

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально - науковий інститут екології
Кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

на тему

АНАЛІЗ СЕЗОННИХ ЗМІН РІВНЯ ПИЛОВИХ ЧАСТОК $PM_{2,5}$ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ м. АМСТЕРДАМУ (НІДЕРЛАНДИ)

Виконала: студентка 4 курсу, групи ДЕ-42

спеціальності : 101 «Екологія»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пі автора _____ / Валерія СИДОРЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / проф. Алла НЕКОС
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / доц. Євгенія МИХАЙЛОВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / проф. Алла НЕКОС
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / ст.лаб.Вікторія КОШЕЛЬКОВСЬКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / доц. Світлана БУРЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут екології

Кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр

Спеціальність 101 Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ / проф. Алла НЕКОС

підпис ім'я та прізвище

20 травня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Валерії СИДОРЕНКО

(прізвище, ім'я)

1. Тема роботи Аналіз сезонних змін рівня пилових часток PM_{2,5} у міському середовищі м. Амстердаму (Нідерланди)

керівник роботи Алла НЕКОС, д-р геогр. наук, професор

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

затверджені наказом по університету від 16.04.2025 р. № 4301-5/967

2. Строк подання студентом роботи 01 травня 2025 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести огляд літератури щодо досліджуваного питання.

2. Ознайомитися з методами та технологіями моніторингу пилових часток у повітрі.
3. Зібрати дані моніторингу рівня пилових часток $PM_{2,5}$ для Амстердаму з урахуванням сезонної варіативності.
4. Проаналізувати зібрані дані, визначивши закономірності сезонних коливань концентрацій $PM_{2,5}$.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел
2	Пошук та обґрунтування методів оцінки екологічного атмосферного повітря
3	Обробка та аналіз результатів досліджень
4	Формування загальних висновків кваліфікаційної роботи.
5	Оформлення списку літературних джерел

5. Дата видачі завдання 20 травня 2024 р.

Студент _____

підпис

Валерія СИДОРЕНКО

ім'я, прізвище

Керівник роботи _____

підпис

зав.каф., проф. Алла НЕКОС

посада, ім'я, прізвище

АНОТАЦІЯ

АНАЛІЗ СЕЗОННИХ ЗМІН РІВНЯ ПИЛОВИХ ЧАСТОК $PM_{2,5}$ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ М. АМСТЕРДАМУ (НІДЕРЛАНДИ)

Валерія СИДОРЕНКО

Кваліфікаційна робота «Аналіз сезонних змін рівня пилових часток $PM_{2,5}$ у міському середовищі м. Амстердаму (Нідерланди)» містить 47 сторінок, 3 розділи, 5 таблиць, 8 рисунків, - формул, 45 використаних джерел.

Мета роботи. Аналіз сезонних змін концентрацій пилових часток $PM_{2,5}$ у повітрі міських середовищ Амстердаму.

Об'єкт дослідження. Рівень забруднення повітря пиловими частками $PM_{2,5}$ у міських середовищах Амстердаму.

Предмет дослідження. Сезонні зміни концентрацій пилових часток $PM_{2,5}$ та їхній вплив на стан повітряного середовища Амстердаму.

Актуальність дослідження. Пилові частки $PM_{2,5}$ мають значний вплив на здоров'я людей та стан екосистем, оскільки вони можуть проникати глибоко в дихальні шляхи і викликати різноманітні захворювання, включаючи респіраторні та серцево-судинні. Амстердам велике європейське місто з інтенсивним автомобільним рухом та високою концентрацією промислових викидів, вивчення сезонних змін концентрацій $PM_{2,5}$ є важливим та актуальним для розуміння впливу сезонних факторів на забруднення повітря.

Завдання дослідження передбачали дослідження екологічного стану атмосферного повітря, вивчення методів оцінки та оцінку індексу забруднення атмосферного повітря. *Методи.* Аналіз, синтез, опис, методи математичної статистики, методи оцінки екологічного стану атмосферного повітря. *Результати.* Визначено основні сезонні закономірності у концентрації $PM_{2,5}$ у повітрі Амстердаму, виявлення факторів, що найбільше впливають на рівень пилових часток у різні пори року.

ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ, $PM_{2,5}$, ІНДЕКС ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

ANNOTATION

ANALYSIS OF SEASONAL CHANGES IN PM_{2.5} PARTICULATE MATTER LEVELS IN THE URBAN ENVIRONMENT OF AMSTERDAM (NETHERLANDS)

Valery SYDORENKO

The qualification work, «Analysis of seasonal changes in PM_{2.5} particulate matter levels in the urban environment of Amsterdam (Netherlands)», contains 47 pages, 3 chapters, 5 tables, 8 figures, - formula, and 45 sources used.

The purpose of the work. Analysis of seasonal changes in concentrations of PM_{2.5} dust particles in the air of urban environments in Amsterdam.

The object of research. The level of air pollution by dust particles PM_{2.5} in the urban environments of Amsterdam.

The subject of research. Seasonal changes in concentrations of PM_{2.5} dust particles and their impact on the state of the air environment in Amsterdam.

Relevance of the research. PM_{2.5} dust particles significantly impact human health and the state of ecosystems, as they can penetrate deep into the respiratory tract and cause various diseases, including respiratory and cardiovascular diseases. Amsterdam is a large European city with heavy traffic and a high concentration of industrial emissions. The study of seasonal changes in PM_{2.5} concentrations is important and relevant for understanding the impact of seasonal factors on air pollution.

The tasks of the research included the study of the ecological state of atmospheric air, the study of assessment methods and the assessment of the index of atmospheric air pollution.

Methods. Analysis, synthesis, description, mathematical statistics methods, and assessing the ecological state of atmospheric air.

The results. Determination of the main seasonal patterns in the concentrations of PM_{2.5} in the air of Amsterdam, and identification of the factors that have the greatest influence on the level of dust particles in different seasons.

ENVIRONMENTAL CONDITION OF ATMOSPHERIC AIR, PM_{2.5}, AIR
POLLUTION INDEX

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	10
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ	17
2.1. Програма і методика дослідження сезонних змін рівня $PM_{2.5}$ у міському середовищі Амстердама.....	17
2.2. Методи аналізу просторово-часових змін концентрації $PM_{2.5}$	23
РОЗДІЛ 3 ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ СЕЗОННИХ ЗМІН РІВНЯ ПИЛОВИХ ЧАСТОК $PM_{2.5}$ У МІСЬКИХ СЕРЕДОВИЩАХ АМСТЕРДАМУ	26
3.1. Еколого-географічна характеристика м. Амстердам.....	26
3.2. Результати дослідження екологічного стану атмосферного повітря м. Амстердам.....	28
ВИСНОВКИ.....	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	42

ВСТУП

Забруднення повітря є однією з найгостріших екологічних проблем сучасного світу, яка безпосередньо впливає на здоров'я населення та стан довкілля, особливо у великих міських агломераціях. Пилові частки розміром $PM_{2,5}$, що мають діаметр менший за 2,5 мкм, є найбільш небезпечними забруднювачами повітря. Вони можуть легко проникати в легені, кровоносну систему і спричинити серйозні респіраторні та серцево-судинні захворювання. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) відзначає, що високий рівень $PM_{2,5}$ є важливим фактором ризику для здоров'я, який призводить до значного зростання смертності та збільшення хронічних захворювань серед міського населення.

Амстердам, як одне з найбільших і найзавантаженіших міст Європи, не є виключенням у питанні забруднення повітря. Місто характеризується високою щільністю населення, інтенсивним автомобільним рухом і значною кількістю промислових підприємств. Усе це робить проблему рівня пилових часток $PM_{2,5}$ особливо актуальною для міста. Питання контролю та зниження рівня забруднення повітря стає все більш важливим, адже існуючі природні і штучні джерела $PM_{2,5}$, а також кліматичні фактори, зокрема сезонні зміни, значно впливають на концентрацію цих часток у повітрі.

Розуміння сезонної варіативності рівнів пилових часток $PM_{2,5}$ є надзвичайно важливим для розробки ефективних заходів щодо поліпшення якості повітря та управління забрудненням у міському середовищі. У багатьох країнах сезонні зміни впливають на інтенсивність і джерела забруднення: наприклад, узимку зростає кількість викидів від опалення, а влітку до повітря можуть додаватися забруднюючі речовини від пилку та фотохімічного смогу. Вивчення впливу сезонних факторів дозволяє ефективніше розуміти процеси накопичення пилових часток у повітрі й прогнозувати їхню концентрацію в різні пори року.

Міські райони, особливо великі мегаполіси, є основними джерелами антропогенного забруднення повітря. У містах спостерігається підвищена концентрація твердих часток $PM_{2.5}$, зумовлена інтенсивним транспортним потоком, промисловою діяльністю та використанням викопного палива для опалення. Амстердам, як один з найбільших та найбільш урбанізованих міст Нідерландів, стикається з проблемою забруднення повітря, що вимагає детального дослідження та аналізу.

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) встановила рекомендаційні рівні для $PM_{2.5}$, які покликані мінімізувати негативний вплив на здоров'я. Проте в багатьох європейських містах, включаючи Амстердам, середньомісячні концентрації $PM_{2.5}$ часто перевищують ці норми. Проведення дослідження дозволяє оцінити рівень забруднення повітря в Амстердамі, виявити порушення встановлених норм та обґрунтувати необхідність додаткових екологічних заходів.

Аналіз сезонних змін рівня $PM_{2.5}$ у різних районах Амстердама дозволяє краще зрозуміти основні джерела та фактори, що впливають на забруднення повітря. Результати дослідження можуть бути використані для розробки локальних екологічних ініціатив, таких як введення зон низьких викидів, стимулювання електротранспорту та впровадження системи моніторингу якості повітря, що сприятиме зменшенню рівня забруднення.

Таким чином, дослідження рівня пилових часток $PM_{2.5}$ у міському середовищі Амстердама є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки воно сприяє розумінню механізмів забруднення, виявленню сезонних коливань, а також розробці ефективних заходів для поліпшення якості повітря та збереження здоров'я мешканців міста.

Мета дослідження – аналіз сезонних змін концентрацій пилових часток $PM_{2.5}$ у повітрі міських середовищ Амстердаму.

Завдання.

1. Провести літературний огляд впливу пилових часток $PM_{2.5}$ на здоров'я людини і довкілля.

2. Проаналізувати існуючі методи моніторингу пилових часток та обрати оптимальні для дослідження.

3. Вивчити сезонну варіативність концентрацій $PM_{2,5}$ та визначити основні фактори, які її впливають.

4. Провести статистичний аналіз та порівняння рівня $PM_{2,5}$ в різні сезони року.

5. Сформулювати висновки до дослідження.

Об'єкт дослідження – рівень забруднення повітря пиловими частками $PM_{2,5}$ у міських середовищах Амстердаму.

