

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-71-3-4>

УДК 504.3.054: 681.518.2

КОСТЯНТИН БОЖКО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-6347-7442>

ІРИНА МОРОЗОВА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-7237-6769>

НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ ТВЕРДИХ ЧАСТОК ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗАПИЛЕНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

В роботі розглянуто нечітку модель для оцінювання рівня запиленості атмосферного повітря на основі врахування дисперсного складу твердих часток. Модель побудована за алгоритмом Мамдані. Використано три входи і один вихід, які мають по три функції належності. Вхідні дані є значеннями концентрації твердих часток типу PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀. Джерелом вхідних даних є доступні із мережі в реальному часі результати вимірювань станціями екологічного моніторингу (ресурс ECOBOT). Це дозволяє оперативно здійснювати апробацію і, за необхідності, – корекцію моделі не тільки розробнику програми, але і її користувачу (експерту). База нечітких правил компактна і налічує усього 27 формул нечіткого виведення. Модель розроблена в модулі FUZZY LOGIC TOOLBOX пакету MATLAB. Окреме врахування концентрації часток із субмікронним розміром у загальному коефіцієнті запиленості є важливою особливістю моделі і надає їй перевагу перед стандартним оцінюванням, оскільки підвищує увагу експерта до вкрай шкідливого для здоров'я людини чинника забруднення.

Ключові слова: індекс якості повітря AQI, тверді частки PM, нечітка логіка, алгоритм Мамдані, аеродинамічний діаметр AD

KONSTANTIN BOGKO, IRINA MOROZOVA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

A FUZZY MODEL OF THE DISPERSED COMPOSITION OF SOLID PARTICLES FOR THE ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR DUST

Models based on the rules of fuzzy logic, or fuzzy models (Fuzzy Models), have gained significant development recently due to the practical tasks of creating and operating various kinds of expert systems in those fields where it is impossible or extremely difficult to obtain the optimal result by analytical methods. This applies, first of all, to quality assessment systems. The input parameters of such systems are numerical data (a vector of real numbers), and the output is some qualitative assessment from an expert, which can be expressed in a point scale. The authors suggested applying fuzzy modeling to estimate the level of atmospheric dust. A feature of the model is the consideration of the dispersed composition of dust. The model was developed in the FUZZY LOGIC TOOLBOX module of the MATLAB package. The main channel for obtaining input data for the model was data from meteorological stations that continuously monitor the environmental condition in the city of Kyiv. Improving the quality of the rating scale by more accurately taking into account the dispersion of solid particles in atmospheric emissions is an urgent research task. The use of three channels for measuring the concentration of solid particles with different dispersions and vague modeling of the general state of air dustiness is the recipe that will allow solving the outlined problem.

The work considers a fuzzy model for estimating the level of dustiness of atmospheric air based on taking into account the dispersed composition of solid particles. The model is built according to Mamdani's algorithm. Three inputs and one output are used, each having three membership functions. The input data are the values of the concentration of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ solid particles. The source of input data is the results of measurements by environmental monitoring stations available from the network in real time (ECOBOT resource). This allows not only the developer of the program, but also its user (expert) to promptly carry out approbation and, if necessary, correction of the model. The database of fuzzy rules is compact and includes only 27 formulas of fuzzy derivation. The model was developed in the FUZZY LOGIC TOOLBOX module of the MATLAB package. The separate consideration of the concentration of particles with submicron size in the overall dustiness coefficient is an important feature of the model and gives it an advantage over the standard assessment, as it increases the expert's attention to the pollution factor that is extremely harmful to human health.

Keywords: air quality index AQI, particulate matter PM, fuzzy logic, Mamdani algorithm, aerodynamic diameter AD

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Моделі на основі правил нечіткої логіки, або нечіткі моделі (*Fuzzy Models*) набули значного розвитку останнім часом завдяки практичним задачам створення і експлуатації різного роду експертних систем в тих галузях, де неможливо або вкрай складно отримати аналітичними методами оптимальний результат. Це стосується, перш за все систем оцінювання якості. Вхідними параметрами таких систем є числові дані (вектор дійсних чисел), а виходом – деяка якісна оцінка від експерта, яку можна оформити в бальній шкалі. Авторами запропоновано застосувати нечітке моделювання для оцінювання рівня запиленості атмосферного повітря. Особливістю моделі є врахування дисперсного складу пилу. Модель розроблена в модулі *FUZZY LOGIC TOOLBOX* пакету *MATLAB*. Основним каналом отримання вхідних даних для моделі стали дані від метеорологічних станцій, які здійснюють неперервний моніторинг

екологічного стану в місті Києві. Підвищити якість шкали для оцінювання за рахунок більш точного врахування дисперсності твердих часток у складі викидів в атмосферу є нагальною задачею дослідження. Використання трьох каналів вимірювання концентрації твердих часток із різною дисперсністю і нечітке моделювання загального стану запиленості повітря є тою рецептурою, яка дозволить вирішити окреслену проблему.

Якість повітря оцінюють коефіцієнтом *AQI* – *Air Quality Index*. При спрощеному розрахунку *AQI* єдиним чинником забруднення є наявність твердих часток (*PM* – *Particular Matter*) із характерним розміром 2,5 μm . (*PM2.5*). Шкала *AQI* тут є прямо пропорційною до шкали концентрації *PM2.5*. Такий спрощений метод лише за одним вхідним каналом для визначення *AQI* пропонує агенція *EPA* – *Environmental Protection Agency* (США). В цьому випадку позначення *AQI* доповнюють індексом «*PM2.5*»: *AQIPM2.5*. За цією методикою працює мережа станцій екологічного моніторингу в Україні, результати вимірювань від яких можна отримати в реальному часі на ресурсі *ЕСОВОТ* [1].

