

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

“ Аналіз ефективності кільцевих розв'язок для підвищення безпеки руху  
транспортних засобів ”

ВИКОНАЛА:

Добровольська Анастасія Олегівна

КЕРІВНИК:

Таран Ігор Олександрович

Допущена до захисту

Зав. кафедри АТ

« \_\_\_\_\_ » червня 2024 р.

Ю.А.Монастирський

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

Затверджую:

Зав. кафедри АТ

Ю.А.Монастирський

«    » квітня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ

*Добровольській Анастасії Олександрівні*

1. Тема проекту (роботи) *“Аналіз ефективності кільцевих розв'язок для підвищення безпеки руху транспортних засобів ”* затверджена наказом по університету від «    » квітня 2024 р. №
2. Термін здачі закінченої роботи «    » червня 2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) *матеріали наукових досліджень з літературних джерел за темою роботи*
4. Зміст            розрахунково-пояснювальної            записки:            *Вступ. Характеристика кільцевих розв'язок. Безпека дорожнього руху на кільцевих розв'язках. Сучасні виклики та перспективи кільцевих розв'язок. Висновки. Список використаних джерел*
5. Перелік графічного матеріалу Графіки та діаграми по результатам досліджень.
6. Дата видачі завдання - «    » квітня 2024 р.

Студентка

Добровольська Анастасія Олегівна

Керівник

Таран Ігор Олександрович

## Зміст

Анотація .....	4
1. Вступ.....	5
2. Характеристика кільцевих розв'язок .....	8
2.1. Загальні відомості .....	8
2.2. Типова структура.....	10
2.3. Види кільцевих розв'язок.....	12
3. Безпека дорожнього руху на кільцевих розв'язках .....	18
3.1. Огляд аварій на кільцевих розв'язках.....	19
3.2. Взаємодія з геометричними елементами дизайну .....	24
3.3. Стан дорожнього покриття.....	28
4. Сучасні виклики та перспективи кільцевих розв'язок.....	30
4.1. Екологічні наслідки.....	30
4.2. Автономні транспортні засоби та кільцеві розв'язки .....	32
4.3. Роль симуляції .....	36
5. Висновки .....	39
Список використаних джерел .....	40

## АНОТАЦІЯ

Перетворення перехресть на кільцеві розв'язки показало, що можна досягти достатнього ступеня безпеки дорожнього руху та пропускної здатності. Через низьку швидкість на ділянці кільцевої розв'язки водії, як правило, легше пристосовуються до будь-якого конфлікту з навколишнім середовищем. Незважаючи на внесок у безпеку, елементи конструкції кільцевих розв'язок не є однорідними у світовому масштабі через різну інтенсивність руху, габарити транспортних засобів, ставлення водіїв тощо. Дане дослідження містить короткий огляд внеску кільцевих розв'язок у безпеку дорожнього руху та взаємодію між безпекою та елементами дизайну кільцевих розв'язок. Крім того, опрацьовуються дискусійні питання щодо поточних викликів та перспектив, включаючи результати екологічної оцінки кільцевих розв'язок; їх використання та продуктивність в епоху автономних транспортних засобів, які домінуватимуть у найближчому майбутньому; а також роль та важливість імітаційних досліджень для покращення конструкції та експлуатації кільцевих розв'язок на користь безпечнішого руху транспортних засобів. Критичність кільцевих розв'язок, з точки зору їх геометричного дизайну, а також забезпеченої безпеки дорожнього руху, полягає в тому, що в даний час кільцеві розв'язки використовуються для звичайного автопарку, який буде поступово замінений новими транспортними технологіями. Такі дії безпосередньо впливатимуть на критерії проектування та/або реалізацію дорожньої мережі.

Ключові слова: кільцеві розв'язки; вплив на проектування доріг; безпека дорожнього руху; місткість; стан дорожнього одягу; екологічні аспекти; автономні транспортні засоби

# 1. Вступ

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, дорожньо-транспортні пригоди вважаються однією з восьми основних причин смертності у всьому світі [1]. Найбільш критичні місця та точки конфлікту, які є вразливими до інцидентів та/або аварій зі смертельними наслідками, знаходяться на перехрестях або поблизу них. За даними [2,3], майже кожна четверта аварія зі смертельними наслідками відбувається на перехрестях або поблизу них.

Перетворення перехресть в кільцеві розв'язки показало, що достатній ступінь безпеки дорожнього руху і пропускної здатності може бути досягнутий без необхідності використання світлофорів, що викликають затримки руху [4]. Під час наближення до перехрестя з круговим рухом водії повинні зменшити швидкість, що допомагає їм плавно рухатися на кільцеву розв'язку, об'їжджати її та виїжджати з неї. Типові профілі максимальної, мінімальної та середньої швидкості показані на рисунку 1.

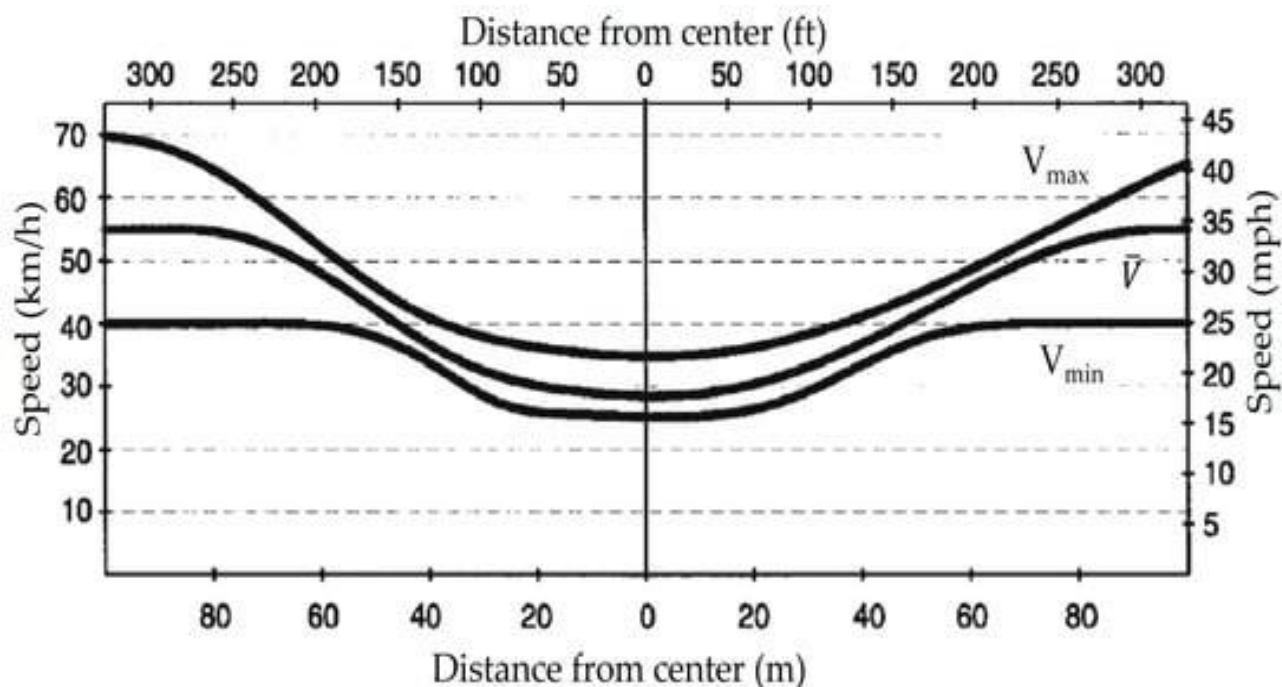


Рисунок 1. Типові профілі швидкості для транспортних засобів, що рухаються поблизу кільцевої розв'язки (адаптовано з [8]).

Нижчі швидкості дозволяють водіям адаптуватися до будь-якого виду конфлікту з навколишніми транспортними засобами, які вже знаходяться на кільцевій доріжці, такими як пішоходи та велосипедисти. Таким чином, перетворення перехресть на кільцеві розв'язки є загальноприйнятим заходом безпеки дорожнього руху в багатьох країнах [2, 5, 6, 7].

Незважаючи на ці позитивні зауваження, елементи конструкції кільцевих розв'язок не є однаково фіксованими у світовому масштабі через різноманітність інтенсивності руху на осях/відрізках кільцевої розв'язки, наявного простору в районі кільцевої розв'язки, що може вплинути на кількість обраних смуг руху, а також місцевих правил дорожнього руху або політики [5, 9, 10]. Найголовніше, що компроміс між виконанням критеріїв безпеки та вантажопідйомності контролює тип конструкції та ефективність кільцевої розв'язки [9]. Загальне правило полягає в тому, що чим більша кількість смуг, що забезпечують паралельний рух транспортних засобів, тим нижчий рівень безпеки перехресть з круговим рухом через високі значення швидкості, які можуть бути досягнуті [11]. Навпаки, односмугові кільцеві розв'язки, які змушують транспортні засоби різко знижувати швидкість, можуть підвищити рівень забезпеченої безпеки дорожнього руху. Крім того, через нижчу швидкість і меншу кількість конфліктних точок кільцеві розв'язки вважаються екологічним типом перехрестя через безпечніші режими руху та зменшення викидів транспортних засобів, які обмежують вплив на забруднення повітря [11, 12].

Ґрунтуючись на цих попередніх зауваженнях, мета цієї роботи полягає в тому, щоб коротко оглянути основні конструктивні особливості кільцевих розв'язок, внесок кільцевих розв'язок у безпеку дорожнього руху, а також надати колекцію дискусійних моментів та думок щодо поточних проблем та майбутніх перспектив для цього типу дорожнього елемента. По-перше, згадується термінологія, пов'язана з кільцевими

розв'язками, а також види кільцевих розв'язок, їх переваги та недоліки. Після цього обговорюються аспекти щодо внеску кільцевих розв'язок у безпеку дорожнього руху та взаємодії з елементами дизайну, а також поточні результати досліджень щодо використання кільцевих розв'язок автономними транспортними засобами (AV) та проблеми, пов'язані з імітаційним аналізом. Нарешті, підсумовуються заключні зауваження цього огляду. Таким чином, основний внесок цієї роботи полягає в тому, щоб показати, що кільцеві розв'язки є основним фактором безпечнішого руху транспортних засобів, за умови, що важливість геометричних елементів дизайну добре зрозуміла як для епохи сучасного автопарку, так і для більш сучасних транспортних технологій.

