

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики

Кафедра Обчислювальної Математики

**Дипломна робота**

За спеціальністю 113 "Прикладна математика"

на тему:

**Моделювання розповсюдження  
шкідливих викидів у атмосфері**

Виконав студент 4-го курсу

Коломієць Микола

Науковий керівник:

Затула Дмитро

Київ, 2024

# ЗМІСТ

<b>1</b>	<b>Забруднення</b>	<b>3</b>
1.1	Основні викиди . . . . .	3
1.2	Тверді частинки (PM) . . . . .	3
1.3	Оксиди азоту (NO <sub>x</sub> ) . . . . .	4
1.4	Сірчастий газ (SO <sub>2</sub> ) . . . . .	5
1.5	Озон(O <sub>3</sub> ) . . . . .	6
1.6	Вуглекислий газ (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	8
1.7	Чадний газ (CO) . . . . .	10
1.8	Методи вимірювання забруднення . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Дані, їх перетворення і аналіз</b>	<b>11</b>
2.1	Дані . . . . .	11
2.2	Інструменти . . . . .	12
2.3	Вигляд, паттерни та зв'язок даних . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Моделювання</b>	<b>15</b>
3.1	Лінійна регресія . . . . .	15
3.2	Кластеризація та регресія . . . . .	16
3.3	Нейронна мережа . . . . .	16
	<b>Бібліографія</b>	<b>17</b>

## **ВСТУП**

Забруднення повітря є дуже важливим питанням для здоров'я людей та навколишнього середовища. Воно може бути викликане різними факторами, такими як викиди транспорту, промисловості та сільського господарства. На стан повітря певної місцевості також може впливати вітер, температура та географія самого міста. Велика кількість забруднюючих речовин може викликати різні захворювання та проблеми зі здоров'ям, тому це є важливим фактором для вибору місця проживання і відповідно важливою проблемою для влади міста, яка піклується про добробиток населення міста.

Моніторинг і можливість прогнозування забруднення повітря є необхідним у сучасному світі. Для забезпечення здоров'я та комфорту населення міста важливо мати точні дані, щодо забруднення та його динаміки. Також важливо мати можливість прогнозувати забруднення задля вивчення аномалій та можливості вчасно реагувати на різкі зміни у стані повітря. Відмінності між реальним станом повітря і прогнозованим може бути наслідком появи нового чинника забруднення або впливу зміни клімату і за допомогою аналізу подібних відмінностей ці чинники можуть бути визначені. Крім того моделі можуть продемонструвати, як на стан повітря вплинули покращувальні заходи, що дозволить з меншими похибками визначати, які з методів є кращими.

# РОЗДІЛ 1 ЗАБРУДНЕННЯ

## 1.1 Основні викиди

До основних викидів, що забруднюють атмосферу, належать:

- Тверді частинки (PM)
- Оксиди азоту
- Сірчастий газ
- Озон
- Вуглекислий газ
- Чадний газ

## 1.2 Тверді частинки (PM)

PM (particulate matter) це особлива категорія викидів в атмосферу, що включає в себе всі не газоподібні забруднювачі з малим розміром частинок. Частинки мають різноманітний хімічний склад і деякі можуть бути токсичними.

Ці викиди класифікують за розміром частинок. Найпоширенішими групами є PM<sub>10</sub> та PM<sub>2.5</sub>, що відповідають частинкам з діаметром менше 10 та 2.5 мікронів відповідно. Подібні частинки можуть долати великі відстані в атмосфері за допомогою вітру. Тож деяка частина цих викидів прилітає зза кордону.

Невелика частина забруднення має природний характер (пил, морські частинки, вулканічний попіл) і більшість забруднення мають антропогенні джерела. Для PM це може бути викиди від спалення палива в транспорті, промисловості або пожеж в лісах. В великих містах значна частина PM з'являється від зношених шин та дисків автотранспорту.