Предмет дослідження – сезонні зміни концентрацій пилових часток $PM_{2,5}$ та їхній вплив на стан повітряного середовища Амстердаму.

Методи дослідження – аналіз, синтез, опис, методи математичної статистики, методи оцінки екологічного стану атмосферного повітря.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Оцінка екологічного стану атмосферного повітря є актуальною темою сучасних досліджень, особливо в умовах урбанізації та індустріалізації, які сприяють зростанню рівня забруднення повітря. Одним із основних показників якості атмосферного повітря є рівень твердих часток, зокрема $PM_{2.5}$, які становлять загрозу для здоров'я населення та екосистеми в цілому. $PM_{2.5}$ (частки діаметром до 2.5 мкм) здатні проникати глибоко в легені і навіть в кровоносну систему, викликаючи захворювання дихальної системи, серцево-судинні хвороби та інші серйозні проблеми зі здоров'ям [1]. Забруднення повітря у міських середовищах формується з різних джерел, серед яких промислові підприємства, транспорт, будівельні роботи, енергетичні об'єкти та побутове опалення. Автотранспорт, зокрема дизельний, є одним із найважливіших джерел викидів $PM_{2.5}$ в містах [2]. Дослідження показують, що рівень забруднення сильно залежить від часу доби, пори року, метеорологічних умов та розташування забруднювачів [3]. Окремі дослідження вказують, що високий рівень забруднення $PM_{2.5}$ може спостерігатися в холодні місяці через збільшення використання палива для опалення [4]. Наприклад, у країнах з помірним кліматом, таких як Нідерланди, сезонні коливання температури та вологість повітря сприяють накопиченню або розсіюванню часток $PM_{2.5}$ [5]. Сучасні методи моніторингу твердих часток включають як стаціонарні, так і мобільні станції, що дозволяють отримувати високоточні дані в реальному часі. Один з основних методів — лазерний аналіз часток, який застосовується у багатьох країнах ЄС [6]. Сучасні технології, такі як сенсори для моніторингу якості повітря, зокрема *Aethalometer*, забезпечують високий рівень деталізації даних про концентрацію $PM_{2.5}$ [7]. Згідно з дослідженнями, комбінація дистанційного зондування та стаціонарного моніторингу допомагає забезпечити точніший

аналіз просторових і часових змін у рівнях забруднення [8]. Наприклад, методи дистанційного зондування дозволяють створювати карти забруднення, які візуалізують рівень $PM_{2.5}$ у певних регіонах. Багато досліджень підтверджують, що тривале перебування в умовах високого забруднення $PM_{2.5}$ призводить до серйозних наслідків для здоров'я людини. Наприклад, дослідження World Health Organization (WHO) свідчать про те, що частинки $PM_{2.5}$, завдяки своєму розміру, можуть проникати в нижні дихальні шляхи, спричиняючи запальні процеси та підвищення ризику хронічних захворювань [9]. Згідно з дослідженнями в Нідерландах, навіть короточасне підвищення рівня $PM_{2.5}$ в Амстердамі асоціюється з підвищеним ризиком респіраторних та серцево-судинних хвороб серед вразливих верств населення [10]. Це підкреслює важливість регулярного моніторингу якості повітря та оцінки сезонних змін концентрації $PM_{2.5}$.

Сезонні зміни рівня твердих часток, таких як $PM_{2.5}$, обумовлені як природними, так і антропогенними факторами. Наприклад, влітку концентрації $PM_{2.5}$ можуть знижуватися через збільшення інтенсивності сонячної радіації та фотохімічних реакцій, які сприяють розкладанню певних забруднюючих речовин [11]. Взимку, навпаки, концентрація $PM_{2.5}$ підвищується через збільшення використання палива для опалення та сприятливі метеорологічні умови для накопичення забруднюючих речовин [12]. Дослідження показують, що на концентрацію $PM_{2.5}$ в атмосферному повітрі впливають численні фактори, серед яких природні та антропогенні процеси, а також погодні умови. Наприклад, високий рівень концентрацій $PM_{2.5}$ взимку пояснюється збільшенням використання вихопного палива для опалення та частішими явищами температурної інверсії, що утримує забруднюючі речовини близько до земної поверхні [13]. У літні місяці рівень $PM_{2.5}$ може знижуватися, що пов'язано з більш активними фотохімічними реакціями, а також зі зменшенням використання опалювальних систем. У той же час, зростання температури може сприяти формуванню вторинних органічних аерозолів, які також є складовими частками $PM_{2.5}$ [14].

Крім сезонних змін, концентрація $PM_{2.5}$ варіюється залежно від годин доби. Дослідження показують, що найбільш високий рівень забруднення спостерігається вранці та ввечері під час пікових годин дорожнього руху, особливо у великих містах [15]. Частки $PM_{2.5}$ здатні переміщуватися на великі відстані через атмосферні потоки, що робить питання їх моніторингу та регулювання складним на міжнародному рівні. Це особливо актуально для таких країн, як Нідерланди, де $PM_{2.5}$ може надходити як від локальних, так і від транскордонних джерел забруднення [16]. Механізми осадження часток включають як сухе, так і вологе осадження. Сухе осадження включає гравітаційне осадження часток на поверхню, а вологе осадження відбувається під час дощу, коли частки вбираються у краплі води й осаджуються разом з опадами [17]. Відповідно, у періоди дощів рівень $PM_{2.5}$ у повітрі знижується, тоді як під час сухої погоди можливе накопичення часток у приземному шарі атмосфери.

Всесвітня організація охорони здоров'я (WHO) визначає рекомендаційні рівні $PM_{2.5}$ для забезпечення здоров'я населення. Згідно з оновленими рекомендаціями WHO, середньорічний рівень $PM_{2.5}$ не повинен перевищувати 5 мкг/м^3 , а середньодобовий — 15 мкг/м^3 [18]. Багато європейських країн, включаючи Нідерланди, приймають ці нормативи як основу для розробки національної екологічної політики. Крім цього, в рамках Європейського Союзу діють директиви, які зобов'язують держави-члени контролювати якість повітря та впроваджувати заходи для зниження концентрації $PM_{2.5}$. Дослідження показують, що навіть незначне зменшення середнього рівня $PM_{2.5}$ може значно покращити стан здоров'я населення та зменшити рівень смертності від респіраторних та серцево-судинних захворювань [19].

Окрім моніторингу, багато міст світу впроваджують різні технології для зниження рівня $PM_{2.5}$ в атмосфері. Це включає розвиток зеленої інфраструктури (озеленення вулиць, створення міських парків), що сприяє поглинанню забруднюючих речовин, та впровадження альтернативних

джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика [20]. Іншим підходом є вдосконалення транспортної інфраструктури та заохочення використання громадського транспорту замість особистих автомобілів. Наприклад, у Амстердамі активно розвивається система велосипедних доріжок, що сприяє зменшенню викидів автотранспорту, одного з основних джерел $PM_{2.5}$ [21]. Згідно з дослідженнями, використання електротранспорту в містах також може сприяти суттєвому зниженню рівня забруднення повітря [22].

Для більш точного прогнозування рівня $PM_{2.5}$ та визначення основних джерел забруднення повітря в міських умовах використовують різноманітні статистичні й математичні моделі. Вони дозволяють оцінити вплив природних та антропогенних факторів на концентрацію твердих часток у повітрі. Моделі дисперсії, наприклад, часто застосовуються для оцінки просторово-часового розподілу забруднюючих речовин. Серед найпопулярніших методів — модель атмосферної дисперсії AERMOD, яка використовується для моделювання забруднення повітря в умовах різних типів метеорологічних умов [23].

Іншим широко використовуваним підходом є модель CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions), яка дозволяє враховувати взаємодію між атмосферними забруднюючими речовинами та вторинними частками $PM_{2.5}$. CAMx застосовується для аналізу складних хімічних реакцій, які відбуваються в атмосфері та призводять до утворення вторинних часток [24]. Згідно з дослідженнями, такі моделі допомагають оцінити ефективність різних заходів зі зменшення викидів $PM_{2.5}$.

Деякі науковці також використовують статистичні методи, зокрема регресійний аналіз та методи машинного навчання, для оцінки впливу окремих чинників на концентрації $PM_{2.5}$ [25]. Наприклад, у дослідженнях, присвячених вивченню рівня забруднення повітря в Амстердамі, було виявлено, що моделі машинного навчання, зокрема нейронні мережі, показують високу точність у прогнозуванні концентрацій $PM_{2.5}$ з

урахуванням таких факторів, як метеорологічні умови, інтенсивність транспортного руху та сезонні зміни [26].

Європейський Союз приділяє значну увагу питанням забруднення повітря, і одним з основних завдань є зниження рівня $PM_{2.5}$ в атмосфері до безпечних для здоров'я населення показників. Директива ЄС 2008/50/ЄС про якість атмосферного повітря та чисте повітря для Європи встановлює граничні рівні для $PM_{2.5}$, які країни-члени зобов'язані дотримуватися [27]. Згідно з цією директивою, середньорічний рівень $PM_{2.5}$ не повинен перевищувати 25 мкг/м^3 , проте багато країн, таких як Нідерланди, прагнуть знизити цей показник до рекомендаційних рівнів WHO.

У Нідерландах існують також локальні ініціативи, спрямовані на покращення якості повітря, зокрема проєкти «Чистий транспорт» і «Зелені міські зони», які обмежують в'їзд транспортних засобів з високими рівнями викидів у центральні райони міст. Амстердам є одним з провідних міст у Європі за кількістю екологічних ініціатив, таких як розвиток електромобільності, впровадження зон низьких викидів і створення пішохідних та велосипедних зон [28].

Стаціонарний моніторинг якості повітря є одним з основних методів збору інформації про рівень забруднення. Вимірювання проводяться спеціалізованими станціями, оснащеними обладнанням для аналізу різних забруднюючих речовин, зокрема $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , O_3 .

Сучасні стаціонарні моніторингові станції обладнані лазерними та інфрачервоними сенсорами, що дозволяють з високою точністю визначати концентрації $PM_{2.5}$ у повітрі в режимі реального часу. Деякі системи також оснащені фільтрами, на яких накопичуються частки для подальшого хімічного аналізу в лабораторних умовах [9]. Завдяки автоматизованим системам можна отримувати точні дані з мінімальною похибкою. Можливість безперервного моніторингу дозволяє вивчати довгострокові зміни концентрацій забруднювачів. Однак цей метод також має обмеження, такі як висока вартість обладнання та обмеженість у просторовому покритті.

Мобільний моніторинг здійснюється за допомогою переносних сенсорів або сенсорних систем, встановлених на транспортних засобах. Цей підхід дозволяє отримувати дані про рівень забруднення в реальному часі в різних точках міста, що сприяє формуванню детальної просторової картини поширення $PM_{2.5}$. Переносні пристрої, такі як мініатюрні лазерні та оптичні сенсори, здатні вимірювати концентрацію $PM_{2.5}$ з достатньою точністю та швидкістю. Дані, зібрані мобільними пристроями, передаються на центральні сервери для подальшого аналізу, дозволяючи оцінювати забруднення повітря у різних районах та за умов зміни метеорологічних факторів [29].