## 2. Характеристика кільцевих розв'язок

### 2.1. Загальні відомості

Сучасні кільцеві розв'язки були офіційно визнані в 1929 році у Великій Британії. Тісна співпраця між Міністерством транспорту та Інститутом містобудування призвела до розробки проекту керівних принципів, згідно з яким перетин однієї або кількох основних доріг в одній і тій самій точці конфлікту вимагав достатнього простору, щоб рух транспортних засобів міг здійснюватися через циркулюючий режим руху, або ж систему «кільцевої розв'язки» [13].

Слід уточнити, що кільцеві розв'язки відрізняються від звичайних кільцевих перехресть. Транспортні засоби, що рухаються по колу, поступаються тим, хто виїжджає на циклічну траєкторію. У цих випадках водії, які не мають досвіду роботи з круговими перехрестями, дійсно можуть бути збиті з пантелику погано розробленою системою і в кінцевому підсумку можуть відчувати себе в пастці, зіткнувшись з іншими транспортними засобами в колі. Така поведінкова модель може призвести до затримок поїздок, резервного трафіку, зіткнення, травми і навіть смертельні випадки. Навпаки, сучасна кільцева розв'язка, як правило, має меншу площу, ніж традиційне кільце [14]. Важлива відмінність сучасної кільцевої розв'язки від традиційного кругового кола полягає в тому, що кільцева розв'язка вимагає, щоб водії, які хочуть в'їхати на кільцеве перехрестя, поступалися транспортним засобам, які вже об'їжджають кільцеву розв'язку, а не повністю зупинялися [15].

Рівень зрілості процесів проектування та реалізації кільцевих розв'язок не є унікальним. Кілька країн у світовому масштабі прийняли, в тій чи іншій мірі, цей тип дорожнього елемента як для міських, так і для сільських доріг. Загальна тенденція полягає в тому, що кільцеві розв'язки в основному спостерігаються в Європі та Австралії порівняно з Америкою,



де термін «поворотний» найчастіше використовується в ситуаціях, що складаються з великих радіусів [16]. Такі фактори, як варіативність у складі дорожнього руху, габарити транспортних засобів, звички водіння та культура, пояснюють причину, чому не існує консенсусу щодо оптимальної конструкції «ідеальної» кільцевої розв'язки.

Цей факт обґрунтовує, чому дослідження особливостей кільцевої розв'язки, пов'язаних з оптимальним проектуванням, питаннями безпеки, моделями аварій, поведінкою транспортних потоків, внеском у стале управління дорожнім рухом тощо, постійно відроджуються, щоб можна було досягти оптимізації та ефективності проектування [14,17,18]. Крім того, епоха переходу до нових типів аудіовізуальних засобів остаточно відкриє нові дослідницькі можливості для кільцевих розв'язок [11].

## 2.2. Типова структура

Типові елементи конструкції на кільцевій розв'язці, представлений на рис.2 включають:

- Радіуси кривих входу і виходу; Вибір малих значень для цих радіусів гарантує, що водії легко спрямовуються в перехідну зону до і після кільцевої розв'язки. Таким чином, цей компонент найбільше пов'язаний з аспектом безпеки.
- Довжина раструбу, тобто область підходу, яка розширюється. Зазвичай на такій довжині додається додаткова смуга, щоб можна було розмістити більше транспортних засобів. Таким чином, зменшуються черги на дорогах і дозволяється більш якісний транспортний потік [19]. Цей компонент найбільше пов'язаний з аспектом пропускної здатності кільцевої розв'язки.
- Центральні та розгалужувальні острівці (якщо є) зазвичай є бетонними острівцями, які підняті порівняно з поверхнею тротуару. Вони можуть поліпшити як відхилення транспортних засобів, виконуючи роль орієнтира, так і пішохідний потік через поперечні зони.

Необхідно також визначити як діаметр центрального острова, так і теоретичний діаметр вписаного кола. Останній є найбільшим колом, який можна вписати в контур з'єднання.

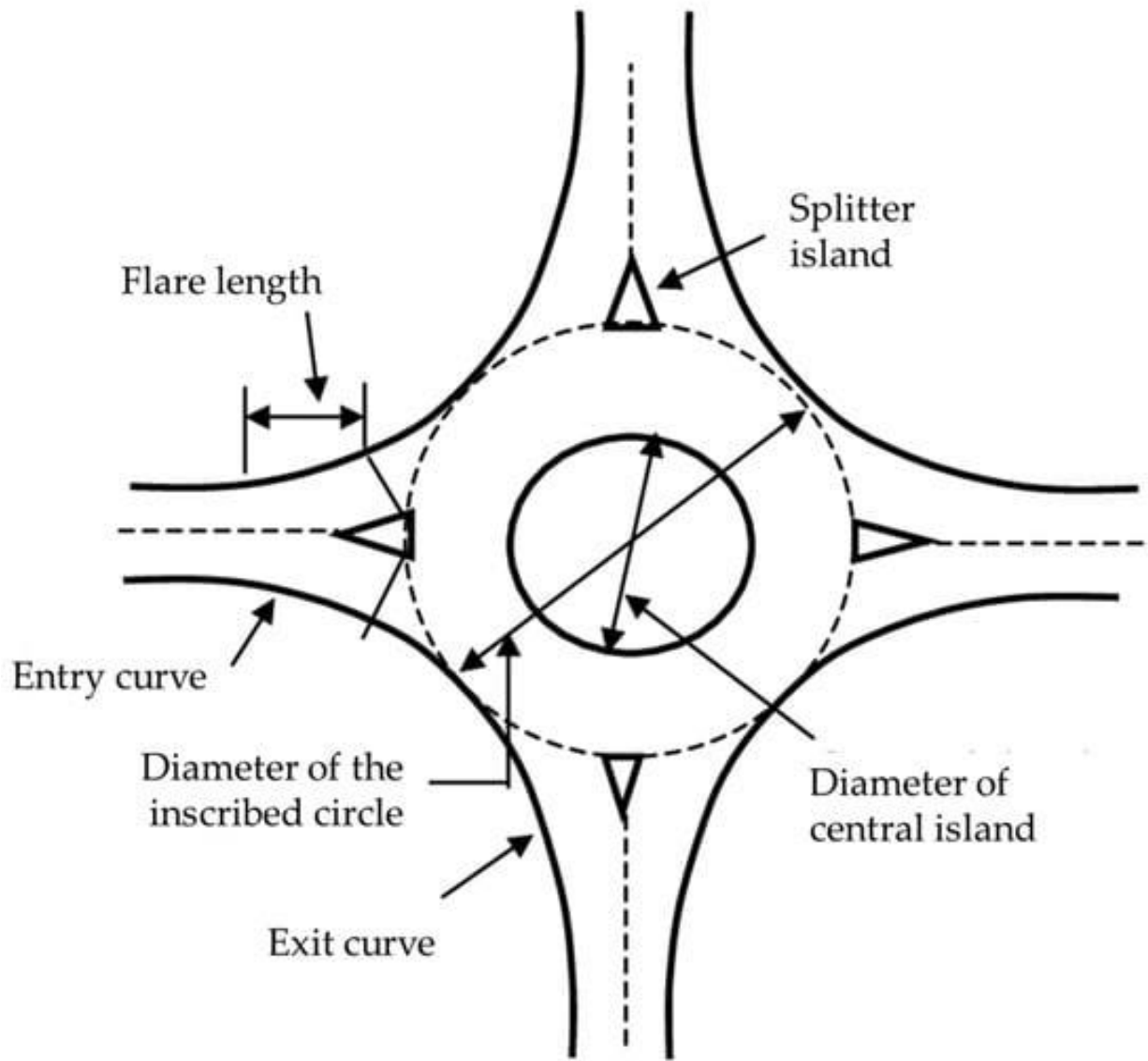


Рисунок 2. Основні елементи типової кільцевої розв'язки.

## 2.3. Види кільцевих розв'язок

Залежно від розміру та кількості смуг руху, кільцеві розв'язки поділяються на три категорії (рис. 3): (а) міні-кільцеві розв'язки, (б) односмугові кільцеві розв'язки та (с) багатосмугові кільцеві розв'язки. Перший тип підходить для міських районів і доріг з невеликою інтенсивністю, де зазвичай спостерігаються більш низькі швидкості. Центральний острів має порівняно невеликий діаметр. Міні-кільцева розв'язка відповідає односмуговій кільцевій дорозі з повністю прохідним центральним островцем, щоб потенційні важкі транспортні засоби могли використовувати всю доступну територію.

Односмугові кільцеві розв'язки складаються з однієї смуги для в'їзду та виїзду на всіх ділянках та однієї циркуляційної смуги. У таких випадках центральний острівець має більший діаметр, що дозволяє досягти більш високих робочих швидкостей. Крім того, центральний острів непрохідний і включає в себе фартух.

Нарешті, багатосмугові кільцеві розв'язки в основному застосовуються в сільській місцевості або навіть у приміських районах, де потрібно розмістити більшу кількість транспортних засобів. На шляху кровообігу транспортні засоби рухаються поруч, і принаймні один в'їзд має дві або більше смуг руху.

Всі перераховані вище види відносяться до категорії сучасних кільцевих розв'язок. Інша класифікація кільцевих розв'язок враховує форму центрального острова [20]. З цієї точки зору можна виділити наступні категорії (рис. 4): (а) сучасні (циклічні) кільцеві розв'язки, (б) еліптичні та (в) турбо-кільцеві розв'язки. На еліптичній кільцевій розв'язці співвідношення діаметрів для мажорного і мінорного підходів зазвичай встановлюється рівним 2:1, що узгоджується з найбільш поширеними методологіями проектування [21].



Рисунок 3. Основні типи кільцевих розв'язок: (а) міні-кільцева розв'язка, (б) односмугова кільцева розв'язка та (с) багатосмугова кільцева розв'язка (з двома смугами руху).