Концентрація РМ в повітрі моніториться організаціями з охорони здоров'я і граничні допустимі норми регулюються законодавством, задля цього був створений індекс якості повітря відносно РМ.[2]

Індекс якості повітря	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Добрий	0	0
Задовільний	12	54
Шкідливий для групи ризику	35	154
Шкідливий	55	254
Дуже шкідливий	150	354
Небезпечний	250	424

Таблиця 1.1: Індекс якості повітря відносно РМ у  $\frac{\text{мкг}}{\text{м}^3}$

Підвищена РМ зазвичай спостерігається біля доріг з інтенсивним рухом транспорту та біля зони зони підприємств у великих містах. Як вже зазначалося, ці частинки можуть переноситися вітром тож великі концентрації зауроднення спостерігаються лише в дні з слабким вітром або у місцевості де вітер не виносить забруднення за межі міста.

Частинки через дихання потрапляють у кровообіг і можуть осідати у внутрішніх органах, таким чином частинки менші 10 мікронів можуть спричинити проблеми з диханням та впливати на роботу серця.[1]

### 1.3 Оксиди азоту (NO<sub>x</sub>)

Більша частина оксидів азоту утворюється в результаті з'єднання кисню з азотом у полум'ї. Менша частина є результатом горіння сполук азоту в паливі. Природньо NO<sub>x</sub> утворюється в наслідок блискавки і незначною мірою мікробних процесів в ґрунті.

Антропогенні викиди оксидів домінують серед інших викидів за масою. Лише в британції ці викиди становлять близько 2.2 мільйонів тон кожного року. З них половина припадає на транспорт, чверть на електростанції і решта на інші промислові та побутові процеси спалювання.

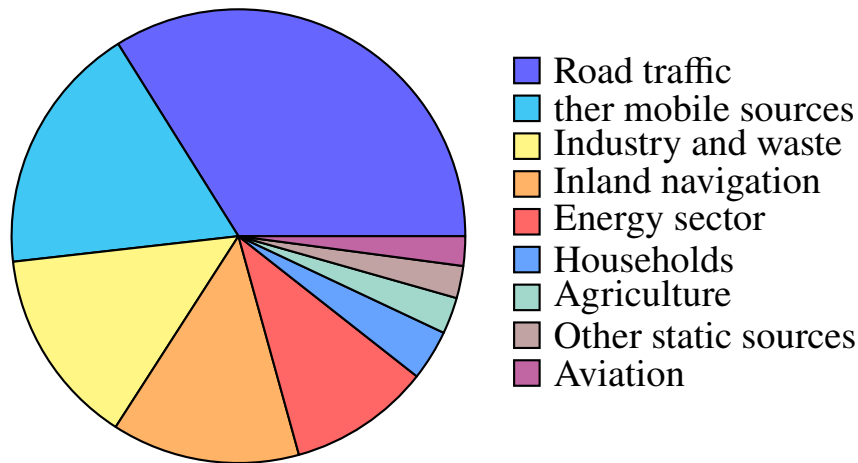


Рис 1.1 Діаграма чинників викидів оксидів азоту за 2022 рік по світу

Основними забруднювачами данного типу є оксид азоту  $\text{NO}$  та меншою мірою діоксид азоту  $\text{NO}_2$ . Протягом дня ці оксиди в атмосфері перетворюються один в одного. Оксид азоту окислюється в атмосфері до  $\text{NO}_2$  за участю озону протягом десятків хвилин, а діоксид розщеплюється під діє ультрафіолетового випромінювання на  $\text{NO}$  та атом кисню, що утворює озон з киснем. Таким чином ці гази існують у квазірівноважному стані за участі світла. Згодом діоксид азоту окислюється до азотної кислоти, яка швидко поглинається під час контакту з поверхнями, назважаючи на це самі оксиди зникають повільно і можуть подорожувати на великі відстані до розкладу на кислоту або нітрати. Тож забруднення однієї країни спричиняють забруднення і в сусідніх. Найбільша концентрація спостігається в районах великих міст через які проходять автомагістралі з інтенсивним рухом.

Високий рівень діоксиду азоту може спричинити пошкодження дихальних шляхів та підвищити вразливість людини до респіраторних інфекцій і астми. Тривалий вплив може спричинити хронічні захворювання легенів.