Рівень забруднення повітря при відображенні на мапі належить до зони із відповідним кольором: зелена зона – добрий стан; жовта – прийнятний стан; помаранчева – шкідливий стан; червоний – небезпечний; фіолетовий – край небезпечний; бордовий – неприйнятний стан атмосферного повітря.

При альтернативному підході [2,3] *EPA* пропонує враховувати шість джерел забруднення: діоксид сірки (SO_2), тверді частки з розміром до 10 μm . (*PM10*), тверді частки типу *PM2.5*, діоксид азоту (NO_2), оксид вуглецю (CO), а також озон (O_3). Кожний із цих забруднювачів має свою шкалу із кусковою лінійною залежністю індексу забруднення від концентрації забруднюючої речовини. Всі шкали узгоджені між собою і мають бальну оцінку. Індекс якості повітря *AQI* за цією методикою визначають за максимальним значенням від цих шести чинників. Шкали для спрощеної і альтернативної методики співпадають і мають нижню границю в 0 балів і границю дуже небезпечного (*Very High*) рівня забруднення у 300 балів. Надалі будемо називати різницю між цими двома характерними точками шкали основним розміром шкали, або основною шкалою.

Наразі відсутній єдиний міжнародний стандарт для визначення *AQI*. Кожна із країн може мати свою власну методику розрахунку, наприклад в Індії [4] кількість чинників забруднення доповнено сьомим – аміаком. Індекс *AQI* тут визначають у 500-бальній основній шкалі за максимальним показником серед семи забруднювачів, причому індекс запилення повітря визначають за мінімальним значенням із *PM2.5* та *PM10*.

В країнах європейської спільноти якість повітря визначають за чотирма показниками: *PM2.5*, діоксид азоту (NO_2), оксид вуглецю (CO), а також озону (O_3). Коефіцієнт якості повітря тут має назву «Загальний коефіцієнт якості повітря» або *CAQI* – *Common Air Quality Index* [5]. Шкала *CAQI* має 100-бальний основний розмір на відміну від 300-бального основного розміру шкали *AQI*.

В документі від *EPA* [6] наведено детальний аналіз стану викидів твердих часток в атмосферу на території Сполучених Штатів і показано «дорожню карту» переходу до граничної межі «зеленого» рівня викидів *PM10* спочатку від 13 до 12, а потім від 12 до 11 мікрограм на метр кубічний. І цей перехід не завершено, країна знаходиться тільки на початку другої фази цього переходу.

Українські вчені традиційно опікуються дослідженнями викидів твердих часток в атмосферу і таким важливим чинником, як дисперсність їх складу [7]. Ці дослідження мають велику практичну цінність, оскільки мають на меті покращення екологічного стану в країні і успішному переході до європейського рівня розвитку людського капіталу, одним із головних чинників якого саме є стан екології.

Визначення дисперсного складу твердих викидів в атмосферу є важливим з точки зору охорони здоров'я, адже різні за розміром частки мають свій вплив на дихальний тракт людини.

Відповідно до моделі дихального тракту [8] найбільш небезпечним є мілко-дисперсний пил типу *PM1*, тобто із характерним розміром до 1 μm . Цей пил проникає всюди, навіть до бронхіол та альвеол. Дихальний тракт має підрозділи із певними позначеннями.

В області носу *ET1* фільтруються тверді частки із характерним розміром (аеродинамічним діаметром *AD*), більшим за 10 μm . В зоні гортані *ET2* можуть бути відфільтровані частки з $AD \gg 10 \mu\text{m}$. В осередку бронх *BB* осідають переважно частки типу *PM10* та *PM2.5*. Тверді частки типу *PM1* надходять без перешкод до бронхіол *bb*. Альвеоли *Al* пропускають частки з $AD \leq 0,6 \mu\text{m}$. Таким чином більша частина твердих часток типу *PM1* уражує і альвеоли.

Аналіз досліджень та публікацій

Увага дослідників різних наукових галузей, а не тільки медиків, наразі прикута до викидів в атмосферу саме твердих часток малої дисперсності *PM1*, а також ультра-малих (*ultrafine*) часток *PM0.1*, для яких $AD \leq 0,1 \mu\text{m}$ [9..13].

Таким чином, ми бачимо явну розбіжність між задачами вчених-дослідників і методиками розрахунку коефіцієнту якості повітря на основі вимірювань концентрації викидів твердих часток. Ці методики потребують, на нашу думку, вдосконалення шляхом окремого врахування концентрації субмікронних часток, перш за все – типу *PM1*. Крім того, для оцінювання запиленості повітря, на нашу думку, слід запровадити окрему шкалу, яка може доповнити шкалу *AQI*, а за потреби, і замінити її.

Важливість екологічних досліджень в парадигмі сталого розвитку світової економіки та відсутність наразі єдиної міжнародної нормативної бази для визначення якості атмосферного повітря розкриває можливість для розробки і впровадження більш якісних і адекватних до конкретних ситуацій із забрудненням моделей оцінювання, зокрема на основі нечіткого моделювання рівня запиленості повітря.