Мобільний моніторинг має ряд переваг. Це можливість швидко змінювати місце проведення вимірювань, що підходить для аналізу в зонах із підвищеним ризиком. Дозволяє отримувати дані про концентрації $PM_{2.5}$ у різних районах міста, створюючи більш деталізовану картину забруднення.

Методи дистанційного зондування широко застосовуються для визначення концентрацій $PM_{2.5}$ на великих територіях. За допомогою супутникових та авіаційних систем дистанційного зондування можна отримувати дані про забруднення у масштабах міста, країни чи навіть континенту. Супутникові датчики, такі як MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) та VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), дозволяють вимірювати рівні аерозолів у приземному шарі атмосфери, що є індикатором концентрацій $PM_{2.5}$ [30].

Лабораторні методи аналізу зразків $PM_{2.5}$ дозволяють визначати хімічний склад часток, що дає змогу ідентифікувати джерела забруднення. Найпоширенішими методами є спектрометрія мас, рентгенофлуоресцентний аналіз і атомно-абсорбційна спектроскопія. Ці методи дозволяють детально аналізувати склад забруднювачів, зокрема, вміст важких металів, органічних сполук і продуктів згоряння [31].

Математичне моделювання є важливим інструментом для оцінки екологічного стану атмосферного повітря. Зокрема, застосовуються моделі

дисперсії, хімічні моделі та чисельні методи для визначення розподілу $PM_{2.5}$ у просторі й часі. Найбільш популярними є такі моделі:

AERMOD – модель дисперсії, що враховує метеорологічні умови та джерела викидів для розрахунку концентрацій забруднюючих речовин у межах міста [32].

WRF-Chem – регіональна модель, що включає хімічні перетворення забруднюючих речовин, дозволяє моделювати процеси утворення вторинних аерозолів, таких як $PM_{2.5}$ [33].

Моделі дозволяють проводити сценарне планування, яке допомагає оцінити вплив різних заходів на рівень забруднення. Наприклад, сценарії скорочення викидів від транспорту дозволяють передбачити, наскільки зменшаться концентрації $PM_{2.5}$ при впровадженні заходів із заборони дизельних автомобілів у певних зонах міста.

Проведений аналіз літературних джерел підтвердив, що $PM_{2.5}$ є одним з найбільш небезпечних забруднювачів повітря в міських умовах. Концентрації цих часток значною мірою залежать від сезонних та метеорологічних умов, а також інтенсивності антропогенних впливів, таких як транспорт і промисловість.

Для контролю рівня $PM_{2.5}$ використовуються різноманітні методи моніторингу та моделювання, включаючи статистичні моделі та технології дистанційного зондування. На основі наявних досліджень можна зробити висновок, що впровадження ефективної політики зниження рівня $PM_{2.5}$ вимагає комплексного підходу, що включає розвиток екологічного транспорту, обмеження промислових викидів та підвищення екологічної обізнаності населення. Особливу увагу слід приділити впровадженню зелених зон та зон низьких викидів у міських районах, що не лише сприяє зменшенню рівня $PM_{2.5}$, але й покращує якість життя мешканців міст.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

2.1. Програма і методика дослідження сезонних змін рівня $PM_{2.5}$ у міському середовищі Амстердама

Сезонна варіативність концентрацій пилових часток $PM_{2.5}$ виступає головним фактором, що впливає на якість атмосферного повітря в умовах великого європейського мегаполіса. Цей чинник обрано через те, що метеорологічні умови (температура, вологість, атмосферний тиск, інверсії), а також зміни у характері використання транспорту й енергетичних ресурсів протягом року істотно впливають на рівень забруднення повітря.

Місце проведення дослідження - м. Амстердам, Нідерланди, період дослідження: 2021–2024 рр., досліджувалося атмосферне повітря у чотирьох типових зонах міста (рис. 2.1):

- T1 - Stadhouderskade, Amsterdam – центральний район Амстердама, де розташовані численні туристичні пам'ятки, канали та жваві вулиці.
- T2 - Vondelpark, Amsterdam – відомий парк у центрі Амстердама, популярне місце для відпочинку, прогулянок та спортивних занять. Вважається «зеленими легенями» міста.
- T3 - Einsteinweg, Amsterdam – район на захід від центру міста, поблизу великих транспортних вузлів і промислових зон.
- T4 - Hoogtij, Amsterdam – промисловий район на північ від центральної частини Амстердама, де розташовані різні підприємства та індустріальні об'єкти.

Метод збору даних – автоматичний моніторинг концентрацій $PM_{2.5}$ через платформу AQICN.org на основі даних муніципальних станцій.

Дані збиралися з відкритих джерел на основі щоденних вимірювань, які було агреговано до середньомісячних значень для кожної з чотирьох зон.

Загалом було опрацьовано понад 190 усереднених місячних значень, що забезпечило достатню глибину для виявлення стабільних сезонних трендів.

Періоди спостереження – зима (грудень–лютий), весна (березень–травень), літо (червень–серпень), осінь (вересень–листопад).

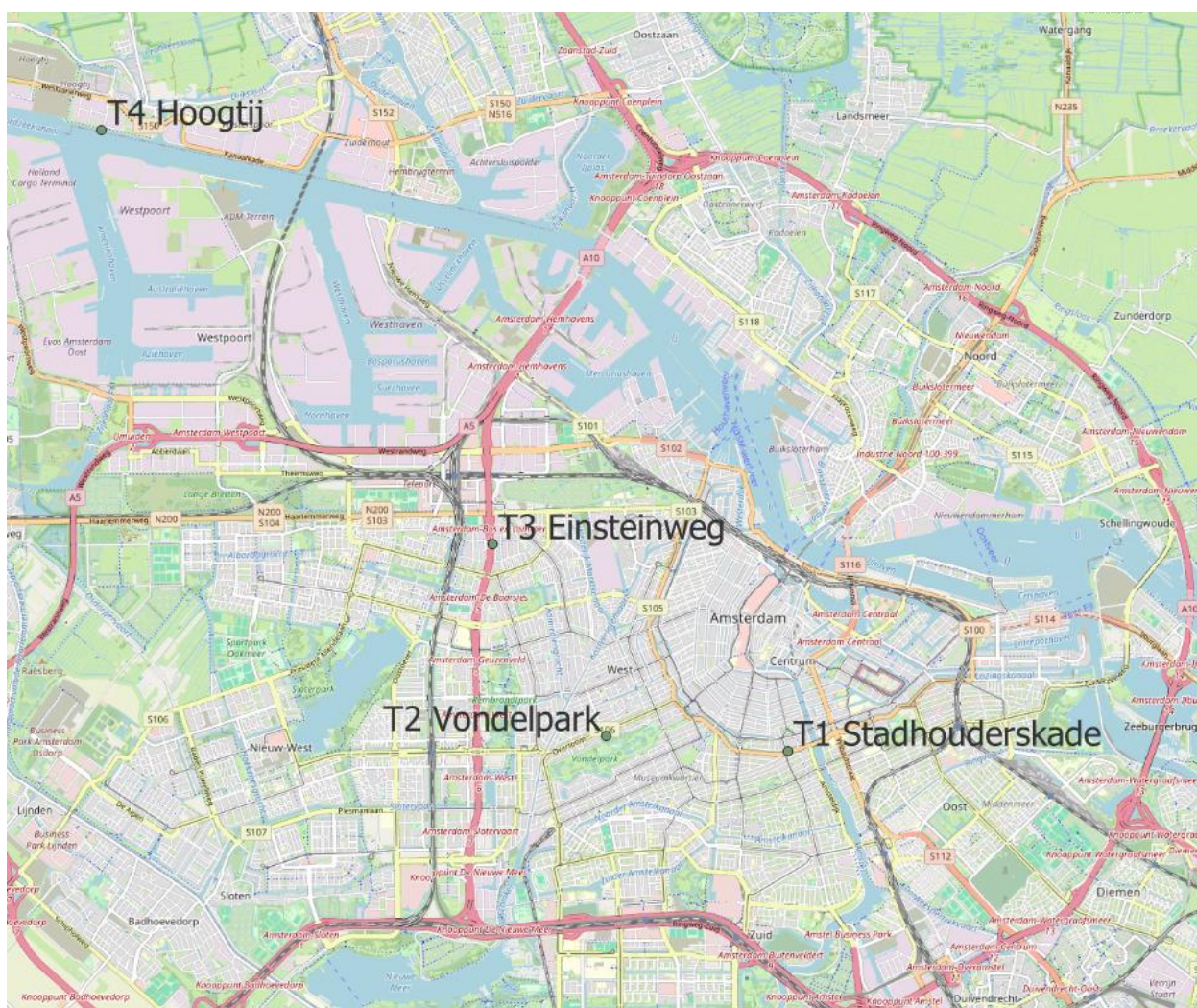


Рис. 2.1 Схема розташування станцій аналізу повітря

Загальний вигляд станцій аналізу повітря показано на рис. 2.2 – 2.3.

Загалом, за станом повітря в м. Амстердам можна спостерігати в он-лайн режимі через інтернет портал <https://aqicn.org/>, вимірювання показників повітря ($PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , O_3) здійснюють близько 20 станцій (рис. 2.4).