#### 1.4 Сірчастий газ ( $\text{SO}_2$ )

Діоксид сірки виділяється при спалюванні палива, що містить сірку, тож основними джерелами даних викидів є виробництво електроенергії, промислове та побутове спалення палива. Міжнародні організації зменшують кількість викидів сірчастого газу за допомогою законів і врегулювань. Також було розроблене обладнання для очищення димових газів від сірки і завдяки йому викиди продовжують зменшуватись, не зважаючи на збільшення

використання вугілля з 2000-них років. Агенством з охорони навколишнього середовища був створений індекс якості повітря відносно сірчистого газу, що дозволяють визначити наскільки небезпечна концентрація викидів для здоров'я людини:

Індекс якості повітря	Частка в повітрі (ppm)
Добрий	0
Задовільний	0,1
Шкідливий для групи ризику	0,2
Шкідливий	1,0
Дуже шкідливий	3.0
Небезпечний	5.0

Таблиця 1.2: Індекс якості повітря відносно SO<sub>2</sub> у ppm (мільйонна частка)

Короткостроковий контакт з викидами може спричинити проблеми з дихальною системою людини. Особливо небезпечними подібні контакти для групи ризику - люди з астмою або діти. Також викиди діоксиду спричиняють формуванню інших оксидів сірки, що в наслідок реакції з іншими компонентами атмосфери можуть перетворитись на тверді частки (PM), що в свою чергу вже мають свої наслідки для здоров'я людини.

Коли сірковий газ реагує з повітрям і водою, утворюється корозійна рідина - сіркова кислота, це одна з головних компонент кислотних дощів, що спричиняють велику шкоду навколишньому середовищу. На додачу сам сірковий газ сповільнює ріст рослин і пошкоджує листя.

При взаємодії сіркового газу з карбоном утворюються сульфатні аерозолі, що збільшують життя хмар сприяючи глобальному потеплінню.

## 1.5 Озон(O<sub>3</sub>)

Озон корисний високо, поганий поблизу. Озоновий шар, який знаходиться високо у верхніх шарах атмосфери, захищає нас від значної частини ультрафіолетового випромінювання Сонця. Проте забруднене озоном повітря на рівні землі, де ми можемо ним дихати, спричиняє серйозні проблеми зі здоров'ям. Озон агресивно атакує легеневу тканину, вступаючи з нею в хімічну реакцію.

Приземний озон утворюється в атмосфері з газів, які викадуються із вихлопних труб, димових труб, фабрик та багатьох інших джерел забруднення. Коли ці гази контактують із сонячним світлом, вони реагують і утворюють озоновий дим. Для утворення озону необхідні оксиди азоту, легкі органічні сполуки та сонячне світло. Утворення оксидів азоту було розглянено в одному з попередніх підрозділів. Легкі органічні сполуки викидаються в повітря з деяких звичайних споживчих товарів, таких як фарба, і коли випаровуються побутові хімікати, такі як розріджувачі фарб і розчинники. Вони також викидаються від автомобілів, хімічних заводів, нафтопереробних заводів, фабрик і автозаправних станцій. За присутності цих газів в правильних умовах утворюється озон і згодом вітер може рознести утворені викиди на великі відстані. Високий рівень озону частіше спостерігається влітку через високі температури і оскільки підвищення рівня даного виду викидів сприяє потеплінню це утворює циклічну залежність.

У Галвестоні, Техас, було проведене дослідження, яке показало, що навіть короточасний вплив озону може погіршити здоров'я дорослих людей. Дослідження показало, що рятувальники мали більшу обструкцію легенів наприкінці дня, коли рівень озону був високий.

Групи ризику для впливу озону:

- вагітні жінки;
- діти;
- люди старші за 65 років;
- люди з астмою або іншими захворюваннями дихальних шляхів;
- Люди з нижчим соціально-економічним статусом;
- люди, які працюють або займаються спортом надворі.

Деякі контраверсійні дослідження показують більший вплив саме на жінок, але на даний момент відсутній остаточний консенсус стосовно цього питання.