З іншого боку, вимірювальні технології субмікронних твердих часток типу *PM1* не зайняли поки ще чинного місця в системі оцінювання якості повітря. Проте, саме такі частки є вкрай небезпечними для людини, адже її дихальний тракт є беззахисним перед масованим вторгненням пилу із супер-малою дисперсністю. Цей факт спонукає нас до розробки нечіткої моделі запиленості атмосферного повітря на основі трьох чинників: концентрації твердих часток типу *PM10*, *PM2.5* і *PM1*.

Вихідними даними для апробації та практичного використання моделі ми обрали результати періодичних вимірів стану атмосферного повітря станціями екологічного моніторингу в місті Києві, більше половини з яких наразі використовують усі три канали вимірювання концентрації твердих часток.

На виході моделі маємо отримати шкалу з оцінювання рівня запиленості атмосферного повітря, яка по-перше, буде враховувати спектральний склад часток за їх дисперсністю, по-друге, має бути сумісною на своїх границях із шкалою для коефіцієнта якості повітря *AQI*.

Алгоритм нечіткої логіки є складовою технологій штучного інтелекту і посіли чинне місце в сучасних моделях викидів твердих часток в атмосферу [14, 15].

Нечітке моделювання виконує ті задачі, розв'язання яких не повною мірою можуть забезпечити методи математичної статистики, де потрібна достатньо велика вибірка даних. Аналітична модель для *AQI* на основі кускової лінійної залежності має спрощену шкалу із недостатньою точністю, а також не враховує концентрацію субмікронних часток, які є фактором підвищеного ризику для здоров'я людини.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка нечіткої моделі оцінювання запиленості атмосферного повітря із підвищеною точністю за рахунок додавання до основних двох каналів вимірювання – концентрації твердих часток типів *PM10* та *PM2.5* – третього каналу для субмікронних часток типу *PM1*.

Викладення основного матеріалу

Розробку нечіткої моделі оцінювання запиленості атмосферного повітря виконуємо в *MATLAB* відповідно до рекомендацій [16]. Для нечіткого виведення використовуємо алгоритм Мамдані. Три вхідні канали із назвами «*PM10*», «*PM2.5*» та «*PM1*» мають по три функції належності типу Гауса. Назви функцій належності відповідають кольорам для позначення рівня забруднення: «зелений», «жовтий», «червоний». Вихід один і має трикутну залежність. Вихідні функції належності мають такі ж самі назви, що і вхідні.

На другому етапі розробки моделі прописуємо базу знань – правил нечіткого виведення у кількості 27. Правила складаємо таким чином, щоб спрацьовувала логіка із середньою оцінкою:

- ✓ два «зелених» і один «жовтий» входи дають на виході «зелений» рівень запиленості;
- ✓ два «зелених» і один «червоний» входи – «жовтий» рівень;
- ✓ «зелений», «жовтий» і «червоний» входи – «жовтий» рівень;
- ✓ «зелений» і два «жовтих» входи – «жовтий» рівень;
- ✓ «зелений» і два «червоних» входи – «жовтий» рівень;
- ✓ «жовтий» і два «червоних» входи – «червоний» рівень;
- ✓ два «жовтих» і «червоний» входи – «жовтий» рівень;
- ✓ три «зелених» входи – «зелений» рівень;
- ✓ три «жовтих» входи – «жовтий» рівень;
- ✓ три «червоних» входи – «червоний» рівень запиленості.

Усі три вхідні канали мають однакову вагу, тобто їх вплив на загальну оцінку запиленості повітря є симетричним один відносно одного.

Наступним кроком є запис граничних значень концентрації твердих часток для кожного із вхідних каналів. Для цього використовуємо рекомендації *EPA* [3]. Крім того, для каналу *PM1* граничний рівень задаємо в 70% від граничного рівня *PM2.5*. Значення у 70% відповідає штилю або швидкості вітру до 2 м/с. При іншій вітровій ситуації потрібно корегування моделі, яке можна здійснити, якщо задати четвертий вхідний канал – швидкості вітру.

Приклад розподілу твердих часток по трьох фракціях наведено на рисунку 2. Тут показані значення, які були отримані від *ЕСОВОТ* 09 жовтня 2022 року, 17год. 00 хв., в Києві, вул.Миколи Шепелєва, 10. Дані отримані на кожному із трьох фільтрів, а також різниця цих значень, яка показує вміст фракції до 1мкм, від 1 до 2,5 мкм і від 2,5 до 10 мкм.