Рис. 2.2 Загальний вигляд станції аналізу повітря T1Stadhouderskade

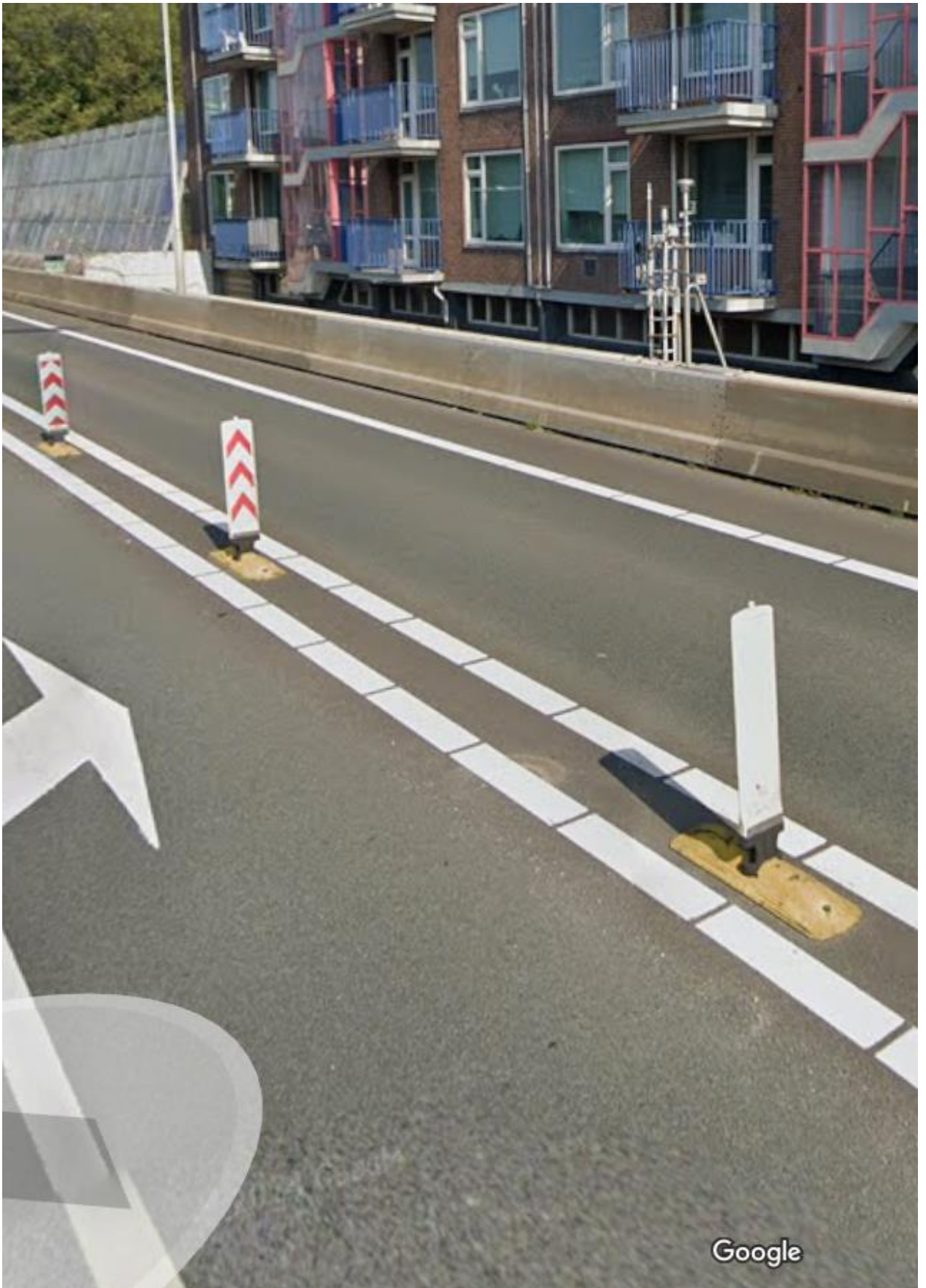


Рис. 2.3 Загальний вигляд станції аналізу повітря ТЗЕinsteinweg

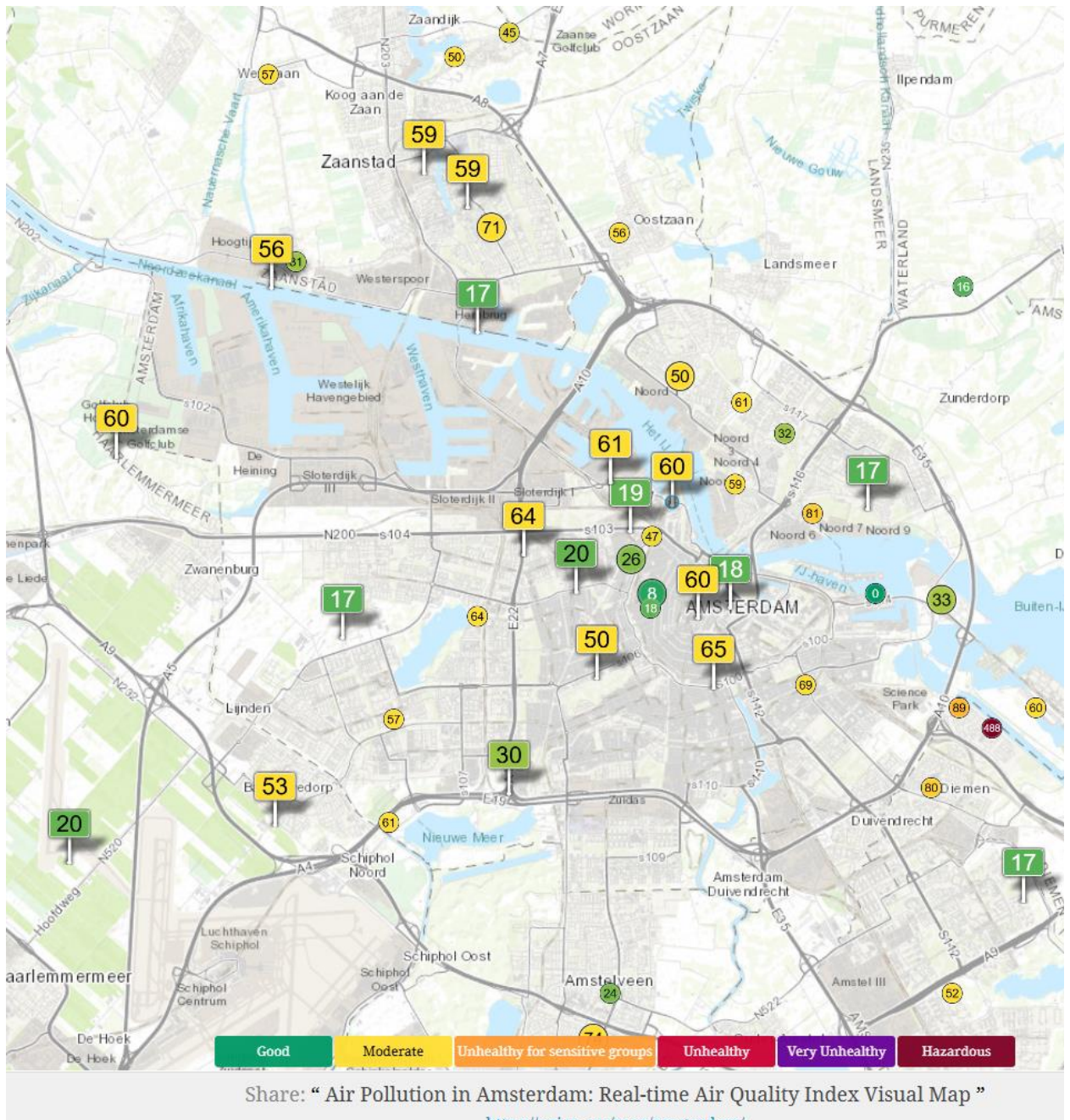


Рис. 2.4 Схема розташування станцій аналізу повітря у м. Амстердам.

Оцінка якості повітря здійснюється відповідно до шкали, рекомендованою Всесвітньою організацією охорони здоров’я (табл. 2.1).

Шкала PM_{2.5} (дрібнодисперсні частки менші за 2.5 мкм)

Good (Добре) 0–10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Відповідає рівню, що нижчий за річну норму ВООЗ (5 С та річну норму ЕРА (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Повітря вважається чистим і безпечним для населення.

Таблиця 2.1

Шкала оцінки якості повітря за показником $\text{PM}_{2.5}$

Good (Добре)	Fair (Задовільно)	Moderate (Помірно)	Poor (Погано)	Verypoor (Дуже погано)	Extremelypoor (Критично погано)
0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800

Шкала $\text{PM}_{2.5}$ (дрібнодисперсні частки менші за 2.5 мкм)

Good (Добре) 0–10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Відповідає рівню, що нижчий за річну норму ВООЗ (5 С та річну норму ЕРА (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Повітря вважається чистим і безпечним для населення.

Fair (Задовільно) 10–20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Легке перевищення рекомендації ВООЗ для річної норми (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), але все ще нижче за добову норму ЕРА (35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Рівень допустимий для короткострокового впливу, хоча вже може впливати на чутливі групи населення.

Moderate (Помірно) 20–25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Перевищує річну норму ЕРА (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) і значно перевищує рекомендацію ВООЗ (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Може викликати помірні ризики для здоров'я, особливо для чутливих осіб (діти, люди похилого віку, люди з респіраторними захворюваннями).

Poor (Погано) 25–50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Значне перевищення добової норми ВООЗ (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) та річної норми ЕРА (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). При таких значеннях якість повітря вже може викликати серйозні респіраторні проблеми, особливо при тривалому впливі.

Very Poor (Дуже погано) 50–75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Значне перевищення як добової, так і річної норм ВООЗ і ЕРА. Високий рівень ризику для всього населення, може спричиняти загострення респіраторних і серцево-судинних захворювань.

Extremely Poor (Критично погано) 75–800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Критичний рівень забруднення, при якому перебування на вулиці небезпечно для всіх, особливо для чутливих груп. Забруднення на такому рівні вимагає термінових заходів для захисту здоров'я населення.

Добрі та задовільні рівні (0–20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) переважно відповідають рекомендаціям ВООЗ і ЕРА для короткострокового впливу.

Помірні та погані рівні (20–50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) вже перевищують норми ВООЗ і частково ЕРА, і такі концентрації можуть мати вплив на здоров'я, особливо при довготривалому впливі.

Для аналізу сезонних змін концентрації $\text{PM}_{2.5}$ використовувалися дані за період з 2021 по 2024 рік. Значення концентрації $\text{PM}_{2.5}$ у мікрограмах на кубічний метр ($\text{мкг}/\text{м}^3$) були згруповані за місяцями для кожного року, що дозволило виявити загальні тенденції та коливання в рівнях забруднення повітря в різні пори року.

2.2. Методи аналізу просторово-часових змін концентрації $\text{PM}_{2.5}$

Для ефективного аналізу даних про концентрацію $\text{PM}_{2.5}$ у міському середовищі використовуються методи, що дозволяють вивчати просторово-часові зміни забруднення. Такі методи допомагають виявити тенденції, сезонні коливання, а також можливі «гарячі точки» – райони з особливо високими рівнями забруднення.

Геоінформаційні системи (ГІС) є потужним інструментом для аналізу просторових даних про забруднення. Використовуючи ГІС, можна створювати карти концентрацій $\text{PM}_{2.5}$ для візуалізації забруднених районів, а також визначати фактори, що впливають на забруднення. Інформація, зібрана

мобільними та стаціонарними моніторинговими станціями, може бути поєднана у вигляді шарів на карті для детального аналізу [34]. ГІС дозволяє аналізувати просторові кореляції, наприклад, порівнювати рівень $PM_{2.5}$ у різних районах та вивчати вплив транспортної інфраструктури або промислових зон на якість повітря; візуалізувати сезонні зміни, створення тематичних карт для різних періодів року дозволяє виявити сезонні коливання забруднення. ГІС також дає можливість використовувати часові ряди для відстеження динаміки концентрацій $PM_{2.5}$ в певному місці протягом часу, що є корисним для довгострокового планування екологічних заходів.