Вплив озону у поєднанні з іншими факторами ризику скорочує середню тривалість життя. Існують переконливі докази смертоносності довго-



строкового впливу озону завдяки масштабним дослідженням. Було встановлено, що ризик передчасної смерті зростає зі збільшенням рівня озону.

В багатьох країнах в літній період утворюється достатньо озону для того щоб викликати проблеми зі здоров'ям. Інші проблеми крім укорочення середньої тривалості життя включають в себе:

- задишка хрипи і кашель
- респіраторні інфекції
- сприйнятливість до запалення легенів
- потреба в госпіталізації групи ризику

По мірі збільшення тривалості впливу озону можуть також з'являтися і інші проблеми. Це може бути метаболічні розлади, проблеми нервової системи, репродуктивні проблеми, рак, а також збільшення смертності від серцевих захворювань.

Вдихання інших викидів може зробити організм більш вразливи до озону і навпаки - вдихання озону підвищить реакцію на інші забруднювачі. Вплив озону також може підсилити реакцію у людей з алергією.

Нові дослідження натякають на те, що можливо варто переосмислити стандарти щодо оцінки данного забруднення. Наприклад, дослідження 2017 року продемонструвало, що люди похилого віку мають симптоми навіть коли рівень озону залишається нижчим за поточний національний стандарт.

## **1.6 Вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>)**

Вуглекислий газ це важливий для землі газ, що зберігає тепло в атмосфері, що вивільняється за спалювання викопного палива. Також велика кількість вуглекислого газу викидається в атмосферу в результаті природних процесів таких, як дихання та виверження вулканів, тож позбутися нанівець від цього газу неможливо. Хоча вуглекислий газ не вважається забрудником, через те що він є натуральним компонентом атмосфери та всі живі організми викидають його, але його кількість в атмосфері сильно зросла через спалювання викопаного палив у виробництві. Невеликі концентрації його у повітрі

безпечні для дихання, проте вони створюють парниковий ефект і сприяють глобальному потеплінню.

Найпоширеніший антропогенний чинник данного виду викидів полягає у спалюванні викопаного палива - вугілля, нафти та газу, для отримання тепла, електроенергії, руху транспорту. Крім прикладу електростанцій, що перетворюють тепло на електроенергію, можна навести будівничі процеси розповсюджені з приходом урбанізації - під час виробництва цементу використовується велика кількість викопаного палива для спалювання матеріалів цементу. Під час цього спалювання відбуваються хімічні реакції, що вивільняють вуглекислий газ. Загалом будівничі процеси багаті на хімічні реакції, що вивільняють вуглекислий газ, також вони залучають використання великої кількості транспорту, що також викидає вуглекислий газ. Крім того, вирубка лісів також вивільняє накопичений вуглець з лісових ландшафтів в атмосферу. Обернений до цього процес - секвестрація поліпшує стан справ і є одним із найперспективніших рішень для данного виду викидів.

Загалом вплив цих чинників виглядає так:

