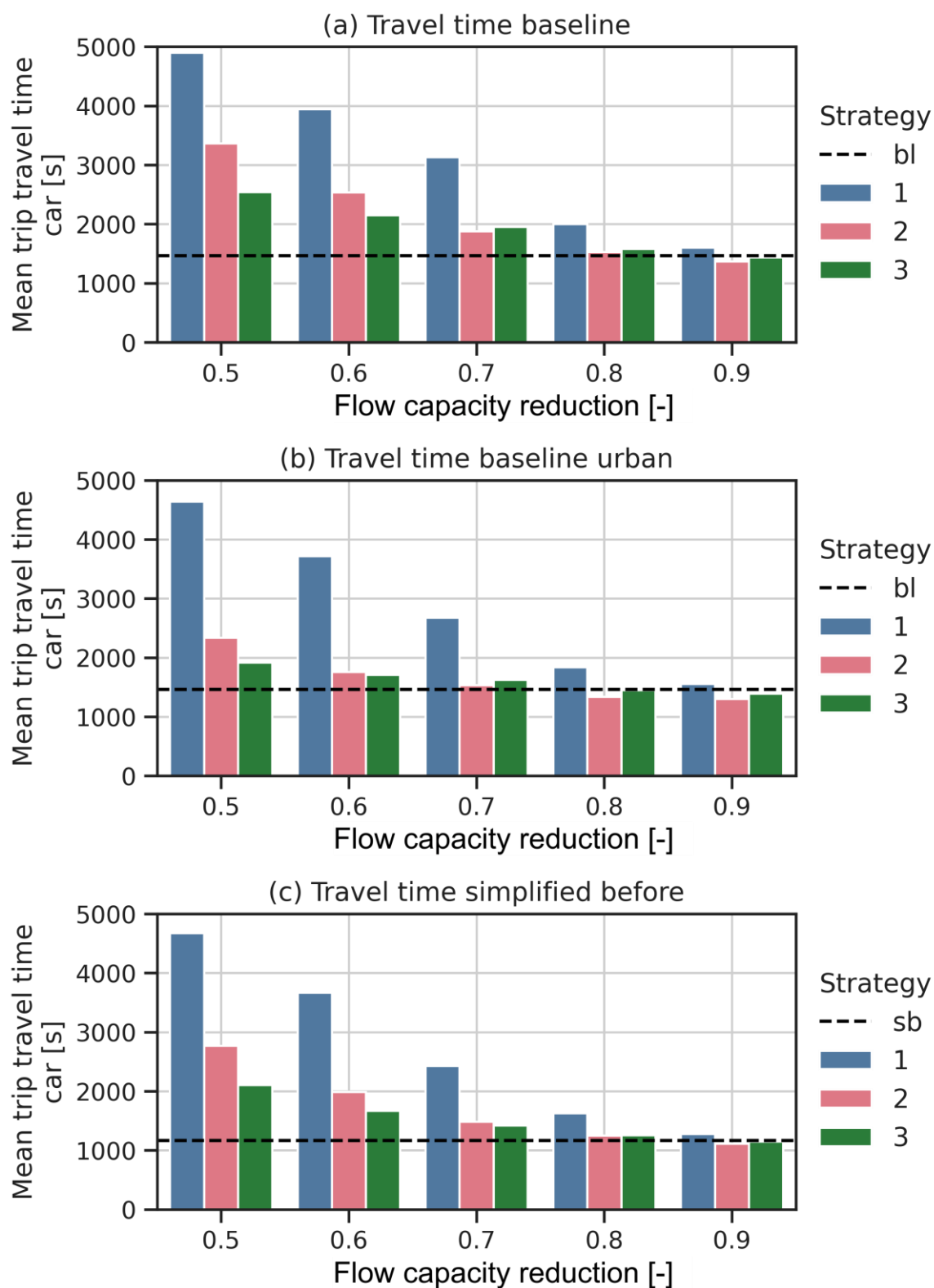


Рисунок 2.10 – Результати часу в дорозі для сценарію Е-Вело-Київ, базова лінія (bl), міська скорочена базова лінія (bl_u) і спрощена до (sb) мережі

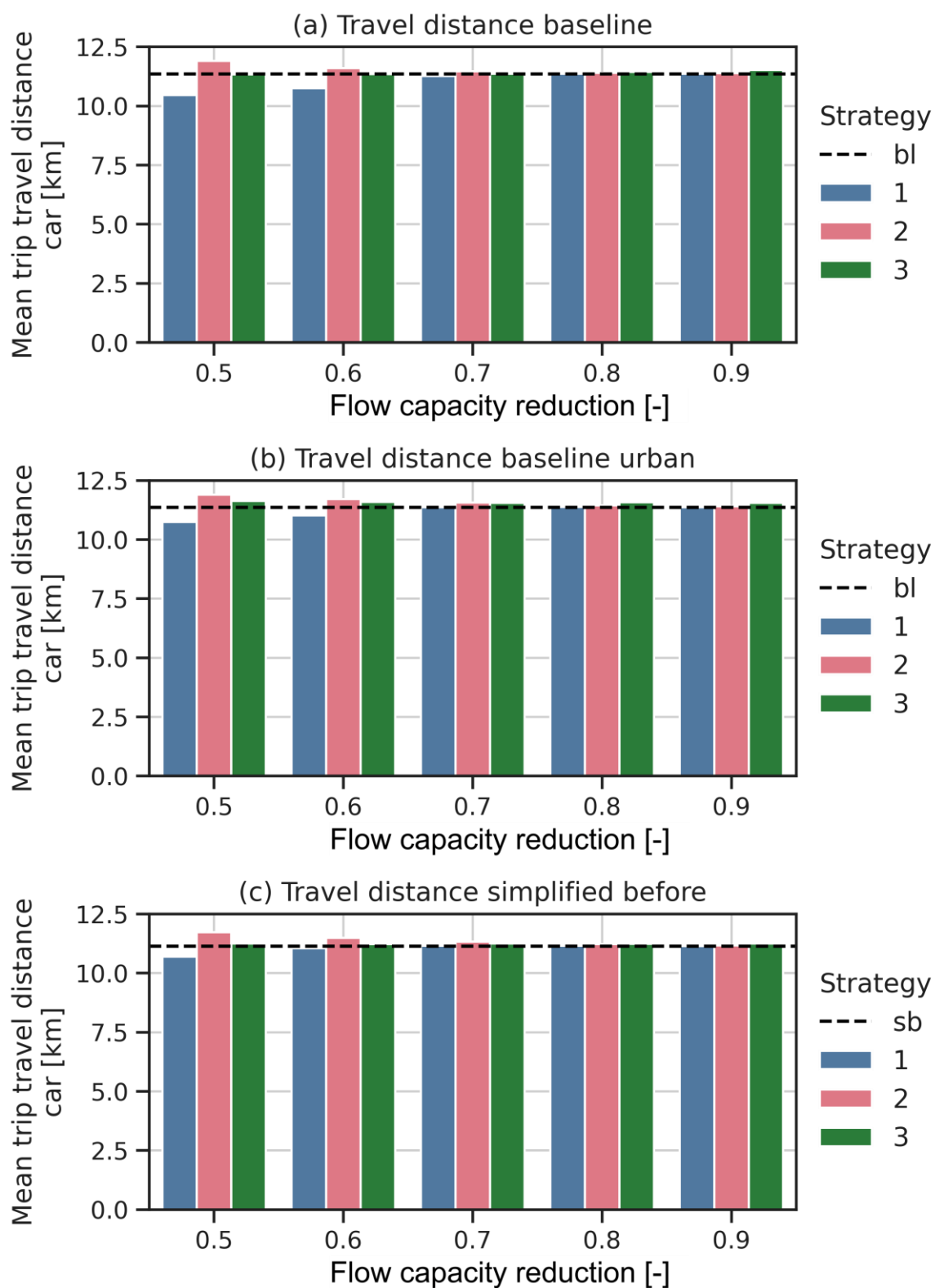


Рисунок 2.11 – Результати відстаней для сценарію Е-Вело-Київ, базова лінія (bl), міська скорочена базова лінія (bl_u) і спрощена до (sb) мережі

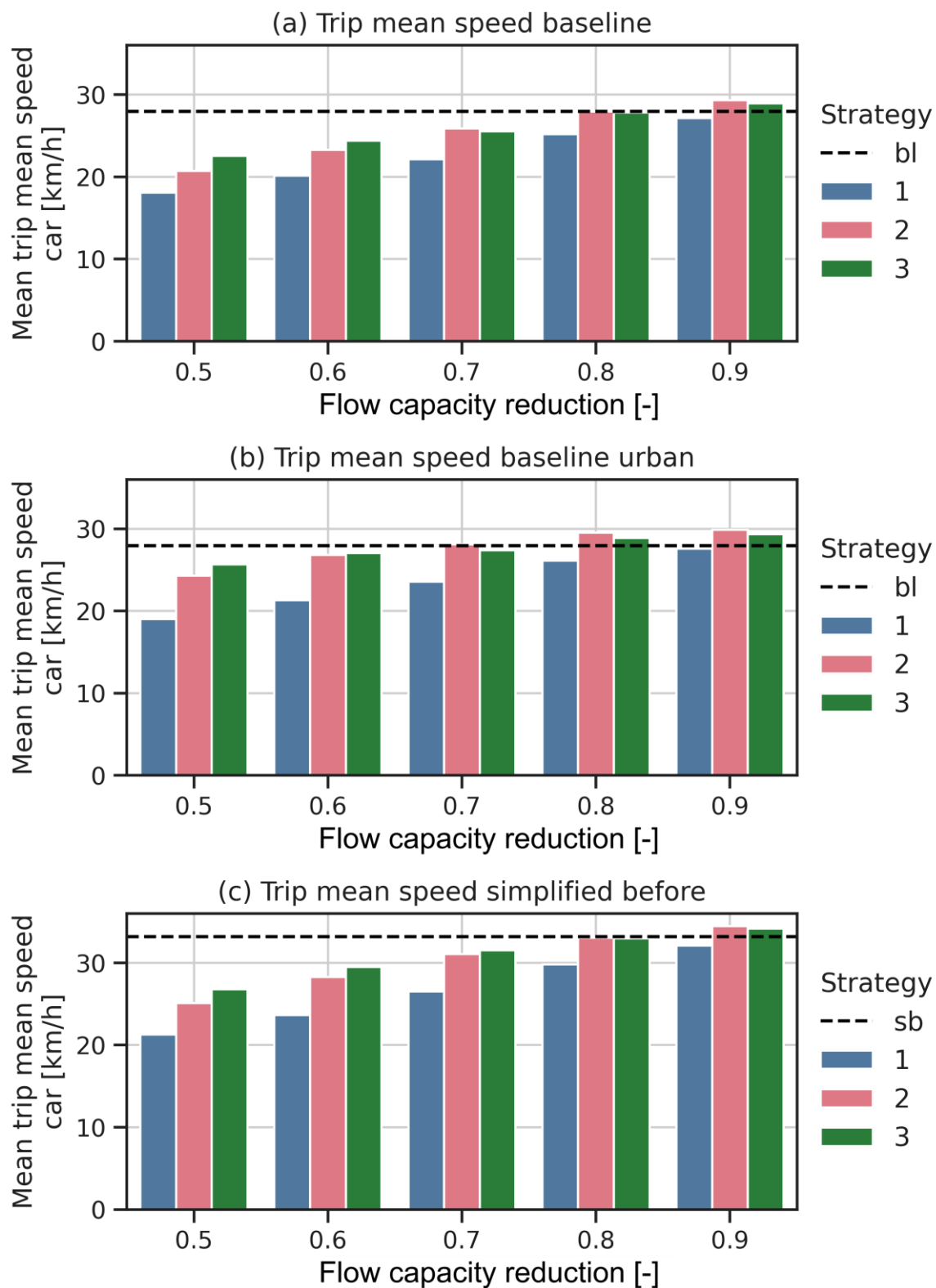


Рисунок 2.12 – Результати середньої швидкості поїздки для сценарію Е-Вело-Київ, базова лінія (bl), міська скорочена базова лінія (bl_u) і спрощена до (sb) мережі

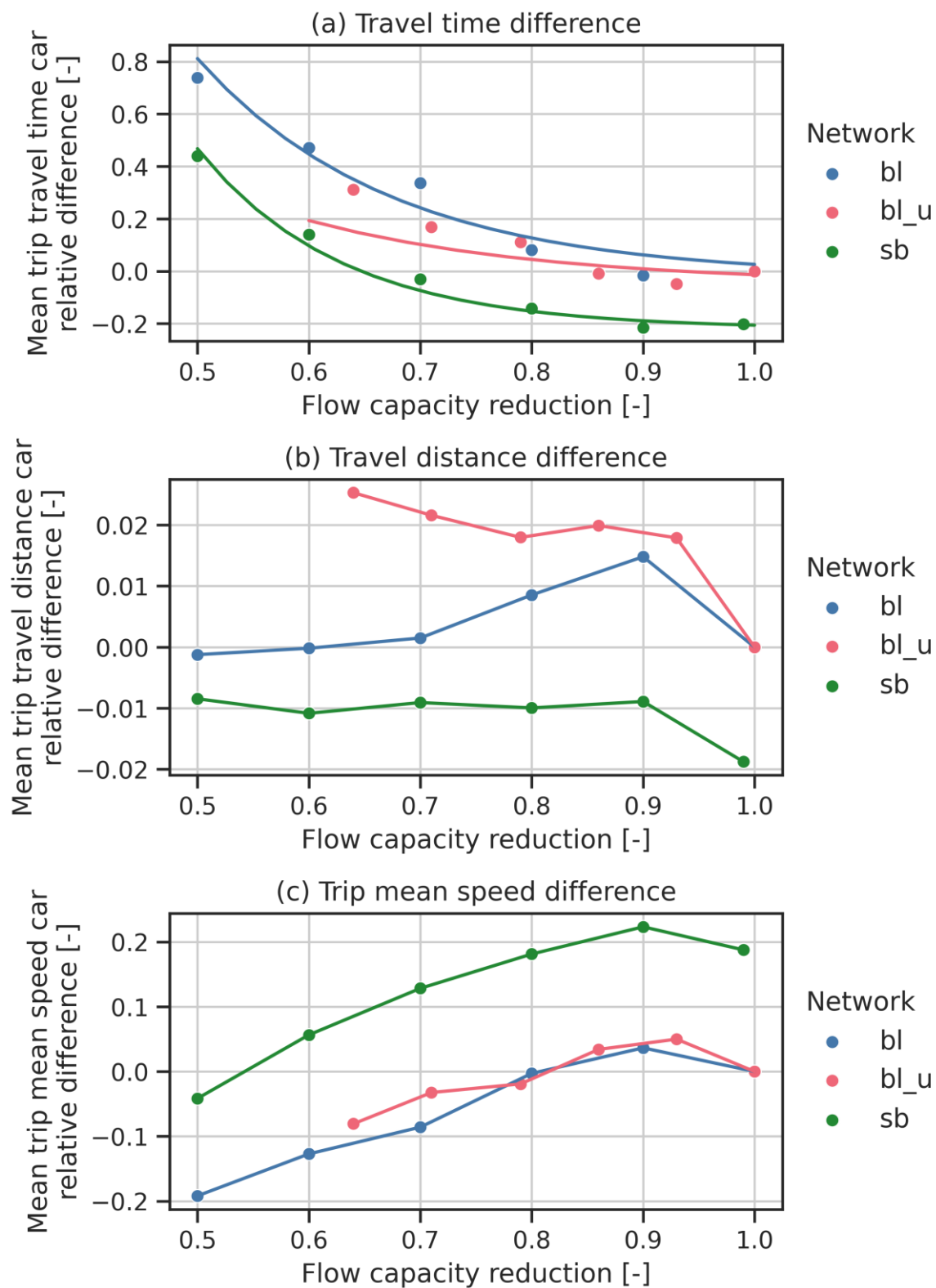


Рисунок 2.13 – Відносні результати для сценарію Е-Вело-Київ щодо базового базового сценарію, стратегії 3, базової лінії (bl), міської зменшеної базової лінії (bl_u) та спрощеної до (sb) мережі

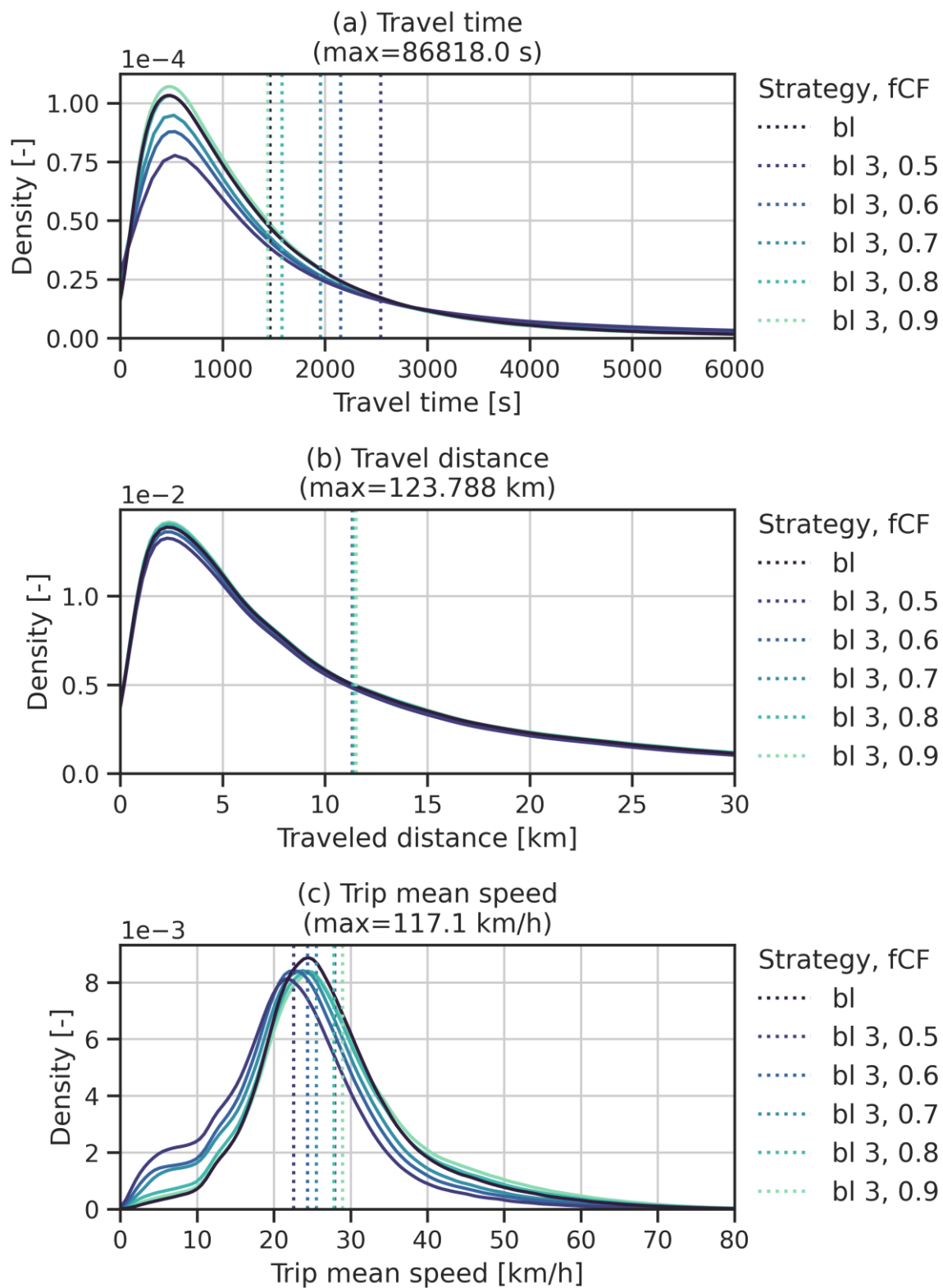


Рисунок 2.14 – Розподіл поїздок для сценарію Е-Вело-Київ, стратегія 3, базова мережа (пунктирні лінії: середнє)

Еластичність

Розміщуючи результати відносно потужностей базового сценарію та агрегованих характеристик відключення на рисунку 2.14, еластичність можна прочитати з графіків. Результати зі спрощеної мережі (sb_3) зміщуються порівняно з базовим сценарієм (bl_3), оскільки їхні сценарії повної потужності вже ведуть до різних початкових точок. Окрім цього, графіки для середнього часу в дорозі та середньої середньої швидкості в дорозі мають аналогічні шляхи. На відміну від сценарію Тернопіль, тут мережі зі зменшенням пропускної здатності лише на міських лініях зв'язку (bl_u_3) слідує лінійно зменшенню мережі (bl_3) для середнього часу подорожі та середньої середньої швидкості поїздки. Середня відстань подорожі змінюється в дуже малому діапазоні від 1 до 2%, тому інтерпретація курсу графіків обмежена. Для середньої середньої швидкості поїздки експоненціальна регресія може бути не найкращою, оскільки в усіх трьох мережах вимірюється збільшення середньої швидкості поїздки для зменшення пропускної здатності приблизно на 0,9.

Розподіл характеристик поїздки, представлений на рисунку 2.14, в принципі подібний до сценарію Тернопіль. Щодо часу в дорозі також здебільшого щільність поїздок із часом у дорозі від 2 до 45 хвилин зменшується та перерозподіляється на набагато більший час у дорозі, збільшуючи середній час у дорозі з меншою пропускною здатністю. Що стосується відстаней поїздок, в основному поїздки довжиною близько 2 км стають помітно меншими з меншою пропускною спроможністю, але вони не перерозподіляються до таких екстремально високих значень, тому середнє значення не змінюється настільки. Поїздки з надзвичайно великим часом подорожі з'являються в (с) зі збільшенням щільності нижче середньої швидкості поїздки 10 км/год. Також ми бачимо, що збільшення середньої середньої швидкості поїздки мережі 0,9 пропускної спроможності спричинене більшою щільністю поїздок із середньою швидкістю поїздки понад 35 км/год, які, ймовірно, будуть проходити принаймні частково по шосе або дорогах високого рівня.

Режим частки

Дивлячись на частки видів транспорту на рисунку 19, на відміну від результатів сценарію Тернопіль, можна побачити помітні зміни режиму транспорту з автомобіля на громадський у найбільш екстремальному випадку зменшення пропускної здатності на 0,5. Найнижча частка автомобілів 32,1% (поїздки) виявлена для рівномірно зменшеної базової мережі (базова повна потужність 33,4%). Частка пішки та їзди на велосипеді істотно не зростає. Для периметра Е-Вело-Київ 81% поїздок не обмежені вибором способу. Порівнюючи рисунки 2.15 і 2.16, базові значення базової лінії та спрощені перед моделюванням відрізняються для внутрішніх і безперешкодних поїздок. Тим не менш, реакція на зменшення потужностей є такою ж величиною, що має сенс, оскільки 81% без обмежень становить значну більшість усіх поїздок.

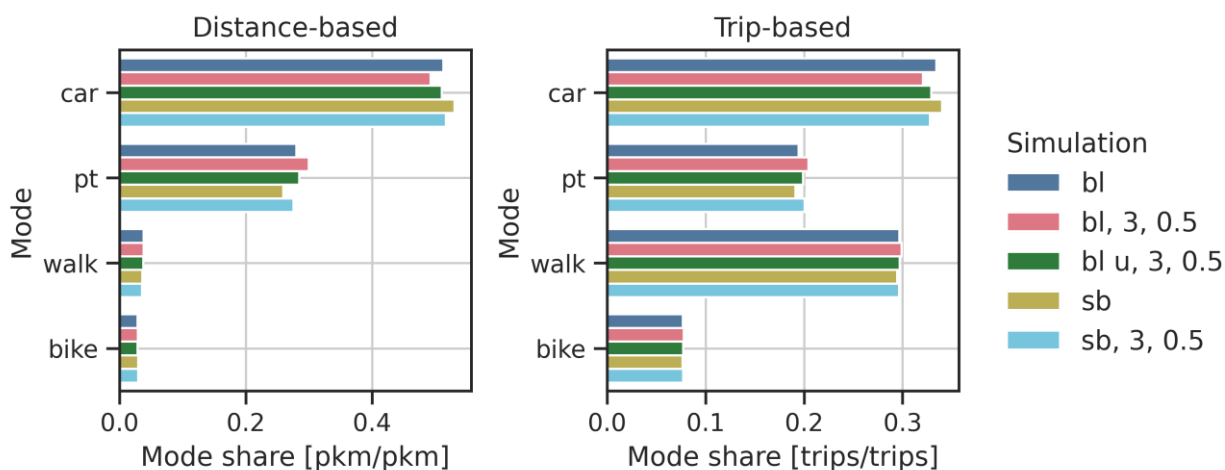


Рисунок 2.15 – Результати розподілу режимів для сценарію Е-Вело-Київ; еталонний сценарій і стратегія 3; 0,5 базової лінії пропускної спроможності (bl), міської зменшеної базової лінії (bl u) і спрощеної до (sb) мережі

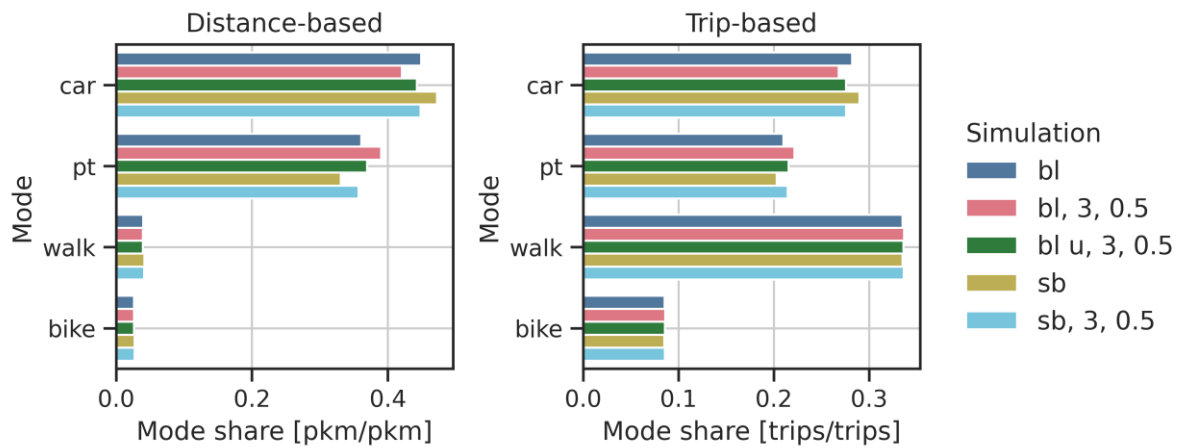


Рисунок 2.16 – Результати частки режиму для необмежених поїздки з вибором режиму для сценарію Е-Вело-Київ; еталонний сценарій і стратегія 3; 0,5 базової потужності (bl), міська скорочена базова лінія (bl u) і спрощена до (sb) мережа

2.4. Очікуваний та змодельований зсув режимів

Для периметра Е-Вело-Київ та найбільш екстремального випадку зі зменшення пропускної спроможності до 50% спостерігається збільшення середнього часу подорожі приблизно на 32 хвилини (1904 с) порівняно з базовим сценарієм, коли дозволяється лише вибір маршруту. Використовуючи середню відстань подорожі прибіл. 11 км і пружності, це призводить до очікуваної еластичності попиту на автомобільну поїздку відносно часу в дорозі -0,2.