Аналіз часових рядів дозволяє дослідити, як змінюється концентрація $PM_{2.5}$ у часі, що допомагає виявити регулярні закономірності та тренди. Цей метод є особливо корисним для вивчення сезонних змін та впливу різних факторів, таких як погода або дні тижня, на рівень забруднення. Методи аналізу часових рядів включають сезонну декомпозицію – розбиття даних на компоненти тренду, сезонності та залишкових варіацій допомагає чіткіше зрозуміти сезонні коливання $PM_{2.5}$ [35]; спектральний аналіз використовується для визначення частотних компонентів у даних про концентрацію $PM_{2.5}$, що може бути корисним для виявлення періодичних змін забруднення, наприклад, піків у години «годин пік» або у певні пори року. Такі методи аналізу допомагають зробити висновки про динаміку змін забруднення та оцінити ефективність заходів зі зменшення рівня $PM_{2.5}$.

Методика сценарного моделювання для оцінки потенційних змін у рівні забруднення. Сценарне моделювання є важливим інструментом для оцінки можливих змін у рівні $PM_{2.5}$ за різних умов. Цей метод дозволяє дослідникам тестувати різні сценарії зниження забруднення, такі як обмеження на використання певних видів транспорту або зменшення промислових викидів. Моделювання може включати сценарії зміни транспортної політики, наприклад, заборона дизельних автомобілів або введення зон з низьким рівнем викидів. За допомогою моделювання можна передбачити, як зміниться рівень $PM_{2.5}$ у певних районах міста [36]; сценарії зміни

метеорологічних умов – аналіз впливу різних метеорологічних факторів, таких як вітер, температура та вологість, дозволяє оцінити, як ці зміни впливають на розсіювання або накопичення $PM_{2.5}$ в атмосфері. Сценарне моделювання використовується в комбінації з іншими методами, зокрема математичними моделями дисперсії, для прогнозування та планування заходів щодо покращення якості повітря.

Важливим аспектом дослідження забруднення повітря є оцінка впливу $PM_{2.5}$ на здоров'я населення, оскільки ці частки здатні проникати у дихальні шляхи та викликати серйозні захворювання. Для цього використовуються різні методи епідеміологічних та статистичних досліджень, що дозволяють визначити взаємозв'язок між рівнями забруднення та показниками здоров'я.

Епідеміологічні дослідження використовуються для визначення рівня захворюваності та смертності, пов'язаної з підвищенням концентрацій $PM_{2.5}$. Такі дослідження включають аналіз великих обсягів даних про здоров'я населення та даних моніторингу повітря. Найпоширеніші типи епідеміологічних досліджень включають когортні, екологічні та випадок-контроль [9].

Для кількісної оцінки впливу $PM_{2.5}$ на здоров'я населення застосовуються статистичні методи, зокрема розрахунок коефіцієнтів ризику (RelativeRisk, RR) та атрибутивного ризику. Наприклад, дослідження ВООЗ показують, що для кожного підвищення концентрації $PM_{2.5}$ на 10 мкг/м^3 ризик серцево-судинних захворювань збільшується на певний відсоток [37].

РОЗДІЛ 3.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ СЕЗОННИХ ЗМІН РІВНЯ ПИЛОВИХ ЧАСТОК $PM_{2,5}$ У МІСЬКИХ СЕРЕДОВИЩАХ АМСТЕРДАМУ

3.1. Еколого-географічна характеристика м. Амстердам

Амстердам — столиця Нідерландів і одне з найбільших міст країни, розташоване на заході Європи. Воно відоме своєю густонаселеною урбаністичною структурою, розвиненою транспортною інфраструктурою та численними каналами, що робить його унікальним з точки зору екологічної ситуації та впливу на довкілля. У цьому підрозділі розглянуто основні географічні особливості, кліматичні умови, а також екологічні виклики, що

Амстердам розташований у провінції Північна Голландія на висоті близько 2 метрів над рівнем моря. Місто розташоване на злитті річки Амстел та кількох каналів, які є важливими для транспортної мережі та впливають на циркуляцію повітря в місті. Таке розташування біля узбережжя Північного моря робить Амстердам вразливим до впливу морських повітряних мас, що вносить свій вклад у розсіювання забруднюючих речовин, але також спричиняє значні сезонні коливання кліматичних умов [38].

Амстердам характеризується морським кліматом (Сfb за класифікацією Кеппена), з помірними зимами та прохолодним літом, високою вологістю і частими опадами протягом усього року. Середньорічна температура в місті складає близько 10°C, причому влітку температура зазвичай коливається в межах 17–20°C, а взимку — від 0 до 6°C [39]. Постійний вплив Північного моря створює сприятливі умови для циркуляції повітря, зменшуючи ризик застою забруднюючих речовин, але вітряна погода також сприяє переносу забруднення з промислових районів та інших частин Європи. Такі кліматичні умови впливають на сезонні коливання рівнів $PM_{2,5}$: в холодні місяці, через збільшення використання опалення, рівень забруднення зростає, тоді як у

літні місяці, завдяки більшій сонячній радіації і активнішій атмосферній циркуляції, рівень $PM_{2.5}$ зазвичай знижується [40].

Амстердам є найбільшим містом Нідерландів з населенням понад 870 тисяч осіб (станом на 2023 рік). Місто зазнало значної урбанізації та розширення протягом останніх десятиліть, що спричинило збільшення кількості транспорту, житлових та промислових об'єктів. Висока щільність населення, характерна для міста, спричиняє значні викиди від транспорту та побутового сектору, що є основними джерелами $PM_{2.5}$ у повітрі [41]. В Амстердамі діє розвинена система громадського транспорту, включаючи трамваї, автобуси, метро і мережу велосипедних доріжок, яка є однією з найбільших у світі. Незважаючи на це, автомобільний транспорт все ще є вагомим джерелом забруднення повітря в місті, особливо в центральних районах, де спостерігається висока інтенсивність дорожнього руху [42].

Головні джерела забруднення повітря в Амстердамі включають транспорт, промисловість, енергетику та побутовий сектор. Автомобільний транспорт, зокрема дизельні автомобілі, є основним джерелом викидів $PM_{2.5}$ та інших забруднюючих речовин. Використання вугільного палива для опалення також робить внесок у підвищення рівнів твердих часток у повітрі, особливо в зимовий період [43]. Промислові підприємства, розташовані у прилеглих до Амстердама районах, включаючи портові об'єкти, також є важливими джерелами забруднення. Зокрема, порт Амстердама є одним з найбільших у Європі і сприяє значним промисловим викидам у повітря, що впливає на якість повітря в усьому регіоні [44].

Амстердам активно впроваджує екологічні ініціативи, спрямовані на зниження рівня забруднення повітря. Основні зусилля включають розвиток електротранспорту та мережі зарядних станцій – місто стимулює використання електромобілів, вводячи пільги та розширюючи мережу зарядних станцій. У центральних районах Амстердама введено обмеження на використання автомобілів, що не відповідають екологічним стандартам, з метою зниження викидів твердих часток та інших забруднювачів [45].

Дані показують, що середньомісячні концентрації $PM_{2.5}$ на станції Stadhouderskade змінювалися в межах від 30 до понад 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, із помітними сезонними коливаннями. Середні показники перевищують рекомендаційний рівень якості повітря ВООЗ для середньомісячних концентрацій (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), що вказує на високий рівень забруднення в центральному районі Амстердама (рис. 3.1).

На графіку нанесено дві червоні лінії, які позначають нормативні рівні якості повітря Норма 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – рекомендований середньомісячний показник якості повітря від ВООЗ. Норма 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – граничний показник забруднення повітря що відповідає верхній межі класу Poor (Погано).

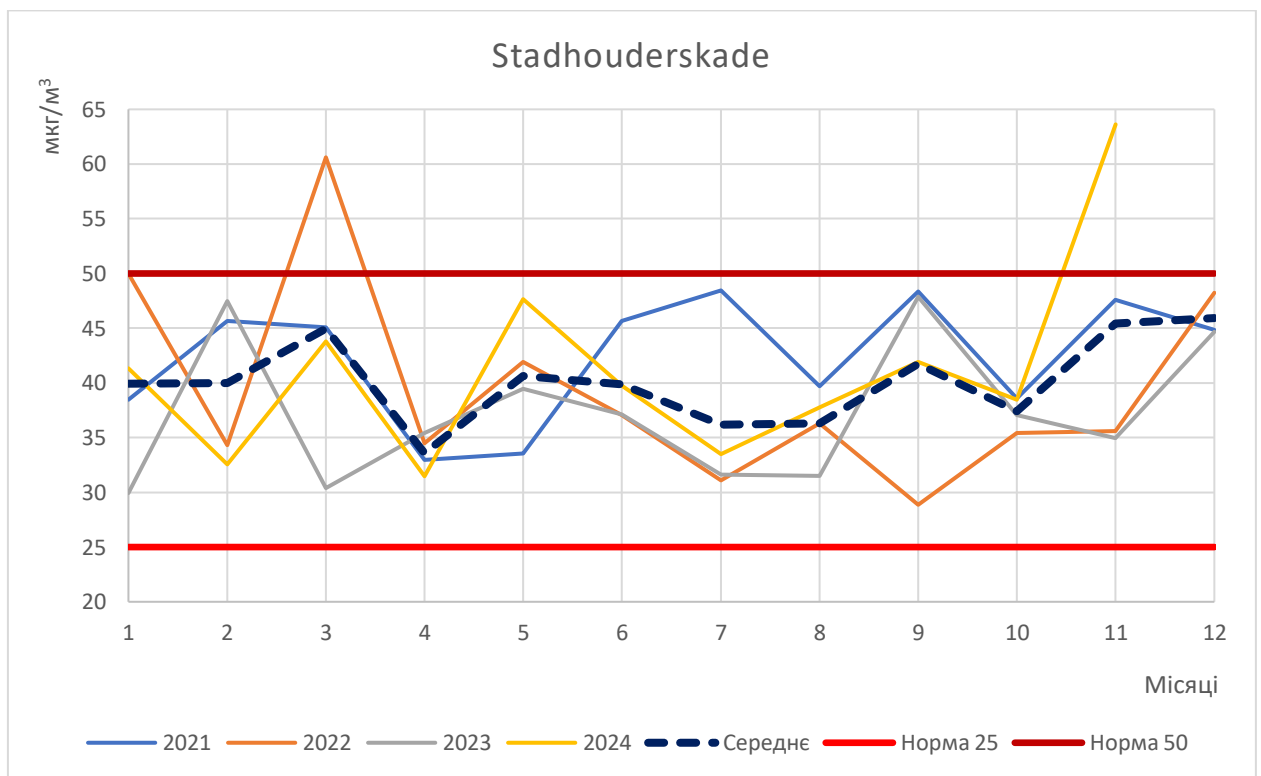


Рис. 3.1 Динаміка середньомісячних значень концентрації $PM_{2.5}$ для станції Stadhouderskade

Найвищі середні значення концентрації $PM_{2.5}$ спостерігаються саме в зимові місяці (грудень – лютий). Це пов'язано з декількома факторами, такими як збільшення інтенсивності опалення, зокрема за рахунок

використання викопного палива в промисловості та побуті, а також несприятливі метеорологічні умови (низькі температури та висока вологість), які сприяють накопиченню твердих часток у приземному шарі атмосфери.