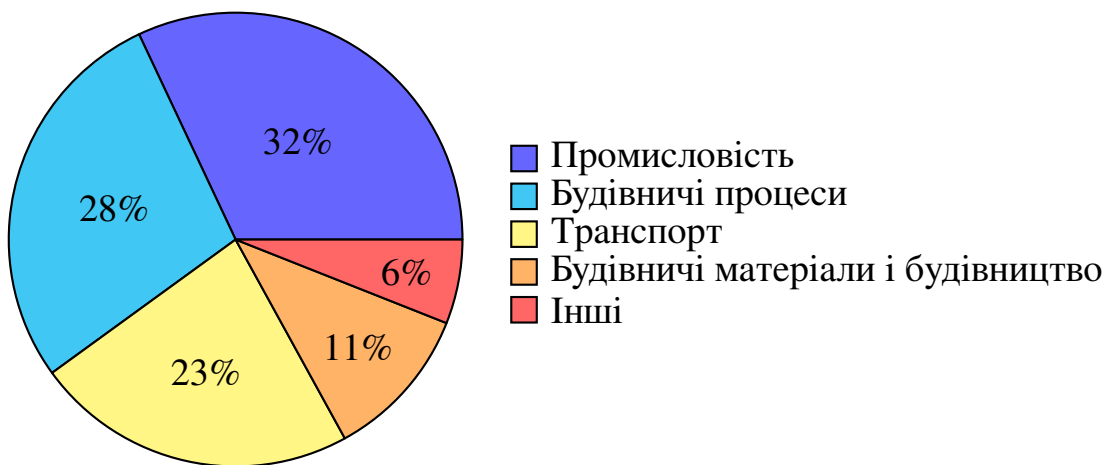


Рис 1.2 Діаграма антропогенних чинників викидів вуглекислого газу за 2019 рік по світу

Як було зазначено вище, невелика концентрація вуглекислого газу безпечна для дихання, проте великі концентрації можуть спричинити такі проблеми зі здоров'ям як:

- Головні болі
- Запаморочення

- Неспокійність
- Відчуття «поколювання».
- Утруднене дихання
- пітливість
- втома
- Почастішання пульсу
- Підвищений артеріальний тиск
- Кома
- Асфіксія
- Судоми

## 1.7 Чадний газ (CO)

Чадний газ, також відомий як оксид вуглецю, утворюється в результаті неповного згоряння палив, що містить у своєму складі вуглець, наприклад бензину, природного газу або деревини. Тож його джерелами є автомобілі, електростанції, лісові пожежі та застарілі сміттєспалювальні заводи. За кількістю викидів переважають саме автомобілі, що викидають близько 60% всіх викидів чадного газу. Оксид вуглецю також може утворюватися в результаті фотохімічних реакцій в атмосфері з метанових і неметанових вуглеводнів, інших летких органічних вуглеводнів в атмосфері та органічних молекул у поверхневих водах і ґрунтах.

Ранні ознаки легкого та помірного отруєння CO схожі на грип або харчове отруєння (за винятком відсутності температури), і деякі загальні симптоми включають:

- Головний біль
- Запаморочення
- Нудота
- Задишка
- Втома

Більш високі рівні отруєння призводять до гірших симптомів, включаючи нудоту, втрату свідомості, кому та навіть іноді призводять до летальних випадків.

## 1.8 Методи вимірювання забруднення

## РОЗДІЛ 2 ДАНІ, ЇХ ПЕРЕТВОРЕННЯ І АНАЗІЛ

У данному розділі буде описано вигляд даних, їх джерело, формат, форма, виміри та буде проведений аналіз на зв'язки та паттерни. Також будуть описані перетворення над даними необхідні для наступного розділу.

### 2.1 Дані

Дані відносно викидів були взяті з офіційного сайту європейського союзу за період 2020-2023 років. Кліматичні дані за той же період були взяті з сайту NASA. Ключі та відповідні назви параметрів наведені у таблиці:

ALLSKY SFC SW DWN	короткохвильове випромінювання неба
WD10M	напрямок вітру на висоті 10 метрів
WD50M	напрямок вітру на висоті 50 метрів
WS10M	швидкість вітру на висоті 10 метрів
WS50M	швидкість вітру на висоті 50 метрів
QV2M	питома вологість на 2 метри
PS	тиск на поверхні
T2M	температура на висоті 2 метри
co conc	чадний газ, виміри $\frac{10^{-9}kg}{m^3}$
no2 conc	діоксид азоту, виміри $\frac{10^{-9}kg}{m^3}$
no conc	моноксид азоту, виміри $\frac{10^{-9}kg}{m^3}$
o3 conc	озон, виміри $\frac{10^{-9}kg}{m^3}$
pm10 conc	PM10, виміри $\frac{10^{-9}kg}{m^3}$
pm2p5 conc	PM2.5, виміри $\frac{10^{-9}kg}{m^3}$
so2 co	сірчастий газ, виміри $\frac{10^{-9}kg}{m^3}$
time	дата замірів у форматі dd-mm-202y