Оскільки симуляція не дозволяє вибирати місце розташування та зменшувати діяльність і поїздки, вибір режиму є єдиним варіантом, тому всі зміни попиту на автомобілі повинні бути відображені в частці режиму, якщо додатково дозволено вибір режиму. Збільшений на 32 хвилини час у дорозі еквівалентний 130% від базового сценарію. З еластичністю -0,2 ми очікуємо, що частка режиму зменшиться на 26%, однак ці поїздки будуть перерозподілені між іншими видами. Частка режимів автомобілів у базовій мережі серед поїздки, відкритих для вибору режиму, становить 28,1%, зменшення цього показника на 26% призводить до 20,9% частки режимів для

автомобілів. Але частка режиму, коли дозволено вибір режиму, знижується лише до 27,3% у моделюванні, а базова пропускна здатність мережі зменшена до 0,5. Це приблизна оцінка, оскільки використовуються лише середні значення без зважування їх за довжиною поїздки тощо. Але все ж це вказує на те, що навіть для периметра Е-Вело-Київ, де велика кількість поїздок не обмежена зовнішньою діяльністю та вибором режиму можливо, зміни режиму не є такими, як очікувалося. Тому було проведено кілька додаткових експериментів для аналізу придатності інструменту моделювання та моделі вибору режиму які будуть застосовані для досліджень перерозподілу потужностей.

2.5. Додаткові експерименти та аналізування

2.5.1. Початкова чисельність населення та стан заторів

Підхід до аналізу чутливості полягав у тому, щоб дозволити зменшеній пропускній здатності створити раптові затори, а разом з цим довший час подорожі зменшить корисність поїздки, тому агенти виберуть інші, більш привабливі способи, і буде знайдено новий стан рівноваги. У програмному забезпеченні для моделювання є механізми стабілізації та запобігання блокуванням, які, імовірно, можуть мати пом'якшувальний вплив на реакцію на надзвичайні затори. Щоб переконатися, що очікуваний вибір транспорту не перешкоджає цьому, у початкових планах поступово більше автомобільних турів було встановлено на громадському транспорті. Таким чином вони будуть телепортовані та не будуть перевантажувати мережу, але під час ітерацій агенти можуть повернутися до автомобіля. Сподівалися, що таким чином мережа не буде наповнена автомобілями до такого перевантаженого стану, як раніше в аналізі чутливості.

Метод

Від 20 до 90% автомобільних турів у початковій популяції запланований режим був переключений на громадський транспорт і використовувався як вхідні дані для моделювання в мережі повної потужності як еталон і в мережі 0,5 місткості для аналізу найбільш екстремального випадку. Аналіз проводився з 25% вибіркою популяції, і пропускна здатність була відповідно зменшена. Модифіковані тури - це тури від дому до дому без сторонніх заходів. Розвиток частки режиму, пройдених людино-кілометрів (pkm) і людино-годин (ph) простежується протягом ітерацій моделювання та порівнюється.

Результати

Як показано на рисунках 2.17 і 2.18, незалежно від того, наскільки низькою є початкова частка автомобілів і, відповідно, наскільки порожньою є мережа на початку, кінцева частка режиму та людино-кілометрів (люд*км) автомобілів у сценарії зі зниженою пропускною здатністю завжди лише трохи нижче, ніж у сценарії повної потужності. Для часу подорожі, вираженого тут як людино-години (люд*год), навіть якщо початкові автомобільні тури зменшено до 80 і 90%, що призводить до меншого початкового часу подорожі, вони знову зростають, як показано на рисунку 2.19. Це вказує на те, що кінцевий результат це не спричинено початковим станом заторів, але автомобіль усе ще залишається привабливим вибором навіть із більшим часом подорожі.

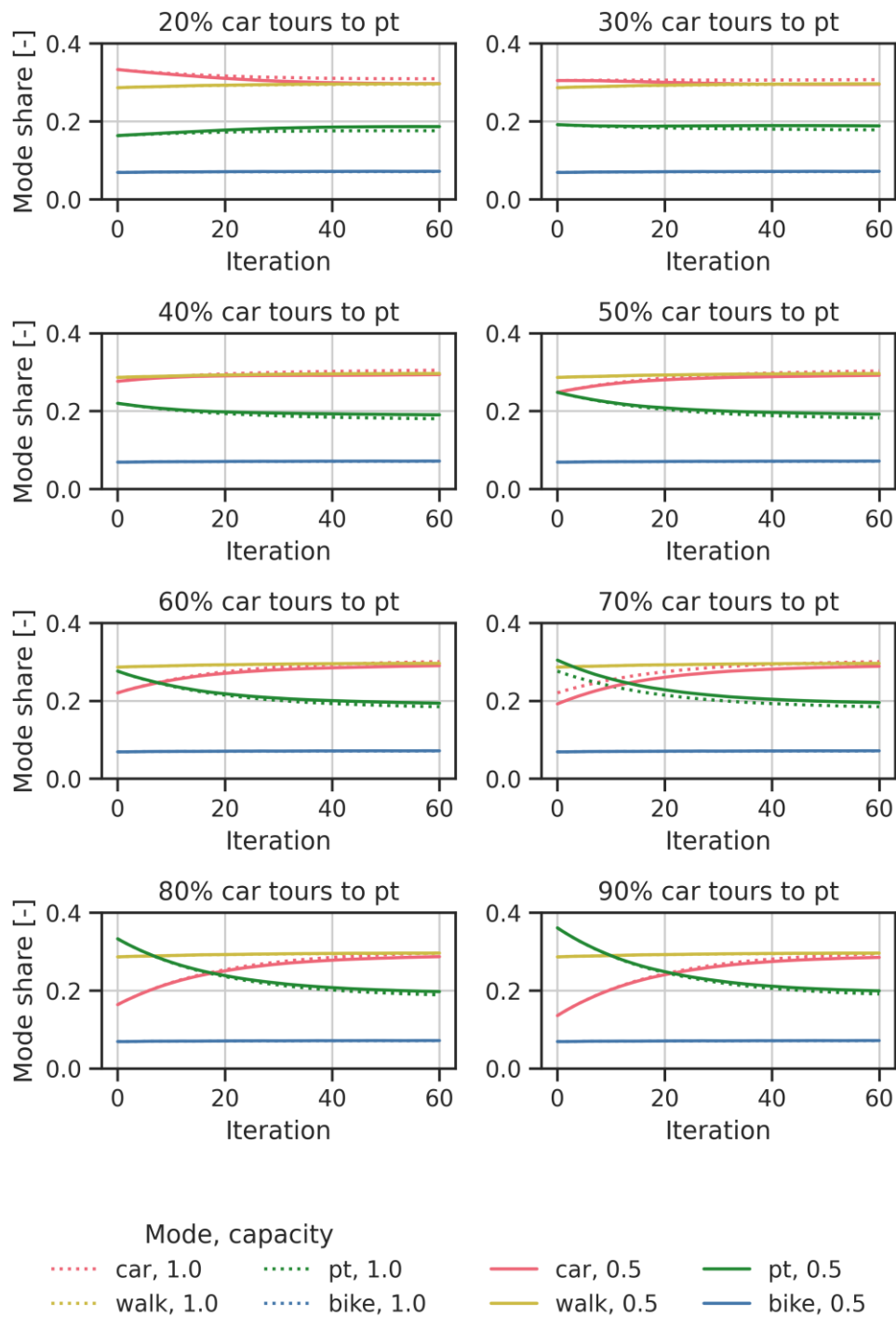


Рисунок 2.17 – Розробка частки режимів моделювання зі збільшенням частки початкових автомобільних турів, встановлених на громадському транспорті

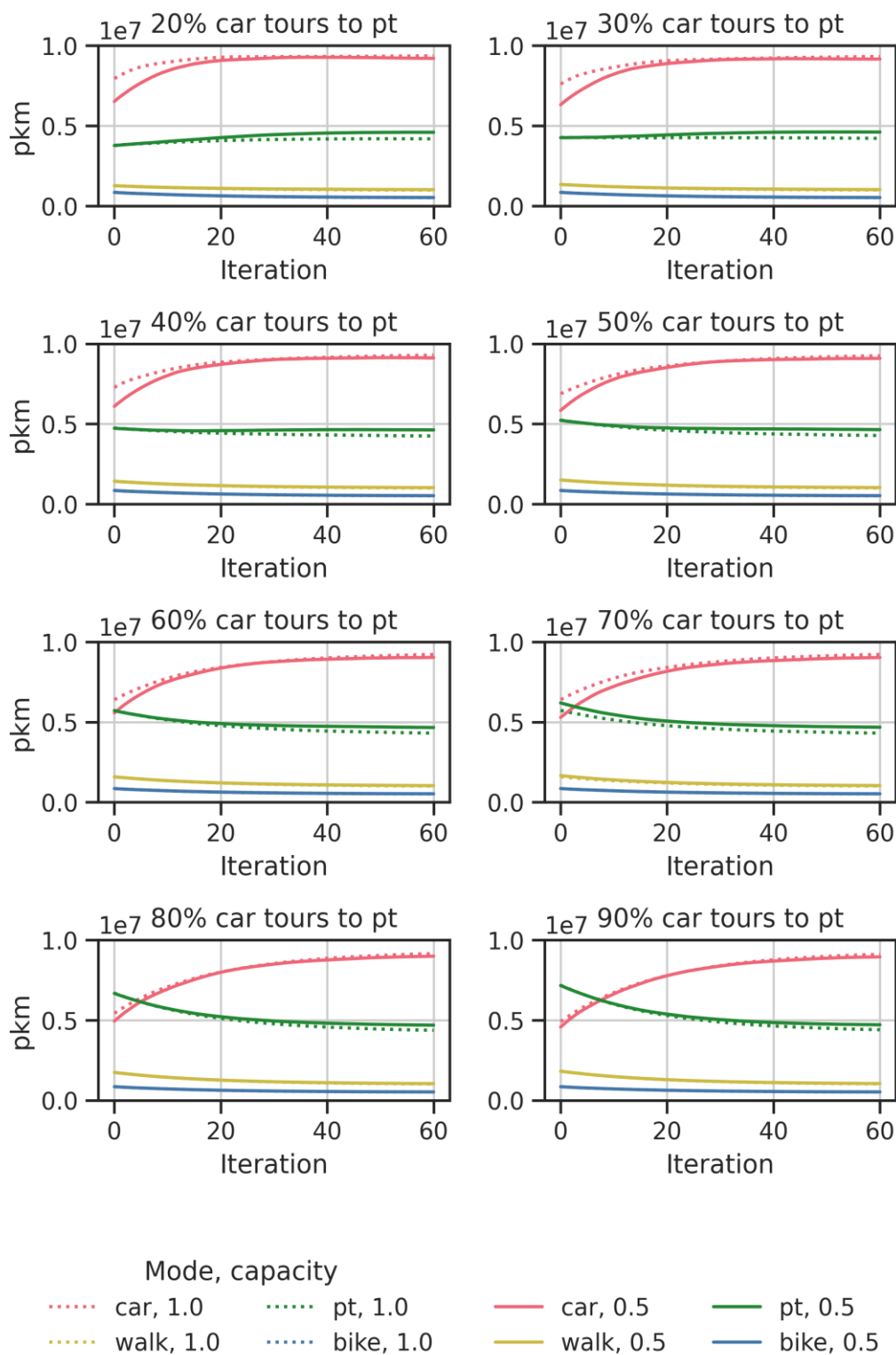


Рисунок 2.18 – Розробка Pkm моделювання зі збільшенням частки початкових автомобільних поїздок, встановлених на громадському транспорті

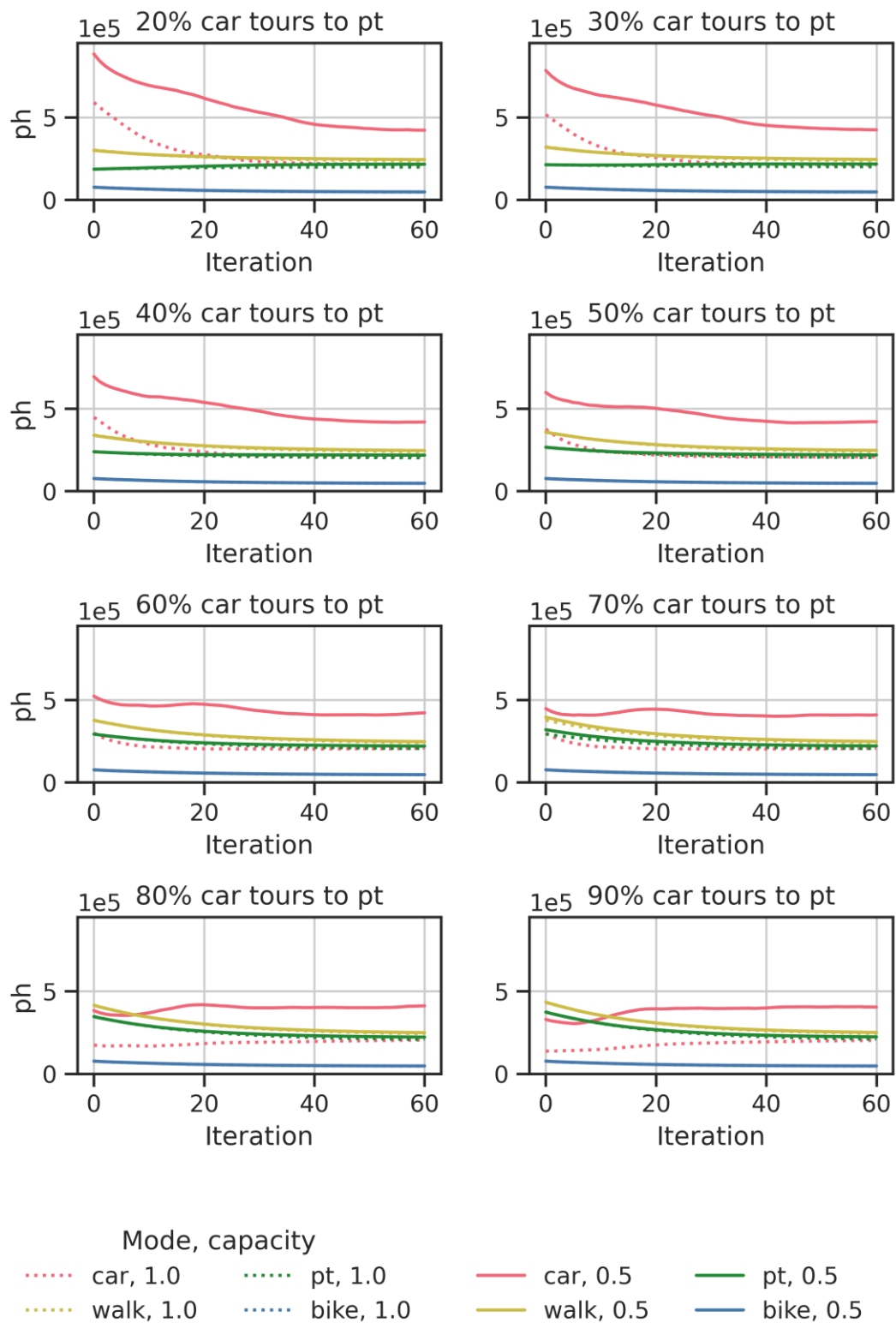


Рисунок 2.19 – Розробка Ph моделювання зі збільшенням частки початкових автомобільних поїздок, встановлених на громадському транспорті

2.5.2. Користь альтернативних режимів

Щоб кількісно визначити, як розвивається корисність автомобільних поїздок, а також різницю з корисністю альтернативних режимів, якщо вони доступні, розраховані корисності на етапі вибору режиму зберігаються та відображаються на відповідну виконану поїздку.

Метод

На кожній ітерації всі оцінені корисності для режимів автомобіль, рт, пішки та велосипед зберігаються в контейнері з ідентифікатором поїздки та прогнозованим часом подорожі та записуються у вихідний файл. Для цього аналізу для кожної особи фільтрується останній набір утиліт (найбільший номер ітерації), якщо вони були обрані кілька разів для перепланування. Потім створюється зведена таблиця, у якій для кожного ідентифікатора поїздки вибирається найвища корисність і найкоротший час у дорозі для кожного виду. Нарешті, це об'єднується з виходом відключення, який також аналізувався раніше в аналізі чутливості. Плани випуску з моделювання базової лінії з повною потужністю та з потужністю 0,5 були змодельовані для додаткових 30 ітерацій під час збору корисних даних. Частка режиму не змінилася суттєво протягом цих додаткових ітерацій.

Результати

Поїздки фільтруються, щоб включати лише ті рейси всередині периметра (навіть якщо вони починаються або закінчуються на зовнішньому об'єкті), які не є вантажними. Симуляція повної ємності містить 8162911 таких поїздок, а симуляція зменшеної ємності – 7961883, що вказує на те, що лише приблизно 0,8% внутрішніх поїздок неможливо виконати. Для майже 71% внутрішніх поїздок корисні дані були записані протягом 30 ітерацій, що вважається достатнім розміром вибірки. Числа в таблиці 10 показують, що для вибірки внутрішніх поїздок з корисними даними частка режиму для автомобілів вища, ніж для внутрішніх поїздок, які були відфільтровані для аналізу чутливості. Ймовірно, це пов'язано з тим, що для вибірки комунальних послуг поїздки з початком або завершенням на зовнішньому об'єкті не

відфільтровані та, ймовірно, містять багато поїздки автомобілями. Також серед поїздки із даними про комунальні послуги немає пасажирів автомобіля, що дещо спотворює частку. Також тут ми спостерігаємо, що частка автомобільного режиму лише трохи зменшується зі зниженою ємністю мережі. Все ще 21% поїздки на автомобілі оцінили корисність велосипеда за сценарієм 0,5 місткості, що можна інтерпретувати як максимальний потенційний перехід від автомобіля до велосипеда. Оскільки рішення прийнято для турів, а не для одноразових поїздки, можливо, що альтернатива не буде обрана, навіть якщо вона має найвищу корисність для цієї поїздки, оскільки інші поїздки в цьому турі роблять вибір цього режиму непривабливим.

Таблиця 2.5 – Кількість поїздки, відфільтрованих за виконаним режимом і розглянутими режимами

Мережа	повна місткість		0,5 місткість	
	# поїздки	частка	#поїздки	частка
внутрішні поїздки з комунальними даними	5,533,076	100%	5,484,589	100%
виконується режим автомобіля	2067330	37%	1 926 389	35%
виконується режим pt	1,182,710	21%	1,265,164	23%
виконується режим ходьби	1814879	33%	1 820 932	33%
виконується режим велосипед	468,157	8%	472,104	9%
розглянутий велосипед	1666075	30%	1 658 581	30%
pt розглядається	4,540,961	82%	4,520,241	82%

виконується автомобіль, розглядається велосипед	473,993	9% (23% від автомобіль них поїздок)	430,335	8% (21% від автомобіль них поїздок)
виконаний автомобіль, pt розглядається	1330693	24% (64% від автомобіль них поїздок)	1,217,109	22% (59% від автомобіль них поїздок)
виконаний автомобіль, pt і велосипед розглядаються	462,466	8% (22% від автомобіль них поїздок)	419,131	8% (20% від автомобіль них поїздок)

Щоб отримати уявлення про діапазон утиліт для кожного режиму, оцініть щільність ядра (KDE) розподіли показані на рисунку 2.5. Оскільки pt, велосипед і ходьба телепортуються, їхня оцінка корисності не змінюється залежно від потужності мережі, тому лише для автомобілів будуються дві криві. Для громадського транспорту значення з утилітою $-\infty$ виключаються з розрахунку середнього та мінімального, тому лише 82% поїздок у громадському транспорті представлені цими числами. Також ходьба може досягати дуже низьких значень, тому лише ті, у яких корисність перевищує -50 (приблизно 80% подорожей пішки), включено до графіка KDE та таблиці 2.6. Оскільки час у дорозі є основним вхідним фактором для обчислення корисності, описова статистика часу в дорозі здійснених поїздок наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.6 – Опис розподілу корисності $u[-]$ за режимами

Режим	min	max	середнє значення	станд
автомобіль (1,0)	-15.05	-0,80	-2.07	1.10
автомобіль (0,5)	-30,92	-0,80	-2,23	1.33
pt ($u \neq -\inf$)	-35,26	-1,04	-2,56	1.20
ходьба ($u > -50$)	-49,99	0,59	-4,89	9.33
велосипед	-80,17	0,15	-3,94	5,96

Таблиця 2.7 – Опис розподілу часу в дорозі (хв) за видами

Режим (ємність мережі)	min	max	середнє значення	станд
автомобіль (1,0 ємності виконано)	0,03	328.20	25.39	27.41
автомобіль (1,0 ємності орієнтовно)	0,0	169,33	22.82	19.74
автомобіль (0,5 ємності виконано)	0,03	1319,60	63,85	111.29
автомобіль (0,5 ємності орієнтовно)	0,0	469,7	33,71	36,86
pt (1,0 ємності)	1.25	1139,68	46.42	35,97
pt (0,5 ємності)	1.25	1139,58	47,52	36,47
ходьба (1,0 ємності)	0,02	1348,42	16.40	47.06
ходьба (0,5 ємності)	0,02	1348,42	16.39	46,84
велосипед (1,0 ємності)	0,00	589,45	18.14	37,96
велосипед (0,5 ємності)	0,00	589,45	18.18	37,80

Наступний аналіз розвивається навколо поїздок, здійснених на автомобілі, щоб зрозуміти, чому автомобіль все ще вибирають у

перевантаженій мережі зі збільшенням часу в дорозі, хоча багато поїздки використовують велосипед або громадський транспорт як альтернативу.