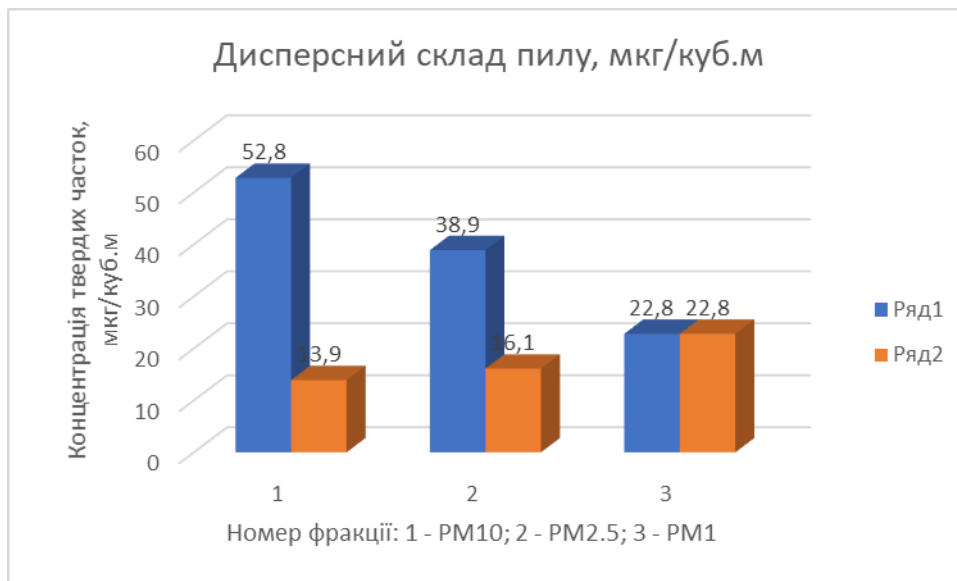


Рис. 2. Дисперсний склад пилу: Ряд1 –значення на фільтрі;
Ряд2 – різниця між сусідніми за розміром комірок фільтрами; $AQI = 93$

Задаємо такі границі концентрації у мкг/куб.м для твердих часток:

PM_{10} – [0 425];

$PM_{2.5}$ – [0 250.5];

PM_1 – [0 175].

Вихідна шкала призначена для бального оцінювання і має співпадати на границях із шкалою індексу якості повітря AQI . Умови нормування вихідної шкали:

- при нульових значеннях на всіх трьох входах на виході маємо нуль балів;
- при максимальних значеннях на всіх трьох входах на виході потрібно мати оцінку у 300 балів.

Для нормування вихідної шкали необхідно її розтягнути до діапазону: [-62.1 363]. Дані для поширення шкали отримані експериментально при дослідженні моделі в *MATLAB*.

Після редагування граничних значень входів і виходу моделюємо процес нечіткого виведення із отриманням поверхні рішень для входів PM_{10} та $PM_{2.5}$ (Рис. 3).

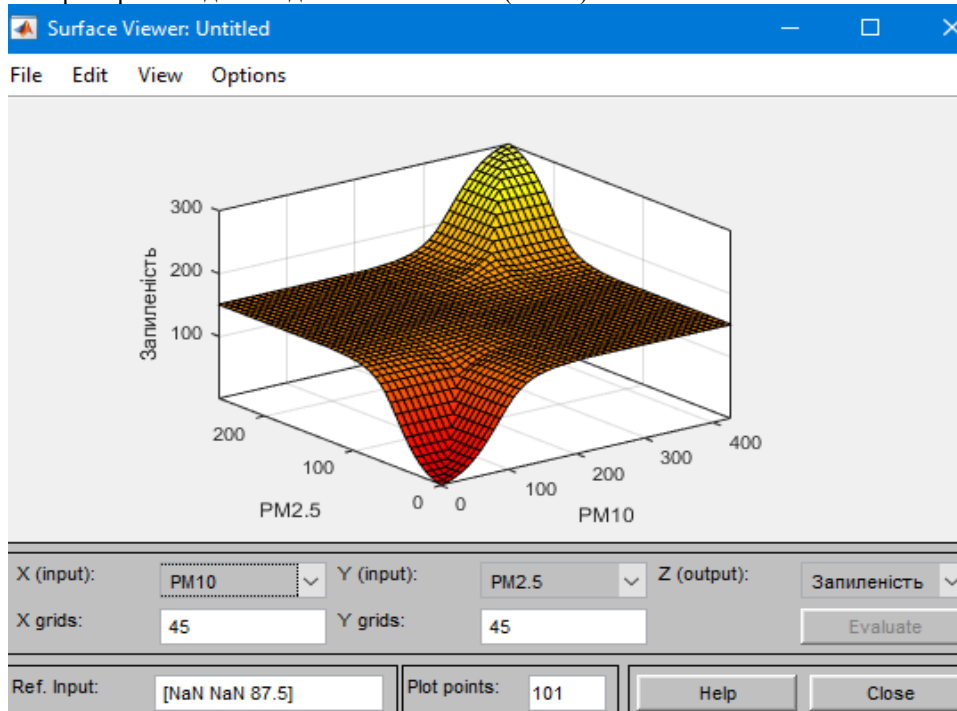


Рис. 3. Поверхня рішень для входів PM_{10} та $PM_{2.5}$

Для пари входів $PM1$ і $PM2.5$ та усіх інших комбінацій вхідних пар для координат X , Y поверхня рішень має аналогічну форму.

В меню *Rules* отримуємо результат моделювання для показів від станції екологічного моніторингу – з ресурсу *ECOVOT* (Рис. 4).