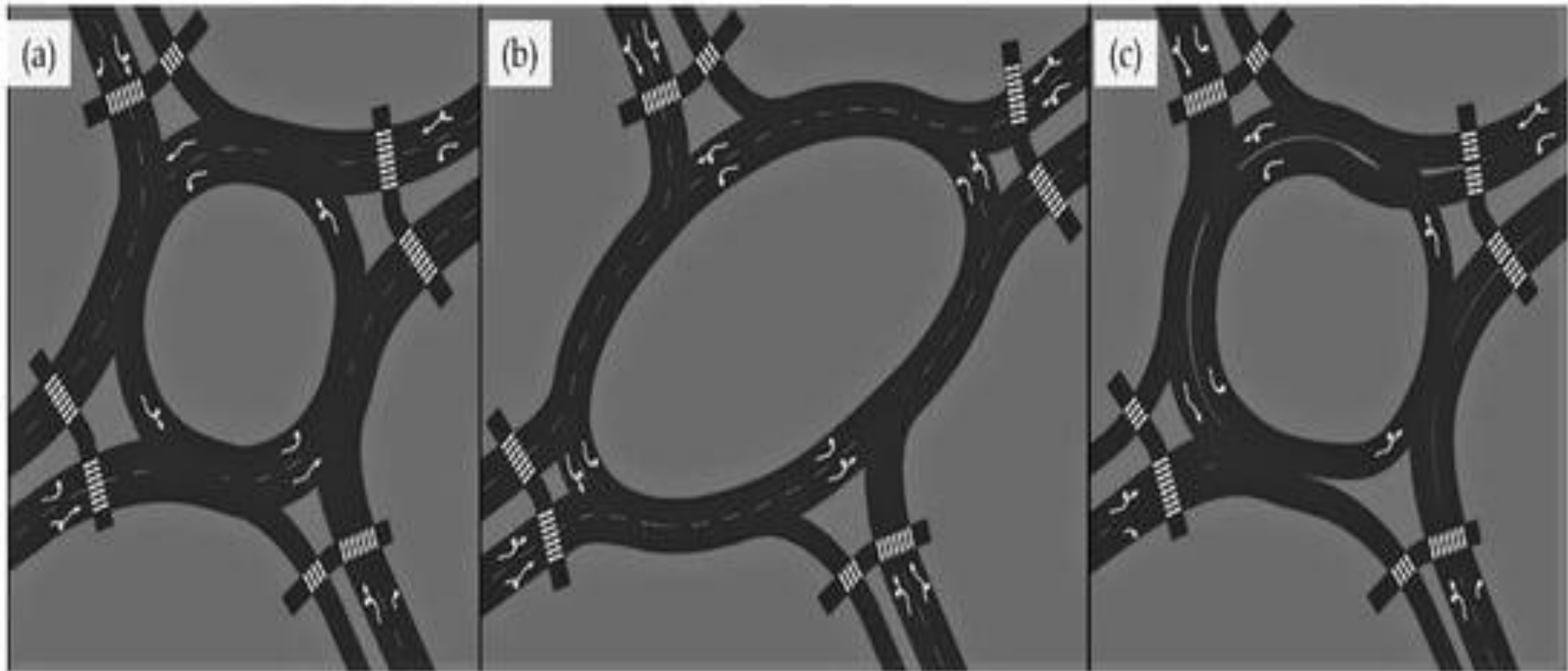


Рисунок 4. (а) Типова сучасна кільцева розв'язка, (б) еліптична кільцева розв'язка та (с) турбокільцева розв'язка (адаптована з [20]).

Порівняльний багато параметричний аналіз показував, що еліптичні кільцеві розв'язки більш ефективні для тих випадків, коли очікуються затори на дорогах [20]. Уникнувши цього, можна досягти більш високих швидкостей, що призведе до збільшення тяжкості зіткнення на еліптичних кільцевих розв'язках, навіть якщо частота зіткнень підтримується на низькому рівні [20,22].

Перш ніж вводити поняття турбокільцевої розв'язки, корисно уточнити, що односмугова кільцева розв'язка перевершує багатосмугову з точки зору безпеки через меншу швидкість. Однак вони не можуть підтримувати більші обсяги трафіку (тобто насичення). Навпаки, багатосмугова кільцева розв'язка має кращу пропускну здатність, але може не вистачати безпеки руху. Виходячи з цього протиріччя, турбокільцева розв'язка є відносно новим типом, який забезпечує спіральний потік транспорту, що змушує водіїв вибирати напрямок перед в'їздом на кільцеву розв'язку, тим самим підвищуючи рівень як безпеки, так і пропускну здатності [23,24].

Перша спроба побудувати турбокільцеву розв'язку була помічена в Нідерландах у 2000 році, і незабаром вона стала настільки популярною і серед інших країн, що за нею послідувала розробка керівних принципів і рекомендацій з проектування на початку 2000-х років [25,26]. Виходячи з їхньої концепції, розгортання турбокільцевих розв'язок привернуло все більше дослідницьких інтересів щодо взаємодії між геометричними конструктивними особливостями та аспектами дорожнього руху. Наприклад, дослідження Dabiri et al. [23], засноване на мікромоделюючих сценаріях з триногими і чотириногими кільцевими розв'язками, показало, що збільшення діаметра центрального острова може викликати затори і затримки на дорогах, тим самим знижуючи рівень сервісу, що надається. Навпаки, було виявлено, що збільшення діаметра позитивно впливає на продуктивність турбокільцевої розв'язки з точки зору потужності. У

таблиці 1 наведені характеристичні значення для типових конфігурацій чотириногих кругових кільцевих розв'язок, що застосовуються в США відповідно до [27].

Інші дослідники досліджували різні конструкції транспортних засобів, щоб при проектуванні кільцевих розв'язок враховувалися їх протоптані траєкторії [24]. У зв'язку з різними габаритами транспортних засобів, які можуть використовувати кільцеву розв'язку, і необхідністю вибору напрямку перед виїздом на кругообігові шляхи, будуть розглянуті окремі шляхи транспортних засобів. У порівнянні з більш традиційними типами кільцевих розв'язок, існує достатньо доказів необхідності (i) збільшення ширини циркуляційних доріжок в сучасних типах, (ii) збільшення радіусів в'їзду і виїзду, і (iii) зміни розташування острівця сепаратора [28,29]. Дослідження принципів їх дизайну все ще тривають.



Таблиця 1.

Характеристика чотириногих кругових кільцевих розв'язок (адаптовано з [27]).

Параметри конфігурації	Міні-Кільцевий	Міський Односмуговий	Міський Двосмуговий	Сільський Односмуговий	Сільський Двосмуговий
Типовий щоденний обсяг обслуговування (авто/день)	10 000	20 000	>100 000	20 000	>80 000
Типовий діаметр вписаного кола (м)	13–25	30–40	45–55	35–40	55–60
Рекомендована максимальна початкова проектна швидкість (км/год)	25	35	40	40	50
Максимальна кількість в'їзних смуг	1	1	2	1	2
Конфігурація розділювального острівця	Піднятий, якщо можливо, зріз пішохідного переходу, якщо піднятий	Піднятий з пішохідним зрізом	Піднятий з пішохідним зрізом	Піднятий і розширений з пішохідним зрізом	Піднятий і розширений з пішохідним зрізом

### 3. Безпека дорожнього руху на кільцевих розв'язках

Правильно спроектовані та розміщені в мережі доріг, кільцеві розв'язки охоплюють багато внесків порівняно з перехрестями з сигналізацією. Найважливішим компонентом дорожньої мережі є здатність підтримувати певну кількість транспортних потоків (тобто пропускну здатність) і забезпечувати безпечний рух усіх транспортних засобів (тобто безпеку). У міжнародній літературі існує загальна згода щодо того, що кільцеві розв'язки спрямовані на посилення обох вищезгаданих параметрів [5,12,19,30]. Причина проста: у порівнянні зі звичайними перехрестями усуваються або принаймні змінюються конфліктні точки, а водії змушені знижувати швидкість, тому стає набагато простіше контролювати свою потенційну участь в інциденті [19]. Звичайно, вибір конкретного типу кільцевої розв'язки з відповідними значеннями її геометричних елементів спрямований на досягнення балансу між місткістю та безпекою. На останнє, безумовно, впливають геометричні елементи дизайну, сприйняття водіями небезпеки (пов'язане з їхнім досвідом та ходовими якостями) та стан поверхні дорожнього покриття певною мірою [31].

### 3.1. Огляд аварій на кільцевих розв'язках

У місцях в'їзду на кільцеву розв'язку автомобілі повинні поступатися зустрічному транспорту, а не зупинятися повністю [15]. Як наслідок, на цьому перехресті може бути менше очікування руху транспорту та більш плавний перехід на цьому перехресті. Фактично, було задокументовано, що перетворення сигналізованого перехрестя на кільцеве призводить до зменшення затримок руху на 89% та зменшення зупинок транспортних засобів на 56% [32]. Що стосується стовпа безпеки кільцевих розв'язок, [33] повідомили про зниження на 38% смертельних травм і важких аварій через нижчу швидкість транспортних засобів. У цьому ж контексті [34] повідомили про середній темп зниження на 34%, 30% і 38% загальної кількості нещасних випадків з травмами, нещасних випадків з легкими травмами та нещасних випадків із серйозними травмами відповідно. Також в інших місцях згадувалися показники зниження на 65% для кількості смертельних випадків і 40% для травм [5,35].

Однак вплив кільцевих розв'язок на кількість аварій, не пов'язаних з травмами, ще належить з'ясувати [35]. У міжнародній літературі сходяться на думці про збільшення загальної кількості аварій низького ступеня тяжкості. [36] підтверджують, що, незважаючи на внесок кільцевих розв'язок у безпеку дорожнього руху, аварії все одно трапляються. Дійсно, повідомлялося про навіть консервативне зростання на 12% [33], але темпи зростання демонструють певну мінливість. [2] спільно вивчили вплив кільцевих розв'язок на рівень безпеки дорожнього руху і повідомили, що, незважаючи на переваги кільцевих розв'язок, дорожньо-транспортні пригоди все одно трапляються. Помітно, що частота аварій на кільцевих розв'язках вища в США порівняно з Європою та Австралією.