Таблиця 2.8 – Різниця в корисності автомобіля за збільшенням часу подорожі для середньої довжини поїздки

Різниця в часі в дорозі, хв	5	10	15	20	25	30
Різниця корисності (-)	-0,080	-0,161	-0,241	-0,321	-0,402	-0,482

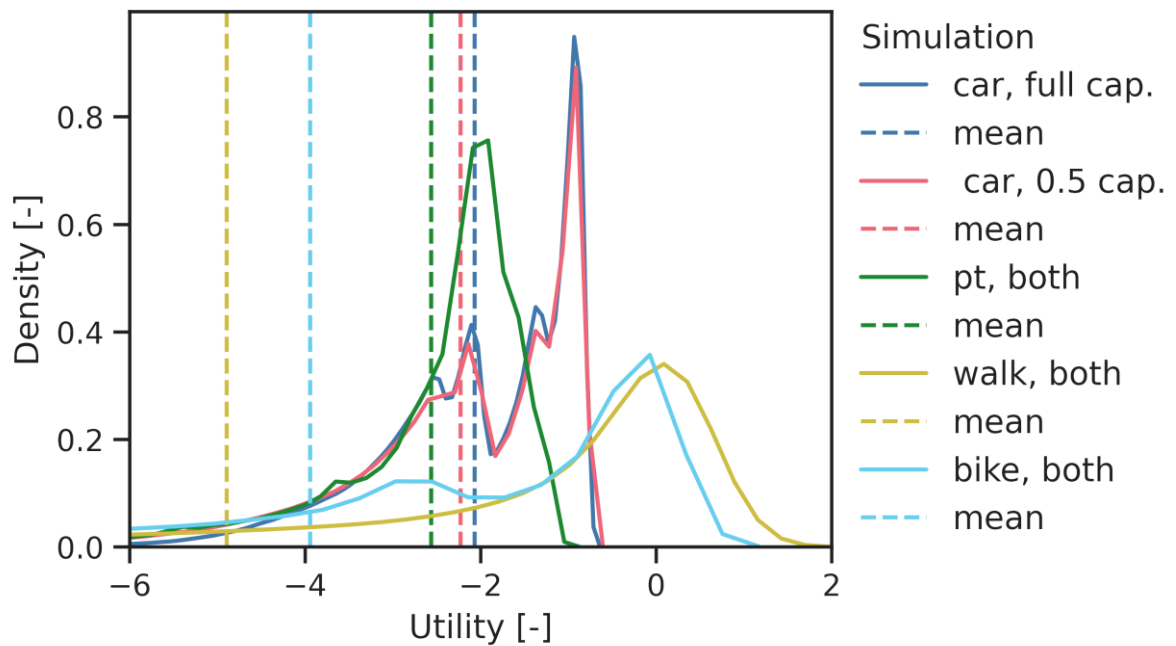


Рисунок 2.20 – Утиліта KDE за режимами

Для внутрішніх поїздки із комунальними даними середня евклідова відстань автомобільних поїздки у мережі з повною потужністю становить 9,1 км. Використовуючи це, можна оцінити дельту корисності автомобіля середньої поїздки для збільшення часу подорожі на 10 хвилин, що дорівнює -0,161 (див. рівняння 1). Більше значень різниці в корисності наведено в таблиці 2.28. Результат для 10-хвилинної різниці близький до різниці в

корисності між середньою корисністю автомобіля в мережі з повною та зниженою потужністю, але середній час подорожі на автомобілі збільшується набагато більше, ніж на 10 хв із 38,5 хв. Ця невідповідність призводить до питання, як прогнозований час подорожі для автомобілів при прийнятті рішення співвідноситься з часом поїздки, що виконується.

$$\begin{aligned}
 \delta_{u,car} &= \beta_{inVehicleTime,car} \cdot \xi_{TD} \cdot x_{inVehicleTime,car} \\
 &= \beta_{inVehicleTime,car} \cdot \left(\frac{x_{euclideanDistance}}{\theta_{referenceDistance}} \right)^{\lambda_{TD}} \cdot x_{inVehicleTime,car} \\
 &= -0.019 \cdot \left(\frac{9.1}{39} \right)^{0.115} \cdot 10 \\
 &= -0.161
 \end{aligned} \tag{1}$$

Прогнозована різниця часу в дорозі визначається таким чином, що позитивні значення означають, що виконаний час у дорозі довший за прогнозований час у дорозі, іншими словами, час у дорозі цих поїздок недооцінюється. Гістограма абсолютної різниці в хвилинах показана на рисунку 1.25. Для мережі з повною пропускнуою здатністю ми бачимо, що більшість прогнозів відхиляються на ± 5 хв, але для мережі зі зниженою пропускнуою здатністю прогнози стають менш точними, і багато виконаних поїздок тривають довше, ніж прогнозувалося. Частка поїздок у 20% із різницею в прогнозі понад 30 хвилин вважається значним погіршенням якості прогнозу. Якщо прогнозована різниця виражена відносно розрахункового часу подорожі, як показано на рисунку 26, ми бачимо, що багато значень знаходяться в межах від -0,5 до 1,0, але хвіст до більшого прогнозованого часу подорожі стає довшим для мережі зі зниженою пропускнуою здатністю. Середнє кінцевих значень відносної різниці передбачення становить 0,11 для мережі з повною пропускнуою здатністю та 0,91 для мережі зі зниженою пропускнуою здатністю, а максимальне значення збільшується від 193 до 5768 при зменшенні потужності.

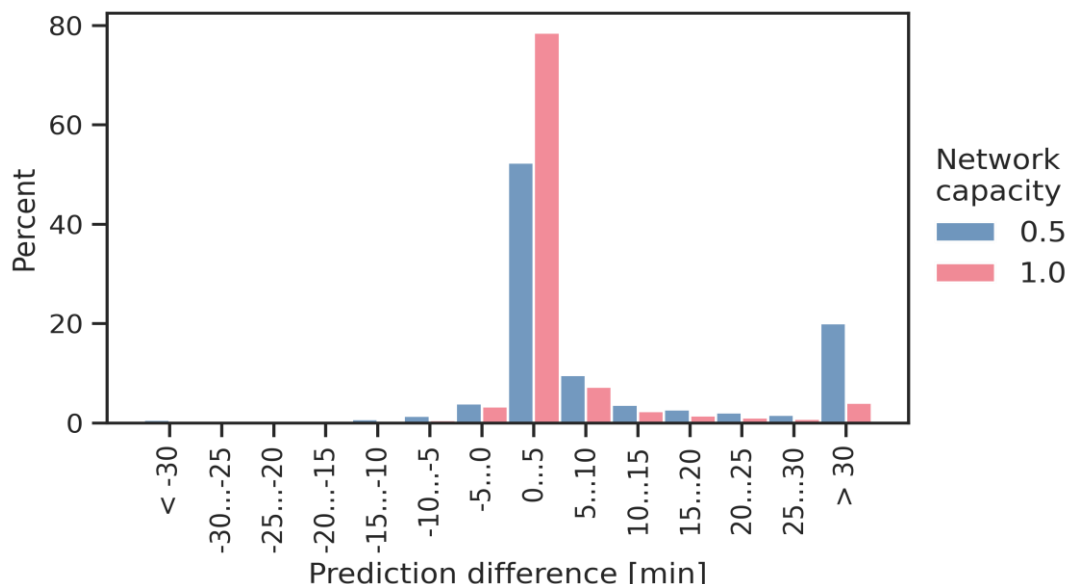


Рисунок 2.21 – Гістограма різниці прогнозованого часу в дорозі (хв) останнього прогнозу для автомобільних поїздок

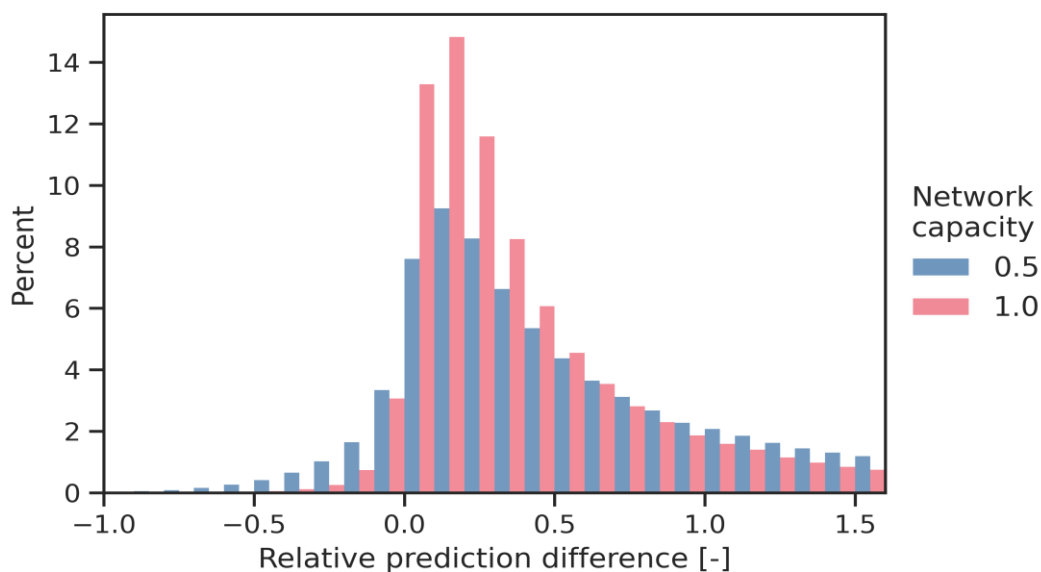


Рисунок 2.22 – Різниця прогнозованого часу в дорозі останнього прогнозу щодо гістограми очікуваного часу в дорозі для автомобільних поїздок

Дивлячись на якість прогнозування часу подорожей за пройденою відстанню (див. Рисунок 2.23) і тривалістю в дорозі (див. Рисунок 2.24), ця втрата якості прогнозування впливає на всі відстані подорожей, але є більш помітною для довших подорожей як у часі, так і в просторі. При побудові гістограми за середньою швидкістю поїздки (див. Рисунок 2.25) стає

очевидним, що на поїздки з особливо низькими швидкостями впливає ця недооцінка часу подорожі.

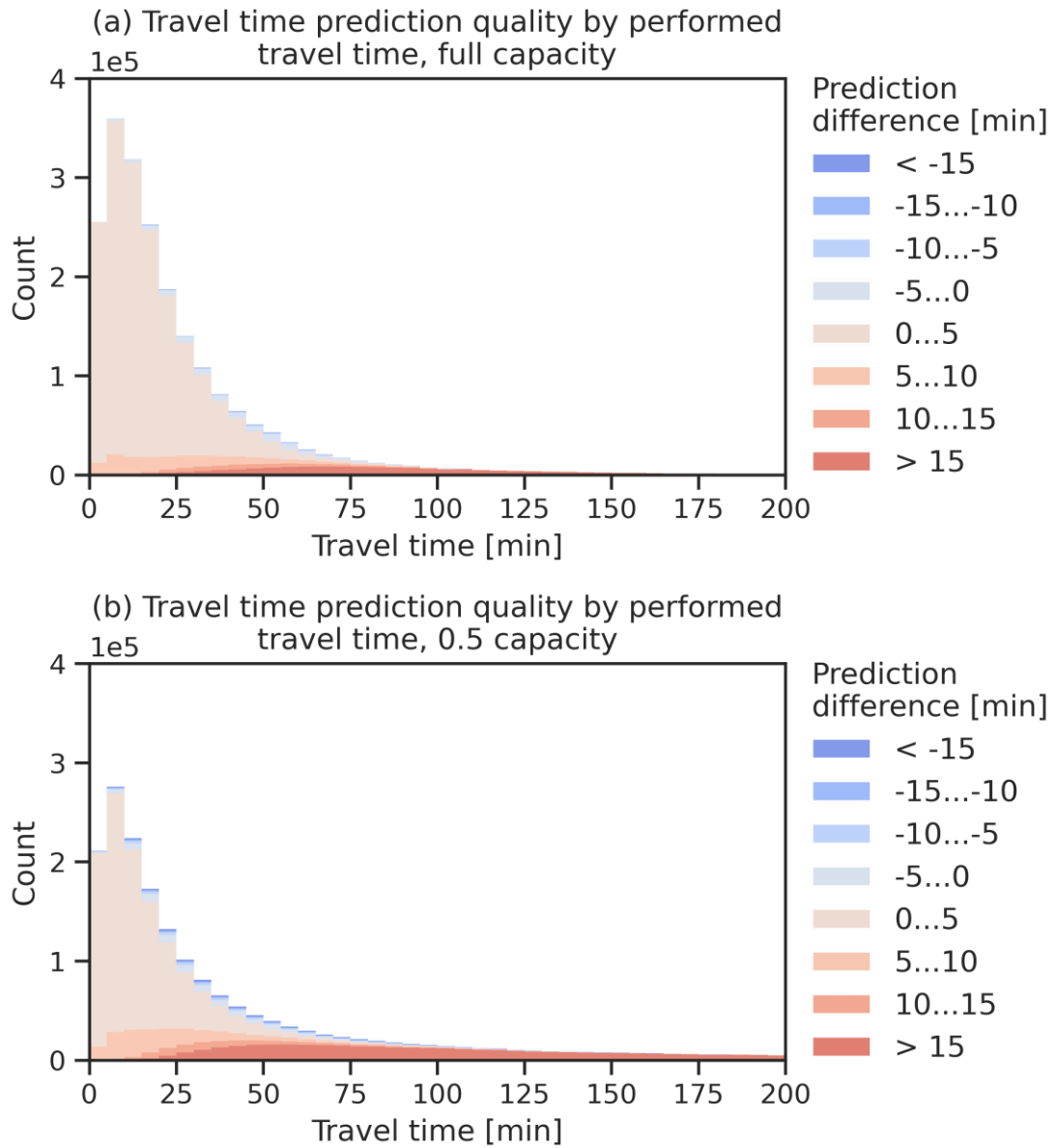


Рисунок 2.23 – Розподіл якості прогнозування часу в дорозі за часом у дорозі

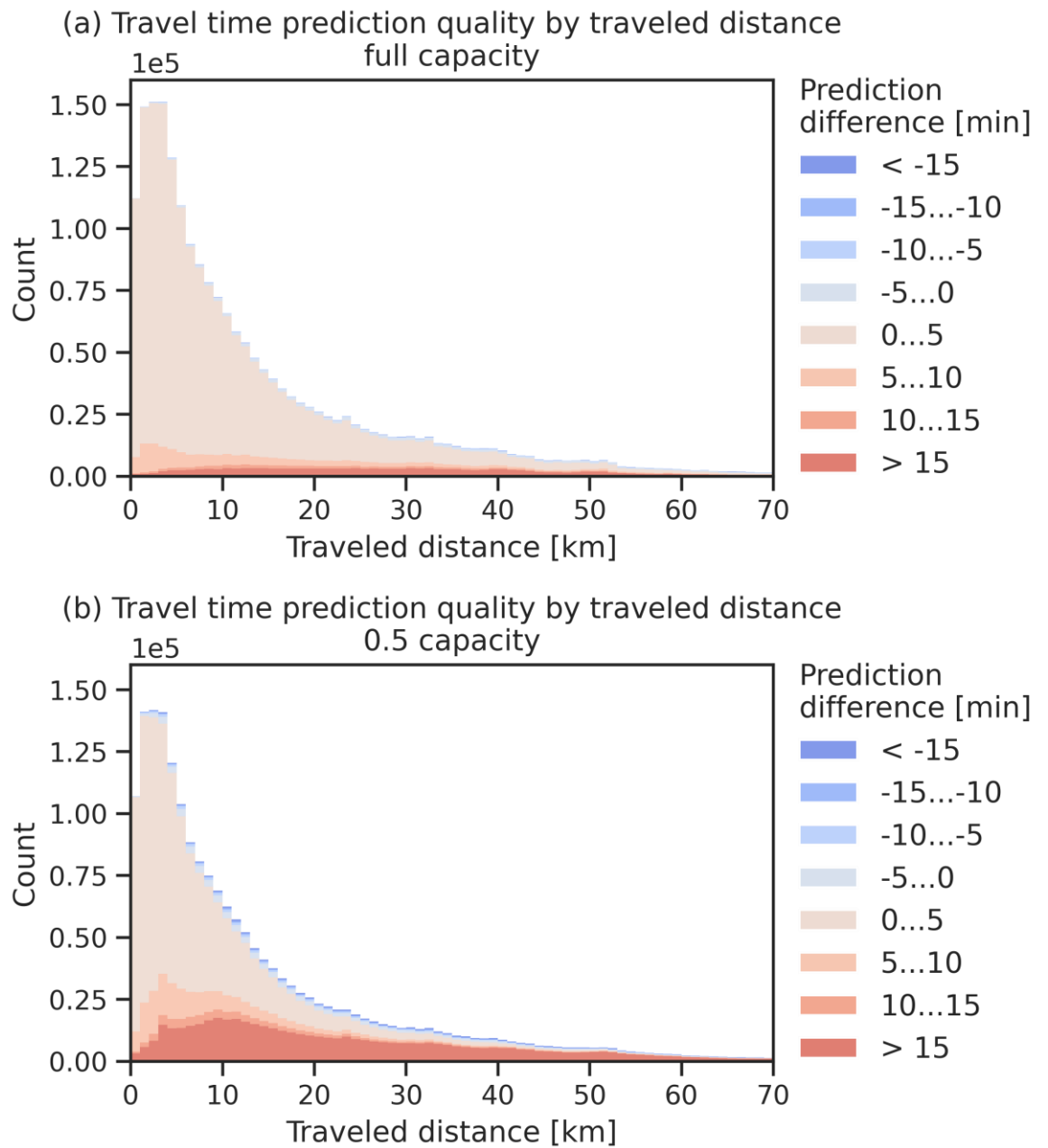


Рисунок 2.24 – Розподіл якості прогнозування часу подорожі за відстанню подорожі

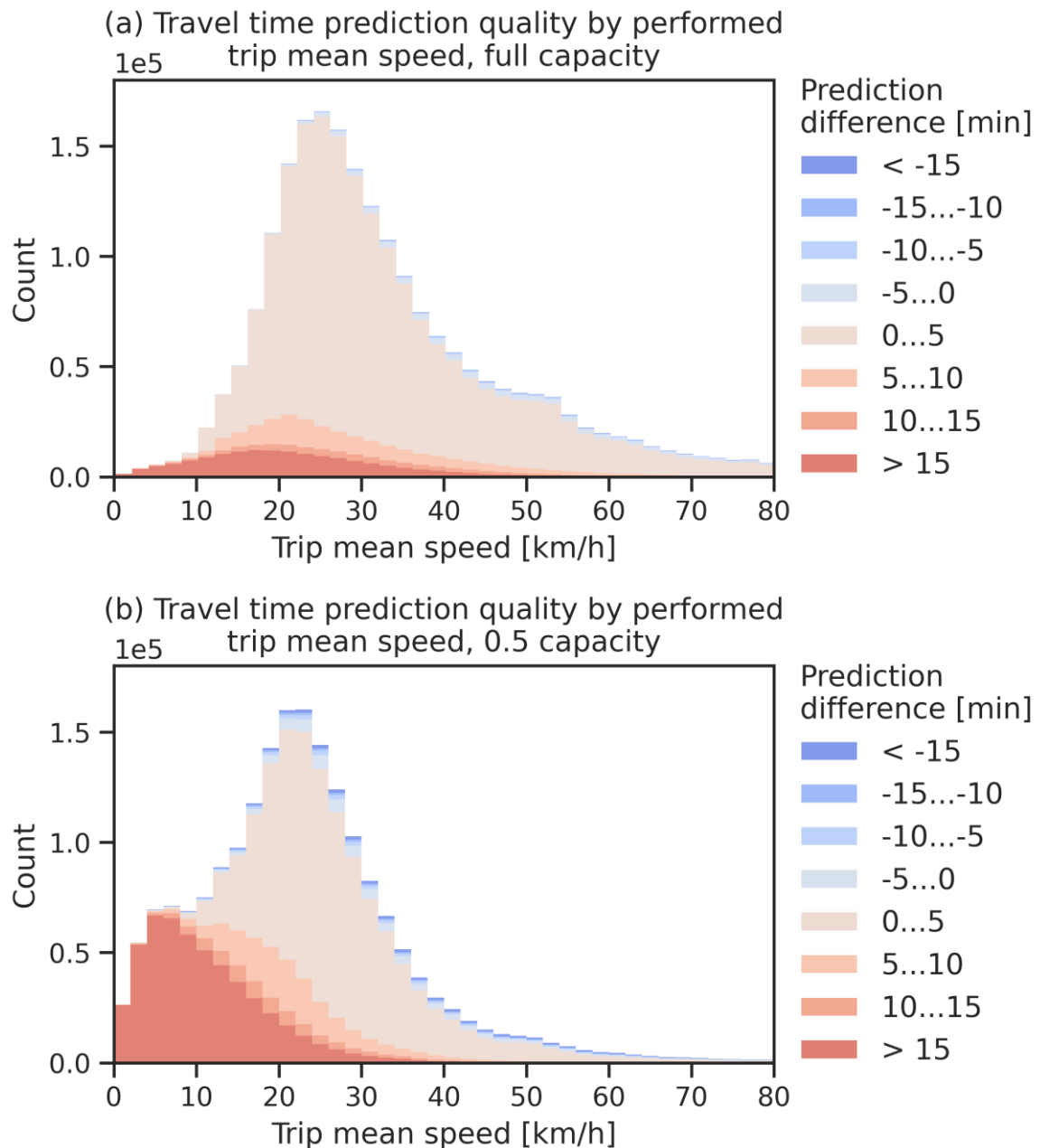


Рисунок 2.25 – Розподіл якості прогнозування часу подорожі за середньою швидкістю поїздки

Щоб відповісти на запитання, чи було більше велосипедного потенціалу серед поїздок, якщо корисність автомобіля була розрахована на основі виконаного часу подорожі, ми можемо обчислити дельта-корисність на основі різниці в часі та евклідової відстані поїздки та додати її до оціненої корисності та потім порівняйте корисність велосипеда та автомобіля. На рисунку 30 показано, що для більшості поїздок на автомобілі корисність велосипеда нижча, ніж корисність автомобіля для комунальних послуг із розрахунковим і

виконаним часом у дорозі. Якщо збільшити частину, де корисність велосипеда більша, ніж корисність автомобіля на рисунку 31, смужки, що враховують час подорожі, будуть трохи вищими, тому є більше поїздки, де велосипед матиме вищу корисність. У цифрах кількість поїздки з більшою корисністю на велосипеді, ніж на автомобілі, зросла з 64 563 до 73 629 на 14%. Але оскільки тут не розрізняється, як вони належать до інших подорожей у турі, який оцінюється спільно, не можна з упевненістю сказати, що всі вони перетворюються на велосипед. І навіть якби вони були, ці 9093 поїздки становлять менше 0,2% від загальної кількості внутрішніх поїздки, які були оцінені під час моделювання.

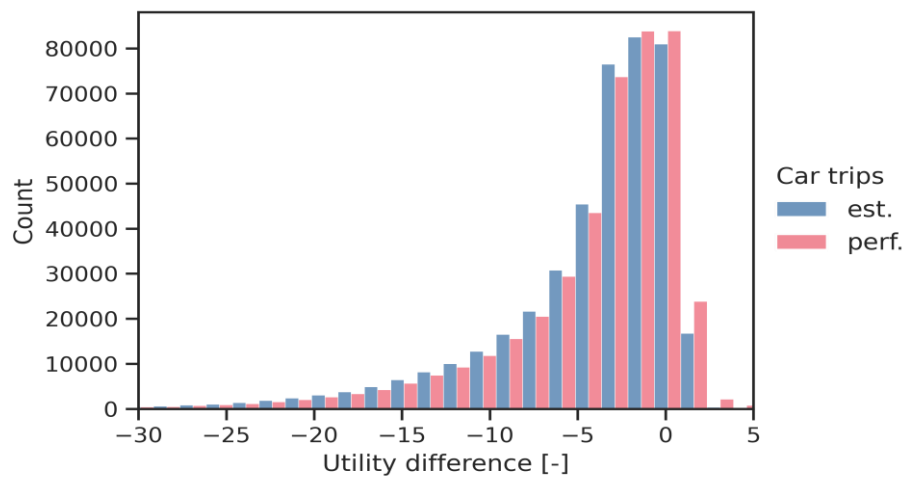


Рисунок 2.26 – Різниця в корисності велосипеда та автомобіля, ємність мережі 0,5

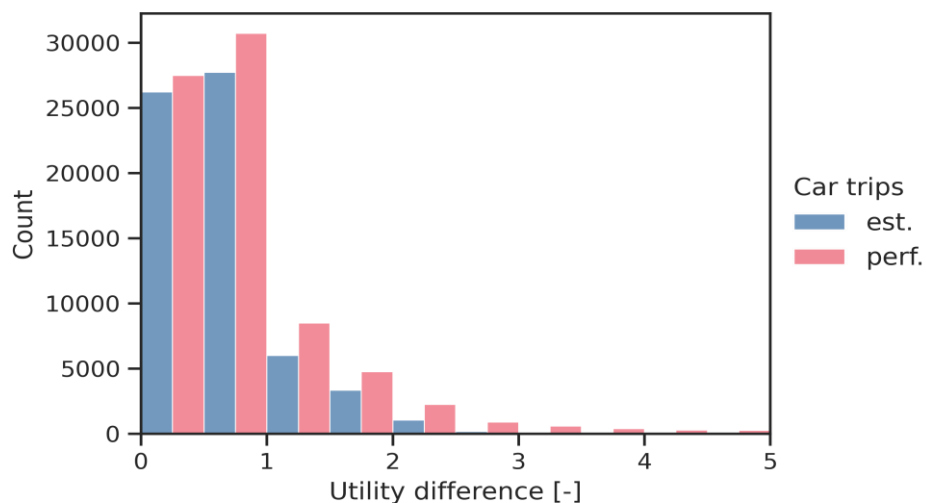


Рисунок 2.27 – Різниця в корисності велосипеда та автомобіля > 0 , 0,5 пропускної здатності мережі

Висновок

Перш за все, комунальні дані показують, для яких поїздки велосипед доступний і розглядається. Якби всі вони перейшли з автомобіля на велосипед, частка автомобілів зменшилася б до 26%. З еластичністю, як у розділі 4.3, і збільшенням часу подорожі на 156% (з 25 хв. до 64 хв., див. Таблиця 2.7), частку режиму для автомобіля слід зменшити на 31% до 24%. Таким чином, з поточною доступністю велосипедів можна було б наблизитися до очікуваної вартості. Однак, як видно під час порівняння даних про корисність автомобіля та велосипеда, малоймовірно, що всі автомобілі перейдуть на велосипед, оскільки корисність переважно не вища, навіть якщо виправити корисність часу в дорозі автомобіля. Це справедливо для поточного стану рівноваги, знайденого для мережі зі зниженою пропускну здатністю. Оскільки вже під час прогнозування поїздки установка моделювання недооцінює час подорожі, а вибір режиму здійснюється за неправильно поінформованих обставин, існує ймовірність того, що після адаптації установки може бути знайдений інший стан рівноваги.