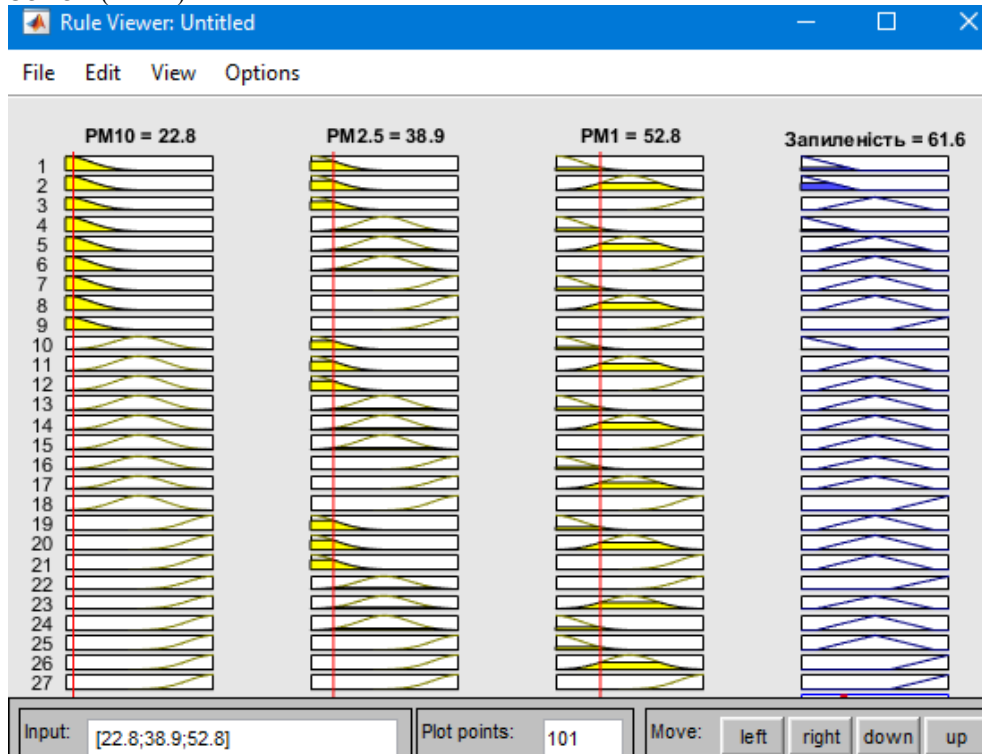


Рис. 5. Нечітке оцінювання запиленості повітря: запиленість дорівнює 61,6

Індекс AQI дорівнює 93 і відрізняється від оцінки запиленості за результатами нечіткого моделювання (61,6 балів).

Змінимо форму функцій належності: для входів – на трикутну (раніше була гаусова); для виходів – на Гауса (раніше була трикутна). Після моделювання із новими параметрами для того ж самого прикладу отримаємо підвищену оцінку запиленості (Рис.6).

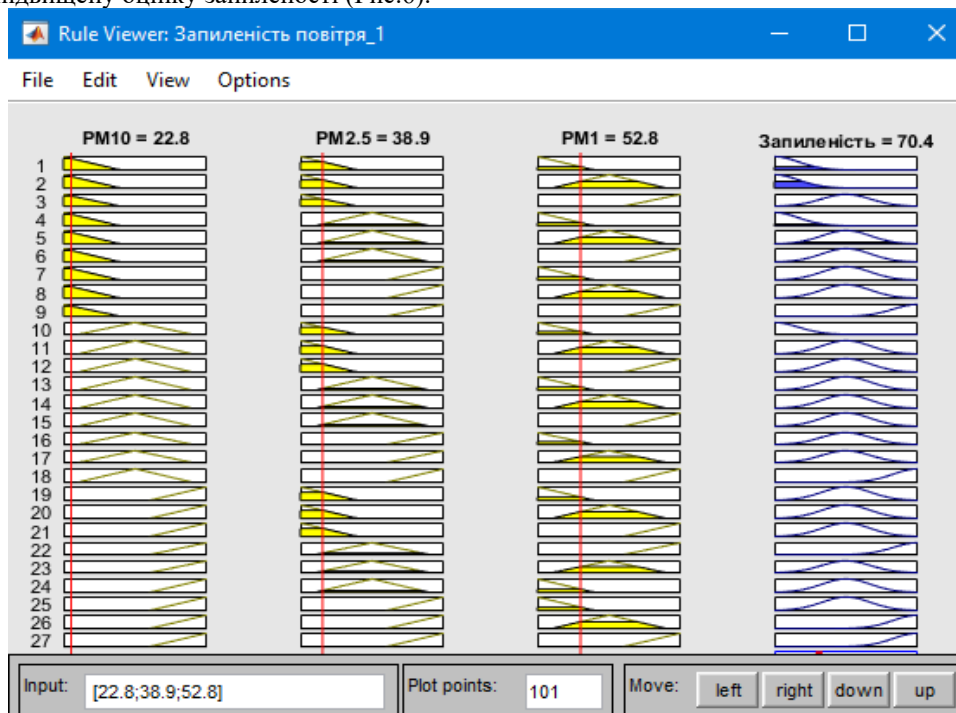


Рис. 6. Модель із модифікованими параметрами: запиленість 70,4

Поверхня рішень після модифікації відрізняється від попередньої моделі і має невеликі плато при вершинах (Рис.7), наявність яких можна пояснити лінійною (трикутною) формою вхідних нечітких функцій належності.