З одного боку, кількість тяжких смертей і травм, ймовірно, обмежена, ймовірно, через зниження швидкості транспортних засобів на кільцевих розв'язках, але еволюційна тенденція аварій з травмами або аварій,

пов'язаних з пошкодженнями (без травм) є однозначною. Кількість доступних смуг має вирішальне значення. [37] зазначили, що односмугові кільцеві розв'язки знизили загальний рівень аварій на 18%, тоді як двосмугові кільцеві розв'язки збільшили рівень аварійності на 62%. Коефіцієнт пошкодження зріс на 2% та 60% для односмугових та двосмугових кільцевих розв'язок відповідно. Зовсім недавно [38] також спостерігав значне збільшення кількості аварій лише з пошкодженням майна (PDO) на багатосмугових кільцевих розв'язках. Таким чином, чим більша кількість смуг руху, тим вищий ризик легких аварій без травм.

Протягом останніх десятиліть проводилися дослідження, присвячені моделям зіткнень на кільцевих розв'язках. Зокрема, [39] розглянули серйозність аварій на кільцевих розв'язках, щоб побачити, які елементи є найважливішими. Дослідники зібрали дані про 1491 аварію на 148 кільцевих розв'язках у Фландрії, Бельгія. Для оцінки даних вони використовували ієрархічну біноміальну логістичну регресію та логістичну регресію. Отримані дані вказують на те, що вища частота та тяжкість нещасних випадків були спричинені наявністю вразливих користувачів. Крім того, цей ефект посилювався протягом ночі через недостатнє освітлення вулиць [39,40]. [36] також досліджували чотири домінуючі типи аварій, використовуючи дані міських кільцевих розв'язок у Бельгії. До них відносяться зіткнення ззаду, зіткнення з вразливими учасниками дорожнього руху, зіткнення з в'їздом-циркулюючим рухом і зіткнення одного транспортного засобу з центральним островом. З'ясувалося, що близько 80% аварій сталися на смугах в'їзду (тобто на зоні під'їзду з круговим рухом). Учасниками дорожнього руху, які виявилися схильними до ризику потрапити в ДТП з серйозними травмами, були велосипедисти та водії мопедів.

Незалежно від причини аварій, збільшення кількості менш серйозних інцидентів може призвести до негативного сприйняття громадськістю

переваг обхідних шляхів [33]. Очікується, що це вплине на (i) молодих водіїв через відсутність досвіду водіння та реакції в складних умовах, (ii) літніх водіїв та (iii) пішоходів у міських районах. На думку літніх водіїв, їхня вразливість полягає в тому, що дедалі складніша дорожня мережа підвищує попит на їхню адаптивність. Іншими словами, літні водії відчують труднощі в регулюванні свого робочого рівня поведінки за кермом [41].

Що стосується пішоходів, то випадковий перехід на кільцевій розв'язці остаточно обмежує його можливості як з точки зору управління пропускнуою спроможністю транспортного засобу, так і з точки зору безпеки пішоходів [42]. [43] визнали, що дослідження безпеки на кільцевій розв'язці зазвичай зосереджуються на водіях і пересуванні транспортних засобів і, на жаль, ігнорують важливість безпеки для вразливих користувачів, включаючи пішоходів і велосипедистів. Вирішенням цієї проблеми може стати покращення умов інфраструктури, наприклад, правильна розмітка дорожнього одягу (рис. 5). Справді, у нещодавньому дослідженні потенціал переміщення пішохідних переходів перед в'їздом на кільцеву розв'язку був прокоментований як внесок у безпеку дорожнього руху у випадку міських кільцевих розв'язок [43].

Важливість правильної розмітки тротуару та покращених вказівних знаків (Рисунок 6) на кільцевій розв'язці також мають вирішальне значення для кращого управління напрямком руху транспортного засобу на шляху кровообігу, особливо для молодих та літніх водіїв [33]. Цей аспект стає ще більш помітним для випадків великих кільцевих розв'язок, які можуть імітувати концепцію дорожніх кіл. У зв'язку з цим може виникнути проблема обмеженої інформації про напрямок руху для водіїв. [44] стверджують, що в таких випадках водіям потрібно більше часу, щоб визначити з'їзд, яким вони хочуть слідувати, тим самим впливаючи на пропускну здатність і безпеку перехрестя.



Рисунок 5. В'їзд на кільцеву розв'язку та розмітка для пішоходів.

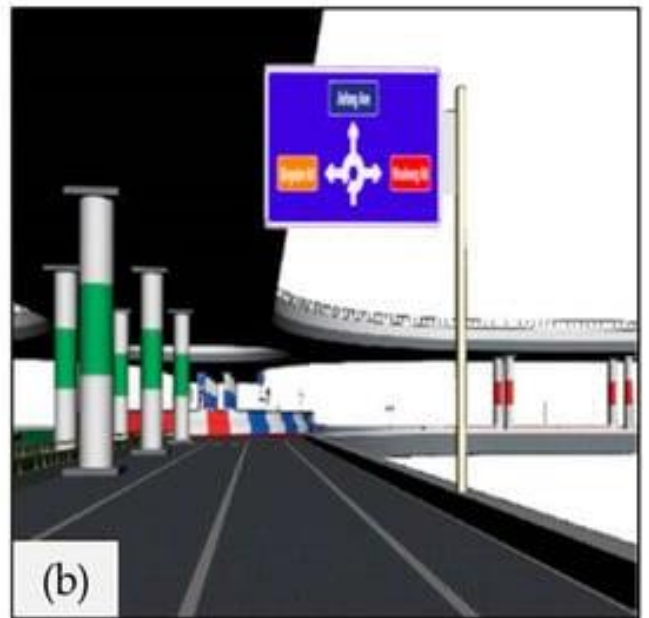


Рисунок 6. (a) Огляд зони під'їзду до кільцевої розв'язки, та (b) теоретичне розташування вказівного знаку на користь підвищення безпеки дорожнього руху.

Наслідуючи приклад рисунку 6, можна очікувати, що правильно підібрані позиції для пішохідних переходів разом із покращеними вказівними знаками можуть допомогти водіям у міських районах точно визначити з'їзд, яким вони хочуть слідувати, тим самим скорочуючи час у дорозі, необхідний для проїзду по кільцевій розв'язці [44].

## 3.2. Взаємодія з геометричними елементами дизайну

До теперішнього часу багато досліджень перехресть з круговим рухом показали, що, незважаючи на високий рівень безпеки, визнаний для даного типу перехресть, існує кілька факторів, що впливають на поведінку водіїв [31]. Геометрія кільцевої розв'язки є основним фактором, що впливає на поведінку водіїв. Елементи конструкції, включаючи ширину в'їзду та з'їзду, ширину кільцевої дороги, радіус в'їзду, кут відхилення тощо, можуть остаточно вплинути на те, як водій регулює свою швидкість та ходові якості під час трьох критичних типів маневрів: (i) на в'їзді, (ii) на шляху кровообігу та (iii) на з'їзді. Це означає, що траєкторія повороту транспортних засобів є питанням, яке потребує досліджень з метою постійного вдосконалення конструкції кільцевих розв'язок. У таблиці 2 представлена сукупність елементів геометрії кругової розв'язки, пов'язаних з подіями дорожньої пригоди.

Таблиця 2.

Залежність дорожньо-транспортних пригод від геометричних елементів конструкції (адаптовано з [45]).

Параметр	Тип ДТП	Сприяючий фактор
Радіус наближення до входу та виїзду	Збіг з дороги/в'їзд–циркуляція/виїзд–циркуляція	Швидкість автомобіля або кут відхилення
Діаметр вписаного кола	Вхід–циркуляція/виїзд–циркуляція/задній кінець/боковий рух	Довжина ділянки переплетення/взаємодії між транспортними засобами, що циркулюють, і транспортними засобами, що в'їжджають
Кількість ніжок	Задні/вхідні–циркуляційні	Збільшення конфліктних точок
Кількість смуг руху та ширина смуги під'їзду	Виїзд–рух/зад/бік	Збільшення конфліктних точок/відстані між паралельними транспортними засобами



Крім того, в [46] була розроблена методика оцінки і генерації варіацій траєкторії руху транспортних засобів в результаті геометричних елементів на перетинах кіл. Експериментально було помічено, що траєкторії транспортних засобів, що повертають праворуч, більш чутливі до швидкості та кута повороту, тоді як траєкторії транспортних засобів, що повертають ліворуч, додатково чутливі до радіусу повороту перехрестя.

Як відомо, найбільш частим випадком використання кільцевих розв'язок є міські дороги [43,47]. [48] визначили причини аварії та оцінили заходи безпеки для індійських міських кільцевих розв'язок з урахуванням геометричних елементів дизайну. Вони виявили, що збільшення ширини кільцевої проїжджої частини, кута з'їзду, кута до наступного відрізка та ширини острівця спліттера пов'язане зі зниженням частоти аварій на під'їздах до кільцевих розв'язок. [49] координували польові дослідження, щоб дослідити реальний рух транспортних засобів на кількох міських кільцевих розв'язках. Їх мета полягала в тому, щоб співвіднести швидкість транспортних засобів для заданої геометричної конструкції кільцевої розв'язки і ймовірність зіткнення.

В іншому дослідженні також було підкреслено важливість геометричного дизайну як фактора, що сприяє аварії на міських кільцевих розв'язках [50]. Виявлено фактори, пов'язані з неправильним оформленням перехресть кругового руху, а отже, не пов'язані зі ставленням водіїв та станом транспортного засобу. Радіус відхилення і кут відхилення вважалися найбільш критичними. Низькі кути в'їзду змушують водіїв займати місце злиття, де вони повинні або дивитися через плече ліворуч, або намагатися справжнє злиття за допомогою дзеркал. В останньому випадку з'являються проблеми із зором, оскільки водії можуть знехтувати лінією здачі та досягти високої швидкості в'їзду, що суперечить перевагам кільцевих розв'язок щодо безпеки дорожнього руху. З іншого боку, низькі значення кута відхилення сприяють відмовам у поступці дорогою,

збільшенню швидкостей проїзду та зниженню цих швидкостей іншими транспортними засобами, розташованими в конфліктних точках, як при подальшому заходженні на посадку праворуч [50].