Таблиця 2.1: Розшифровка ключів з NETCDF4

Формат завантажених даних - NETCDF, зберігає дані в багатовимірних масивах з прив'язкою до географічних координат та рівнів, на яких були зняті відповідні виміри. Географічно дані були узяті з прямокутника, координати якого - широта 44.2-52.3, довгота 30.4 - 40.3. Прямокутник являє собою східну частину України (див рис 2.1)



Рис. 2.1: Мапа з прямокутником, що показує область дослідження

## 2.2 Інструменти

Для обробки даних було використано мову програмування Python на веб-інтерактивній обчислювальній платформі Jupyter Notebook. Для аналізу, ізуальзації та обробки даних були застосовані такі бібліотеки як:

- numpy - для роботи з масивами даних
- NETCDF4 - для роботи з NETCDF файлами
- matplotlib - для візуалізації даних
- pandas - збереження даних у форматі датафрейму і зручному використанні їх під час аналізу
- seaborn - аналіз даних

## 2.3 Вигляд, паттерни та зв'язок даних

Для ілюстрації вигляду даних про вибрані викиди, була застосована функція гістограми, що показує розподіл значень пов'язані з ними.

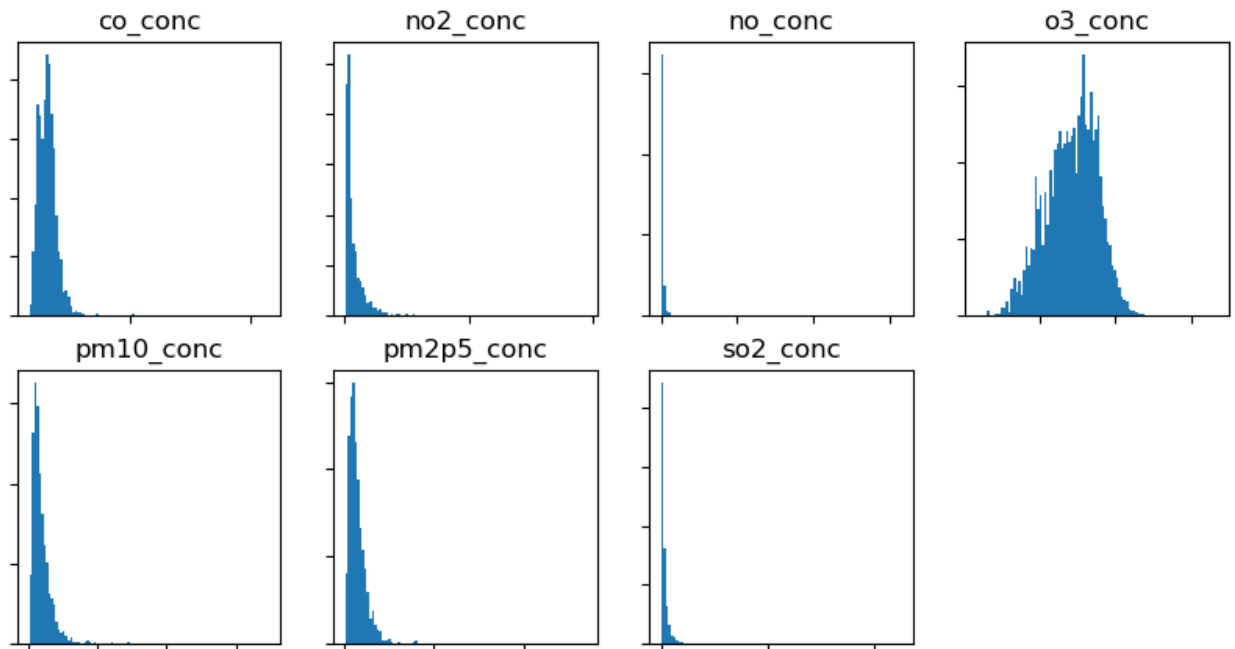


Рис. 2.2: Гістограми для даних про викиди

Лише дані відносно викидів озону мають розподіл подібний до нормального (за меншої кількості рівнів). Дані відносно інших викидів утворюють правосторонні розподіли. Переважна кількість даних стосовно викидів монооксида азоту і сірчастого газу також відповідають правосторонньому розподілу, проте через невелику кількість випадків з великою кількістю викидів на рис 2.1 цього не видно. Для наочності наведемо діапазони усіх типів даних стосовно забруднення.