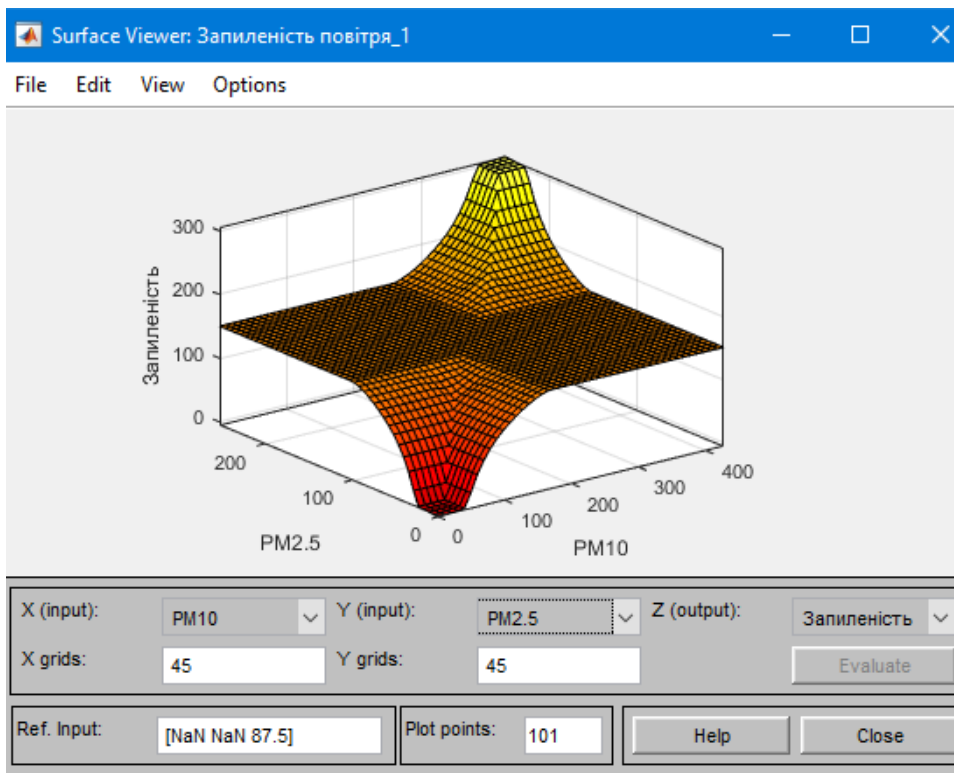


Рис. 7. Поверхня рішень модифікованої нечіткої моделі для входів PM_{10} та $PM_{2.5}$

Оцінимо невизначеність результату нечіткого моделювання запиленості повітря, для чого виведемо поверхню рішень тільки для однієї вхідної змінної $PM_{2.5}$ (Рис.8).

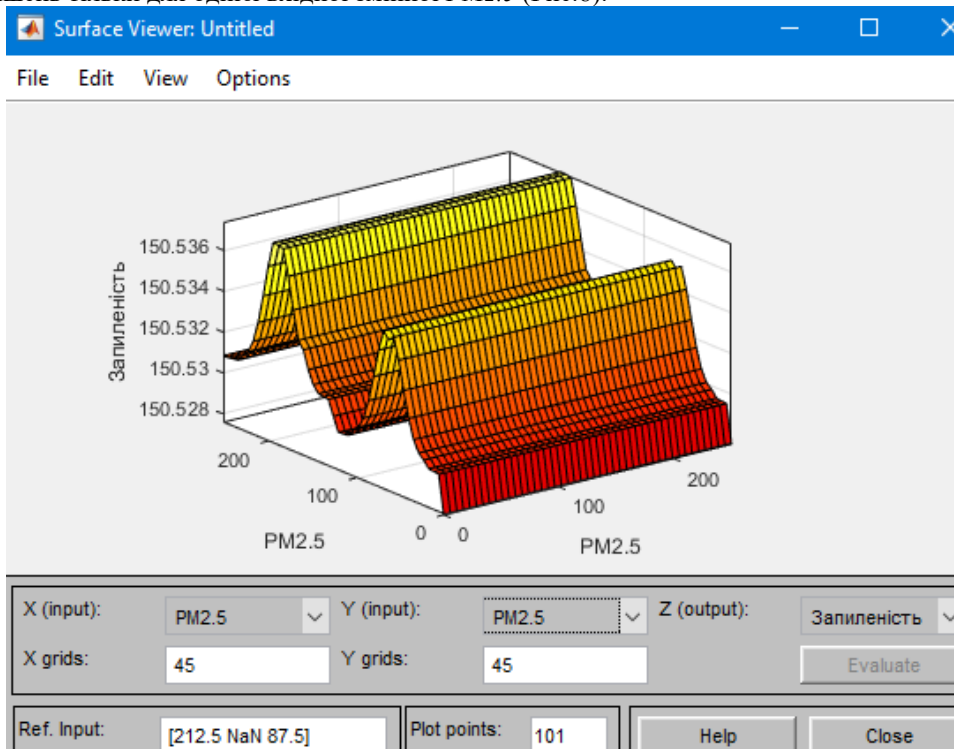


Рис. 8. Оцінювання невизначеності нечіткої моделі за входом $PM_{2.5}$: вхідні нечіткі функції належності гаусові, вихідні – трикутні

Відповідно до рисунку 8 невизначеність оцінки за каналом $PM_{2.5}$ в балах дорівнює 0,01.

Той же результат можна отримати і при виведенні залежності запиленості від однієї координати $PM_{2.5}$ на площині у вигляді графіка (Рис.9).