Ґрунтуючись на глибокому статистичному аналізі сприйняття користувачами геометричних елементів дороги, складається враження, що водії віддають перевагу простим конфігураціям кільцевих розв'язок, зокрема односмуговим циркуляційним шляхам [31]. Крім того, завдяки взаємодії між розміткою, знаками та геометричним дизайном, можна з упевненістю стверджувати, що покращення розмітки, тобто повних вертикальних та горизонтальних знаків, може значно підвищити рівень безпеки дорожнього руху на об'єктах, де недоліки геометричного дизайну дійсно є причиною аварій та інцидентів [44,50]. Іншими словами, чітке керівництво може попередити водіїв про потенційні чорні плями геометрії кільцевої розв'язки.

Після цього, при заданій геометрії кільцевої розв'язки і заданому наборі доступної розмітки, транспортні засоби, як правило, розвивають певну швидкість. Відповідні дослідження продемонстрували сильний зв'язок між кількістю смуг руху, шириною в'їзду та швидкістю з'їзду [51,52]. Більша ширина в'їзду та багатосмугові кільцеві розв'язки змушують водіїв збільшувати середню швидкість транспортного засобу на в'їзних ділянках [52]. Крім того, також повідомлялося про позитивну кореляцію між швидкістю та діаметрами як вписаного кола, так і центрального острова (рис. 2). [52] розробили регресійну модель для прогнозування швидкості транспортного засобу на основі радіуса циркуляційної смуги. Звичайно, швидкість транспортного засобу може бути додатковим результатом сприйняття, досвіду та віку водія, а також статусу транспортного засобу, як-от його вік, експлуатаційні характеристики, стан гальм тощо. Однак метою роботи було головним

чином дослідження взаємодії між швидкістю та геометричними особливостями конструкції.

Максимально точна оцінка швидкості є ітераційним процесом обхідного проектування [51]. Після того, як характерні швидкості на кільцевій розв'язці відомі, за допомогою вимірювань або оцінок на основі моделей, можна вдосконалити конструкцію або переробити кільцеву розв'язку, а також використовувати більш точні імітаційні моделі для оцінки того, як ці кільцеві розв'язки впливають на дорожні умови та рівень безпеки дорожньої дороги в дорожній мережі. Це гарантує більш стійке управління вуличною мережею, що дозволяє оцінити, як кожен компонент впливає на час поїздки та дорожні умови. Це дуже важливо для достовірного визначення проектних параметрів на етапі планування доріг і при виборі довгострокової стратегії підвищення безпеки дорожнього руху і управління транспортними потоками [52].

### 3.3. Стан дорожнього покриття

З точки зору поверхні дорожнього покриття, найбільш впливовим параметром є опір ковзанню або сила тертя, яка розвивається в районі шини-тротуару. За умови, що була досягнута належна якість будівництва шарів дорожнього одягу та матеріалів [53,54], основна увага зазвичай приділяється функціональності дорожнього одягу [55]. Менша кількість зупинок транспортних засобів відповідає ненульовій швидкості, внаслідок чого колія, штовхання або інші серйозні неприємності, які зазвичай спостерігаються на простих перехрестях, як правило, відсутні за умови правильної розробки стійких до зсуву асфальтобетонних сумішей.

З іншого боку, існує достатньо літературних доказів того, що текстура поверхні та опір ковзанню вважаються факторами, що сприяють дорожнім інцидентам, оскільки вони можуть взаємодіяти з заносом транспортних засобів, що впливає на безпеку учасників дорожнього руху [56,57]. Особливість кільцевих розв'язок полягає в тому, що через циркуляційні шляхи для забезпечення стійкості автомобіля потрібне підвищене навантаження на бічне тертя. Однак це може бути врівноважено низькою швидкістю транспортних засобів, особливо на односмугових кільцевих розв'язках. Також слід висвітлити вплив погодних умов; Дощові або зледенілі поверхні, як правило, знижують рівень опору ковзанню. Крім того, відомо, що несприятливі погодні умови тісно пов'язані зі збільшенням кількості аварій, які можуть перешкоджати безпеці дорожнього руху.

Крім того, повідомлялося, що навіть для сухої поверхні наявність масел або інших забруднювачів на асфальті спричиняє дорожньо-транспортні пригоди на перехрестях з круговим рухом [50]. Таким чином, часті візуальні огляди та/або заходи тертя можуть допомогти зберегти стан дорожнього покриття кільцевої розв'язки на прийнятному рівні. Інші типи факторів, пов'язаних з дорожнім покриттям, включають наявність дефектів

поверхні, таких як вибоїни [50], які можуть обмежити експлуатаційні можливості транспортних засобів, що рухаються.

## 4. Сучасні виклики та перспективи кільцевих розв'язок

### 4.1. Екологічні наслідки

Вплив дорожнього руху на навколишнє середовище добре відомий і зростає протягом останніх десятиліть, створюючи проблеми як для автомобільної промисловості, так і для інженерів дорожнього руху. Викиди транспортних засобів залежать від загальної кількості транспорту, типу контролю перехрестя (наприклад, сигналізація, кільцева розв'язка тощо), манери водіння, віку транспортного засобу та стану транспортного засобу [58].

Дизайн сучасних кільцевих розв'язок став домінуючим у багатьох європейських країнах у 1980-х роках [59]. За останні 30 років у Європі спостерігаються часті будівельні роботи. Згідно з правилом «поступливості до в'їзду», повні зупинки транспортного засобу, що відповідають різким уповільненням і повторним прискоренням, обмежуються. Чим більший час зупинки, тим більше витрачається палива. Таким чином, необхідне паливо зменшується під час в'їзду на кільцеву розв'язку з додатковим покращенням якості повітря, окрім внеску в безпеку дорожнього руху.

З цієї точки зору, кільцеві розв'язки допомагають досягти цілей сталих видів транспорту, згідно з якими охороняється навколишнє середовище та зберігаються ресурси з урахуванням суспільних потреб, вигод та витрат [60]. [61] пояснюють, що досягнення цілей сталого розвитку при плануванні, проектуванні та управлінні дорожньою мережею може бути забезпечено шляхом включення кільцевих розв'язок в мережу проектування доріг. Зазначається, що сучасні кільцеві розв'язки перевершують традиційні перехрестя з сигналізацією з точки зору екологічної стійкості, оскільки спостерігається скорочення часу простою, а

також швидкостей прискорення та уповільнення, які безумовно сприяють позитивній тенденції рівня викидів забруднюючих речовин та норм споживання палива [62,63]. Відомо також, що рівень шумового забруднення знижується поблизу кільцевих розв'язок [61]. Повідомлені середні показники скорочення викидів чадного газу та діоксиду вуглецю приблизно на 16–60% та зменшення шуму на 1–4 дБ свідчать на користь сталого потенціалу кільцевих розв'язок [61,63,64].

Однак перед прийняттям рішення про тип нової кільцевої розв'язки під час техніко-економічного обґрунтування нового проекту необхідно ретельно врахувати екологічні міркування. Наприклад, детальні польові дослідження заходів щодо викидів забруднюючих речовин на міських турбокільцевих розв'язках не дали значного поліпшення стану навколишнього середовища порівняно зі звичайними [12]. Таким чином, баланс між усіма окремими аспектами може призвести до оптимізованого дизайну та функціональності кільцевих розв'язок. Розгляд екологічних наслідків кільцевих розв'язок, безумовно, є відкритим питанням, яке потребує додаткових досліджень.

Нарешті, не слід забувати про естетичний внесок кільцевих розв'язок. Кільцеві розв'язки, серед іншого, розташовані в критичних місцях міста (тобто з пам'ятниками або без них); Таким чином, вони також можуть служити орієнтиром у місті [65]. Вони також можуть бути побудовані на кордоні двох доріг різної класифікації або ділянок з різними функціями, щоб водії були належним чином попереджені про необхідність регулювання швидкості. У цьому контексті кільцеві розв'язки розглядаються як елемент організаційного ландшафту. Отже, крім своїх основних функцій, кільцева розв'язка з відповідним центральним острівним розташуванням є естетичним і легко впізнаваним місцем, що характеризує архітектуру тутешньої території [66].

## 4.2. Автономні транспортні засоби та кільцеві розв'язки

Взаємозв'язок між кільцевими розв'язками та режимом автономного водіння, який, як очікується, стане все більш поширеним у найближчому майбутньому, є ще одним вартом уваги спостереженням. Важливо зазначити, що більшість громад у всьому світі в даний час борються з переходом до майбутнього автономного водіння, в рамках якого очікуються нові моделі мобільності. Рух вантажівок у колоні, підключені автономні транспортні засоби (CAV) та автономні транспортні засоби (AV) – це терміни, які як науковці, так і практики починають використовувати все частіше. Наукове співтовариство, промисловість і технології автоматизації співпрацюють для підвищення ефективності переміщення людей і продуктів. Впровадження аудіовізуальних засобів призвело до розробки нових досліджень, що вивчають модифікації дорожньої розмітки, ширини смуги руху, пропускної здатності проїжджої частини та елементів конструкції дорожнього одягу [67, 68, 69].

Дослідження ролі аудіовізуальних засобів у стані існуючої дорожньої інфраструктури надає унікальну можливість для спільноти транспортних інженерів. Серед іншого, внесок AV у пропускну здатність та безпеку кільцевої розв'язки привернув багато дослідницьких інтересів [11]. Автономне водіння на перехрестях з круговим рухом вимагає розуміння складних взаємозв'язків між особливостями конструкції дороги, правилами дорожнього руху та виконуваними маневрами різних учасників дорожнього руху [70]. Згідно з рисунком 8, у повністю автономному середовищі водіння транспортного засобу Інтернет речей відповідатиме за будь-які маневри прийняття рішень, де поведінка водія та сприйняття водія не впливатимуть.