У 2022 році спостерігалось значне перевищення норми (до 60,6 мкг/м³ у березні), що вказує на погіршення якості повітря в цей період.

Навесні (березень – травень) рівні РМ_{2.5} знижуються, що пов'язано зі сприятливішими метеорологічними умовами (більша інтенсивність сонячного світла, краща вентиляція повітря), які сприяють розсіюванню забруднюючих речовин. Проте окремі місяці (наприклад, квітень у 2023 році з рівнем 35,4 мкг/м³) все ж показують перевищення норми через інтенсивний туристичний потік і транспортні викиди.

У літні місяці (червень – серпень) середні концентрації РМ_{2.5} зазвичай є нижчими, що пояснюється сприятливими умовами для розсіювання забруднюючих речовин. Проте рівні все ще перевищують норму ВООЗ (25 мкг/м³) у більшості років, досягаючи значень 36–39 мкг/м³. Лише у 2023 році було зафіксовано зниження до 31–32 мкг/м³, що можна пояснити локальними екологічними ініціативами або зменшенням промислової активності.

Восени (вересень – листопад) рівні РМ_{2.5} знову починають зростати, особливо у листопаді, що збігається з початком опалювального сезону. Середні значення коливаються від 34 до 48 мкг/м³, що вказує на сезонне збільшення концентрацій через підвищену активність джерел забруднення.

Аналіз показує, що середньомісячні концентрації РМ_{2.5} на станції Stadhouderskade часто перевищують норму ВООЗ у 25 мкг/м³ протягом більшої частини року, особливо в зимовий та осінній періоди. Однак рівні забруднення зазвичай не перевищують норму ЄС у 50 мкг/м³, за винятком окремих місяців у 2022 році.

Через високу інтенсивність транспортного потоку, промислову активність та щільність населення центральний район Амстердама має вищі рівні РМ_{2.5} порівняно з іншими частинами міста.

Аналіз даних за 2021–2024 роки свідчить про те, що середньомісячні концентрації PM_{2.5} у Vondelpark коливаються в межах від 22,8 до 61,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ці показники значно варіюють залежно від сезону та року. На графіку (рис. 3.2) відображено місячні середні концентрації, які показують тенденції забруднення.

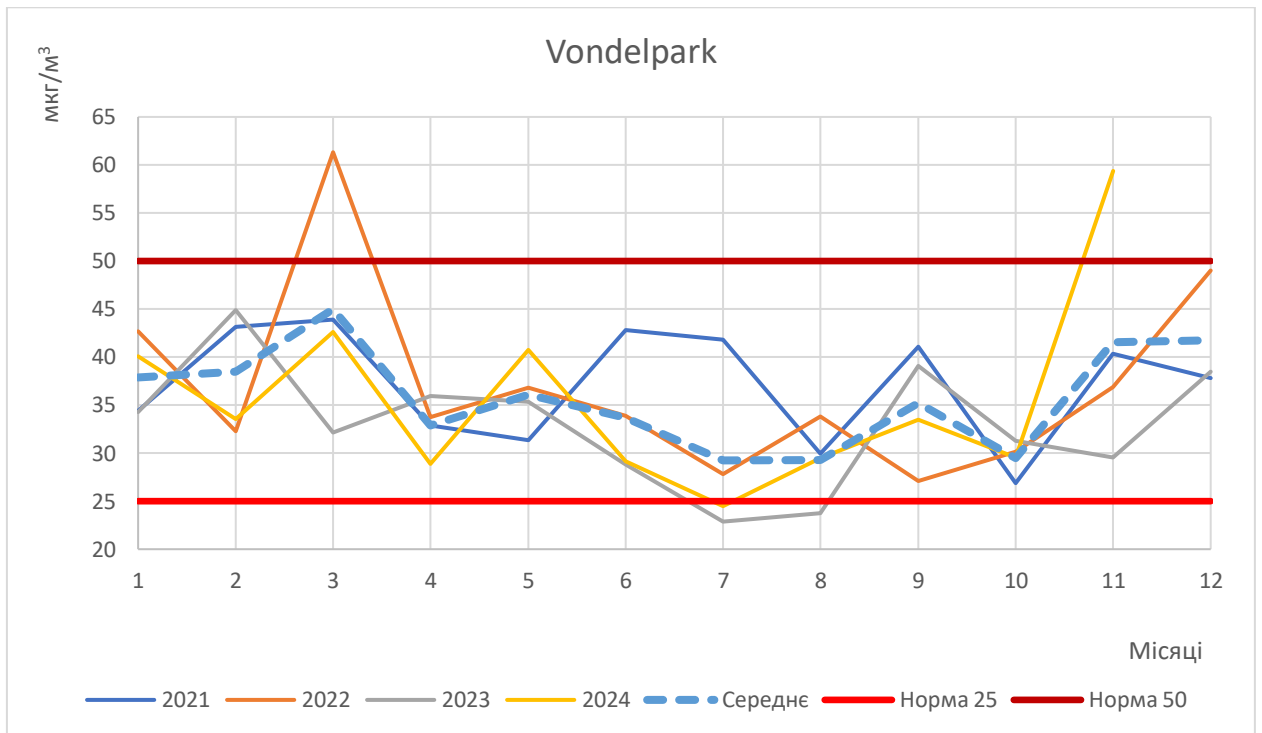


Рис. 3.2 Динаміка середньомісячних значень концентрації PM_{2.5} для станції Vondelpark

Середні значення часто перевищують рекомендовані норми ВООЗ (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), особливо у весняні місяці (березень) та зимові місяці (листопад і грудень).

Хоча рівень PM_{2.5} рідко перевищує граничний норматив Європейського Союзу (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), у деяких місяцях, особливо в березні 2022 року (61,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), все ж фіксуються суттєві перевищення цього рівня. Зимовий період (грудень – лютий). У зимові місяці концентрації PM_{2.5} зазвичай зростають. Це можна пояснити збільшенням використання опалення в будівлях, а також менш сприятливими погодними умовами (низькі температури, висока

вологість), які сприяють накопиченню забруднюючих речовин. У 2021 році середній рівень $PM_{2.5}$ у грудні складав $37,8 \mu g/m^3$, що перевищує норму ВООЗ. У грудні 2022 року рівень підвищився до $49 \mu g/m^3$, що також перевищує допустимі норми ЄС.

Весна, зокрема березень, демонструє високі коливання концентрацій $PM_{2.5}$. Наприклад, у березні 2022 року рівень $PM_{2.5}$ досягнув максимуму в $61,3 \mu g/m^3$, що значно перевищує обидві норми. Такий високий рівень може бути пов'язаний із сезонними змінами, включаючи підвищену активність транспорту та будівельні роботи. Протягом інших весняних місяців (квітень і травень) концентрації залишаються високими, хоча і нижчими, ніж у березні.

У літні місяці (червень – серпень), коли сприятливі метеорологічні умови сприяють розсіюванню забруднюючих речовин, рівні $PM_{2.5}$ значно знижуються. Наприклад, у липні 2023 року було зафіксовано один з найнижчих рівнів $PM_{2.5}$ ($22,9 \mu g/m^3$). Літо є найчистішим сезоном, коли середні значення $PM_{2.5}$ залишаються ближче до норми ВООЗ ($25 \mu g/m^3$), хоча в окремі роки, як у липні 2021 року ($41,8 \mu g/m^3$), можуть бути пікові значення.

Восени (вересень – листопад) рівень $PM_{2.5}$ поступово зростає, особливо в листопаді, коли починається опалювальний сезон. Наприклад, у листопаді 2024 року спостерігалось значне перевищення норми з рівнем $59,4 \mu g/m^3$, що є одним з найвищих показників за досліджуваний період.

Вересень та жовтень зазвичай мають помірні показники, ближчі до норм ВООЗ, але значення можуть змінюватися залежно від метеорологічних умов та інтенсивності діяльності, пов'язаної з туризмом.

Аналіз показує, що середньомісячні концентрації $PM_{2.5}$ у Vondelpark значно перевищують норму ВООЗ у більшості місяців. Крім того, в окремих випадках, таких як березень 2022 року та листопад 2024 року, рівень $PM_{2.5}$ перевищує норму ЄС, що є серйозним екологічним ризиком та ризиком для здоров'я.

Дані свідчать про те, що концентрації PM_{2.5} на станції Einsteinweg суттєво коливаються залежно від сезону, досягаючи максимальних значень у зимові та весняні місяці. Середньомісячні концентрації PM_{2.5} у цьому районі змінюються в межах від 22,4 до 69,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Протягом декількох місяців показники перевищують як рекомендовані значення ВООЗ (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), так і граничний рівень, встановлений Європейським Союзом (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), що свідчить про високий рівень забруднення повітря в цьому районі (рис. 3.3).

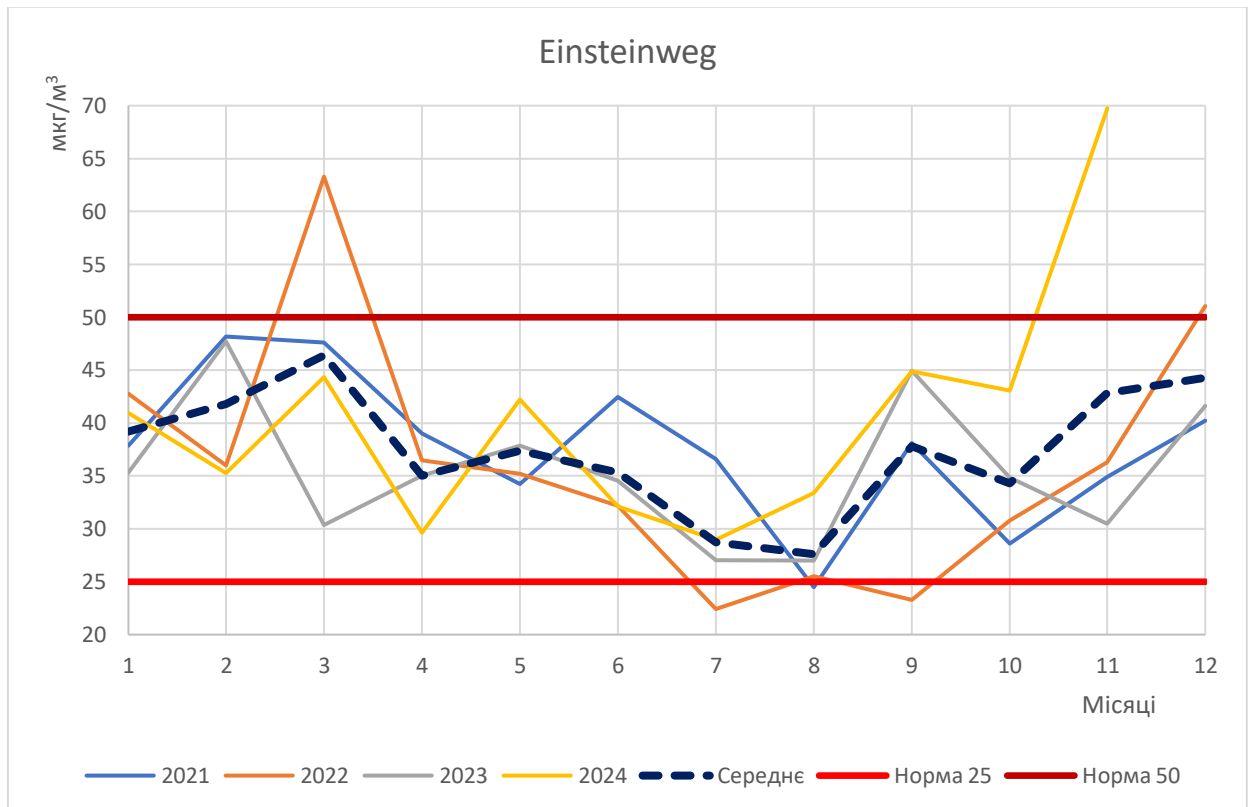


Рис. 3.3 Динаміка середньомісячних значень концентрації PM_{2.5} для станції Einsteinweg