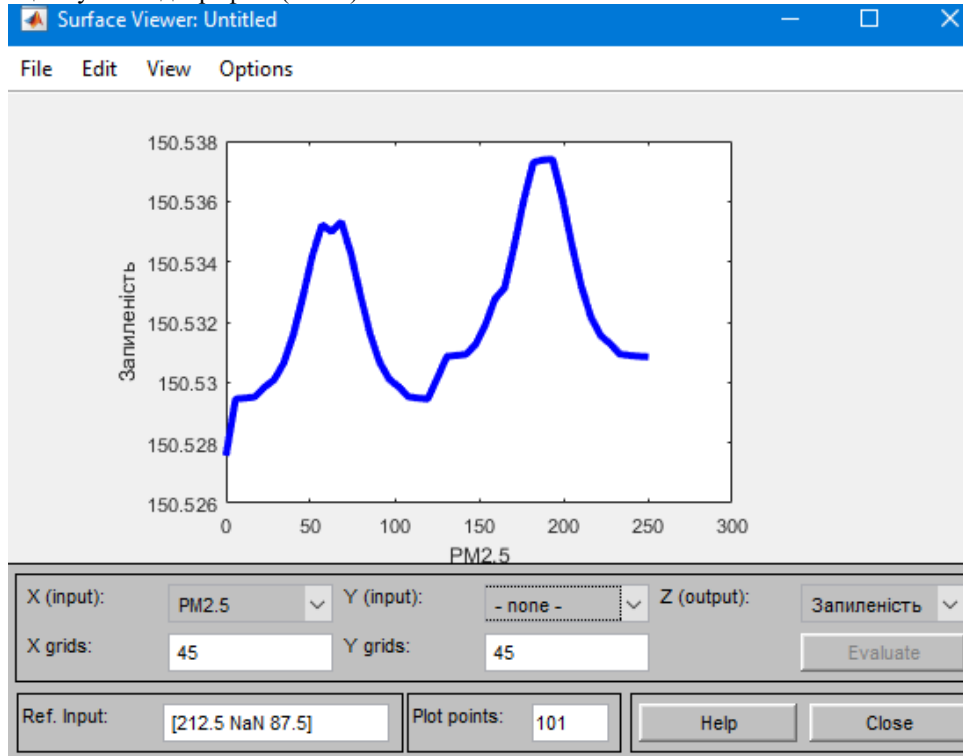


Рис. 9. Графік для оцінки невизначеності результату моделювання за входним каналом $PM_{2.5}$: входні нечіткі функції належності гаусові, вихідні – трикутні

Функція запиленості має два максимуми: при 50 мкг/куб.м та при 180 мкг/куб.м.

Для твердих часток типу PM_{10} невизначеність в балах дорівнює 0,008 (Рис. 10).

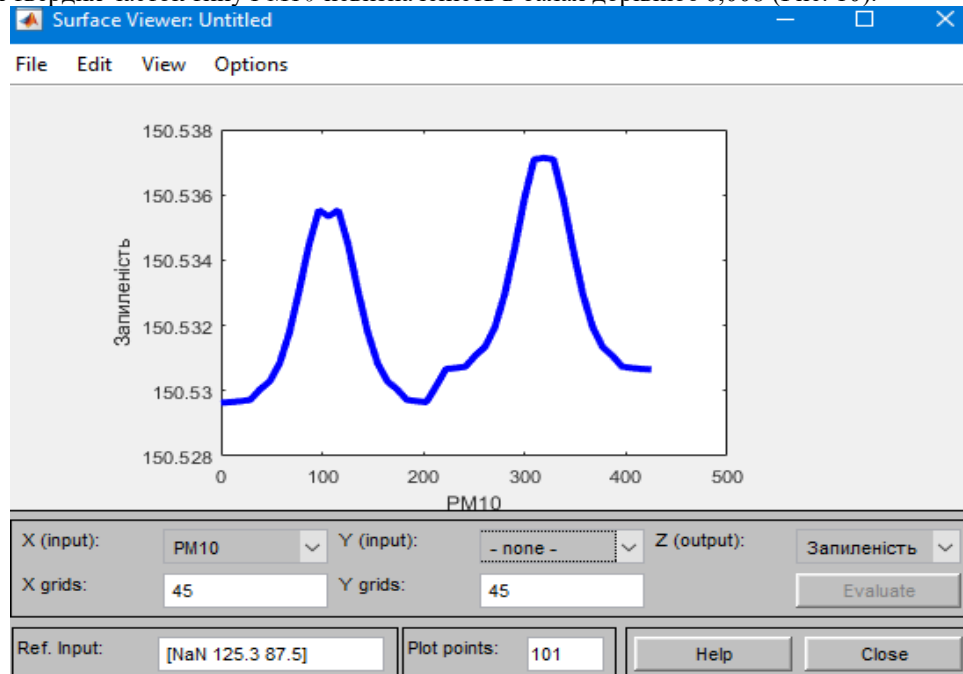


Рис. 10. Графік для оцінки невизначеності результату моделювання за входним каналом PM_{10} : входні нечіткі функції належності гаусові, вихідні – трикутні

Функція запиленості для твердих часток $PM_{2.5}$ схожа на попередню і має також два максимуми: при 100 мкг/куб.м та при 320 мкг/куб.м.

Інший варіант залежності маємо для твердих часток *PM1* (Рис. 11). Тут один із максимумів втричі перевищує інший. Незвизначеність оцінюємо по найбільшому із максимумів, вона дорівнює в балах 0,015. Максимуми для твердих часток знаходяться при концентрації 45 мкг/куб.м і 130 мкг/куб.м.