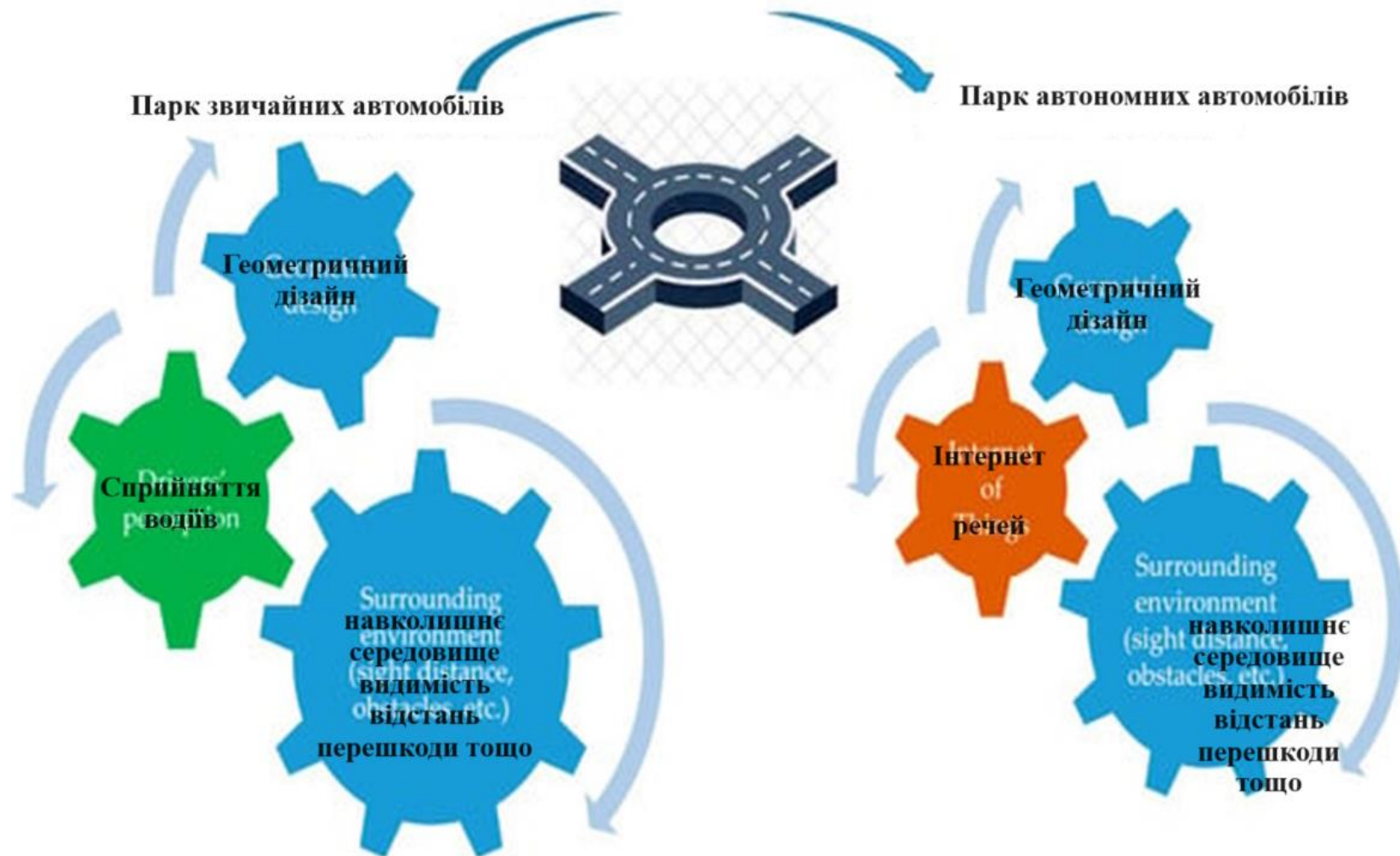


Рисунок 7. Стовпи, що впливають на рух транспортних засобів на кільцевих розв'язках для звичайного автопарку та повністю автономного автопарку.

Для теоретичного випадку повного домінування AV в даний час неможливо оцінити реальну продуктивність кільцевої розв'язки проти AV з точки зору безпеки та потужності; Таким чином, польові випробування та спостереження можуть бути замінені мікроскопічними симуляціями дорожнього руху та тестами на симуляторах водіння, щоб отримати подальше розуміння цієї області. Дослідження поки що не дає послідовних зауважень. Двосмугові кільцеві розв'язки були оцінені в дослідженні [71] за допомогою мікромодельовання за допомогою програмного забезпечення Vissim [72]. Передбачалися різні темпи проникнення CAV у рутинний транспортний потік, і було виявлено, що для більш високих ставок мають місце значні переваги для максимальної довжини черги, часу в дорозі та затримок. Для сценарію дорожнього руху, що повністю базується на CAV, стверджувалося, що обхідні характеристики дорожньої мережі погіршуються [71]. З іншого боку, Фрідріх [73] повідомив про непропорційне збільшення пропускної спроможності дорожньої мережі зі збільшенням частки AV. Тим не менш, досягнення максимально можливих швидкостей стане можливим, коли AV з'являться зі швидкістю 100% у складі трафіку [74].

Стратегія планування шляху для автономного водіння транспортних засобів була розроблена [75] для кращого розуміння закономірностей AV, що рухаються на кільцевій розв'язці. Вони запропонували систему, яка генерує безперервні траєкторії, розділяючи процес руху на три етапи наступним чином: (а) маневр в'їзду, (б) рух в межах кільцевої розв'язки і (в) маневр виїзду. У своєму параметричному дослідженні вони розглянули двосмугові кільцеві розв'язки, але з різними сценаріями з'їзду. Їхній внесок полягав у тому, щоб забезпечити раціональне планування в реальному часі, яке легко адаптується до будь-якої архітектури аудіовізуальних технологій [75].

Загалом у міжнародній літературі сходяться на думці, що кільцева розв'язка є безпечнішою, ніж перехрестя зі світлофором для AV [74,76], оскільки прогрес у датчиках транспортних засобів допоможе їм краще керувати злиттям на різних смугах руху. Крім того, аспект зв'язку дозволяє краще оперативно управляти поперечними відстанями, тимчасовими проміжками і т.д., тим самим збільшуючи пропускну здатність і якість транспортного потоку на кільцевій розв'язці [77]. Тим не менш, основні проблеми до повного поглинання AV у типовий склад руху включають спільний розгляд звичайних транспортних засобів з автономними транспортними засобами з різною швидкістю [74].

### 4.3. Роль симуляції

Реальні вимірювання продуктивності транспортного засобу на кільцевих розв'язках не дають можливості оптимізації конструкції; скоріше, вони пропонують реактивний потенціал, а не проактивний. У той же час неможливо строго контролювати вплив багатьох особливостей конструкції дороги (наприклад, ширину і радіус смуг в'їзду, діаметр вписаного кола, відстань видимості і т.д.) і оцінювати, як це впливає на реакцію водіїв на зміни в геометричній конструкції кільцевої розв'язки [78]. Для того, щоб дослідити, як зміниться безпека та експлуатаційні характеристики дорожнього руху при додаванні аудіовізуальних засобів, мікромодельовання дорожнього руху видається цінним підходом. У той же час необхідно вивчити методи інтелектуального аналізу даних і штучного інтелекту, щоб знайти ефективний метод розуміння поведінки транспорту на кільцевих розв'язках [79,80]. Це ще важливіше у випадку AV, де, незважаючи на загальну тенденцію більш безпечного руху транспортних засобів на перехрестях з круговим рухом, існує ризик того, що деякі безпілотні автомобілі виїдуть на кільцеву розв'язку без повної реалізації середовища водіння.

Використання технології симуляції водіння є ефективним засобом оцінки поведінки за кермом, не ризикуючи реальними діями водіння [81]. Завдяки їх використанню стає можливим оцінити зв'язок між драйверами та принципами геометричного проектування. Це важливо для досягнення балансу між місткістю та безпекою та максимальної продуктивності кільцевих розв'язок. Крім того, спільний ефект геометричних елементів важливіший, ніж їх окремі впливи [2]. Відповідні дослідження повинні бути спрямовані на підвищення точності моделей показників безпеки за рахунок врахування геометричних параметрів процесу проектування доріг, використання автоматизованого відеоаналізу для опису дорожньо-транспортних пригод, використання надійних тренажерів. Звичайно, слід

визнати, що проблеми врахування фізичних обмежень або перешкод, відсутність реалізму, випадок втоми водіїв, а також проблеми валідності є одними з основних недоліків симуляторів водіння [78,82].

У цьому ж контексті [20] підкреслили роль моделювання для збалансованого проектування кільцевих розв'язок, спільно розглянувши три стовпи: (i) розділення окремих рухів, (ii) досягнення бажаних профілів швидкостей і (iii) задоволення геометричних обмежень. Нехтування елементами проектування дорожнього руху означає, що будь-яке підвищення безпеки дорожнього руху не обов'язково буде супроводжуватися кращою мобільністю і навпаки [20]. Таким чином, автори розробили новий багатокритеріальний підхід для одночасного осмисленого включення різних критеріїв оцінки. Мікромоделювання дозволило їм проводити аналіз у контрольованому середовищі та припускати кілька сценаріїв з різною гучністю для руху транспорту та пішоходів. Вони розглянули сучасну, еліптичну та турбо-кільцеву розв'язку. Вони дійшли висновку, що турбокільцева розв'язка чудово підходить для низьких і середніх заторів, а також для загальних викидів транспортних засобів. Було виявлено, що еліптичні кільцеві розв'язки більш схильні до інцидентів, а безпека була кращою лише у випадках з вищим рівнем заторів.

Завдяки імітаційним дослідженням можна отримати корисну інформацію про профілі швидкості на кільцевих розв'язках. Крім того, підтримання відповідної швидкості для всіх транспортних засобів під час руху по кільцевій розв'язці є найважливішою метою проектування. Однак, через неодностайний консенсус щодо конструкції кільцевої розв'язки, досить важко кількісно оцінити вплив альтернативних заходів безпеки на отриману швидкість і пов'язані з цим параметри управління. Звичайно, обмеження швидкості може виявитися корисним, оскільки швидкість забезпечує зв'язок між безпекою кругового руху та геометрією [6]. Однак

пряме спостереження та вимірювання геометричних параметрів, які можуть призвести до збору інших змінних, пов'язаних з поведінкою водіння, не обов'язково гарантують послідовні та обґрунтовані зауваження. Таким чином, спільний аналіз з використанням імітаційного аналізу та реальних допоміжних заходів дозволив би провести оптимізовану оцінку. З цією метою слід спрямувати активні дослідницькі зусилля на покращення стандартів проектування та керівних принципів доріг та кільцевих розв'язок з метою оптимізації параметрів проекту, які мають суперечливі наслідки.