Зимові місяці характеризуються підвищенням рівня PM_{2.5}, що пов'язано з інтенсивним опаленням, менш сприятливими метеорологічними умовами (температурна інверсія, висока вологість) та високою транспортною активністю. У грудні 2022 року концентрація PM_{2.5} досягла значення 51,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, що перевищує граничний рівень ЄС. Середнє значення для зимових місяців залишається вище за норму ВООЗ, досягаючи 42,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ у середньому за чотири роки.

Весна демонструє значне підвищення рівня PM_{2.5}, особливо в березні. У березні 2022 року показник PM_{2.5} досягнув 63,3 µg/m³, що є максимальним значенням за весь досліджуваний період. Середній рівень PM_{2.5} навесні зазвичай перевищує норму ВООЗ і навіть граничний рівень ЄС у деякі місяці.

Пік забруднення може бути зумовлений сезонною активністю транспорту, а також промисловими викидами в цей період.

У літні місяці рівень PM_{2.5} зазвичай знижується, що пояснюється сприятливими умовами для розсіювання забруднюючих речовин. Найнижчі середньомісячні значення спостерігаються в липні та серпні, коли середні концентрації PM_{2.5} становлять близько 22,4–28,8 µg/m³. Проте навіть у цей період концентрації часто залишаються вище за норму ВООЗ (25 µg/m³), що може вказувати на постійний вплив транспорту та промислових джерел забруднення.

Восени рівень PM_{2.5} поступово зростає, особливо у жовтні та листопаді, коли починається опалювальний сезон. Наприклад, у листопаді 2024 року концентрація досягла одного з найвищих значень – 69,7 µg/m³, що є значним перевищенням обох нормативів (ВООЗ і ЄС). Це свідчить про збільшення викидів від опалення, а також вплив транспортного руху в цьому промислово-орієнтованому районі.

Район навколо станції Einsteinweg має високу концентрацію PM_{2.5}, особливо в зимовий та весняний періоди, що вказує на вплив транспортних і промислових джерел забруднення. Весняний пік у березні та осінній пік у листопаді вказують на необхідність додаткових заходів у ці періоди, таких як обмеження на використання дизельного транспорту або зменшення промислових викидів.

Аналіз показує, що в районі Einsteinweg рівні PM_{2.5} часто перевищують обидві норми (ВООЗ і ЄС), особливо в холодні місяці та під час підвищеної транспортної активності. Це підкреслює необхідність продовження моніторингу та впровадження ефективних екологічних заходів для зниження рівня забруднення.

Станція Hoogtij розташована у промисловій зоні Амстердама, що потенційно є джерелом високого рівня забруднення через діяльність різних промислових об'єктів. Ця локація є важливою для моніторингу якості повітря, оскільки викиди промислових підприємств можуть суттєво підвищувати концентрацію твердих часток PM_{2.5} у повітрі. Дані, проаналізовані за період з 2021 по 2024 роки, дозволяють виявити сезонні коливання та загальні тенденції у рівнях забруднення PM_{2.5}. Середньомісячні значення за цей період наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Середньомісячні значення концентрації PM_{2.5} для станції Einsteinweg

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2021	35,84	47,54	44,42	32,63	32,87	43,93	42,00	29,42	39,96	34,90	44,89	39,96
2022	45,00	40,77	64,00	35,70	38,42	37,00	28,84	31,71	28,73	36,74	41,10	52,45
2023	36,61	51,00	29,45	35,40	38,32	33,70	20,42	18,94	38,43	27,90	22,07	33,90
2024	30,42	29,97	37,94	24,59	38,39	27,87	21,77	27,39	31,43	26,29	55,75	
Середнє	36,97	42,32	43,95	32,08	37,00	35,63	28,26	26,86	34,64	31,46	40,95	42,11
Норма 25	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Норма 50	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00

Аналіз даних свідчить, що концентрації PM_{2.5} на станції Hoogtij змінюються залежно від сезону та року. Середньомісячні показники коливаються від 18,9 до 64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, при цьому значення часто перевищують рекомендовану ВООЗ норму у 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. У декількох місяцях показники PM_{2.5} також перевищують граничний рівень ЄС у 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, що свідчить про суттєвий рівень забруднення повітря в цьому районі (рис. 3.4).

Взимку рівні (грудень – лютий) PM_{2.5} є відносно високими, що можна пояснити збільшенням опалення в промислових об'єктах та менш сприятливими метеорологічними умовами для розсіювання забруднення. Наприклад, у грудні 2022 року рівень PM_{2.5} досягнув 52,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, що значно

перевищує норму ЄС. Середні показники зимових місяців стабільно перевищують норму ВООЗ, що свідчить про високе забруднення в холодний період року.

Навесні (березень – травень) спостерігається значне коливання рівнів $PM_{2.5}$, з піковими значеннями у березні. Наприклад, у березні 2022 року рівень $PM_{2.5}$ досягнув $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, що є найвищим показником за всі роки спостереження. Високі рівні забруднення можуть бути пов'язані з промисловою активністю та менш сприятливими погодними умовами у цю пору року.

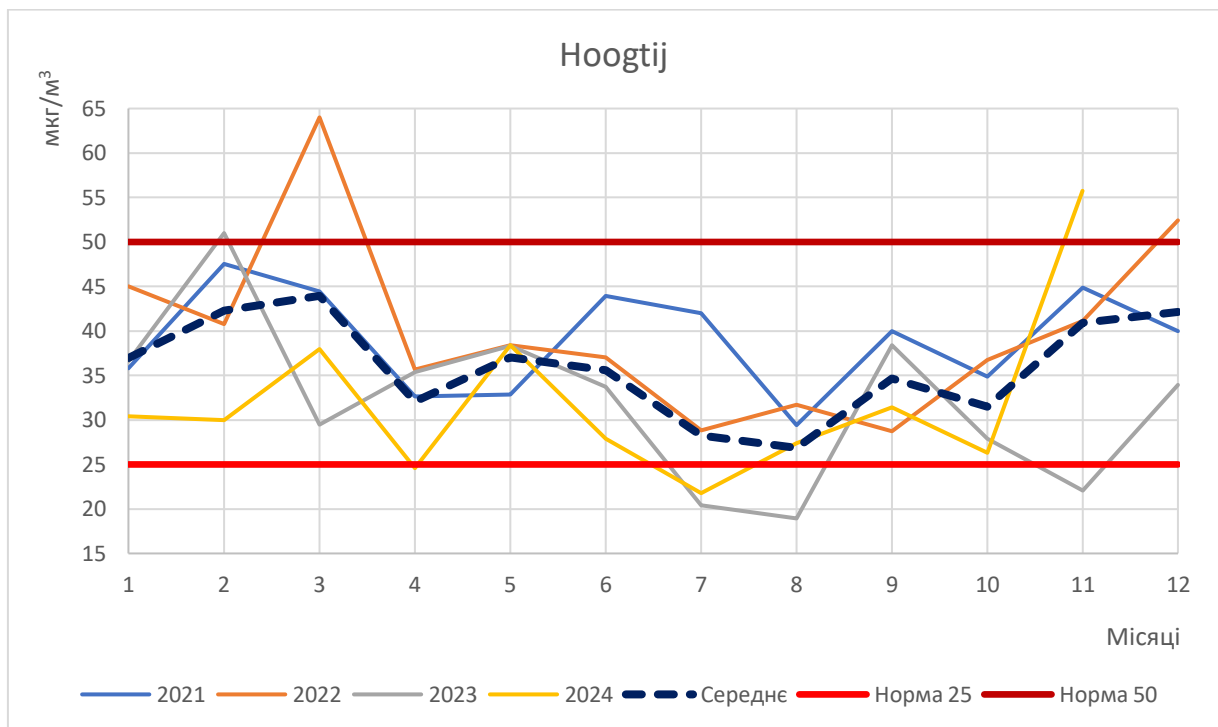


Рис. 3.4 Динаміка середньомісячних значень концентрації $PM_{2.5}$ для станції Einsteinweg

Літній період (червень – серпень). Літні місяці, як правило, мають нижчі рівні $PM_{2.5}$ завдяки сприятливим погодним умовам для розсіювання забруднюючих речовин. Найнижчі значення фіксуються у липні та серпні, коли середні концентрації становлять близько $18,9\text{--}28,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, що є ближчим до норми ВООЗ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Проте навіть у цей період спостерігаються деякі перевищення, що вказує на постійний вплив промислових джерел забруднення.

В осінній період (вересень – листопад) рівень PM_{2.5} поступово зростає, особливо в листопаді, коли опалювальний сезон розпочинається.

Наприклад, у листопаді 2024 року рівень PM_{2.5} досягнув 55,8 µg/m³, що значно перевищує норму ЄС. Це підтверджує негативний вплив опалювального сезону та промислової діяльності на якість повітря в цьому районі.

Район навколо станції Hoogtij є однією з найзабрудненіших зон Амстердама, особливо під час зимового та весняного періодів. Це пов'язано з впливом промислових об'єктів та опалювального сезону.

Станція Hoogtij відображає постійно високий рівень забруднення, який перевищує рекомендовані ВООЗ показники протягом більшої частини року. Це свідчить про необхідність впровадження додаткових екологічних заходів для зниження викидів PM_{2.5} у цьому промисловому районі.

ВИСНОВКИ

Вході виконання кваліфікаційної роботи Аналіз сезонних змін рівня пилових часток PM_{2,5} у міському середовищі м. Амстердаму (Нідерланди).