2.5.3. Вплив обмежень перепланування

У налаштуванні симуляції є два важливі обмеження, що обмежують вибір режиму, одне щодо зовнішньої діяльності та одне щодо кількості поїздки у турі. Зовнішні заходи та поїздки походять із вирізання сценарію зі сценарію України. Щоб не недооцінювати попит у мережі, агенти, які переміщуються в периметрі, а також за його межами, включені до популяції. Оскільки зовнішні взаємодії не симулюються, а розташування точок перетину на межі периметра залежить від режиму, дозвіл вибору режиму для цих агентів може призвести до нереалістичних результатів. Наприклад, якщо багато транспортних засобів, які в'їжджають на межу через шосе, з цього моменту перемикаються режим на велосипед, на шосе будуть велосипеди та невідповідності решті початкової поїздки поза межами перед вирізанням. Оскільки тури оцінюються в цілому, обчислювальні ресурси, необхідні для оцінки кількох можливих режимів і

комбінацій режимів, зростають із збільшенням кількості поїздок у турі. Оскільки налаштування симуляції містять велику кількість агентів, що вже потребує багато пам'яті, було встановлено обмеження на перепланування лише турів із максимум 8 поїздками. Для автомобільних поїздок, запланованих у початковій популяції, 21% з них є частиною туру, який обмежений зовнішніми обмеженнями чи довжиною туру. Якщо відстані подорожі наближено до евклідової відстані, обмежено 36% початкової запланованої відстані подорожі.

Наразі стратегію встановлено таким чином, щоб обмежені тури зберігали свій маршрут у початковому стані, тому вибір режиму чи маршруту не допускається, коли вибір режиму вибрано як стратегію перепланування для симуляції. Для автомобільних поїздок це означає, що транспортні засоби обмежених агентів діють як додаткове зменшення пропускної здатності, оскільки вони будуть дотримуватися своїх маршрутів для кожної ітерації симуляції. Якщо реалізувати стратегію, щоб також зовнішні агенти могли вибирати маршрути, вони могли б адаптуватися вздовж маршруту, але перша й остання ланка завжди визначаються початковим і кінцевим об'єктом.

Метод

Оскільки неточні прогнози часу подорожі, здається, є проблемою або найбільш прямим показником проблеми, вони аналізуються більш загально, а не лише для нещодавно перепланованих поїздок. Розрахунковий час у дорозі також можна знайти як час у дорозі у вихідних планах, які також включають зовнішні поїздки. Ці розрахункові часи в дорозі порівнюються з часом у дорозі виконаних поїздок, зафіксованим у вихідних поїздках. Частина часу в дорозі, обчисленого на основі вихідних поїздок, є часом очікування між людиною, яка входить у транспортний засіб, і тим, що транспортний засіб може включитися в рух. Цей час очікування було обчислено на основі симуляційних подій для кожної поїздки. Було проведено нове моделювання з поєднанням вибору маршруту та режиму, щоб оцінити вплив можливості вибору режиму для турів усередині периметра та вибору маршруту для турів із зовнішніми

обмеженнями. Для прискорення процесу була використана вибірка населення розміром 25%.

Результати

Оскільки зараз використовується 25% вибірка сукупності, важливо перевірити, чи масштабований сценарій поводить себе як сценарій із повною сукупністю. Рисунок 2.28 показує, що вже з масштабуванням якості передбачення загалом краща. Це слід враховувати для порівняння результатів зі стратегіями поєднання маршруту та вибору режиму.

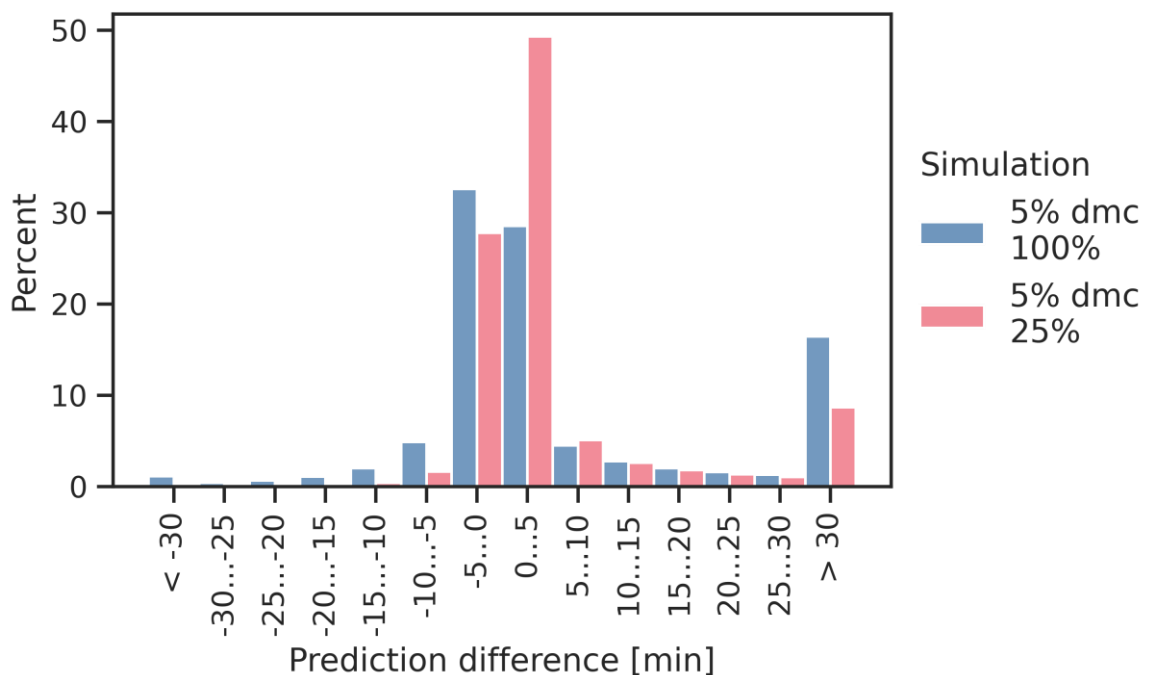


Рисунок 2.28 – Гістограма різниці прогнозованого часу в дорозі для поїздок автомобіля для сценарію 100% і 25% зі стратегією вибору дискретного режиму (dmc) 5%

Поєднання стратегій зміни маршруту та вибору режиму справді незначно впливає на якість прогнозування, але, як показано на рисунках 2.28 і 2.29, частка поїздок, у яких час у дорозі був недооцінений більше ніж на 30 хвилин, навіть зростає, а також хвіст у відносній різниці прогнозів залишається. Отже, середнє кінцевих значень відносної різниці прогнозів становить 0,42 для моделювання з 5% зміною маршруту та 5% вибором режиму, 0,43 з 2,5% зміною маршруту та 5% вибором режиму та 0,58 з 2,5%

зміною маршруту та 2,5% вибором режиму . Дивлячись на результати спільного використання режиму, значних відмінностей порівняно зі сценарієм без додаткової стратегії перенаправлення немає.

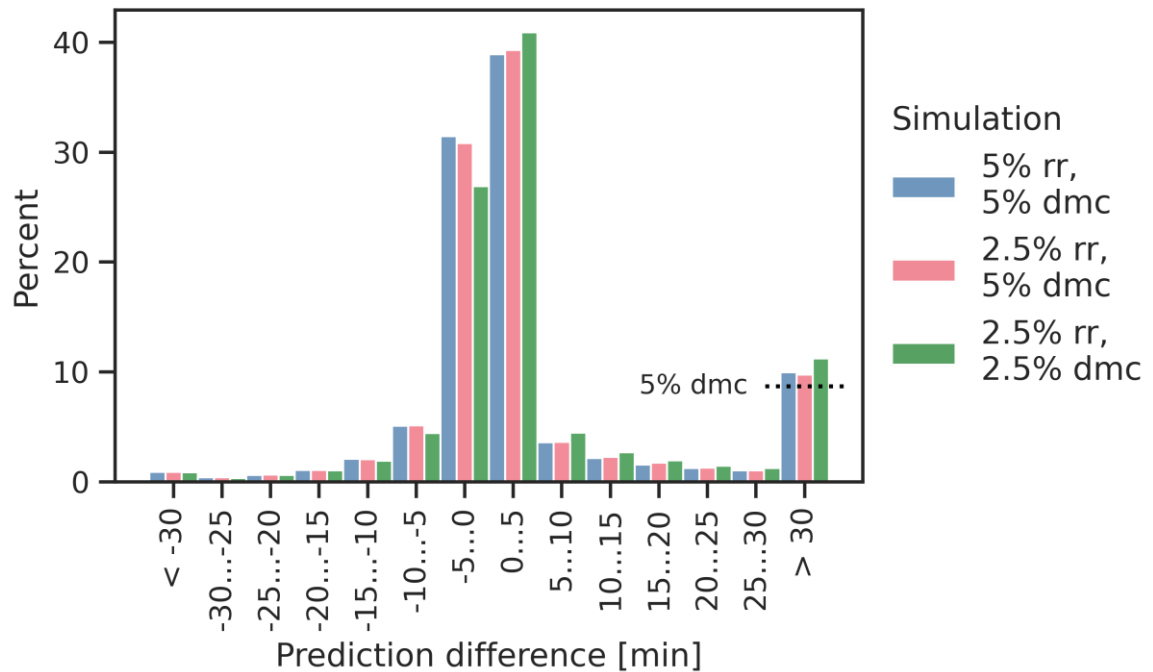


Рисунок 2.29 – Гістограма різниці прогнозованого часу в дорозі (хв) для поїздки на автомобілі для комбінованих стратегій зміни маршруту та вибору режиму

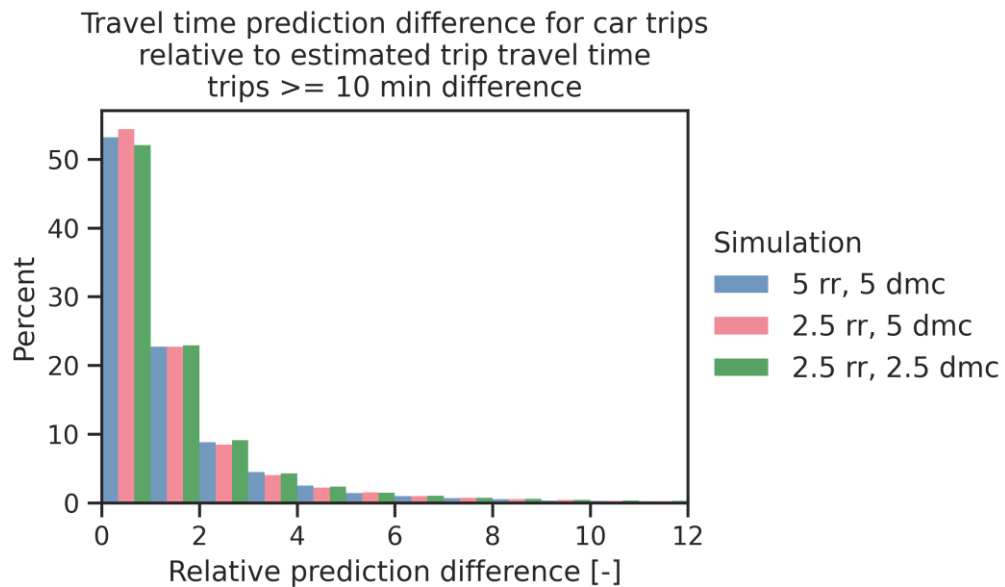
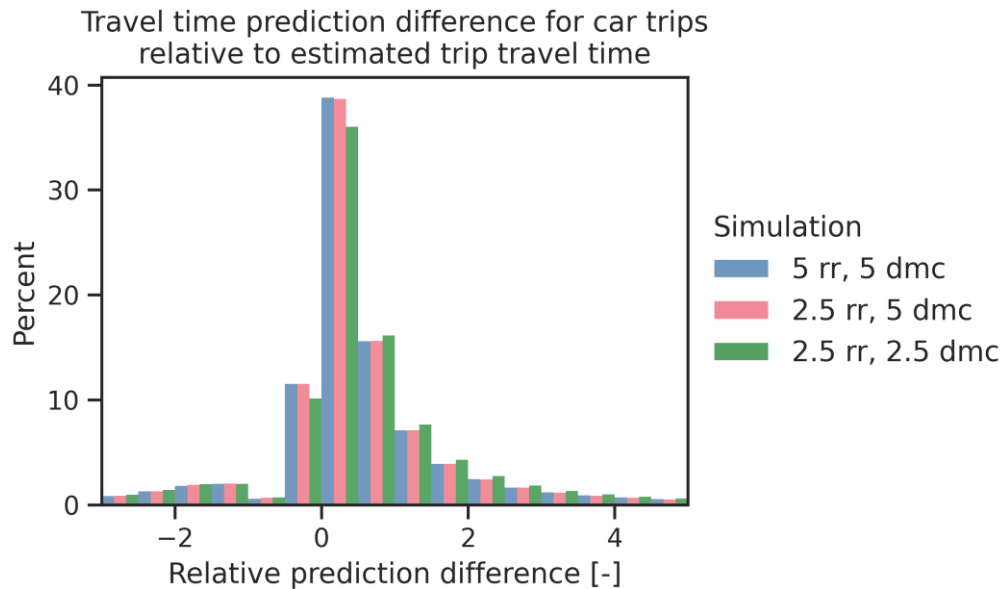


Рисунок 2.30 – Різниця прогнозованого часу подорожі відносно гістограми очікуваного часу подорожі для поїздок на автомобілі для комбінованих стратегій зміни маршруту та вибору режиму

Можна помітити, що час очікування між особою, яка входить у транспортний засіб, і транспортним засобом, який починає рух, особливо великий для транспортних засобів, які виїжджають із зовнішніх об'єктів. Це можна пояснити тим, як генеруються зовнішні поїздки та засоби. Зовнішні засоби розміщуються там, де людина у більшому сценарії симуляції входить у периметр вирізаного сценарію, а час відправлення визначається часом

перетину. Якщо головна дорога або шосе перерізана периметром, через який буде проходити великий потік транспортних засобів, багато транспортних засобів виїжджають звідти з коротким пробігом. Якщо тепер пропускну здатність лінії зв'язку зменшити, транспортні засоби, що від'їжджають, уже створюють затори на своїй першій лінії зв'язку, що призводить до збільшення часу очікування. Якщо ми віднімемо цей час очікування з різниці прогнозів, частка недооцінки понад 30 хвилин трохи зменшиться, як показано на рисунку 2.31.

Гістограма прогнозованої різниці часу в дорозі (хв) для автомобільних поїздок; 5% вибір маршруту + 5% стратегія вибору режиму; із часом очікування для переходу на посилення та без нього

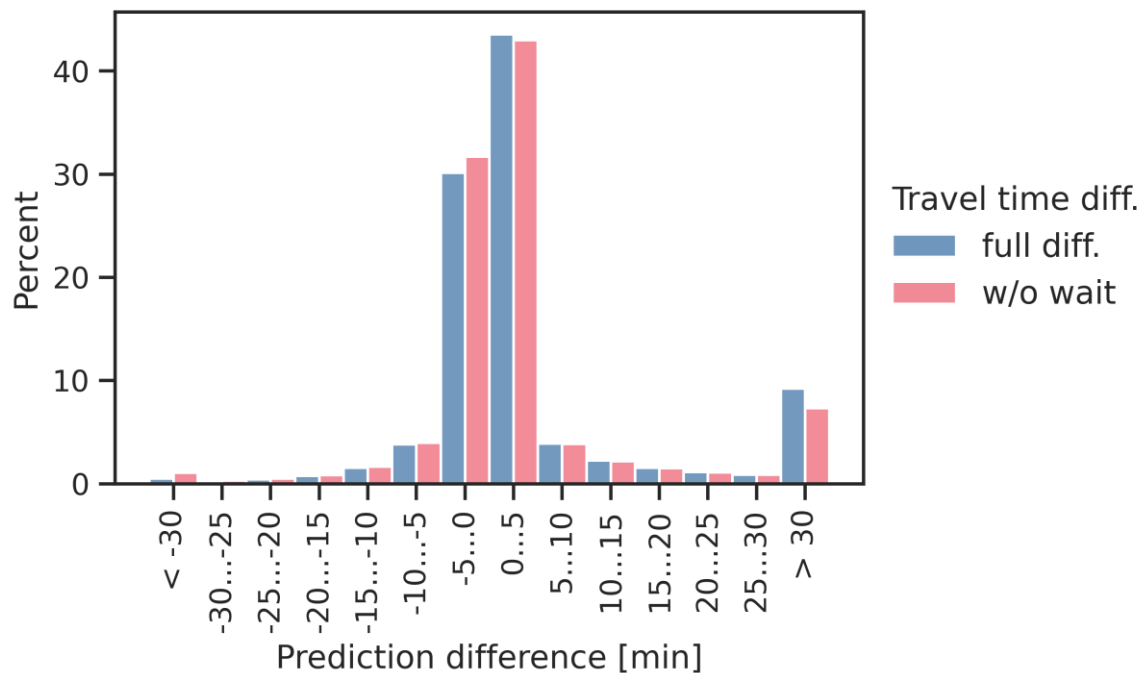


Рисунок 2.31 – Різниця прогнозованого часу подорожі відносно гістограми очікуваного часу подорожі для поїздок на автомобілі для комбінованих стратегій зміни маршруту та вибору режиму

Висновки

Додавання зміни маршруту як другої стратегії, щоб дозволити вибір маршруту для зовнішніх поїздок, не може самотійно вирішити проблему з прогнозуванням часу подорожі, а також час очікування на початкових

об'єктах залишається. Один із аспектів полягає в тому, що відправлення може відбутися пізніше того ж дня, якщо попередня поїздка затримується настільки, що запланований час на об'єкті не може це компенсувати. Таким чином поїздки можуть бути переведені на більш завантажені режими та триватимуть довше, ніж очікувалося. Але ймовірно, що на недооцінку часу в дорозі впливають інші фактори, які розглядаються в наступному розділі. Все ще рекомендується комбінувати вибір маршруту та режиму для даного випадку зміни пропускної спроможності після того, як інші проблеми будуть вирішені, тому що це може зменшити попит з боку наскрізного руху на основних коридорах. Крім того, з відомою еластичністю попиту щодо часу подорожі та тривалості поїздки для України, частка автомобільних поїздок під час зовнішніх турів може бути вручну конвертована в поїздки громадським транспортом, щоб зменшити попит, що відправляється із зовнішніх об'єктів і мережі в цілому.

2.5.4. Час подорожі посилення

У цьому розділі на рівні зв'язку аналізуються відмінності в розрахунковому та виконаному часі подорожі. Приблизний час у дорозі за посиленням використовується для прогнозування маршруту з найменшою вартістю, який стане кандидатом на подорож для вибору маршруту чи способу. Деякі з них погано відображають досвідчений час у дорозі у випадку моделювання зі зниженою пропускною здатністю, що відображається в недооцінці часу в дорозі, описаному вище.

Оцінка часу в дорозі на основі спостережуваного часу в дорозі

Зазвичай у MATSim події різних типів використовуються для запису того, що відбувається під час симуляції. Для обчислення часу проходження за посиленням потрібні події `LinkEnterEvent` і `LinkLeaveEvents`. Якщо це перше посилення маршруту, немає `LinkEnterEvent`, а `PersonDepartureEvent` і `VehiclesEntersTrafficEvent`. Подія `PersonDepartureEvent` також використовується для визначення початку поїздки у файлі `output_trips`. Подія

VehicleEntersTrafficEvent вказує, що транспортний засіб почав рух за посиланням. Якщо вони не реєструються одночасно, це означає, що транспортних засобів, які чекали на в'їзд, було більше, ніж доступна кількість за посиланням. Для останнього посилання маршруту запускається VehicleLeavesTrafficEvent замість LinkLeaveEvent, щоб позначити кінець поїздки.

SmoothingTravelTimeModule обробляє події та зберігає дані спостережень за вагонами про зайнятість зв'язку та час у дорозі для кожного інтервалу часу та каналу (тут інтервали мають довжину 15 хвилин). Час подорожі усереднюється в кожному біні, а для бінів без спостережень передбачається час вільної швидкості подорожі. Якщо транспортні засоби витрачають час на зв'язок між кількома інтервалами часу, їх час у дорозі використовується в усіх із них, щоб внести свій внесок у середнє значення. Параметр під назвою travelTimeEstimationAlpha може бути використаний для пом'якшення коливань зайнятості зв'язку протягом ітерацій, також враховуючи розрахунковий час проходження з попередньої ітерації. Це вимкнено для наступного аналізу, щоб краще зрозуміти цю справу.

Таблиця 2.9 – Типова пропускна здатність зв'язку та час відновлення

Ємність	Ємність на крок (1 с)	Час відновлення
авто/год	вех	s
2000 рік	0,556	1.8
1500	0,417	2.4
1000	0,278	3.6
750	0,208	4.8
600	0,167	6.0
300	0,083	12.0
150	0,042	24,0

Співвідношення місткості та часу в дорозі

Для симуляції мобільності (mobsim) у цьому налаштуванні використовується модуль qsim із динамікою трафіку, налаштованою на чергу. Це гарантує, що обмеження пропускної здатності посилання не буде перевищено агентами, що проходять через нього, використовуючи чергу та буфер у кінці черги. Транспортний засіб, який входить у ланку, потрапляє в чергу транспортних засобів цієї ланки. Ця черга обмежена лише обсягом пам'яті посилання. Коли транспортний засіб займає перше місце в черзі і провів у черзі достатньо часу, щоб теоретично проїхати всю довжину зв'язку, він переміщується в буфер зв'язку. Цей буфер обмежений пропускною здатністю каналу. Наприклад, для лінії з пропускною спроможністю 750 авт/год це еквівалентно 0,21 авт/с або один транспортний засіб кожні 4,8 секунди. Якщо транспортний засіб потрапляє в буфер, він споживає ємність одного транспортного засобу для цього кроку часу, і ємність відновлюється протягом наступних кроків часу до початкового значення, для прикладу посилання це займає 4,8 с або майже 5 кроків часу по 1 с. Час відновлення за ємністю підсумовано в таблиці 14. Нарешті, з буфера транспортний засіб може бути переміщений до наступної ланки, якщо в черзі є вільна ємність для зберігання. Чим меншою є ємність і довшим стає час відновлення, тим більша ймовірність того, що транспортний засіб увійде до того, як ємність відновиться, і йому доведеться чекати, навіть якщо попередник уже покинув буфер.

Існує один виняток із транспортних засобів, які переміщуються лише тоді, коли наступна ланка має вільну ємність для зберігання як механізм запобігання тупику. Транспортний засіб вважається застряглим, якщо він не рухався з першого положення буфера протягом 10 секунд. Щоб уникнути затору, транспортні засоби, що застрягли, переміщуються до наступної ланки незалежно від вільної ємності сховища на цій ланці.

Час у дорозі та вибір маршруту

Якщо агентів вибрано для перепланування, для них розраховується шлях з найменшими витратами (якщо поєднується з вибором режиму для кожного режиму). Тут час у дорозі використовується як параметр вартості, тому вони отримують маршрут із найкоротшим часом у дорозі. Розрахунковий час подорожі не порівнюється з тривалістю подорожі агента за раніше вибраним маршрутом, тобто вони змінять маршрут, навіть якщо новий буде лише трохи коротшим. Червенков та ін. (2020) показують, що вже в симуляції невеликих пісочниць це призводить до помітних коливань навколо стану рівноваги, тому що якщо забагато агентів обирають цей швидший маршрут, він стає перевантаженим, і в порівнянні зі старим маршрутом знову стає привабливішим. Цьому можна протистояти меншими темпами перепланування, що призводить до більшої кількості ітерацій і більшого часу моделювання, необхідного для знаходження стану рівноваги. Крім того, Червенков та ін. (2020) пропонують ввести ймовірність перемикання маршруту залежно від економії часу в дорозі на шляху з найменшою вартістю порівняно з часом у дорозі. Це не реалізовано для налаштування, яке використовується для представленого аналізу.

Приклади змодельованих подорожей

Щоб глибше дослідити оцінку часу в дорозі, вибираються агенти, які мають лише поїздки всередині периметра, тому на них безпосередньо не впливає проблема надто великої кількості транспортних засобів, які намагаються увійти в лінію зв'язку на зовнішніх об'єктах. Крім того, ці агенти перепланували в поточній ітерації, тому ми знаємо, що їхні оцінки нещодавні та базуються на подіях моделювання попередньої ітерації. Для цього аналізу використовується вибірка з 25% генеральної сукупності, і потужності масштабуються з 0,125, щоб представити мережу ємності 0,5. Це масштабування може призвести до деяких відмінностей, якщо його повторити зі 100% населенням.

Перша вибрана подорож є відносно довгою, яка майже перетинає весь периметр і виконується агентом 711237. За оцінками, вона займає 3974 секунди, але затримується на 3544 секунди, що призводить до загального часу подорожі 7518 секунд. Час відправлення приблизно о 15:50, тобто він, можливо, досягає піку дня.

Маршрут показаний на рисунку 36.b) і містить 280 зв'язків. Різниця в часі подорожі між розрахунковим часом і часом подорожі для кожного зв'язку становить 2861 секунду, що становить 80% різниці в часі подорожі на рівні поїздки. Відсутні 20% — це час у дорозі, зафіксований на посиленнях, які в попередній ітерації та часовому інтервалі не використовували транспортний засіб і не зберігали час у дорозі. У моделюванні час вільної швидкості подорожі потім використовується як прогнозований час подорожі, але в цьому аналізі за межами моделювання ці зв'язки не враховуються.

На початку рейсу транспортний засіб заходить на першу ланку лише через 10 секунд після виходу агента, тому час очікування на першій ланці великої ролі не грає. Середня різниця в часі подорожі на посиленнях становить 10,2 секунди, і лише на 8 посиленнях час подорожі агента був більш ніж на 10 секунд довший, ніж оцінено.