## 5. ВИСНОВКИ

Багато професіоналів у сфері транспорту пропагують кільцеві розв'язки як ефективну альтернативу звичайним конструкціям перехресть. Вони забезпечують зручне рішення, зменшуючи затримки транспортних засобів і підвищуючи безпеку, серед інших передбачуваних переваг. Найбільш переважні переваги безпеки зазвичай приписуються геометрії та правилам пріоритету перехресть з круговим рухом, які змушують транспортні засоби, що наближаються, знижувати швидкість і, відповідно, стикатися з меншим ризиком зіткнень.

Обхідне впровадження, комплексне проектування та належна оцінка є необхідністю для досягнення позитивних результатів. Незважаючи на цей факт, існує обмежена література, присвячена обхідній оцінці якості (рівень обслуговування в порівнянні з якістю обслуговування); Це те, що може бути дуже корисним для інженерів-транспортників та політиків на етапі проектування, технічного обслуговування або при прийнятті рішення про будівництво нової кільцевої розв'язки [10].

Критичність кільцевих розв'язок з точки зору їх геометричної конструкції, а також забезпеченої безпеки дорожнього руху полягає в тому, що в даний час кільцеві розв'язки використовуються для звичайного автопарку, який буде поступово замінений новими транспортними технологіями. Такі дії безпосередньо впливатимуть на критерії проектування та/або редизайну дорожньої мережі, тим самим постійно сприяючи новим дослідницьким ініціативам. У цьому напрямку було висвітлено роль мікросимуляційних досліджень. Пов'язані з цим дослідження тривають, спрямовані на те, щоб пролити світло на оптимізовану геометричну конструкцію кільцевих розв'язок з ефективним транспортним потоком, що дозволяє максимізувати потенціали як «безпеки», так і «пропускну здатності», тим самим пропонуючи стійке управління рухом на кільцевих розв'язках.

## Список використаних джерел

1. World Health Organization (WHO). Global Status Report on Road Safety; World Health Organization (WHO): Geneva, Switzerland, 2018. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>
2. Zubaidi, H.A.; Jason, C.A.; Salvador, H. Understanding roundabout safety through the application of advanced econometric techniques. *Int. J. Transp. Sci. Technol.* **2020**, *9*, 309–321.
3. Haleem, K.; Abdel-Aty, M. Examining traffic crash injury severity at unsignalized intersections. *J. Saf. Res.* **2010**, *41*, 347–357.
4. Jamal, A.; Tauhidur Rahman, M.; Al-Ahmadi, H.M.; Ullah, I.; Zahid, M. Intelligent Intersection Control for Delay Optimization: Using Meta-Heuristic Search Algorithms. *Sustainability* **2020**, *12*, 1896.
5. Evlik, R. Road safety effects of roundabouts: A meta-analysis. *Accid. Anal. Prev.* **2017**, *99*, 364–371.
6. Ambros, J.; Novák, J.; Borsos, A.; Hóz, E.; Kiec, M.; Machciník, S.; Ondrejka, R. Central European comparative study of traffic safety on roundabouts. *Transp. Res. Procedia* **2016**, *14*, 4200–4208.
7. Han, I. Safety analysis of roundabouts and avoidance of conflicts for intersection-advanced driver assistance systems. *Cogent Eng.* **2022**, *9*, 2112813.
8. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Roundabouts: An Information Guide, 2nd ed.; Chapter 4 Operation, Chapter 6 Geometric Design; US Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2010.
9. Nikiforiadis, A.; Nikiforiadis, A.; Mitropoulos, L.; Basbas, S.; Campisi, T. International Design Practices for Roundabouts. In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2023 Workshops. ICCSA 2023*; Gervasi, O., Murgante, B., Rocha, A.M.A.C., Garau, C., Scorza, F., Karaca, Y., Torre, C.M., Eds.; Lecture Notes in Computer Science; Springer: Cham, Switzerland, 2023; Volume 14111, pp. 308–326.



10. Damaskou, E.; Kehagia, F.; Karagiotas, I.; Anagnostopoulos, A.; Pitsiava-Latinopoulou, M. Driver's Perceived Satisfaction at Urban Roundabouts—A Structural Equation-Modeling Approach. *Future Transp.* **2022**, *2*, 675–687.
11. Boualam, O.; Borsos, A.; Koren, C.; Nagy, V. Impact of Autonomous Vehicles on Roundabout Capacity. *Sustainability* **2022**, *14*, 2203.
12. Fernandes, P.; Salamati, K.; Rouphail, N.M.; Coelho, M.C. Identification of emission hotspots in roundabouts corridors. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2015**, *37*, 48–64.
13. Tollazzi, T. Alternative Types of Roundabouts. An Information Guide; Springer Tracts on Transportation and Traffic; Roess, R.P., Ed.; Springer: New York, NY, USA, 2015; Volume 6, pp. 40–47.
14. Giuffrè, T.; Trubia, S.; Canale, A.; Persaud, B. Using Microsimulation to Evaluate Safety and Operational Implications of Newer Roundabout Layouts for European Road Networks. *Sustainability* **2017**, *9*, 2084.
15. Wang, C.; Wang, Y.; Peeta, S. Cooperative Roundabout Control Strategy for Connected and Autonomous Vehicles. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 12678.
16. Wang, W.; Yang, X. Research on Capacity of Roundabouts in Beijing. *Procedia-Soc. Behav. Sci.* **2012**, *43*, 157–168.
17. Vichovaa, K.; Heinzovaa, R.; Dvoraceka, R.; Tomastika, M. Optimization of Traffic Situation Using Roundabouts. *Transp. Res. Procedia* **2021**, *55*, 1244–1250. *Vehicles* **2024**, *6*, 447
18. Macioszek, E. Roundabout Entry Capacity Calculation—A Case Study Based on Roundabouts in Tokyo, Japan, and Tokyo Surroundings. *Sustainability* **2020**, *12*, 1533.
19. Damaskou, E.; Kehagia, F. Quality of service (QOS) of Urban roundabouts: A literature review. *Int. J. Transp. Syst.* **2017**, *2*, 37–45.

20. Alozi, A.R.; Hussein, M. Multi-criteria comparative assessment of unconventional roundabout designs. *Int. J. Transp. Sci. Technol.* **2022**, *11*, 158–173.
21. Mohamed, A.I.Z.; Ci, Y.; Tan, Y. A novel methodology for estimating the capacity and level of service for the new mega elliptical roundabout intersection. *J. Adv. Transp.* **2020**, 2020, 8467152.
22. Ahac, S.; Ahac, M.; Majstorovi'c, I.; Baši'c, S. Speed Reduction Capabilities of Two-Geometry Roundabouts. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 11816.
23. Dabiri, A.R.; Aghayan, I.; Hadadi, F. A comparative analysis of the performance of turbo roundabouts based on geometric characteristics and traffic scenarios. *Transp. Lett. Int. J. Transp. Res.* **2021**, *13*, 674–685.
24. Sołowczuk, A.B.; Benedysiuk, W. Design of Turbo-Roundabouts Based on the Rules of Vehicle Movement Geometry on Curvilinear Approaches. *Sustainability* **2023**, *15*, 13882.
25. CROW. *Turborotondes*; Publication No. 257; CROW: The Hague, The Netherlands, 2008. (In Dutch)
26. Overkamp, D.P.; van der Wijk, W. *Roundabouts—Application and Design—A Practical Manual*; Royal Haskoning DHV, Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Partners for Roads: Hague, The Netherlands, 2009.
27. Robinson, B.W.; Rodegerdts, L.; Scarborough, W.; Kittelson, W.; Troutbeck, R.; Brilon, W.; Bondzio, L.; Courage, K.; Kyte, M.; Mason, J.; et al. *Roundabouts: An informational guide*. Federal Highway Administration; FHWA-RD-00-67; Turner-Fairbank Highway Research Center: McLean, VA, USA, 2000.
28. Chan, S.; Livingston, R. Design vehicle's influence to the geometric design of turbo-roundabouts. In *Proceedings of the International Roundabout Conference*, Seattle, WA, USA, 7–10 April 2014; pp. 1–17.

29. Guerrieri, M.; Ticali, D.; Corriere, F. Turbo roundabouts: Geometric design parameters and performance analysis. *GSTF J. Comput.* **2012**, *2*, 227–232.
30. Mathew, S.; Dhamaniya, A.; Arkatkar, S.S.; Joshi, G. Roundabout Capacity in Heterogeneous Traffic Condition: Modification of HCM Equation and Calibration. *Transp. Res. Procedia* **2017**, *27*, 985–992.
31. Distefano, N.; Leonardi, S.; Pulvirenti, G. Factors with the greatest influence on drivers' judgment of roundabouts safety. An analysis based on web survey in Italy. *IATSS Res.* **2018**, *42*, 265–273.
32. Retting, R.A.; Mandavilli, S.; McCartt, A.T.; Russell, E.R. Roundabouts, Traffic Flow and Public Opinion. *Traffic Eng. Control* **2006**, *47*, 268–272.
33. Burdett, B.; Alsghan, I.; Chiu, L.H.; Bill, A.R.; Noyce, D.A. Analysis of Rear-End Collisions at Roundabout Approaches. *Transp. Res. Rec.* **2016**, *2585*, 29–38.
34. De Brabander, B.; Nuyts, E.; Vereeck, L. Road safety effects of roundabouts in Flanders. *J. Saf. Res.* **2005**, *36*, 289–296.
35. Leich, A.; Fuchs, J.; Srinivas, G.; Niemeijer, J.; Wagner, P. Traffic Safety at German Roundabouts—A Replication Study. *Safety* **2022**, *8*, 50.
36. Polders, E.; Daniels, S.; Casters, W.; Brijs, T. Identifying Crash Patterns on Roundabouts. *Traffic Inj. Prev.* **2015**, *16*, 202–207.
37. Mamlouk, M.; Souliman, B. Effect of traffic roundabouts on accident rate and severity in Arizona. *J. Transp. Saf. Secur.* **2019**, *11*, 430–442.
38. Johnson, M.T. Effects of Phi and View Angle Geometric Principles on Safety of Multi-Lane Roundabouts. *Transp. Res. Rec.* **2023**, *2677*, 362–371.
39. Daniels, S.; Brijs, T.; Nuyts, E.; Wets, G. Externality of risk and crash severity at roundabouts. *Accid. Anal. Prev.* **2010**, *42*, 1966–1973.
40. Daniels, S.T.; Brijs, T.; Nuyts, E.; Wets, G. Explaining variation in safety performance of roundabouts. *Accid. Anal. Prev.* **2010**, *42*, 393–402.