1. З'ясовано, що проблема забруднення повітря пиловими частками PM_{2.5} є актуальною для великих міст, зокрема Амстердама. Проведений літературний огляд показав, що PM_{2.5} негативно впливають на здоров'я людей та екосистеми, а їх концентрація залежить від пори року та кліматичних умов.

2. У роботі розглянуто сучасні методи моніторингу атмосферного повітря, серед яких найефективнішими виявилися стаціонарний моніторинг, мобільні сенсори та дистанційне зондування. Для аналізу просторово-часових змін концентрацій PM_{2.5} використано методи геоінформаційних систем (ГІС) та аналізу часових рядів. Розроблена програма дослідження передбачала збір та аналіз даних із чотирьох станцій у різних зонах Амстердама: центральній, парковій, транспортній та промисловій, дані про середньомісячні концентрації PM_{2.5} за 2021–2024 роки стали основою для оцінки сезонної динаміки забруднення повітря.

3. Станції, розташовані у промислових та транспортно-орієнтованих районах Амстердама, зокрема Hoogtij та Einsteinweg, демонструють найвищі середньомісячні концентрації PM_{2.5}. Показники на цих станціях часто перевищують як рекомендації ВООЗ (25 µg/m³), так і граничний рівень ЄС (50 µg/m³), особливо у зимовий та весняний періоди.

Забруднення в цих районах зумовлене інтенсивною діяльністю промислових підприємств, високою інтенсивністю транспортного руху та опалювальним сезоном, коли збільшується використання вихопного палива.

Станція Vondelpark, розташована у великій зеленій зоні, має загалом нижчі середні концентрації PM_{2.5} порівняно з промисловими та транспортними районами. Рослинність частково компенсує забруднення повітря, але не здатна повністю знизити концентрації PM_{2.5} до

рекомендованих значень, особливо у періоди з інтенсивною транспортною активністю, що свідчить про обмежений вплив рослинності на зниження рівня забруднення у густонаселених і промислових зонах.

4. Результати показали, що найвищі рівні $PM_{2.5}$ спостерігаються в зимовий період — до $63,6 \text{ мкг/м}^3$ у центрі міста. Це пов'язано з опалювальним сезоном, високою вологістю та несприятливими погодними умовами для розсіювання часток. У літні місяці концентрації знижуються до $22\text{--}33 \text{ мкг/м}^3$, коли повітря очищується завдяки кращій циркуляції. У літні місяці, навпаки, спостерігається зниження рівнів $PM_{2.5}$ завдяки сприятливим метеорологічним умовам, які сприяють розсіюванню забруднюючих речовин. Однак навіть у цей період концентрації $PM_{2.5}$ залишаються вищими за рекомендації ВООЗ у промислових районах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Health Organization. Quality Guidelines 2021-Aiming for Healthier Air for all: A Joint Statement by Medical, Public Health, Scientific Societies and Patient Representative Organisations. *Int J Public Health*. 2021 Sep 23;66:1604465. <https://doi.org/10.3389/ijph.2021.1604465> .
2. Miller K.A., Siscovick D.S., Sheppard L., Shepherd K., Sullivan J.H., Anderson G.L., Kaufman J.D. Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women. *The New England journal of medicine*, 2007. 356(5), P. 447–458. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa054409>
3. Dockery D. W., Pope C. A., Spengler J. D., Ware J. H. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England journal of medicine*, 1993. 329(24), P. 1753–1759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401> .
4. Janssen N. A., Hoek G., Simic-Lawson M., Fischer P. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM₁₀ and PM_{2.5}. *Environmental health perspectives*, 2011. 119(12), P. 1691–1699. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>
5. Air Quality in Europe – 2019 Report. Copenhagen. *European Environment Agency*. 2019. 104 p. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>
6. Eeftens M., Tsai M. Y., Ampe C., et al. Spatial variation of PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5} absorbance and PM_{coarse} concentrations between and within 20 European study areas and their relationship with NO₂. *Atmospheric Environment*, 2012. 62, P. 303-317. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.038>
7. Hoek G., Krishnan R. M., Beelen R., Peters A. Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. *Environmental health: a global access science source*, 2013. 12(1), 43. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-43>

8. Lelieveld J., Evans J. S., Fnais M., Giannadaki D., Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 2015. 525(7569), P. 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
9. Pope C. A., Burnett R. T., Thun M. J. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 2002. 287(9), P. 1132–1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
10. Knol A. B., de Hartog J. J., Boogaard H., Slottje P. Expert elicitation on ultrafine particles: likelihood of health effects and causal pathways. *Particle and fibre toxicology*, 2009. 6, 19. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-6-19>
11. Zhang R., Jing J., Tao J., Hsu S.-C. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective, *Atmos. Chem. Phys.*, 2013. 13, 7053–7074, <https://doi.org/10.5194/acp-13-7053-2013> .
12. Huang T., Yu Y., Wei Y., Wang H., Huang W., Chen X. Spatial-seasonal characteristics and critical impact factors of PM_{2.5} concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *PloS one*, 2018. 13(9), e0201364. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201364>
13. Hu J., Yu L., Yang Z., Qiu J. Long-Term Exposure to PM_{2.5} and Mortality: A Cohort Study in China. *Toxics*, 2023. 11(9), 727. <https://doi.org/10.3390/toxics11090727>
14. Seinfeld J. H., Pandis, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change (3rd ed.). John Wiley & Sons. 2016. 1152 p.
15. Hu J., Huang L., Chen M., Liao H., Zhang H., Wang S., Zhang Q. Premature Mortality Attributable to Particulate Matter in China: Source Contributions and Responses to Reductions. *Environmental science & technology*, 2017. 51(17), 9950–9959. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03193>
16. Lelieveld J., Pöschl, U. Chemists can help to solve the air-pollution health crisis. *Nature*, 2017. 551(7680), 291–293. <https://doi.org/10.1038/d41586-017-05906-9>

17. Zhong L., Louie P. K. K., Zheng J., Yuan Z., Yue D., Ho J. W. K., Lau A. K. H. Science–policy interplay: Air quality management in the Pearl River Delta region and Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 2013, 76, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.012>
18. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.. World Health Organization. 2021. 300 p. Доступно за посиланням <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
19. Brunekreef B., Holgate, S. T. Air pollution and health. *The Lancet*, 2002. 360(9341), 1233-1242. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)
20. Pugh T. A. M., MacKenzie A. R., Whyatt J. D., et al. Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Urban Air Quality. *Environmental Science & Technology*, 2012. 46(14), 7692-7699. DOI: <https://doi.org/10.1021/es300826w>
21. de Nazelle A., Nieuwenhuijsen M. J., Antó J. M., et al. Improving health through policies that promote active travel: A review of evidence to support integrated health impact assessment. *Environment International*, 2011. 37(4), 766-777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.02.003>
22. Buekers J., Van Holderbeke M., Bierkens J., Panis L. I. Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014. 33, 26-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.09.002>
23. Cimorelli A. J., Perry S. G., Venkatram A. AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. *EPA Technical Report*, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAM2227.1>
24. Ramboll. CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) User's Guide Version 7.0. 2021/ Доступнозапосиланням: <http://www.camx.com>
25. Buonocore J. J., Lee H. J., Levy J. I. The influence of traffic on air quality in an urban neighborhood: a community-university partnership. *American journal*

of public health. 2009. 99 Suppl 3 (Suppl 3), S629–S635.
<https://doi.org/10.2105/AJPH.2008.149138>

26. Huang K., Xiao Q., Meng X., Geng G. Predicting monthly high-resolution PM_{2.5} concentrations with random forest model in the North China Plain. *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*, 2018. 242 (Pt A), C. 675–683.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.016>

27. European Parliament and Council. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. 2008. Офіційний журнал Європейського Союзу L 152/1.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>

28. Gemeente Amsterdam. Amsterdam Climate Neutral Roadmap. 2020.
 Доступно за посиланням:
https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/943415/roadmap_climate_neutral.pdf

29. Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., et al. The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 2013. 47(20), 11369-11377. DOI: <https://doi.org/10.1021/es4022602>

30. Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y. C., & Kumar, N. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 2006. 40(30), 5880-5892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.016>

31. Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 2015. 74, 136-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>

32 Baldauf R. W., Devlin R. B., Gehr P., Giannelli R., Hassett-Sipple B., Jung H., Martini G., McDonald J., Sacks J. D., Walker K. Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop. *International journal of environmental research and public health*, 2016. 13 (11), 1054.
<https://doi.org/10.3390/ijerph13111054>

33. Kumar, P., Morawska, L., Birmili, W., et al. Ultrafine particles in cities. *Environment International*, 2014. 66, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.01.013>
34. Zou Bin, Peng Fen, Chen Si, Luo Yan. A GIS-Aided Method for Assessing High-Resolution Population Exposure to Environmental Pollutants. *Advanced Materials Research*. 2012. 610-613. 3738-3741. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.3738> .
35. Tunnicliffe Wilson, Granville. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th Edition, by George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel and Greta M. Ljung, 2015. Published by John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, pp. 712. *Journal of Time Series Analysis*. 2016. 37. n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12194>.
36. Xiang Jianbang, Weschler Charles, Wang Qingqin, Zhang Lin, Mo Jinhan. Reducing Indoor Levels of "Outdoor PM2.5" in Urban China: Impact on Mortalities. *Environmental Science & Technology*. 2019. 53. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06878> .
37. World Health Organization. *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease*. WHO. 2016. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf>
38. Marando F., Heris M. P., Zulian G., Udías A., Mentaschi L., Chrysoulakis N., Parastatidis D., Maes J. Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustain. Cities Soc.*, 2022, 77, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
39. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Climate data for the Netherlands. 2023. <https://www.knmi.nl/>
40. Manders A., Schaap Martijn, Hoogerbrugge Ronald. Testing the capability of the chemistry transport model LOTOS-EUROS to forecast PM10 levels in the Netherlands. *Atmospheric Environment*. 2009. 43. 4050-4059. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.006>.

41. Statistics Netherlands (CBS). Population and urban density of Amsterdam. 2023. <https://www.cbs.nl/>
42. Municipality of Amsterdam. Traffic and transportation in Amsterdam: Annual report. 2022. <https://www.amsterdam.nl/>
43. Fischer, P. H., Marra, M., Ameling, C. B., Hoek, G., Beelen, R., de Hoogh, K., Breugelmans, O., Kruize, H., Janssen, N. A., & Houthuijs, D. (2015). Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS). *Environmental health perspectives*, 123(7), 697–704. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408254>
44. Port of Amsterdam. Environmental impact report. 2023. <https://www.portofamsterdam.com/>
45. Gemeente Amsterdam. Amsterdam Climate Neutral Roadmap 2050. <https://openresearch.amsterdam.nl/page/48130/roadmap-amsterdam-climate-neutral-2050>