Деякі посилення аналізуються більш детально. По-перше, зв'язок із найсильнішою недооцінкою часу подорожі – це зв'язок 16522 із різницею прогнозів у 2989 с. Це ділянка шосе безпосередньо за напрямком від автомагістралі з розрахованою пропускною спроможністю 2000 автомобілів/год і вільною швидкістю 80 км/год. Його довжина становить 70,1 метра, а максимальний час вільного руху становить 6,2 секунди (з урахуванням штрафу за перетин). Транспортний засіб потрапляє в чергу цього зв'язку близько 16:08 (58119 с), і на той час воно вже перевантажене. На рисунках 2.34.a) і b) показано час у дорозі кожного транспортного засобу, який увійшов у лінію за 20 хвилин до входу вибраного агента та через 20 хвилин після виходу агента. Крім того, включено оцінку часу в дорозі для інтервалів часу за цей період. На рисунку 38.c) показано зайнятість каналу протягом цього періоду, тобто довжина черги перед буфером, якщо канал

перевантажений. У попередній ітерації час подорожі по цьому зв'язку протягом періоду, який цікавить агента, близький до вільного часу подорожі, але в аналізованій ітерації зайнятість набагато вища, що також призводить до більшого часу подорожі. Крім того, навіть розрахунковий час подорожі, розрахований на основі спостережень під час цієї ітерації, лежить під точками даних спостережуваного часу подорожі за часом входу. Це можна пояснити на рисунку 2.34. На ньому показано, що через те, як розрахований час у дорозі обчислюється на основі середнього значення всіх транспортних засобів, які перебувають на ланці в певному проміжку часу, він має певну інерцію, щоб реагувати на зміни після того, як подорож пройде часи стають довшими за біни, які тут становлять 9 00 с.

Друга найсильніша недооцінка часу в дорозі – це посилення 16191, з оцінкою 15 с і експериментальним часом у дорозі 81 с. З'єднання знаходиться на шосе безпосередньо перед проаналізованим вище з'єднанням. Він також має масштабовану потужність 500 автомобілів/год і вільну швидкість 80 км/год. Його довжина становить 186 м, а час руху на вільній швидкості становитиме 11,4 с. На рисунку 2.35.с) ми бачимо, що зайнятість збільшується лише з максимум трьох до максимум семи, що потім призводить до збільшення часу подорожі до понад 100 с, що майже в 10 разів перевищує час подорожі на вільній швидкості. Оскільки ми знаємо, що нижнє з'єднання дуже перевантажене, з'єднання 16191, швидше за все, працюватиме лише в режимі уникнення блокування сітки та переміщуватиме транспортні засоби до наступного після очікування протягом 10 с у першій позиції черги. Це пояснює, чому спостережуваний час подорожі завжди принаймні на 10 с вищий, ніж у попередній ітерації. Залежно від відстані в часі, на яку в'їжджають транспортні засоби, вони чекають у черзі до 10 секунд більше, ніж їхні попередники. Це є причиною того, що спостережуваний час подорожі на рисунку 39.b) стає досить розкиданим, і для транспортних засобів, які в'їжджають на відстань до 10 с, час подорожі (включаючи очікування в кінці зв'язку) другого транспортного засобу на 10 с довший, ніж для перших транспортних засобів.

Нарешті посилання 92704 вибрано як посилання з меншою пропускною здатністю на маршруті. Це сполучення автомагістралі на перехресті автомагістралі, а пропускна спроможність розрахована на 187,5 автомобіля/год на вільній швидкості 80 км/год. Його довжина становить 95 м, а час вільної швидкості буде 4,3 с. За оцінками, транспортний засіб проїхав по цій лінії 9,5 секунд, але на 12,5 секунд довше. Під час входу транспортного засобу зв'язок і вихідні канали не перевантажені, однак ми можемо спостерігати розкиданий час подорожі на рисунку 2.34.a) і b) із часом подорожі до 60 с. Час відновлення буфера для цієї масштабованої ємності становить 19,2 секунди. Для кожного транспортного засобу, який входить у зв'язок менш ніж за 19,2 секунди після своїх попередників, час подорожі збільшується на час відновлення, що залишився попередників, що стосується вибраного агента.

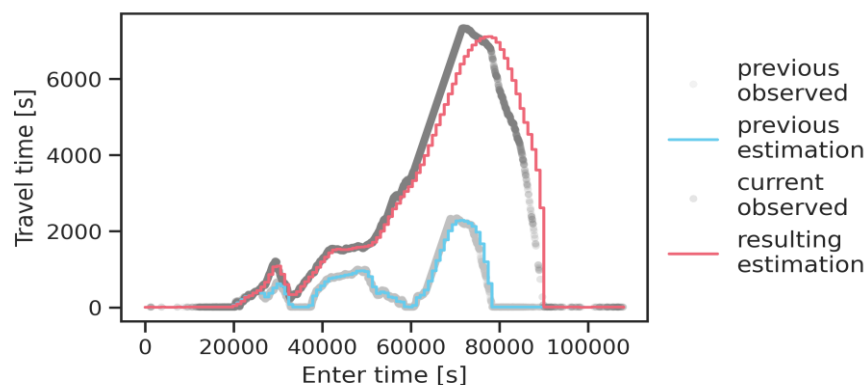


Рисунок 2.33 – Час подорожі за часом входу на посиланні 16522 для поточної та попередньої ітерації

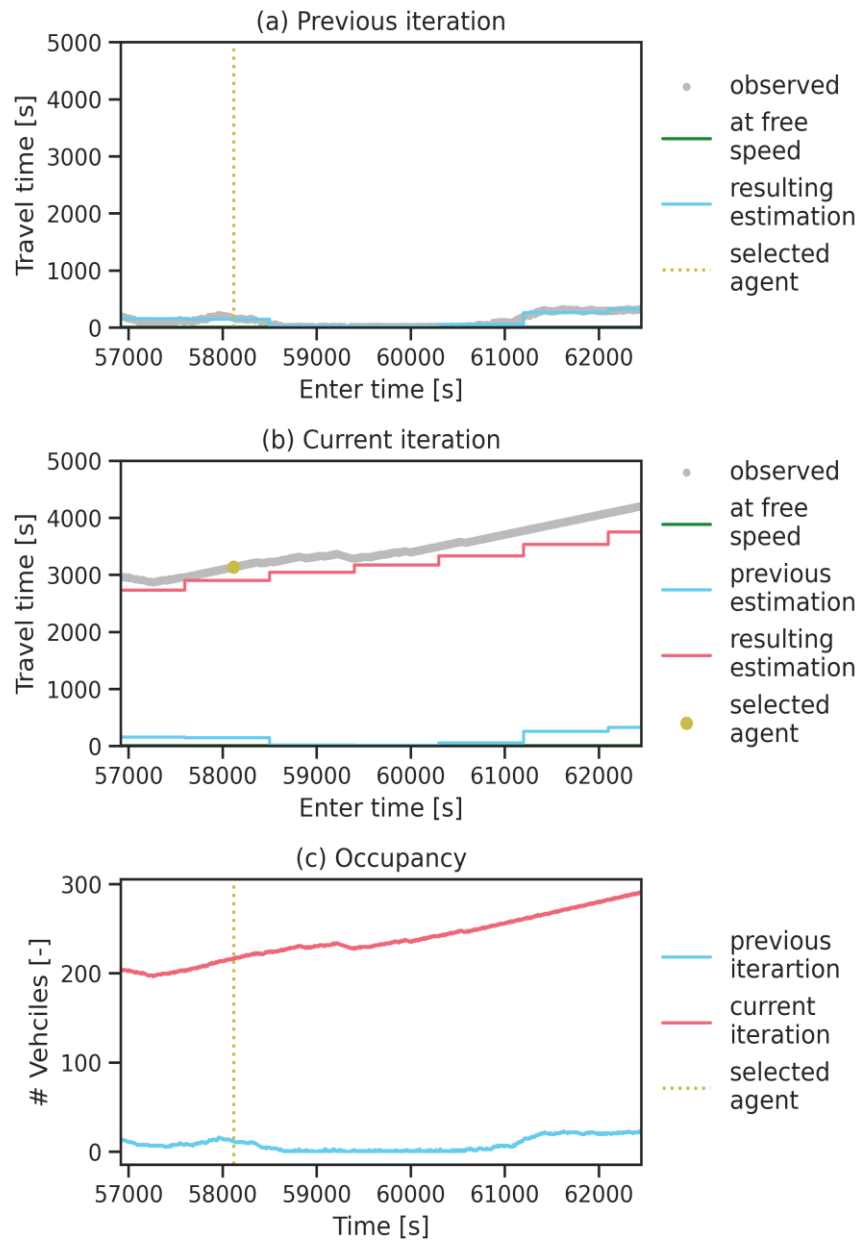


Рисунок 2.34 – Аналіз оцінки часу в дорозі для агента 711237 за посиланням 16522

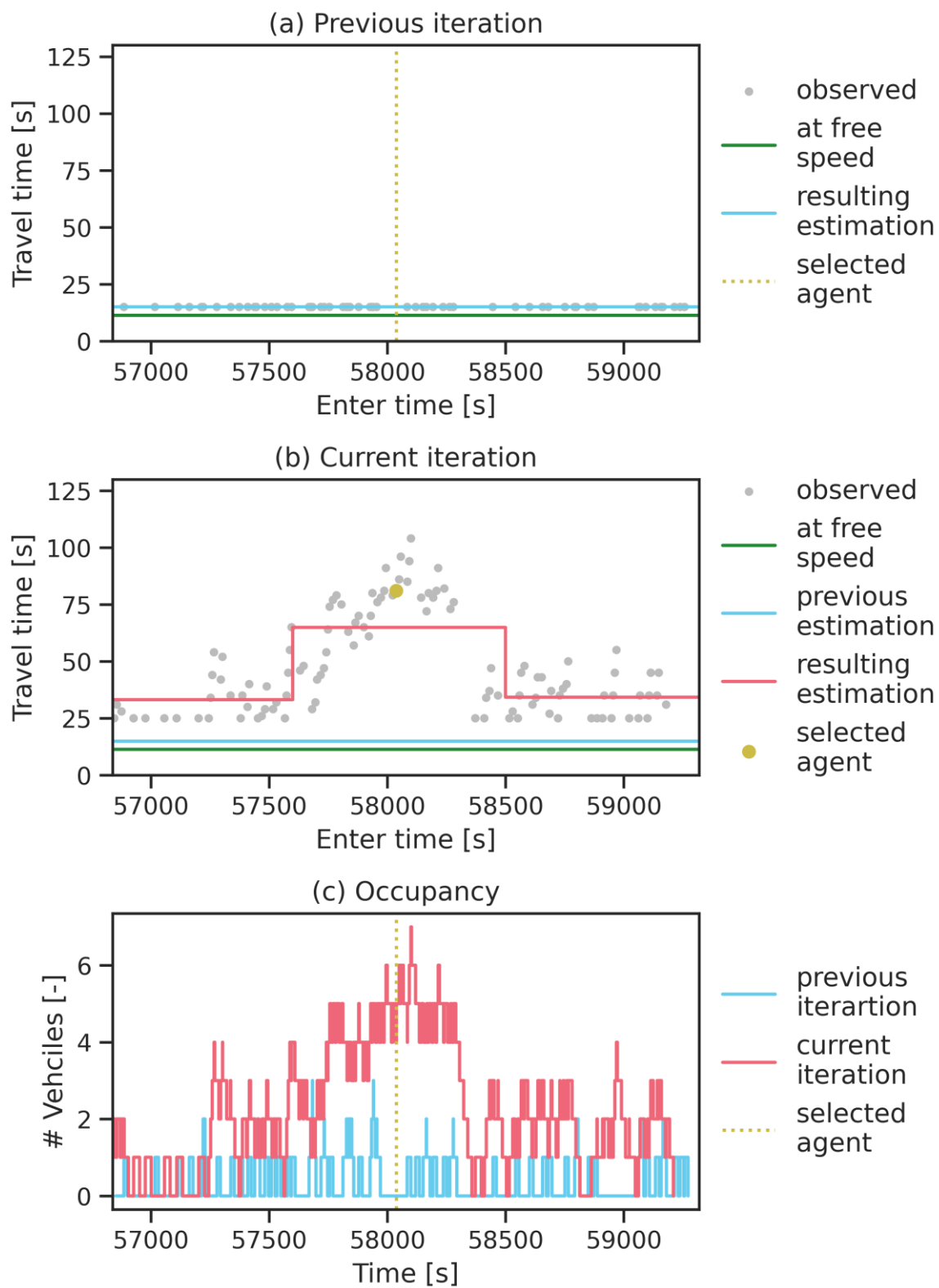


Рисунок 2.35 – Аналіз оцінки часу в дорозі для агента 711237 за посиланням 16191

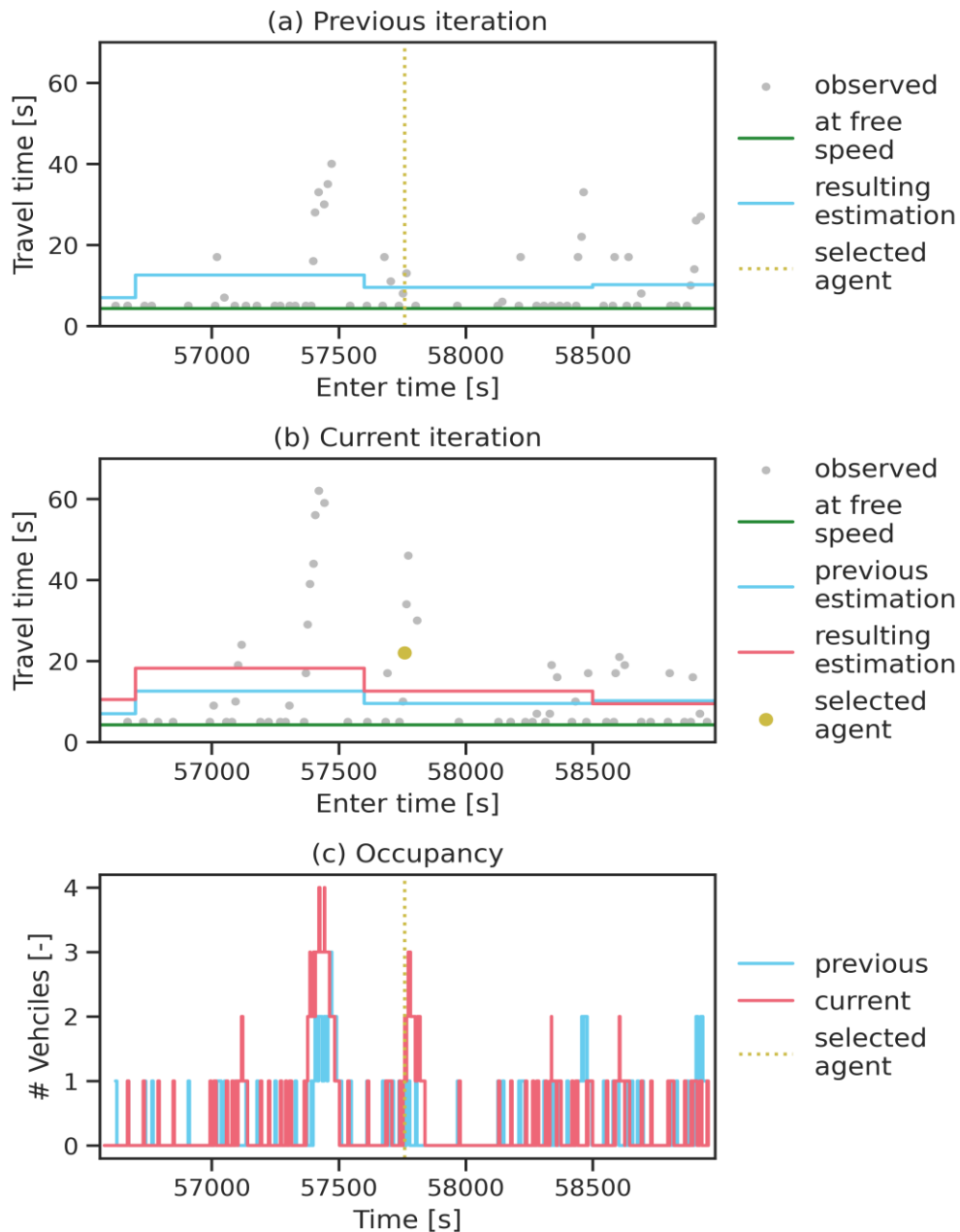


Рисунок 2.36 – Аналіз оцінки часу в дорозі для агента 711237 за посиланням 92704

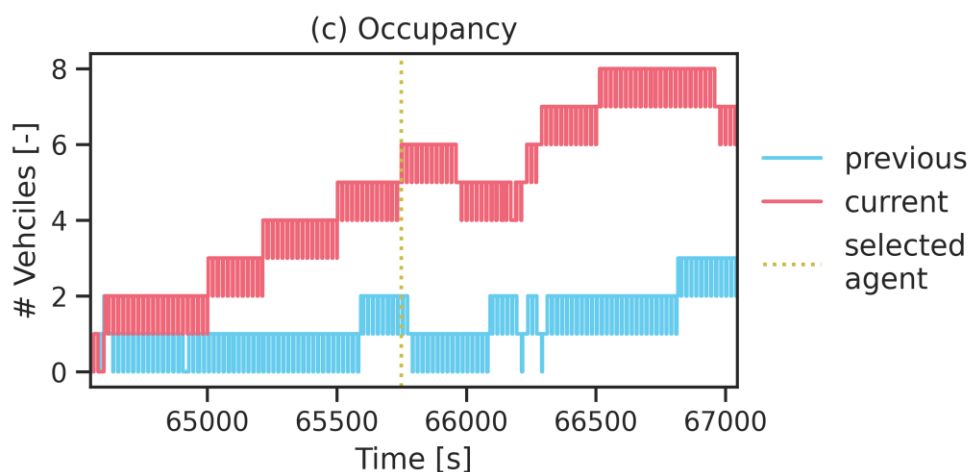
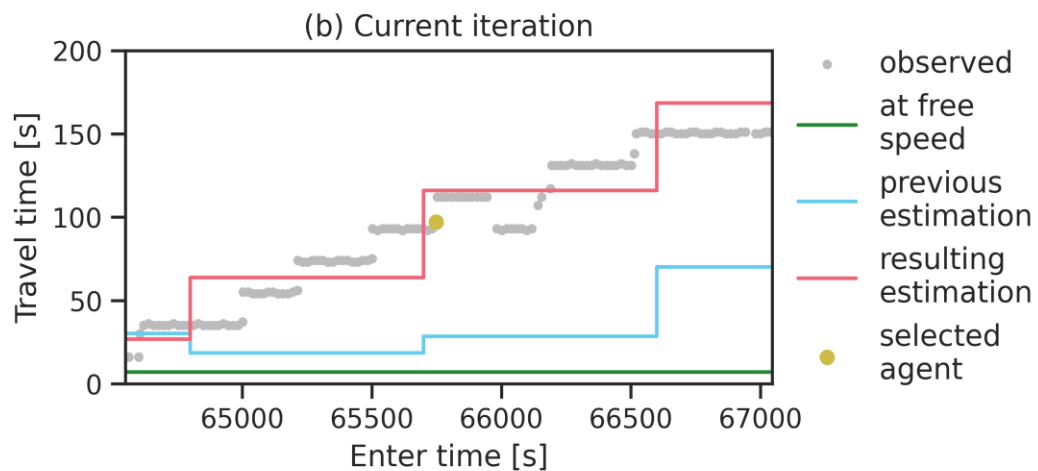
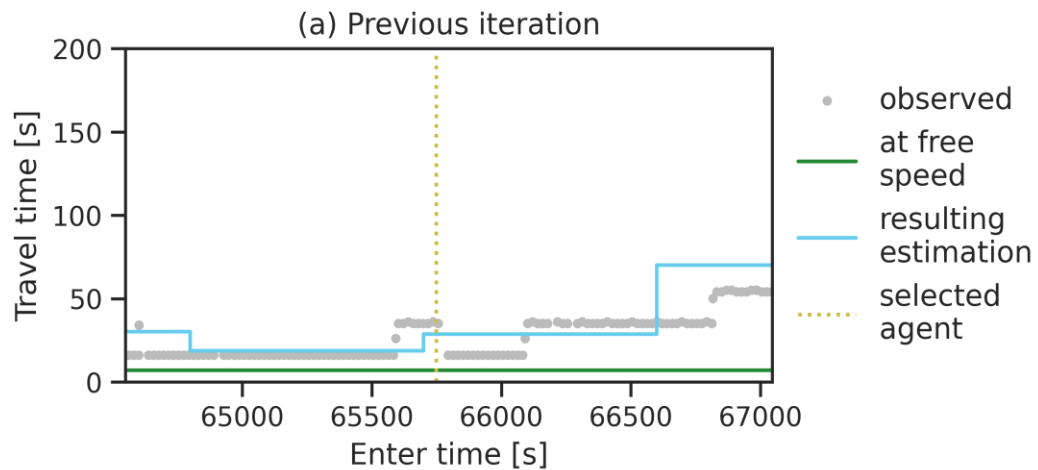
Серед агентів, які мають лише внутрішні поїздки, розглядається більше посилань із високою затримкою. Було знайдено додатковий тип моделі часу подорожі, який представлено на рисунку 2.36. На ньому показано результати для сполучення на Беллерієвштрассе, головній дорозі вздовж Київського озера. Це довгий відрізок зв'язків з однаковою пропускнуою здатністю та деякими перехрестями, де транспортні засоби в'їжджають або виїжджають, щоб перетнути вулиці. Оскільки ця ланка знаходиться в послідовності ланок з

однаковою пропускнуою спроможністю, час входу транспортних засобів вже спокійно рівномірно розподілений, а час подорожі коливається навколо того самого значення. Тільки коли транспортний засіб додатково повертає з перехрестя, час у дорозі збільшується в один раз від часу відновлення (тут потужність 187,5, час відновлення 19,2 с).

Висновок

Для всіх трьох механізмів, які впливають на час у дорозі та оцінку часу в дорозі (`SmoothingTravelTime`, час відновлення буфера та коливання зайнятості), можна знайти приклади в даних про час у дорозі за посиланням, коли час у дорозі було занижено. Вони показують, що загалом сам `qsim` також працює з дуже масштабованими можливостями, але оцінка часу подорожі та те, як розроблено вибір маршруту, не є оптимальними для роботи з поведінкою `qsim` у дуже перевантажених умовах. Наприклад, у класі `SmoothingTravelTime` функцію усереднення можна адаптувати, щоб мати меншу інерцію, коли час проходження зв'язку стає довшим, ніж інтервали часу. Для з'єднань із дуже низькою пропускнуою спроможністю та дуже довгим часом відновлення пропускнуї здатності, залежно від зайнятості в часовому діапазоні, може стати цілком імовірним, що транспортні засоби в'їжджатимуть із меншою швидкістю, ніж час відновлення пропускнуї здатності, і їм доведеться чекати. Для транспортного засобу, який проходить декілька з цих зв'язків, додатковий час у дорозі можна додати в кінці поїздки, щоб відобразити цей час очікування в першій частині черги. Для коливань Червенков та ін. (2020) вже підказують ну що робити. Оскільки нижчі показники перепланування збільшують кількість ітерацій для досягнення рівноваги, алгоритм ймовірності перемикання буде кращим. Якщо досягнуто стабільнішої рівноваги, а зайнятість на каналі зв'язку більш схожа на попередню ітерацію, якість оцінки часу в дорозі також має покращитися, також при поєднанні зміни маршруту та вибору режиму, що призводить до вищих показників перепланування.

Поєднання різних ефектів і специфічних мережових умов навколо посилення призводить до багатьох різних моделей часу подорожі за часом введення. Через це важко оцінити вплив кожного механізму окремо та визначити, якому з них слід віддати перевагу при адаптації до перевантажених мереж. Зі прикладу поїздки та першої ланки коливання мають найбільший вплив, оскільки зайнятість значно підвищується на цій ланці порівняно з попередньою ітерацією.



3. ПРОЄКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Оцінювання мереж з перерозподіленням дорожнім простором. Методи оцінювання мереж із перерозподіленням дорожнім простором

3.1.1. Впровадження велосипедів та електровелосипедів у MATSim

Щоб чітко моделювати велосипеди «на дорозі» в симуляції замість того, щоб телепортувати їх, щоб вони взаємодіяли з автомобілями, необхідно виконати кілька кроків. Під час генерації вхідної мережі з OSM-файлу режим велосипеда має бути включений як дозволений режим у параметрах за замовчуванням типів доріг для тих, якими велосипедистам дозволено користуватися законом (тут усі дороги, крім автомагістралей і магістральних доріг). Крім того, шлях `osm:highway` було додано як тип посилання, який потрібно перетворити з файлу OSM у мережу MATSim. Доріжка описує велосипедну та пішохідну інфраструктуру, і тут заборонено рух автомобілів. Також значення відстані для спрощеного вибору велосипедного маршруту передається як новий атрибут для кожного посилання з файлу OSM. Об'єкти мають бути нанесені на карту цієї мережі, переконавшись, що вони пов'язані лише з посиланнями, до яких можна дістатися як на велосипедах, так і на автомобілях.

У конфігураційному файлі велосипед додано як основний і мережевий режим і вилучено з режимів телепортації. Крім того, динаміку зв'язку потрібно налаштувати так, щоб дозволити просочування, щоб велосипеди могли «просочуватися» через черги автомобілів, а автомобілі могли обганяти велосипеди. Щоб розрізнити велосипеди та каср у файлі подій, ми встановили, що ідентифікатор автомобіля складається з ідентифікатора особи та режиму.