При цьому максимуми по викидам цих типів - 31 і 112 відповідно. При цьому є лише 6 записів серед даних стосовно викидів діоксиду азоту більших за 12 і лише 2 записи відносно діоксиду сірки більших за 70.

Якщо, прибрати низькочастотні випадки отримаємо більш ілюстративні гістограми:

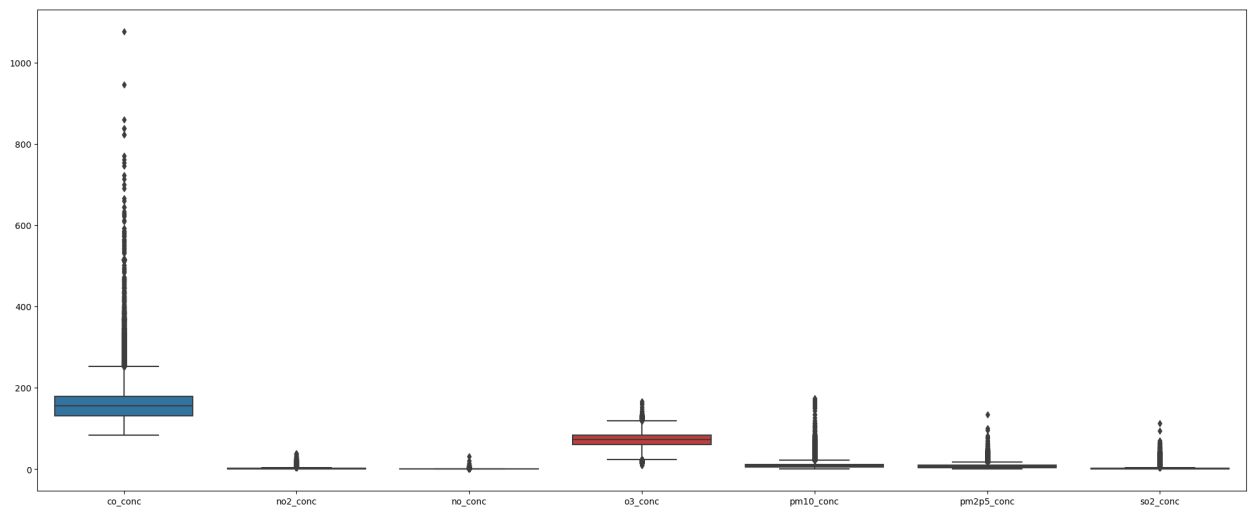


Рис. 2.3: Діапазон даних про викиди

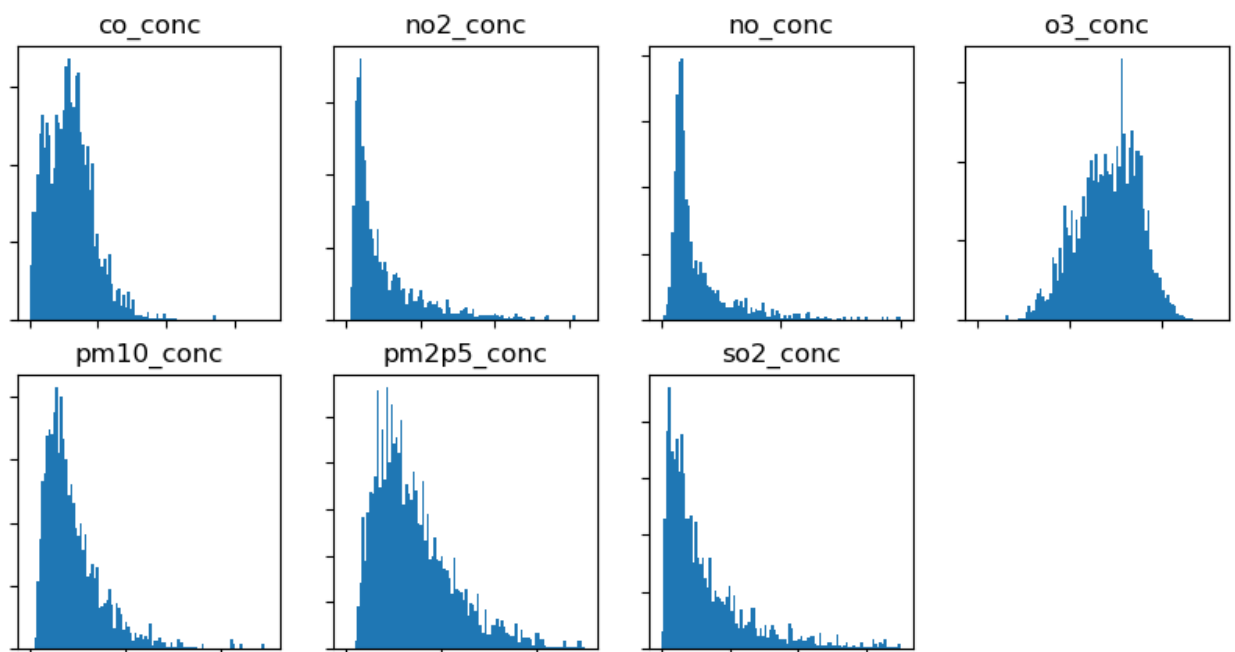


Рис. 2.4: Гістограми без низьких частот для даних про викиди

## РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ

Для моделювання були розглянуті застосовані лінійна регресія та нейронна мережа. Кожна модель має свої переваги і свої недоліки. Умови, основи математичного обґрунтування, код, переваги та недоліки кожної моделі будуть розглянуті у відповідних підрозділах даного розділу і будуть підбиті підсумки у останньому підрозділі.

### 3.1 Лінійна регресія

Лінійна регресія це модель, де прогнозована величина наближається за допомогою лінійної комбінації змінних:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i$$

де  $y_i$  прогнозована величина за  $i$ -ий проміжок часу,  $x_j$  змінні, за якими відбувається прогнозування,  $\beta_j$  коефіцієнти, які визначають лінійну залежність,  $\varepsilon_i$  помилка моделі. Для лінійної регресії з багатьма параметрами частіше використовують матричний запис:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{pmatrix}, \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