41. Sun, Q.; Xia, J.; Foster, J.; Falkmer, T.; Lee, H. Unpacking older drivers' mobility at roundabouts: Their visual-motor coordination through driver-vehicle-environment interactions. *Int. J. Sustain. Transp.* **2019**, *13*, 627–638.
42. Vijayawargiya, V.; Rokade, S. Identification of factors affecting pedestrian level of service of crosswalks at roundabouts. *Int. Res. J. Eng. Technol.* **2017**, *4*, 342–346.
43. Vignali, V.; Pazzini, M.; Ghasemi, N.; Lantieri, C.; Simone, A.; Dondi, G. The safety and conspicuity of pedestrian crossing at roundabouts: The effect of median refuge island and zebra markings. *Transp. Res. Part F* **2020**, *68*, 94–104.
44. Wan, H.; Chen, X.; Du, Z. Improving Safety and Efficiency of Roundabouts Through an Integrated System of Guide Signs. *Sustainability* **2019**, *11*, 5202.
45. Li, L.; Zhang, Z.; Xu, Z.-G.; Yang, W.-C.; Lu, Q.-C. The role of traffic conflicts in roundabout safety evaluation: A review. *Accid. Anal. Prev.* **2024**, *196*, 107430.
46. Alhajyaseen, W.K.M.; Asano, M.; Nakamura, H.; Minh Tan, D. Stochastic approach for modeling the effects of intersection geometry on turning vehicle paths. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* **2013**, *32*, 179–192.
47. Hydén, C.; Várhelyi, A. The effects on safety, time consumption and environment of large-scale use of roundabouts in an urban area: A case study. *Accid. Anal. Prev.* **2000**, *32*, 11–23. *Vehicles* **2024**, *6* 448
48. Anjana, S.; Anjaneyulu, M.V.L.R. Development of safety performance measures for urban roundabouts in India. *J. Transp. Eng.* **2015**, *141*, 1.
49. Kim, S.; Choi, J. Safety analysis of roundabout designs based on geometric and speed characteristics. *KSCE J. Civ. Eng.* **2013**, *17*, 1446–1454.

50. Montella, A. Identifying crash contributory factors at urban roundabouts and using association rules to explore their relationships to different crash types. *Accid. Anal. Prev.* **2011**, 43, 1451–1463.

51. Surdonja, S.; Dragcevic, V.; Deluka Tibljaš, A. Analyses of maximum-speed path definition at single-lane roundabouts. *J. Traffic Transp. Eng.* **2018**, 5, 83–95.

52. Davidovi'c, S.; Bogdanovi'c, V.; Garunovi'c, N.; Papi'c, Z.; Pamučar, D. Research on Speeds at Roundabouts for the Needs of Sustainable Traffic Management. *Sustainability* **2021**, 13, 399.

53. Loizos, A.; Spiliopoulos, K.; Cliatt, B.; Gkyrtis, K. Structural pavement responses using nonlinear finite element analysis of unbound materials. In *Proceedings of the 10th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA)*, Athens, Greece, 28–30 June 2017; pp. 1343–1350.

54. Gkyrtis, K. Pavement Analysis with the Consideration of Unbound Granular Material Nonlinearity. *Designs* **2023**, 7, 142.

55. Plati, C.; Gkyrtis, K.; Loizos, A. A Practice-Based Approach to Diagnose Pavement Roughness Problems. *Int. J. Civ. Eng.* **2024**, 22, 453–465.

56. Pomoni, M.; Plati, C. Skid Resistance Performance of Asphalt Mixtures Containing Recycled Pavement Materials under Simulated Weather Conditions. *Recycling* **2022**, 7, 47.

57. Plati, C.; Pomoni, M.; Stergiou, T. From Mean Texture Depth to Mean Profile Depth: Exploring possibilities. In *Proceedings of the 7th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements (ICONFBMP)*, Thessaloniki, Greece, 12–14 June 2019; pp. 639–644.

58. Mandavilli, S.; Rys, M.J.; Russell, E.R. Environmental impact of modern roundabouts. *Int. J. Ind. Ergon.* **2008**, 38, 135–142.

59. Ahac, S.; Dragčević, V. Geometric Design of Suburban Roundabouts. *Encyclopedia* **2021**, 1, 720–743.

60. Ariniello, A.; Przybyl, B. Roundabouts and Sustainable Design. In Proceedings of the Green Streets and Highways 2010: An Interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes, Denver, CO, USA, 14–17 November 2010; Weinstein, N., Ed.; American Society of Civil Engineers (ASCE): Reston, VA, USA, 2010.

61. Ahac, S.; Ahac, M.; Domitrović, J.; Dragčević, V. Modeling the Influence of Roundabout Deflection on Its Efficiency as a Noise Abatement Measure. *Sustainability* **2021**, *13*, 5407.

62. Granà, A.; Giuffrè, T.; Guerrieri, M. Exploring Effects of Area-Wide Traffic Calming Measures on Urban Road Sustainable Safety. *J. Sustain. Dev.* **2010**, *3*, 38–49.

63. Guerrieri, M.; Corriere, F.; Casto, B.L.; Rizzo, G. A model for evaluating the environmental and functional benefits of “innovative” roundabouts. *Transp. Res. Part D* **2015**, *39*, 1–16.

64. Distefano, N.; Leonardi, S. Experimental investigation of the effect of roundabouts on noise emission level from motor vehicles. *Noise Control Eng. J.* **2019**, *67*, 282–294.

65. Macioszek, E. Roundabouts as aesthetic road solutions for organizing landscapes. *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transport.* **2022**, *115*, 53–62.

66. Tumminello, M.L.; Macioszek, E.; Granà, A.; Giuffrè, T. Evaluating Traffic-Calming-Based Urban Road Design Solutions Featuring Cooperative Driving Technologies in Energy Efficiency Transition for Smart Cities. *Energies* **2023**, *16*, 7325.

67. Rana, M.M.; Hossain, K. Impact of autonomous truck implementation: Rutting and highway safety perspectives. *Road Mater. Pavement Des.* **2022**, *23*, 2205–2226.

68. Machiani, S.G.; Ahmadi, A.; Musial, W.; Kathe, A.; Melendez, B.; Jahangiri, A. Implications of a Narrow Automated Vehicle- Exclusive Lane on Interstate 15 Express Lanes. *J. Adv. Transp.* **2021**, *2021*, 6617205.

69. Okte, E.; Al-Qadi, I.L. Impact of Autonomous and Human-Driven Trucks on Flexible Pavement Design. *Transp. Res. Record.* **2022**, 2676, 144–160.

70. Keler, A.; Malcolm, P.; Grigoropoulos, G.; Hosseini, S.A.; Kathis, H.; Busch, F.; Bogenberger, K. Data-Driven Scenario Specification for AV–VRU Interactions at Urban Roundabouts. *Sustainability* **2021**, 13, 8281.

71. Anagnostopoulos, A.; Kehagia, F. CAVs and roundabouts: Research on traffic impacts and design elements. *Transp. Res. Procedia* **2020**, 49, 83–94.

72. Giuffre, O.; Grana, A.; Tumminello, M.L.; Giuffre, T.; Trubia, S. Surrogate Measures of Safety at Roundabouts in AIMSUN and VISSIM Environment. In *Roundabouts as Safe and Modern Solutions in Transport Networks and Systems. TSTP 2018*; Macioszek, E., Akcelik, R., Sierpinski, G., Eds.; Lecture Notes in Networks and Systems; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 52, pp. 53–64.

73. Friedrich, B. *The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic. In Autonomous Driving; Technical, Legal and Social Aspects*; Springer: Berlin, Germany, 2016; pp. 317–334.

74. Deluka Tibljaš, A.; Giuffrè, T.; Surdonja, S.; Trubia, S. Introduction of Autonomous Vehicles: Roundabouts Design and Safety Performance Evaluation. *Sustainability* **2018**, 10, 1060. *Vehicles* **2024**, 6 449

75. González, D.; Pérez, J.; Milanés, V. Parametric-based path generation for automated vehicles at roundabouts. *Expert Syst. Appl.* **2017**, 71, 332–341.

76. Gill, V.; Kirk, B.; Godsmark, P.; Flemming, B. *Automated Vehicles: The Coming of the Next Disruptive Technology*; The Conference Board of Canada: Ottawa, ON, Canada, 2015.

77. Johnson, C. *Readiness of the Road Network for Connected and Autonomous Vehicles*; RAC Foundation: London, UK, 2017; pp. 16–17.

78. Montella, A.; Aria, M.; D’Ambrosio, A.; Galante, F.; Mauriello, F.; Perneti, M. Simulator evaluation of drivers’ speed, deceleration and lateral

position at rural intersections in relation to different perceptual cues. *Accid. Anal. Prev.* **2011**, 43, 2072–2084.

79. Wei, S.; Shen, X.; Shao, M.; Sun, L. Applying Data Mining Approaches for Analyzing Hazardous Materials Transportation Accidents on Different Types of Roads. *Sustainability* **2021**, 13, 12773.

80. García Cuenca, L.; Sanchez-Soriano, J.; Puertas, E.; Fernandez Andrés, J.; Aliane, N. Machine Learning Techniques for Undertaking Roundabouts in Autonomous Driving. *Sensors* **2019**, 19, 2386.

81. Ibanez, G.; Meuser, T.; Lopez-Carmona, M.A.; Lopez-Pajares, D. Synchronous Roundabouts with Rotating Priority Sectors (SYROPS): High Capacity and Safety for Conventional and Autonomous Vehicles. *Electronics* **2020**, 9, 1726.

82. Montella, A.; Aria, M.; D'Ambrosio, A.; Galante, F.; Mauriello, F.; Perneti, M. Perceptual measures to influence operating speeds and reduce crashes at rural intersections: Driving simulator experiment. *Transp. Res. Rec.* **2010**, 2149, 11–20.