У самому коді тип транспортного засобу велосипед визначається з максимальною швидкістю 15 км/год, а розміри, що відображають споживання простору, становлять одну чверть автомобіля як відправну точку. Для легкових, легкових і вантажних транспортних засобів швидкість і розміри встановлюються такими ж, як типи транспортних засобів за замовчуванням, які використовувалися раніше. Для спрощеного вибору велосипедного маршруту максимальна швидкість на сполученні повинна бути обмежена до мінімуму з максимальної швидкості транспортного засобу, поточної швидкості на з'єднаннях і вільної швидкості на відповідних з'єднаннях. Для спрощеного вибору маршруту довжину зв'язку замінено на значення відстані, щоб обчислити шлях з найменшою вартістю з використанням існуючої логіки обчислення найкоротшого шляху.

Для додавання електровелосипедів до симуляції було створено новий режим і тип транспортних засобів. Право власності на електровелосипед надається в наявності велосипеда агентів із ключовим словом «EBIKE». У даному випадку агент може мати велосипед або електровелосипед і не вибирати між ними. Для перших заїздів параметри режиму були залишені такими ж значеннями, як і для звичайних велосипедів, але створені як власні поля, тому їх можна змінювати незалежно. Частку електровелосипедів серед доступних велосипедів можна встановити у конфігураційному файлі. Тут також новий режим було додано до кешованих режимів, доступних режимів, мережевих режимів, основних режимів, режимів на основі ланцюга та режимів просочування. Це гарантує, що електровелосипеди також взаємодіють з іншими транспортними засобами на зв'язку, їх потрібно використовувати протягом усього туру, і їх не можна десь залишати, а автомобілі можуть їх обігнати, а також вони можуть обганяти повільніші транспортні засоби.

Окрім самої симуляції, було створено клас для постобробки лічильників велосипедів за певними посиланнями з файлу подій. Таким чином можна вручну відобразити розташування реальних лічильників у мережі та порівняти змодельовані підрахунки із записаними. Більш детальну документацію можна знайти в Додатку.

3.1.2. Налаштування симуляції з велосипедами

Перш за все, цікаво, як моделювання велосипедів впливає на результати порівняно з моделюванням з телепортованими велосипедами, тому перед моделюванням перерозподіленої мережі використовується спрощена мережа, що включає шляхи. Подібно до аналізу чутливості, у першій симуляції дозволяється лише вибір маршруту, а потім також вибір режиму. Для цього експерименту вибір маршруту неможливий для турів, які включають заходи поза межами, коли стратегія встановлена на вибір режиму. На другому кроці використовується перерозподілена мережа та виконується моделювання з вибором маршруту та ще одним додаванням режиму. Перші експерименти були проведені з 25% вибіркою населення та підсумовані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Огляд експериментів із симуляцією велосипеда в спрощених і перерозподілених мережах

Симуляція	Велосипеди	Мережа	Вхідні плани	Стратегія	Ітерації
sb	телепортований	спрощений	вирізати з СН	вибір режиму (змінити маршрут всередині)	60
sb велосипед r	змодельований	спрощене перед вкл. шляхи	вихід з сб	вибір маршруту	90
sb bike m	змодельований	спрощене перед вкл. шляхи	вихід з сб	вибір режиму (змінити маршрут всередині)	90
rea bike r	змодельований	перерозподілено	вихід з сб	вибір маршруту	90

rea bike m	змодельований	перерозподілено	вихід з сб	вибір режиму (змінити маршрут всередині)	90
------------	---------------	-----------------	---------------	--	----

3.1.3. Налаштування моделювання з електровелосипедами

Ті самі мережі з симуляції з велосипедами можна використовувати для електровелосипедів, режим ebike потрібно додати скрізь, де дозволений режим велосипеда. Для першого запуску була використана спрощена мережа та 25% популяція на основі вихідних планів еталонного моделювання без зменшення пропускної здатності та з телепортацією велосипеда. Сьогодні частка електровелосипедів серед усіх велосипедів і електровелосипедів може бути оцінена приблизно в 18%.

3.2. Результати

3.2.1. Інфраструктура зв'язку

Таблиця 3.2 показує характеристики інфраструктури дорожнього зв'язку для спрощеної мережі, яка використовувалася для моделювання з телепортованими велосипедами, спрощеної мережі для моделювання велосипедів і перерозподіленої мережі. Збільшення кількості зв'язків і загальної пропускної здатності в велосипедній мережі та перерозподіленій мережі є результатом додавання шляхів до мережі. Це також знижує середню вільну швидкість мережі та частку миль смуги руху, спільних між автобусом і автомобілем, порівняно із загальною кількістю миль смуги. Перерозподіл не змінює співвідношення пропускної здатності високого рівня до міських зв'язків. Значення ємності на шляхах збільшуються на 15%. Це може здатися низьким, але шляхи також включають усі шляхи змішаного використання, такі як шляхи в лісах, які складають велику частину довжини, яка залишається

незмінною під час перерозподілу. Таким чином, відносно збільшення міських шляхів має бути вищим. Оскільки в MATSim у поточному налаштуванні вуличні велосипедні доріжки не виділяються, є лише невелике зменшення пропускної здатності з точки зору інфраструктури для автомобілів. Коли велосипедисти користуються такою дорогою, пропускна здатність для автомобілів все одно зменшується, оскільки велосипеди також займають місце.

Таблиця 3.2 – Характеристики інфраструктури каналу для спрощених мереж (sb, sb bike) і перерозподіленої мережі (rea)

Мережі Е-Вело-Київ	sb	sb bike	rea
N посилань, -	131,615	162,609	165'979
Загальна кількість миль по смузі, км	22,419	28,252	28'590
Середнє вільна швидкість, км/год	41,21	36,08	35,97
Загальна місткість, авто/год*км	17,336,255	18 940 032	18 816 071
Ємність відносно sb	100%	109%	109%
Спільна смуга миль автобус+авто	21%	16%	16%
Високий рівень вантажопідйомності, авто/год*км	4'797'026	4'747'871	4'659'583
Міська потужність, авто/год*км	12'486'421	12'290'276	11'995'681
Співвідношення місткості високий рівень / місто	0,39	0,38	0,39
Пропускна здатність шляхів, авто/год*км	0	1 857 067	2,128,315
Місткість спільного велосипеда + автомобіля, авто/год*км	0	14,231,159	13 835 950

Місткість автомобіля, авто/год*км	17,336,255	17 082 964	16 687 756
--------------------------------------	------------	------------	------------

3.2.2. 25% населення, звичайні велосипеди

На рисунках 3.1, 3.2 і 3.3 показано продуктивність мережі для режимів автомобіль і велосипед з точки зору часу подорожі, пройденої відстані та середньої швидкості поїздки, якщо дозволено вибір маршруту та режиму. Дивлячись спочатку на продуктивність мережі до перерозподілу дорожнього простору (sb bike), ми бачимо, що моделювання велосипедів замість телепортації вже має певний ефект порівняно з контрольним сценарієм із телепортацією велосипедів (sb). Час подорожі та відстані для автомобілів і велосипедів вищі, ніж у базовому сценарії. Середня швидкість поїздки легкових автомобілів знижується на 7-8%. Середня швидкість поїздки для велосипедів на 12 км/год трохи вища за фіксовану швидкість телепортації 11,16 км/год.

Для перерозподіленої мережі (rea bike) велосипедні поїздки працюють дуже подібно до спрощеної попередньої мережі з дещо вищим часом подорожі та відстанями та дещо меншою швидкістю, ніж раніше. Для автомобілів реакція схожа на аналіз чутливості. За умови вибору лише маршруту дозволений час подорожі збільшується майже вдвічі, тоді як за вибору способу збільшення залишається на 33%. Тут також відстань подорожі автомобіля помітно збільшується на 29% з вибором маршруту та на 11% з вибором маршруту та способу. Ймовірно, це пов'язано з більшою кількістю доріг з одностороннім рухом у мережі, що вимагає об'їздів. Середня швидкість у дорозі також зменшується на 10%, коли доступний вибір режиму.

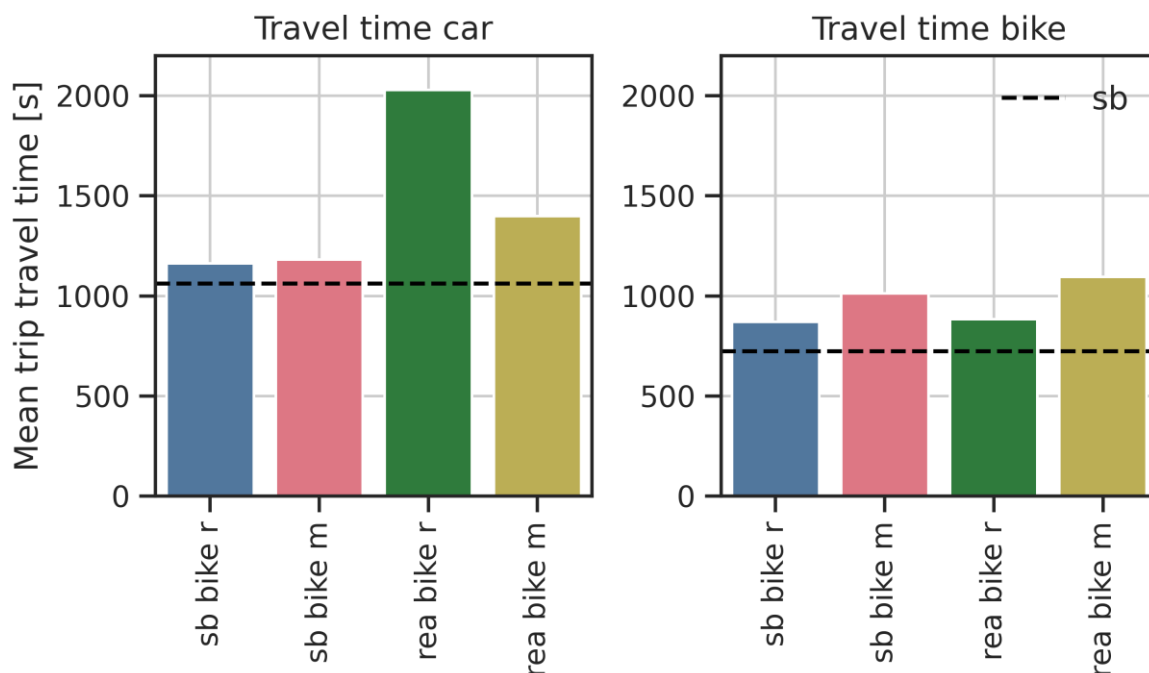


Рисунок 3.1 – Час подорожі в симуляції велосипеда для автомобіля та велосипеда зі стратегією вибору маршруту (r) і режиму (m)

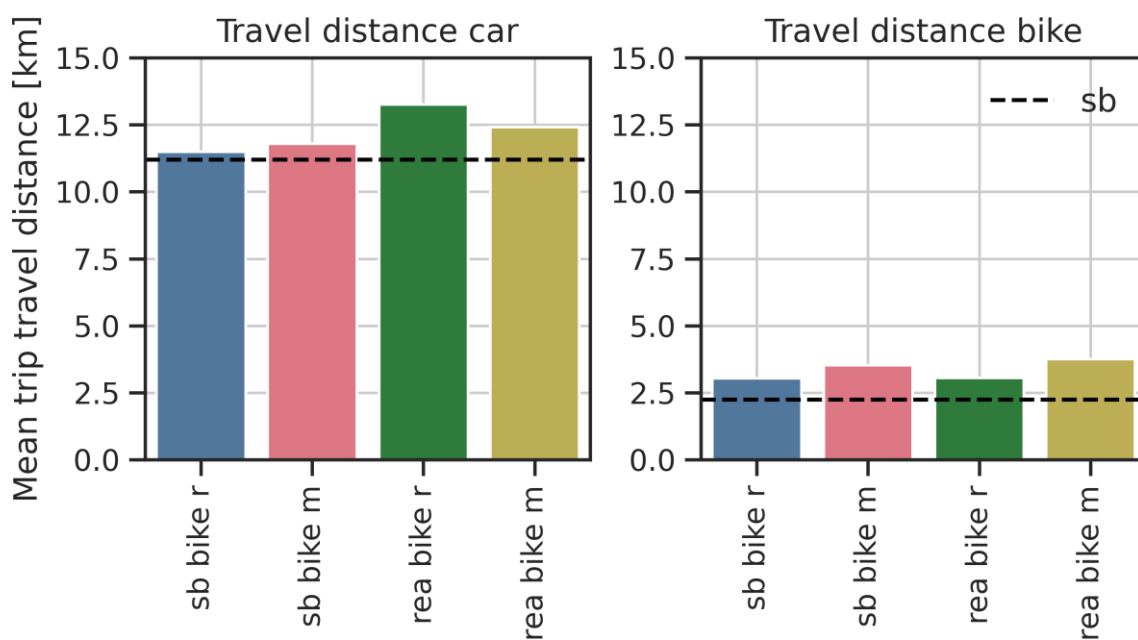


Рисунок 3.2 - Дистанція подорожі в симуляції велосипеда для автомобіля та велосипеда зі стратегією вибору маршруту (r) і режиму (m)

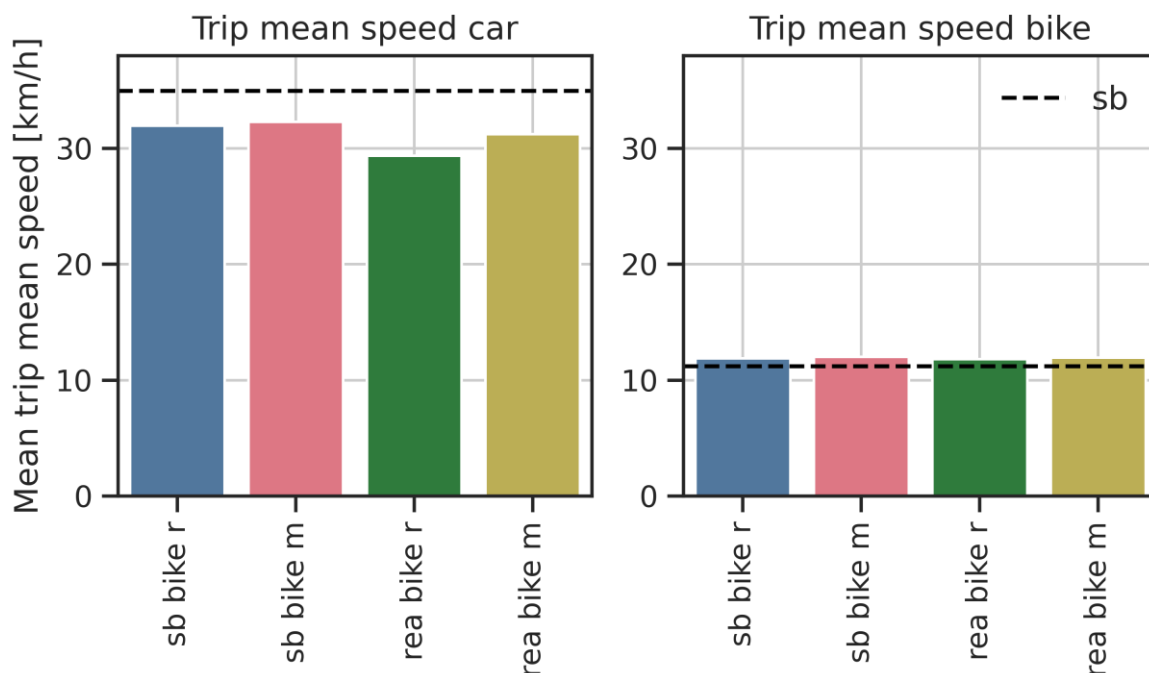


Рисунок 3.3 – Середня швидкість поїздки в симуляції велосипеда для автомобіля та велосипеда зі стратегією вибору маршруту (r) і режиму (m)

Для часток режиму всіх внутрішніх поїздок, показаних на рисунку 3.4, частка автомобіля знижується як з точки зору поїздок, так і відстані під час імітації велосипедів і навіть далі в перерозподіленій мережі. Щоб порівняти це скорочення з очікуваннями від еластичності, ми застосовуємо як основу збільшення часу подорожі на 92,4% перерозподіленої мережі з дозволим вибором маршруту. З еластичністю -0,2 для поїздок довжиною 11 км можна очікувати зміну попиту на автомобільну поїздку на -18,5%. Це означає, що для початкової частки режиму серед необмежених відключень 29,4% у мережі sb (див. Рисунок 3.5), частка режиму повинна зменшитися до 24%. Перерозподілена мережа з вибором режиму має залишок частки поїздок на автомобілі 25,5%, що є зміною на -13,3%. Ця реакція не така сильна, як очікувалося, але вже сильніша і ближча до очікувань, ніж в аналізі чутливості.

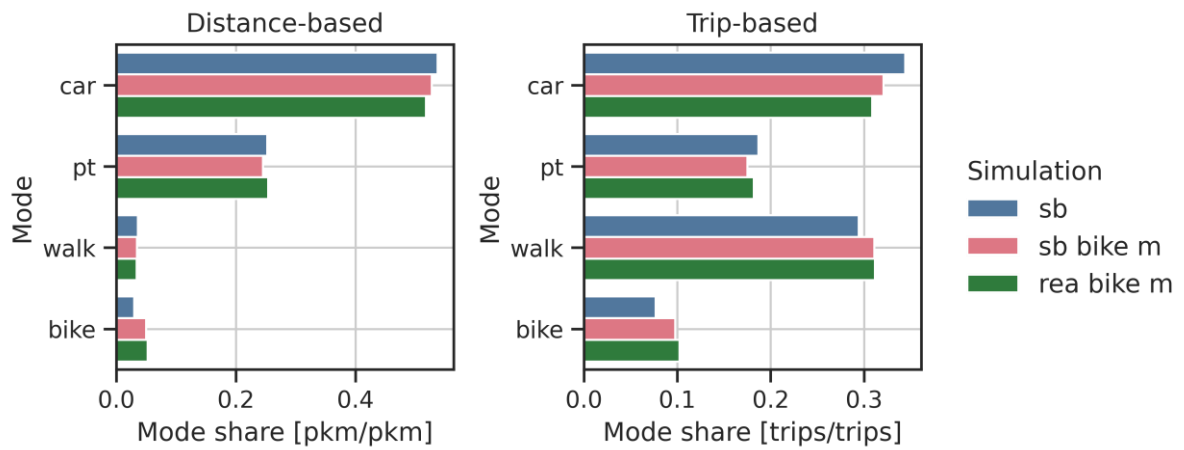


Рисунок 3.4 – Частка режимів моделювання велосипеда для всіх внутрішніх поїздов

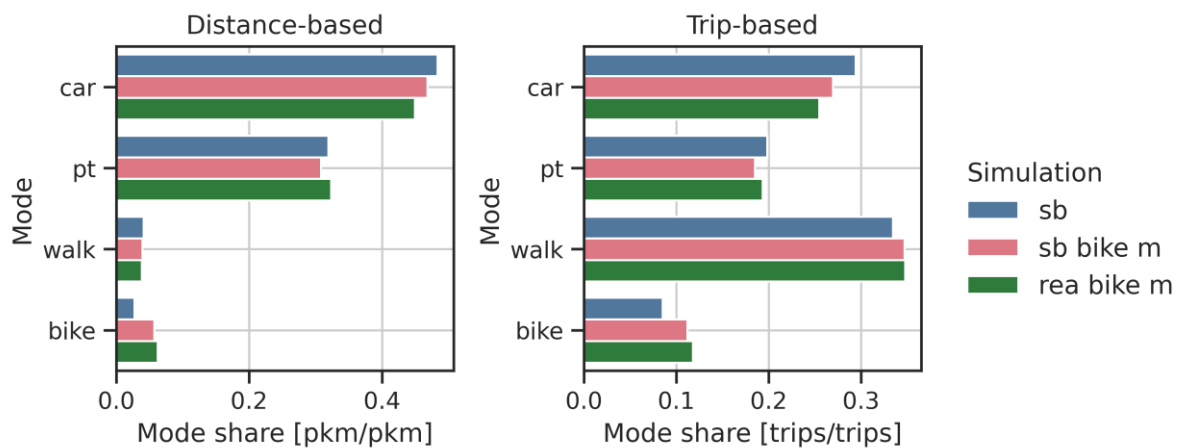


Рисунок 3.5 – Частка режимів симуляції велосипеда для поїздов з необмеженим вибором режиму

Якість прогнозування часу подорожі під час симуляції велосипедів

Знову використовуючи гістограму різниці прогнозованого часу в дорозі (Рисунок 3.6), прогнозований час у дорозі автомобільних поїздов при додаванні велосипедів як мережевих режимів можна порівняти з базовим сценарієм, а стовпчики переважно збільшуються в діапазоні ± 10 хв. При використанні перерозподіленої мережі частка поїздов, занижених на 30 хвилин, досягає 3%, що вказує на ті ж проблеми, що й в аналізі чутливості, але менш серйозні. Для велосипедних подорожей усі велосипедні подорожі в базовому сценарії мають той самий досвідчений час подорожі, що й прогнозований час подорожі, оскільки велосипеди телепортуються. При

моделюванні велосипедів час у дорозі майже завжди занижується під час перепланування. Однією з причин цього є те, що зв'язки частіше масштабуються, щоб бути коротшими, коли їх довжина змінюється за допомогою значення відстані. Оскільки це довжина, яка використовується під час маршрутизації, поїздки оцінюються коротше. Також просочування використовується тут як динаміка черги, і ще не було кількісно визначено, наскільки взаємодія з автомобілями сповільнює велосипеди в представленій установці. Час подорожі за певними посиланнями для велосипедів також оцінюється на основі спостережень, але в іншому модулі, ніж SmoothingTravelTime. Якщо необхідно отримати більше контролю над цим обчисленням, до SmoothingTravelTime слід додати залежну від режиму оцінку часу подорожі.

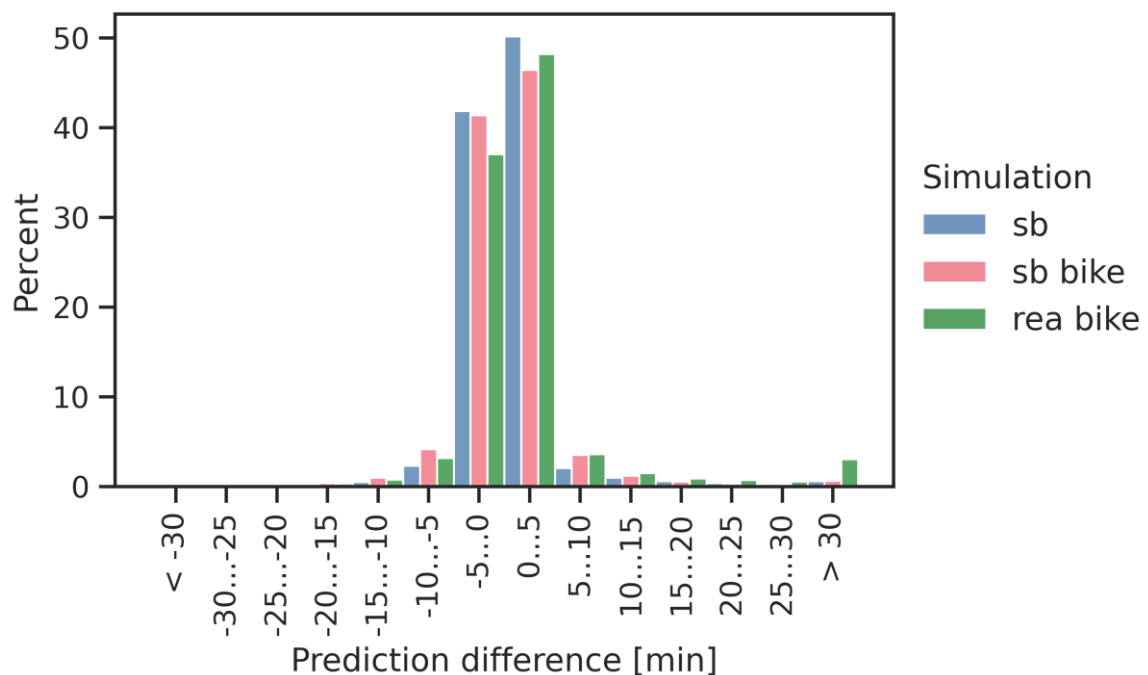


Рисунок 3.6 – Гістограма різниці в часі подорожі (хв) для автомобільних поїздок у моделюванні з велосипедами як мережевим режимом

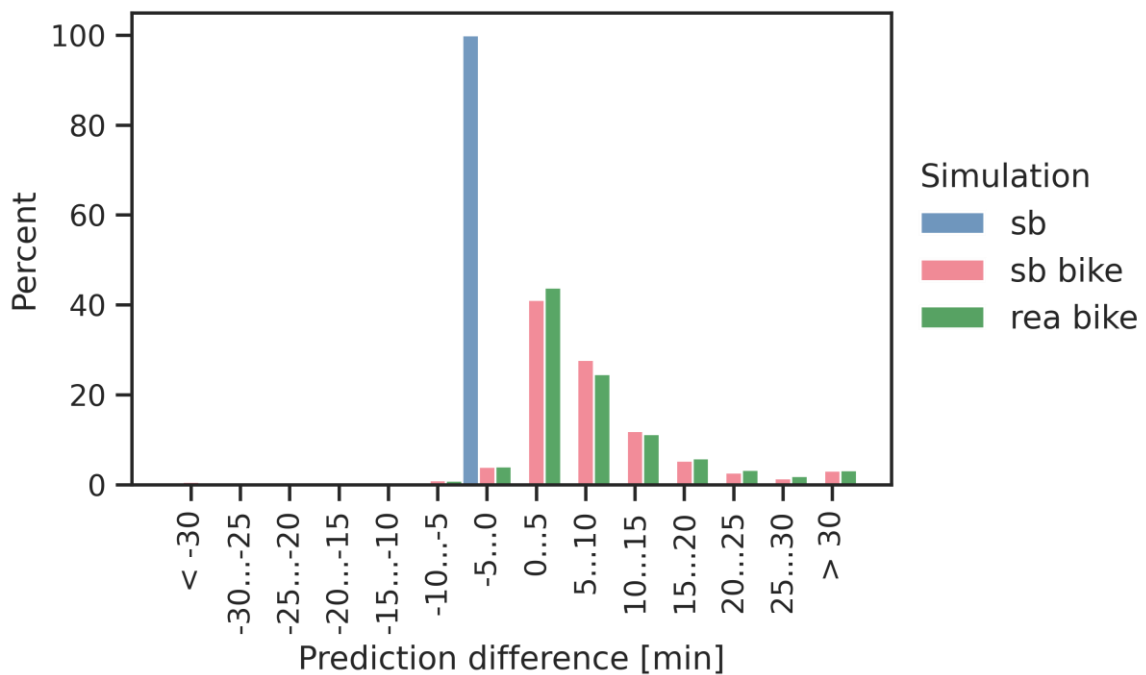


Рисунок 3.7 – Гістограма різниці в часі подорожі (хв) для велосипедних поїздки у симуляції з велосипедами як мережевим режимом

3.2.3. 25% населення, велосипеди та електровелосипеди

Для першого симуляційного прогону з електровелосипедами в спрощеній мережі до перерозподілу дорожнього простору отримано наступні результати. Запровадження електровелосипедів майже не впливає на час подорожі, відстань у дорозі та середню швидкість автомобіля та велосипеда. Подорожі на електровелосипедах є швидшими порівняно з поїздками на велосипеді та, як і очікувалося, долають більші відстані за короткий час.