Коефіцієнти вектора  $\beta$  знаходяться за допомогою методу найменших квадратів тобто обераються такі значення, за яких набуває найменшого значення вираз:



$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^p X_{ij}\beta_j)^2 = \|y - X\beta\|^2$$

З припущенням, що всі стовпці матриці  $X$  незалежні (не має залежних параметрів моделі) метод має єдиний розв'язок:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Для застосування подібних моделей були створені припущення, яких варто притримуватись задля коректного застосування тої чи іншої моделі:

- Слабка екзогенність. Незважаючи на випадкову природу більшості життєвих процесів до, яких застосовується регресія, вхідні дані розглядаються як фіксовані значення тобто припускається, що дані не містять помилок у вимірюванні
- Лінійність. З визначення моделі слідує, що середнє значення відповіді є лінійною комбінацією параметрів. На перший погляд це досить сильно обмежує можливості моделі, проте це припущення не обмежує перетворення оригінальних даних до параметрів, тобто пред застосуванням регресії не рідко дані логарифмують і нормують, але коефіцієнти регресії  $\beta$  залишаються лінійними
- Постійна дисперсія. Для великих і малих величин похибки має лишатись однаковою.

Порушення цих припущень призводить до упереджених оцінок коефіцієнтів, ненадійних довірчих інтервалів і тестів на значимість.

## 3.2 Кластеризація та регресія

## 3.3 Нейронна мережа

## БІБЛІОГРАФІЯ

- [1] Dusts | air pollution information system.
- [2] Метеопост - Що таке PM2.5 та PM10. <https://meteopost.com/info/PM/>.