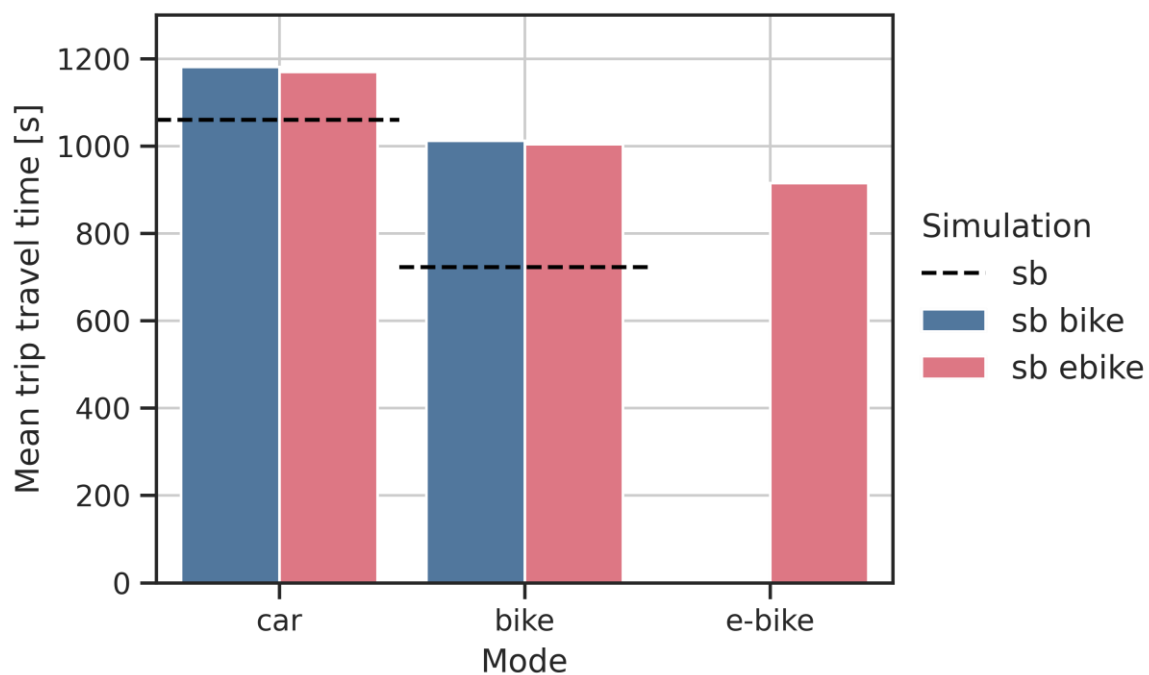


Рисунок 3.8 – Середній час у дорозі для поїздки на автомобілі, велосипеді та електровелосипеді

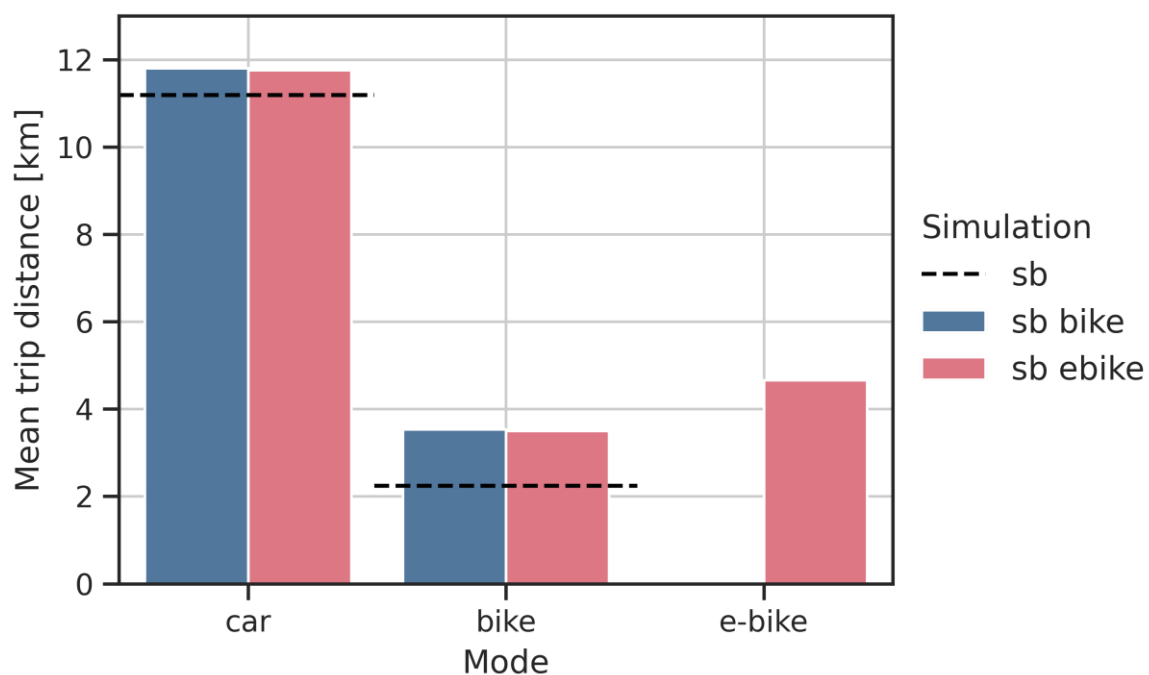


Рисунок 3.9 – Середня відстань поїздки на автомобілі, велосипеді та електровелосипеді

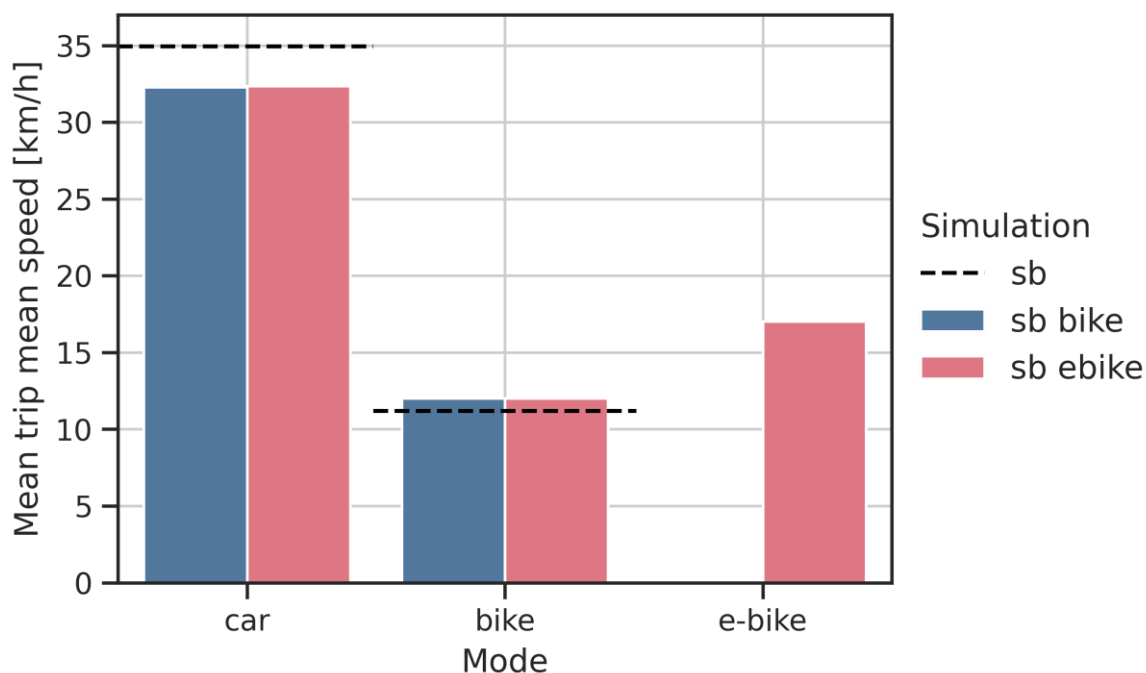


Рисунок 3.10 – Середня середня швидкість поїздки на автомобілі, велосипеді та електровелосипеді

Частка режимів автомобілів і громадського транспорту дещо зменшилася після введення електровелосипедів, але в основному здається, що лише ті велосипеди, які були перетворені на електровелосипеди, відображаються в частці режиму електровелосипеда як з точки зору відстані, так і поїздки. Оскільки вони використовують однакові параметри в моделі витрат, єдина різниця в оцінці корисності електровелосипеда та велосипеда полягає в тому, що час у дорозі коротший через вищу швидкість електровелосипедів. Цілком можливо, що електровелосипеди могли б залучити більше поїздки, якби їх корисність була вищою через більший комфорт. Але вони також мають вищу грошову вартість і стають непривабливими для турів, тривалість яких перевищує ємність акумулятора автомобіля.

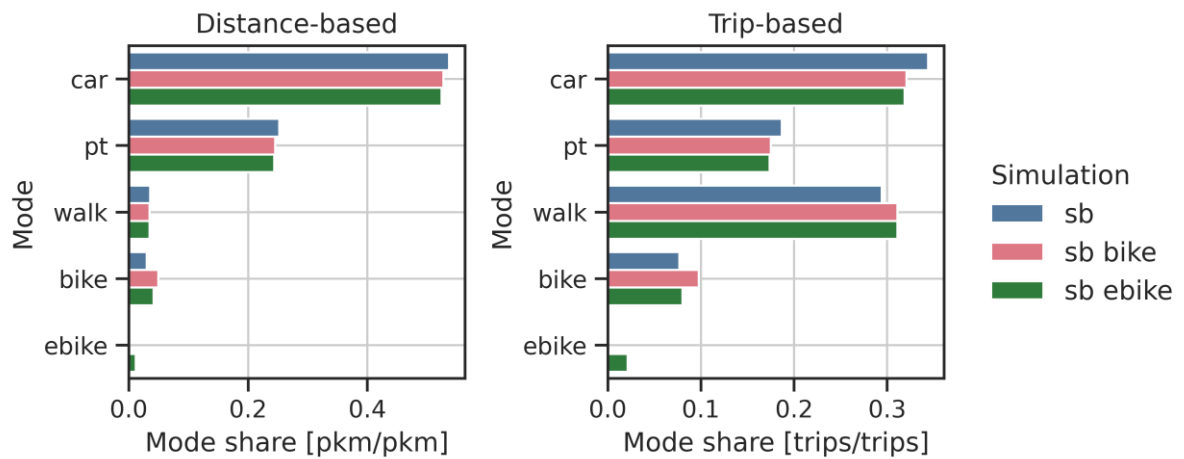


Рисунок 3.11 – Частка режимів симуляції велосипеда та електровелосипеда для всіх внутрішніх поїздок

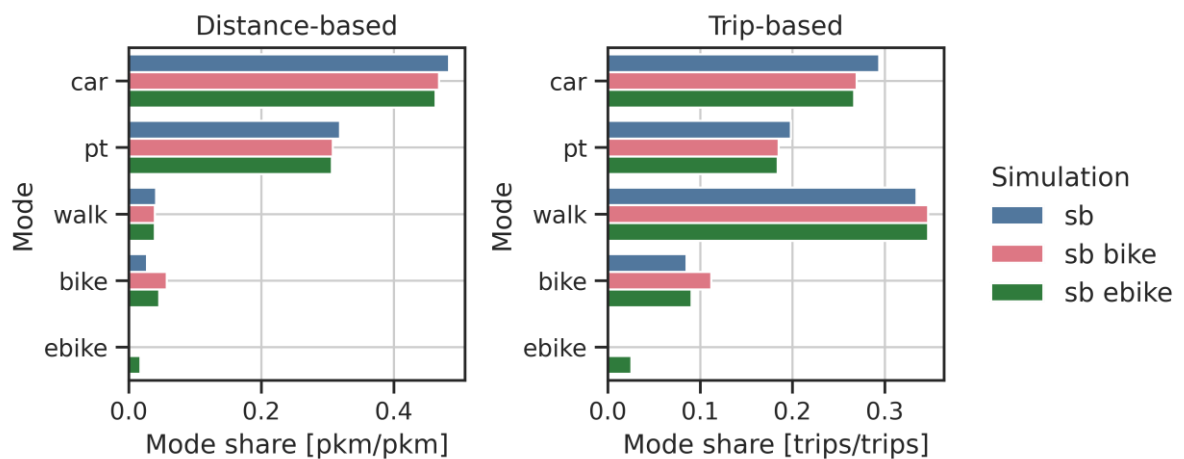


Рисунок 3.12 – Частка режимів моделювання велосипеда та електровелосипеда для необмеженого вибору режиму поїздки

3.3. Електровелосипеди: швидкість

У поточних налаштуваннях встановлено максимальні значення швидкості 15 км/год для звичайних велосипедів і 25 км/год для електровелосипедів. Це призводить до середньої швидкості поїздки в симуляції 12 км/год для звичайних велосипедів і 17 км/год для електровелосипедів. Мейстер та ін. (2023) оцінили на основі даних відстеження GPS середню швидкість для велосипедів у 15,61 км/год і для електровелосипедів у 19,57 км/год. Це показує, що ще є місце для

калібрування максимальних швидкостей, що також може призвести до більшої частки режимів, якщо поїздки стануть коротшими і, отже, більш привабливими. Крім того, взаємодію автомобілів і (e-)велосипедів на дорозі з просочуванням можна додатково вивчити, щоб знайти потенціал для прискорення велосипедів.

3.4. Велосипед розраховує

Оскільки дані про населення представляють Україну в 2021 році. Для кожного року в понеділок ближче до 01.10.2021 була обрана така, що не було сильних дощів, була частиною шкільних канікул або дорога була закрита через будівництво. Потім для кожного лічильника погодинні підрахунки були агреговані, усереднені за три роки та помножені на поправочний коефіцієнт, наданий містом Київ, утворюючи годинний еталонний графік. Коригувальний коефіцієнт масштабує автоматично зареєстровані підрахунки, де підрахунки під керуванням людини виявили різницю у фактичній кількості велосипедів, що пройшли лічильник. Для еквівалентних зв'язків у моделюванні можна обчислити погодинні показники та побудувати їх поруч із еталонним графіком. На рисунку 3.13 показано деякі приклади поточного стану симуляції велосипеда. Опис розташування лічильників пояснюється в таблиці 3.3. Для ранкового піку результати моделювання на Лангштрассе (LANN) і Хофвізенштрассе (HOFW) мають подібну величину, як і підрахунки, зареєстровані містом Київ, але крім цього вони є не підходить так добре. Більш детальний аналіз маршрутів та альтернативних маршрутів буде необхідний для калібрування моделювання відповідно до цих показників.

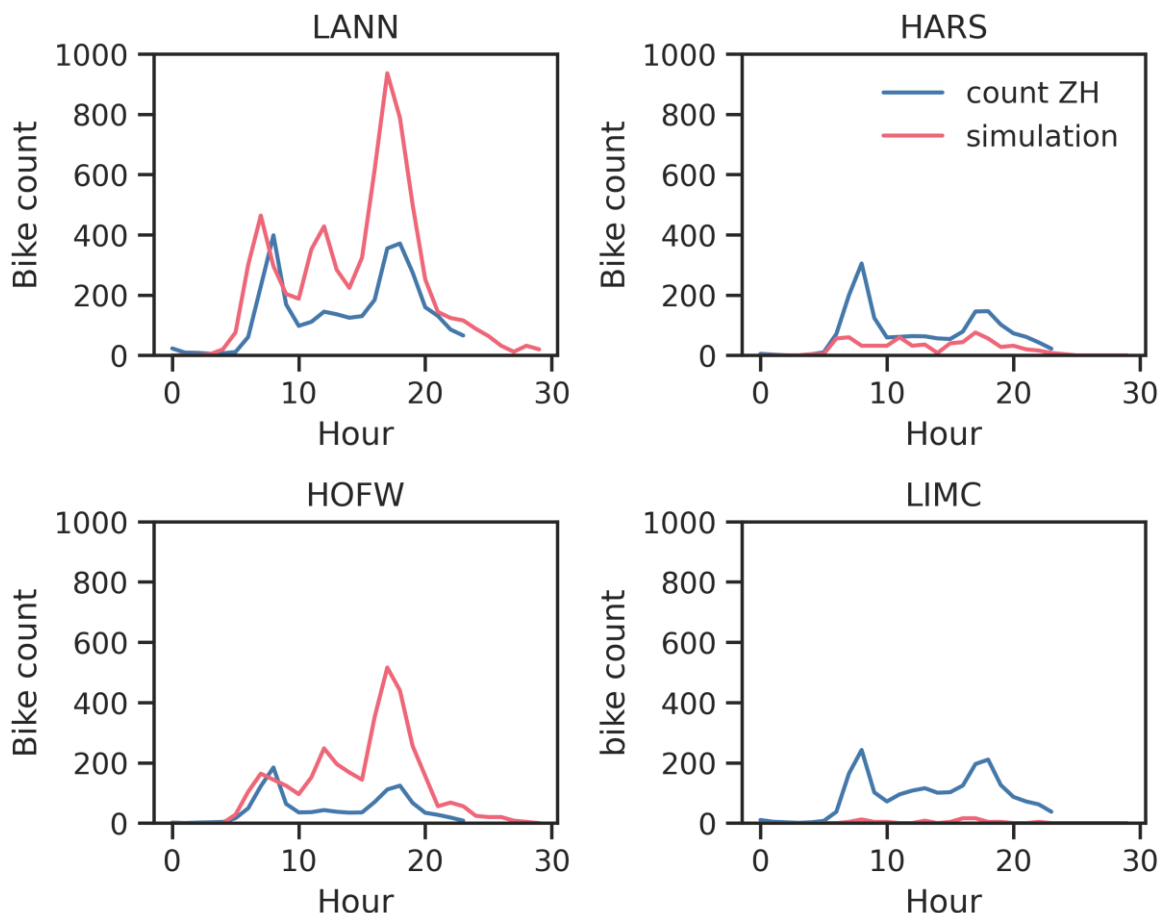


Рисунок 3.13 – Велосипедні підрахунки за реальними лічильниками та моделюванням у спрощеній мережі

3.5. Обговорення та погляд

3.5.1. Зворотний зв'язок з процесом перерозподілу

Перші запуски моделювання з велосипедами та електровелосипедами показують зменшення частки режиму автомобілів як щодо кількості поїздок, так і щодо пройденої відстані. Результати першого запуску з перерозподіленою мережею демонструють дещо слабшу реакцію на збільшення часу подорожі, ніж оцінено за допомогою еластичностей з літератури. Але також були виявлені показники недооцінки часу в дорозі під час перепланування, тому результати ще не є повністю надійними. Після того, як це буде покращено, можна збільшити кількість змін режимів шляхом

подальшого зменшення пропускної здатності для автомобілів у мережі. Пропускна здатність можна зменшити шляхом видалення більшої кількості смуг, а також шляхом перегляду пропускної здатності перехресть. У міському контексті перехрестя часто є обмежуючим фактором пропускної спроможності, і з більш зручними для велосипедистів проектами перехресть, як заплановано для Е-Вело-Київ, їх пропускна здатність може зменшитися. Інший або додатковий спосіб покращити перехід до велосипедів – це відкалібрувати велосипеди на вищу швидкість і зробити велосипедні подорожі більш привабливими. Щоб зробити висновок щодо цілей скорочення викидів, потрібно враховувати не лише відстань, яку проїхали автомобілі, але й стан заторів на їхніх маршрутах, оскільки зупинка та виїзд і затори відомі особливо високим споживанням палива, а отже, і викидами. Більш детальні розрахунки необхідні для оцінки впливу поточних змін мережі на викиди.

3.5.2. Решта обмежень

Аналіз чутливості показує, що для належного полегшення вибору маршруту та способу слід внести деякі покращення в оцінку часу подорожі. Зараз значна частка поїздок недооцінюється, коли мережа перевантажена, через три основні причини. Перший полягає в тому, що поїздки, обмежені зовнішньою діяльністю, не можуть належним чином адаптуватися до змін пропускної здатності мережі. Другий полягає в недооцінці часу проходження, розрахованого на основі спостережуваного часу проходження зв'язку. Оцінки стають неточними, коли час подорожі за посиленнями стає довшим за інтервали часу, для яких усереднюється час подорожі. Крім того, для дуже низьких пропускних спроможностей примусове просування транспортних засобів, що залишають зв'язок, стає довшим. Це зменшує передбачуваність часу проходження каналу в міських мережах, де час входу в канал може бути досить випадковим. Нарешті, під час вибору маршруту завжди вибирається шлях з найменшою вартістю без урахування економії часу в дорозі порівняно з поточним маршрутом. Це призводить до коливань зайнятості каналу та часу

проходження каналу, що також погіршує оцінку часу проходження. Запропоновано підходи до покращення прогнозування часу подорожі, і після вдосконалення налаштування для моделювання мереж зі зниженою пропускнуою здатністю можна знайти більш репрезентативну рівновагу. Окрім вибору маршруту та способу, можна також дозволити інші реакції на збільшення часу подорожі. За оцінками Вейса та Аксхаузена (2012), люди, ймовірно, виберуть інші пункти призначення, коли вартість їхнього подорожі зростає. У даному випадку можна було б реалізувати стратегію, яка б дозволила частці агентів обирати нові об'єкти для покупок і дозвілля після певної кількості ітерацій. Це означає, що агенти деякий час намагаються знайти кращий маршрут або вид транспорту, але якщо їхня ситуація не покращиться, вони можуть вибрати пункти призначення, до яких легше дістатися. Оскільки експеримент зосереджений на середньострокових ефектах, місце проживання, роботи та навчання має залишатися фіксованим. Подібним чином, вибір часу відправлення також можна дозволити як стратегію. У планах має бути більш детально визначено, як заходи обмежуються мінімальною тривалістю, фіксованим часом початку або годинами роботи. Якщо агенти мають певну гнучкість у своїх планах, вони можуть перенести свою поїздку на менш завантажений час доби.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Безпека дорожнього руху при впровадженні мікромобільного транспорту

Основні фактори ризику

Швидкісний режим

Перевищення швидкості є головною причиною ДТП, складаючи 39,9% всіх аварій

Значна різниця у швидкості руху між автомобілями та мікромобільним транспортом створює додаткові ризики при маневруванні

Маневрування та перестроювання

Порушення правил маневрування становить 23% всіх ДТП

Особливо небезпечним є перестроювання та зміна смуг руху через обмежену маневреність мікромобільного транспорту

Погодні умови та стан покриття

На слизькій дорозі підвищується ризик заносу та падіння для двоколісних транспортних засобів

При дощі необхідно знижувати швидкість та збільшувати дистанцію між транспортними засобами

Специфічні ризики для мікромобільного транспорту

Видимість

Обмежена помітність користувачів мікромобільного транспорту, особливо в темну пору доби

Недостатня видимість при несприятливих погодних умовах (туман, дощ, сніг)

Вразливість учасників руху

Відсутність елементів пасивної безпеки у мікромобільного транспорту

Підвищений ризик травмування при зіткненні з автомобілем через різницю в масі та швидкості

Заходи зниження ризиків

Інфраструктурні рішення

Створення відокремленої інфраструктури для мікромобільного транспорту

Облаштування захищених перехресть та розділення потоків руху

Організаційні заходи

Чітке визначення правил руху та статусу користувачів мікромобільного транспорту

Впровадження швидкісних обмежень у зонах змішаного руху

Підвищення рівня підготовки всіх учасників дорожнього руху

Розробка заходів з організації безпечного руху велосипедистів та користувачів електросамокатів

Інфраструктурні заходи

Організація велосипедних доріжок

Створення відокремленої інфраструктури для мікромобільного транспорту з чітким розмежуванням від автомобільного руху

Облаштування захищених перехресть та розділення потоків руху

Встановлення спеціальних світлофорів для велосипедистів на регульованих перехрестях

Технічне забезпечення безпеки

Забезпечення належного освітлення велодоріжок та місць перетину з автомобільним рухом

Встановлення відповідних дорожніх знаків та розмітки для позначення велосипедних маршрутів

Облаштування безпечних місць для паркування велосипедів та електросамокатів

Організаційні заходи

Швидкісний режим

Обмеження максимальної швидкості руху електросамокатів до 25 км/год у населених пунктах

Зниження швидкості до 20 км/год на велодоріжках

Обмеження швидкості до 5 км/год при русі тротуарами у виняткових випадках⁶

Правила руху

Заборона руху тротуарами, окрім випадків відсутності альтернативи

Обов'язкове спішування на пішохідних переходах

Заборона перевезення пасажирів на електросамокатах

Засоби індивідуального захисту

Обов'язкове оснащення

Використання світловідбивальних елементів на одязі та транспортному засобі²

Встановлення передніх фар та задніх габаритних вогнів

Обладнання звуковим сигналом для попередження інших учасників руху⁶

Рекомендоване спорядження

Використання захисного шолома

Застосування налокітників та наколінників

Носіння яскравого одягу для кращої видимості

Вимоги до облаштування велосипедної інфраструктури з точки зору безпеки (розмітка, знаки, освітлення)

Основні елементи безпечної велоінфраструктури

Розмітка та відокремлення

- Обов'язкові велосмуги повинні бути відділені від проїзної частини суцільною лінією розмітки
- Рекомендовані велосмуги позначаються переривчастою розміткою для можливості маневрування інших транспортних засобів
- Буферні зони між велосмугами та автомобільними смугами для підвищення безпеки

Світлотехнічне обладнання

- Забезпечення належного освітлення велодоріжок, особливо в місцях перетину з автомобільним рухом
- Встановлення спеціальних світлофорів для велосипедистів на регульованих перехрестях
- Обов'язкове використання світлоповертачів: білих спереду, оранжевих по боках, червоних позаду

Організація безпечного руху

- Заборона руху велосипедистів по автомагістралях і дорогах для автомобілів
- Облаштування винесених вперед стоп-ліній для велосипедистів перед світлофорами
- При груповому русі - розділення на групи до 10 велосипедистів з дистанцією 80-100 м між групами

Додаткові заходи безпеки

Перехрестя та примикання

- Оптимізація перехресть з урахуванням велосипедного руху
- Системи контролю дорожнього руху для розпізнавання велосипедистів
- Надання пріоритету велосипедистам у визначених зонах

Заспокоєння руху

- Зменшення інтенсивності автомобільного руху в зонах активного велосипедного руху
- Створення зон з обмеженням швидкості
- Впровадження елементів примусового зниження швидкості

4.2. Безпека життєдіяльності на транспорті. Реалізація державної політики моніторингу довкілля у сфері автомобільного транспорту

Загальна структура моніторингу

- Моніторинг довкілля у сфері автомобільного транспорту функціонує на трьох рівнях:
- Локальний - здійснюється підприємствами транспортної галузі
- Регіональний - реалізується місцевими природоохоронними органами
- Національний - забезпечується центральними органами виконавчої влади

Основні завдання моніторингу:

- Спостереження за рівнем забруднення атмосферного повітря вздовж автомагістралей
 - Контроль якості поверхневих вод у місцях розташування транспортної інфраструктури
 - Оцінка стану ґрунтів на прилеглих територіях
 - Визначення рівнів шумового та вібраційного забруднення
- Організація системи моніторингу на об'єктовому рівні

Контроль забруднюючих речовин:

- Моніторинг викидів від стаціонарних джерел (СТО, автопарки)
- Контроль викидів від пересувних джерел (автотранспорт)
- Оцінка впливу на якість атмосферного повітря
- Визначення зон забруднення

Технічні заходи:

- Модернізація транспортних засобів
- Впровадження екологічних стандартів
- Оптимізація транспортних потоків
- Розвиток "зеленої" інфраструктури

Заходи щодо зменшення негативного впливу

Організаційні заходи:

- Оптимізація маршрутів руху
- Обмеження руху у критичних зонах
- Створення пішохідних зон
- Розвиток велоінфраструктури

Економічні механізми:

- Стимулювання використання екологічного транспорту
- Впровадження платних зон паркування
- Обмеження в'їзду у центральні частини міст
- Розвиток громадського транспорту

Інформаційне забезпечення моніторингу

Збір та обробка даних:

- Автоматизовані системи контролю
- Стаціонарні пости спостереження
- Мобільні лабораторії
- Створення баз даних

Прогнозування та моделювання:

- Оцінка ризиків забруднення
- Моделювання транспортних потоків
- Прогнозування екологічної ситуації
- Розробка природоохоронних заходів

Спеціальні тренування та навчання з цивільного захисту включають наступні види:

Спеціальні об'єктові навчання і тренування

За призначенням поділяються на:

- Планові - завершують період підготовки працівників до дій у надзвичайних ситуаціях
- Показові - для демонстрації зразкових дій та досягнення єдності поглядів на організацію навчань
- Експериментальні - для пошуку та випробування ефективних способів захисту персоналу

Види підготовки працівників

Програми підготовки включають:

- Загальну підготовку працівників підприємств та організацій
- Спеціальну підготовку працівників спеціалізованих служб і формувань

- Додаткову підготовку з техногенної безпеки для працівників об'єктів підвищеної небезпеки
- Пожежно-технічний мінімум
- Прискорену підготовку до дій в особливий період

Організація навчального процесу

Навчання проводиться:

- На курсах у спеціальних класах
- Індивідуально (самостійне та консультаційне засвоєння)
- У складі навчальних груп
- Шляхом проведення інструктажів
- Тривалість спеціального тренування - до 8 годин

Документальне забезпечення

Для проведення навчань розробляються:

- План-календар підготовки та проведення тренування
- Схема практичного виконання робіт
- Графіки проведення навчань і тренувань
- Навчальні програми та плани

4.3. Запобігання антропогенному забрудненню атмосфери внаслідок функціонування суб'єктів господарювання автомобільного господарства

Вплив автотранспорту на забруднення атмосфери

Автомобільний транспорт є одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря, особливо у містах, де його вплив становить 80-90% загального забруднення. Основними причинами цього є:

- Концентрація транспорту в місцях з високою щільністю населення
- Викиди відбуваються в приземному шарі атмосфери
- Відпрацьовані гази містять понад 200 токсичних компонентів

Негативні наслідки для довкілля

Забруднення від автотранспорту призводить до:

- Формування парникового ефекту та глобального потепління
- Утворення кислотних дощів через викиди оксидів сірки та азоту
- Погіршення якості повітря в містах та утворення смогу

Впровадження екологічних альтернатив

Для зменшення негативного впливу необхідно:

- Розвивати інфраструктуру для електротранспорту
- Створювати велосипедні доріжки та умови для мікромобільності
- Оптимізувати маршрути громадського транспорту

Перерозподіл дорожнього простору

Ефективними заходами є:

- Створення пішохідних зон у центрах міст
- Виділення окремих смуг для громадського транспорту
- Обмеження руху приватного транспорту в певних зонах

Моніторинг та контроль

Необхідно забезпечити:

- Постійний контроль якості повітря в містах
- Регулярні перевірки технічного стану транспортних засобів
- Впровадження сучасних систем моніторингу викидів

Впровадження мікромобільності як екологічної альтернативи

Переваги мікромобільності:

- Зменшення транспортних заторів у містах
- Скорочення викидів забруднюючих речовин в атмосферу
- Покращення якості повітря в міських районах
- Зниження рівня шумового забруднення

Основні напрямки розвитку:

- Створення безпечної велосипедної інфраструктури
- Розвиток мережі прокату електросамокатів та велосипедів
- Інтеграція сервісів мікромобільності з громадським транспортом
- Облаштування велопішохідних просторів

Практичні заходи впровадження:

- Обмеження в'їзду автомобілів у центральні частини міст
- Створення виділених смуг для мікротранспорту
- Розвиток паркувальної інфраструктури для велосипедів та електросамокатів
- Впровадження систем спільного користування транспортом

Необхідні умови для успішного впровадження:

- Розробка чітких правил та політик щодо мікромобільності
- Налагодження взаємодії між місцевою владою та операторами прокату
- Проведення інформаційних кампаній для популяризації екологічного транспорту
- Створення безпечних умов для користувачів мікротранспорту

Очікувані результати:

- Зменшення частки автомобільного транспорту в міських перевезеннях
- Покращення екологічної ситуації в містах
- Підвищення мобільності населення
- Розвиток більш здорового способу життя серед містян

ВИСНОВКИ

Налаштування моделювання було розширено для моделювання взаємодії автомобілів, велосипедів та електровелосипедів у мережі. Це дозволяє експериментувати з пропускнуою здатністю та швидкістю велосипедної інфраструктури або покращувати вибір маршруту для велосипедів, щоб він був більш реалістичним. Також можна додати інші режими мікромобільності та їх інфраструктуру.

Для цих режимів, а також для велосипедів та електровелосипедів було б цікаво, як їх можна реалізувати як можливі режими доступу та виходу для поїздов громадським транспортом. Різноманітність інших політик можна протестувати та поєднати зі змінами в інфраструктурі, як-от підвищення плати за паркування або час пошуку місця для паркування через скорочення паркування на вулиці. Інша ідея проекту Е-Вело-Київ полягає в тому, щоб зробити використання доріг динамічним, що також має бути можливо відтворити в симуляції, зробивши дозволені режими на ланках залежними від часу. З точки зору політичних цілей, результуючий час у дорозі в результаті моделювання в перерозподілених мережах є основним входом для кількісної оцінки змін доступності. Це важливо відстежувати, щоб нерівність не зростала неадекватно через зменшення можливостей мобільності для окремих груп.

Загалом, існує багато можливих експериментів, але не тільки вхідні параметри повинні бути ретельно відкалібровані, але також слід спостерігати за проміжними процесами, які добре працювали в минулому, і потенційно переглядати для особливого випадку мереж, сильно перевантажених початковим попитом.

В результаті проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

Проведено аналіз чутливості моделі для двох сценаріїв - "Тернопіль" та "Е-Вело-Київ". При зменшенні пропускнуої здатності мережі на 50% час подорожі збільшується на 32 хвилини (1904 секунди) порівняно з базовим сценарієм.

Встановлено, що при зменшенні пропускної здатності на 30% час у дорозі збільшується на 11% з дозволеним вибором маршруту та режиму, тоді як при зменшенні пропускної здатності по всій мережі він збільшується на 34%.

Виявлено, що частка автомобільного транспорту зменшується з 33.4% до 32.1% при максимальному зменшенні пропускної здатності, при цьому збільшується використання громадського транспорту.

Аналіз показав, що 20% поїздок мають різницю в прогнозі понад 30 хвилин, що вказує на значне погіршення якості прогнозування при зниженій пропускній здатності мережі.

Встановлено, що якість прогнозування погіршується для довших поїздок як у часі, так і в просторі. Особливо це помітно для поїздок з низькою середньою швидкістю.

Результати моделювання показали, що велосипедний транспорт має потенціал для заміщення 21% автомобільних поїздок, проте реалізація цього потенціалу потребує додаткових заходів.

Виявлено обмеження моделі, зокрема:

- неврахування довгострокових змін у поведінці учасників руху
- обмежена можливість вибору маршруту для агентів із зовнішньою активністю
- неточності в прогнозуванні часу подорожі при зниженій пропускній здатності

Результати дослідження можуть бути використані для:

- планування транспортної інфраструктури міста
- оптимізації розподілу дорожнього простору
- розробки стратегій розвитку мікромобільності
- покращення транспортної доступності міських територій

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

Ben-Dor, G., E. Ben-Elia and I. Benenson (2021) Population downscaling in multi-agent transportation simulations: A review and case study, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 108, 102233.

Cairns, S., S. Atkins and P. Goodwin (2002) Disappearing traffic? The story so far, *Municipal Engineer*, 151, 13–22, 01 2002.

de Jong, G. and H. Gunn (2001) Recent evidence on car cost and time elasticities of travel demand in Europe, *Journal of Transport Economics and Policy*, 35 (2) 137– 160.

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.

Hörl, S. (2020) *Dynamic Demand Simulation for Automated Mobility on Demand*, PhD Thesis, ETH Zürich.

Hörl, S. and M. Balac (2021) Introducing the eqasim pipeline: From raw data to agentbased transport simulation, *Procedia Computer Science*, 184, 712–719, 01 2021.

Horni, A., K. Nagel and K. W. Axhausen (2016) *The Multi-agent Transport Simulation MATSim*, Ubiquity Press, London.

Lefebvre, N. and M. Balmer (2007) Fast shortest path computation in time-dependent traffic networks, *Working Paper*, 439, IVT, ETH Zürich, Zürich.

Litman, T. (2023) *Understanding Transport Demands and Elasticities. How Prices and Other Factors Affect Travel Behavior*, Victoria Transport Policy Institute, Victoria, British Columbia.

Meister, A., M. Felder, B. Schmid and K. W. Axhausen (2023) Route choice modeling for cyclists on urban networks, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 173, 103723.

Poletti, F. (2016) *Public Transit Mapping on Multi-Modal Networks in MATSim*, Master Thesis, IVT, ETH Zürich, Zürich.

Saadi, I., A. Mustafa, J. Teller and M. Cools (2018) Investigating the impact of river floods on travel demand based on an agent-based modeling approach: The case of Liège, Belgium, *Transport Policy*, 67, 102–110.

Tchervenkov, C., S. Hörl, M. Balac, T. Dubernet and K. W. Axhausen (2020) An improved replanning strategy for congested traffic conditions in MATSim, *Procedia Computer Science*, 170, 779–784.

Tønnesen, A. and O. H. Hagen (2020) Reallocation of road and street space in Oslo - Measures for zero growth in urban traffic, *Discussion Paper*, 181, OECD / Interantional Transport Forum, Paris.

TRACE (1999) Elasticity Handbook: Elasticities for Prototypical Contexts, *Final report*, European Commission, Den Haag.

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.

Weis, C., M. Vrtic, B. Schmid and K. W. Axhausen (2017) Analyse der SP-Befragung 2015 zur Verkehrsmodus- und Routenwahl, *Grundlagen*, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern.

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 (MaaS): 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.

А **Додаткові цифри**

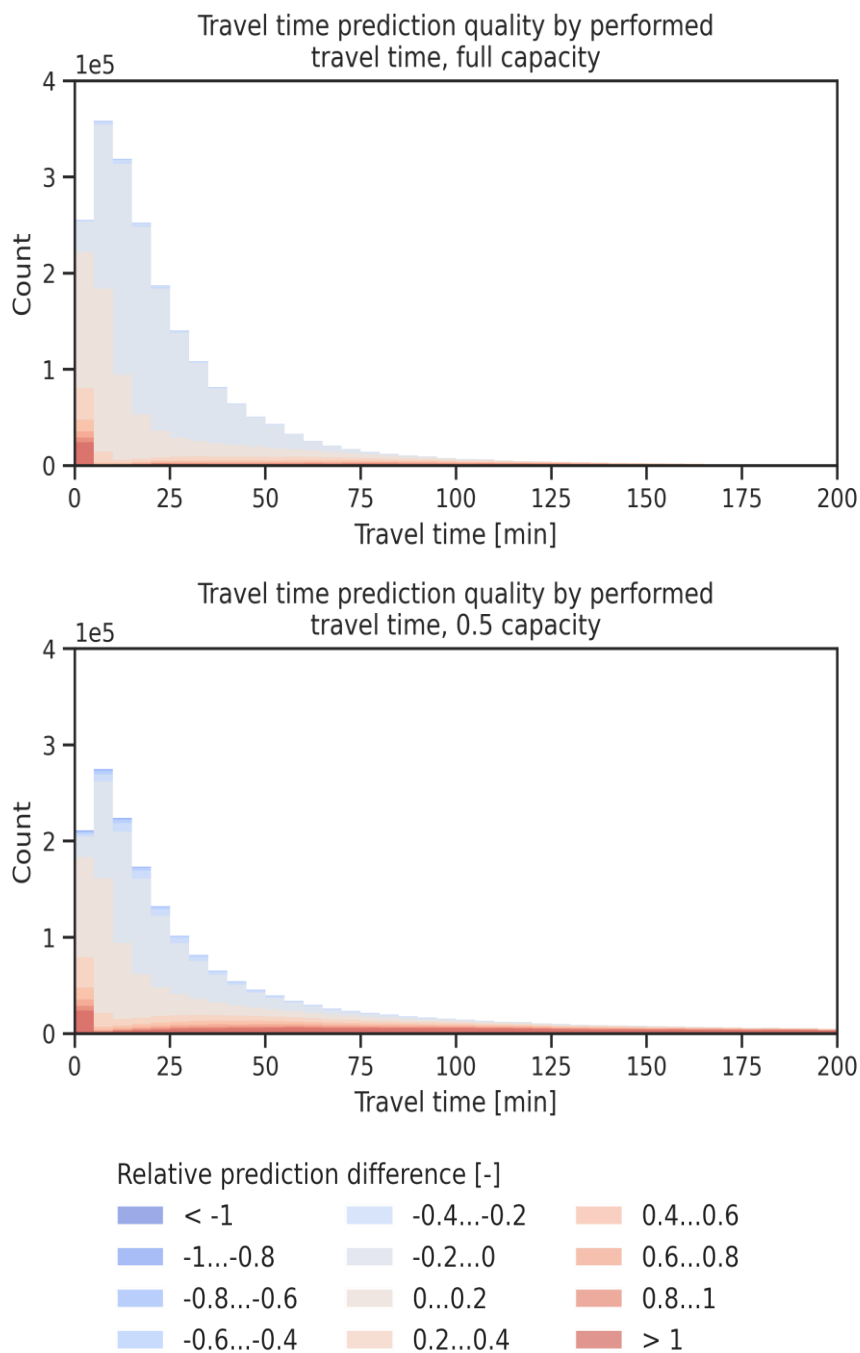


Рисунок А.1 – Розподіл якості прогнозу відносного часу подорожі за часом подорожі

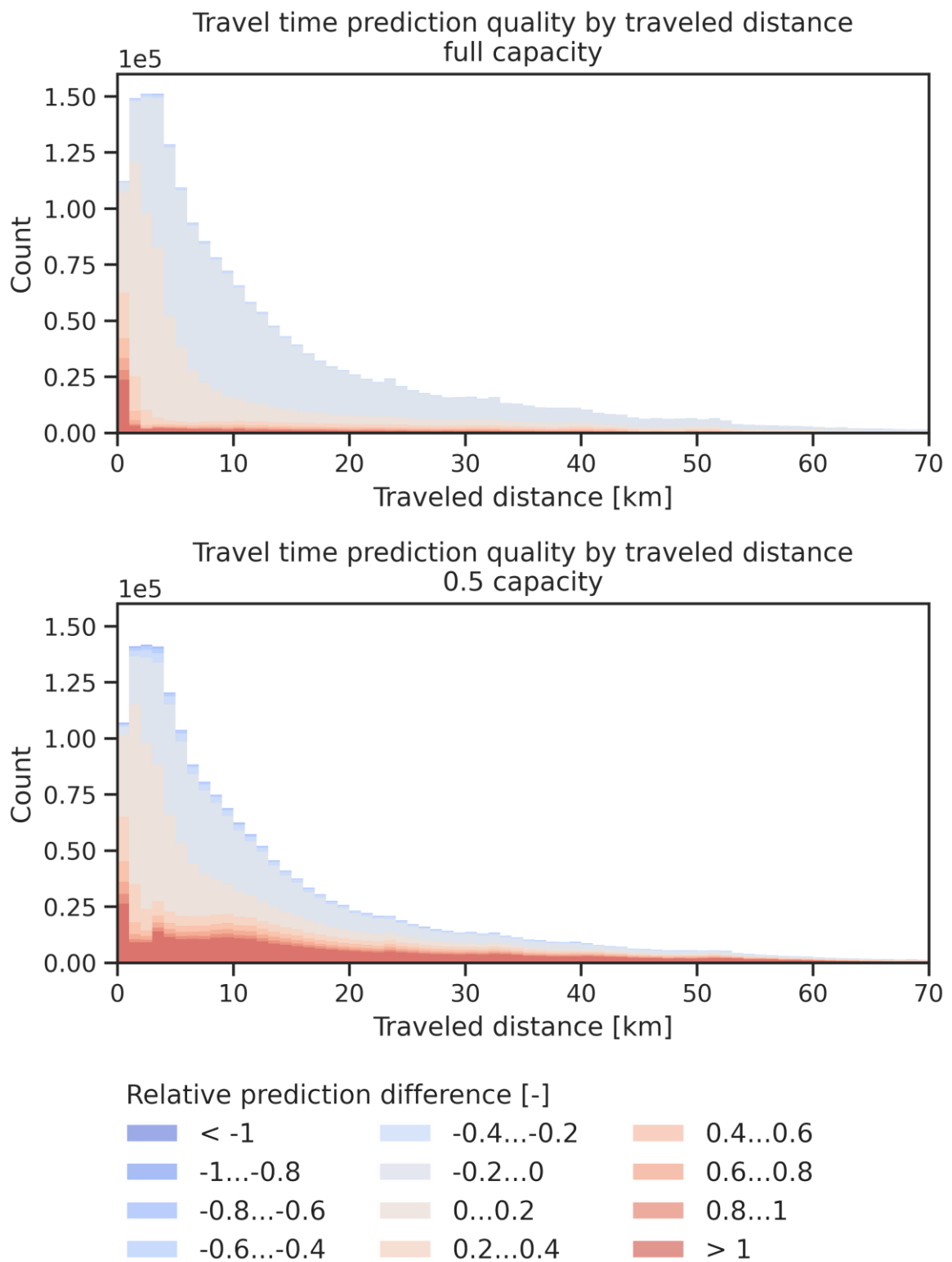


Рисунок А.2 – Розподіл якості прогнозування відносного часу подорожі за відстанню подорожі

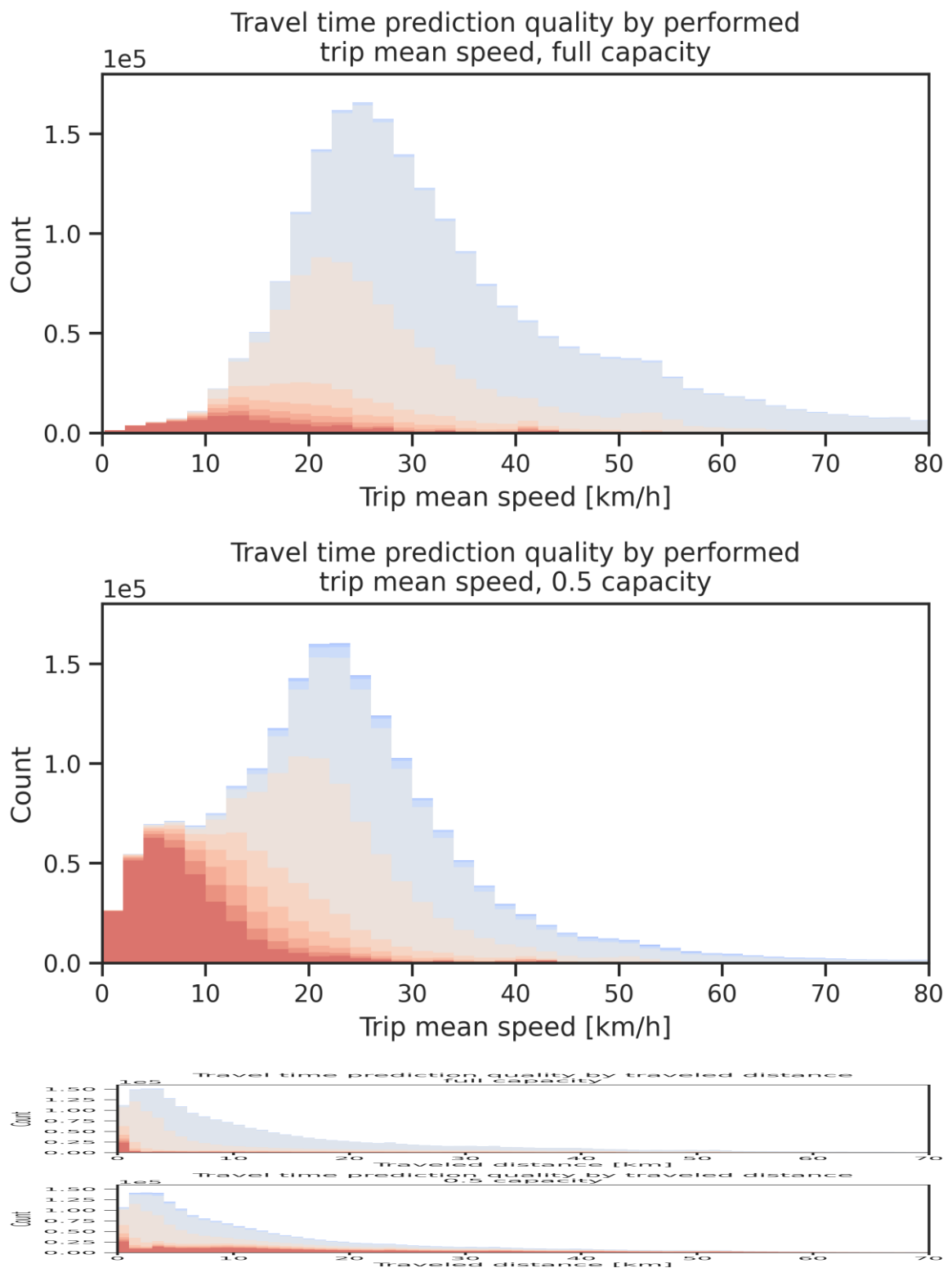


Рисунок А.3 – Розподіл якості прогнозування відносного часу подорожі за середньою швидкістю поїздки