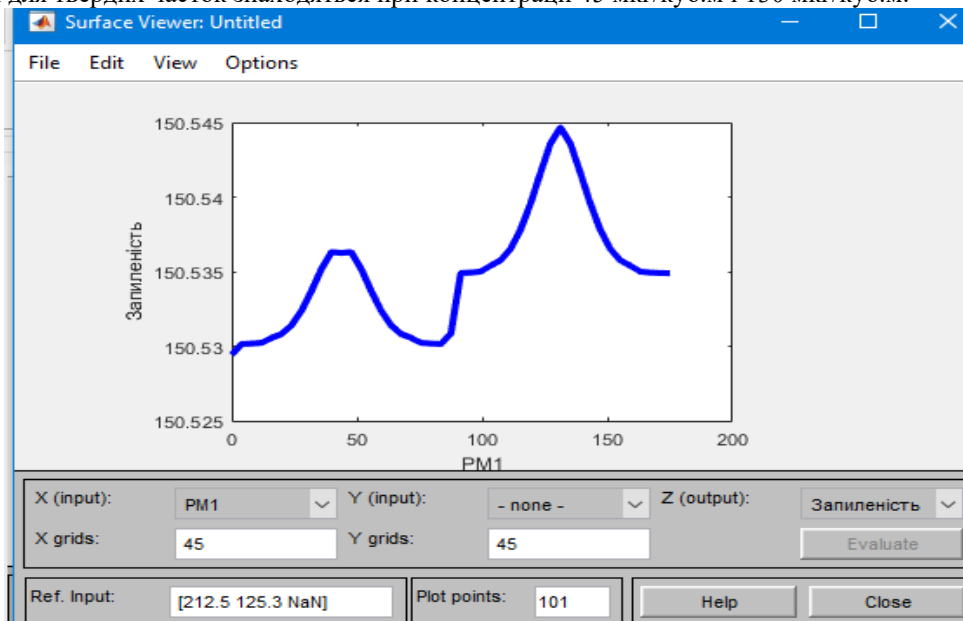


Рис. 11. Графік для оцінки невизначеності результату моделювання за вхідним каналом *PM1* : вхідні нечіткі функції належності гаусові, вихідні – трикутні

Причиною невизначеності, аналіз якої ми навели, полягає, на наш погляд, у відхиленні поверхні рішень від форми, яка є всюди опуклою. Цей недолік взагалі притаманний нечітким моделям і його можна зменшити за рахунок більш досконалої бази правил нечіткого виведення. Незвизначеність за трьома вхідними каналами визначимо за такою формулою:

$$\delta_{\text{Запиленості}} = \delta_{PM10} + \delta_{PM2.5} + \delta_{PM1} ; \quad (1)$$

Для нечіткої моделі із гаусовими вхідними і трикутними вихідними функціями належності $\delta_{\text{Запиленості}} = 0,01 + 0,008 + 0,015 = 0,033$.

Для модифікованої моделі, в якій вхідні функції належності нечіткого виведення задані трикутними, а вихідні функції – гаусовими, невизначеність каналу *PM10* набуває форми із багатьма локальними максимумами (Рис. 12).

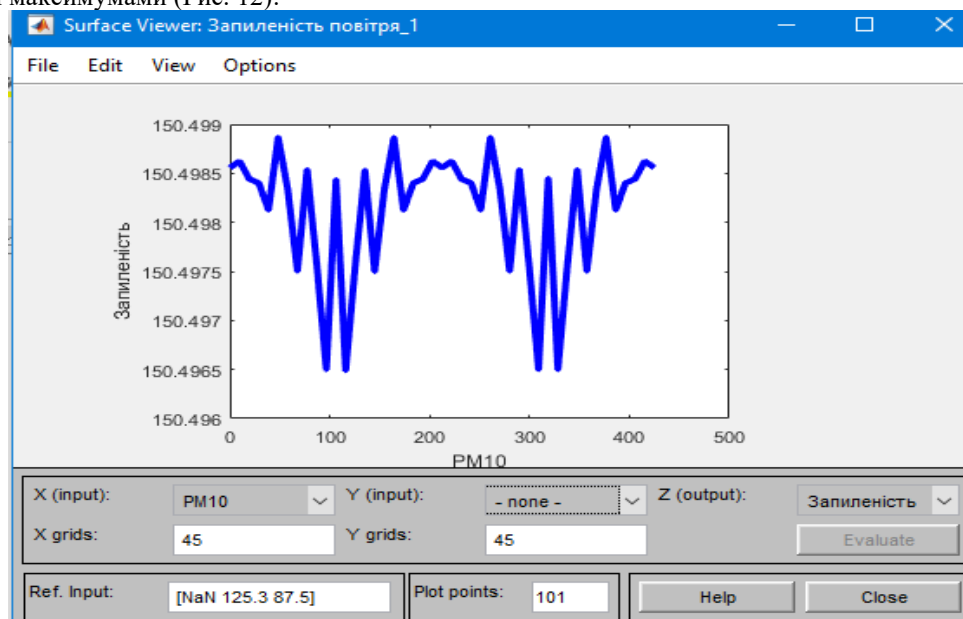


Рис. 10. Графік для оцінки невизначеності результату моделювання за вхідним каналом *PM10* : вхідні нечіткі функції належності є трикутними, вихідні – типу Гауса

Для каналів $PM_{2.5}$ та PM_1 невизначеність має таку ж саму залежність.

Згідно із формулою (1) для модифікованої нечіткої моделі запиленості повітря отримаємо:
 $\delta \text{Запиленості} = 0,0033 + 0,0033 + 0,0033 = 0,01$. Результат округлено до третього знаку після коми.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеного аналізу сучасного стану досліджень в сфері вимірювань концентрації твердих часток у повітрі було окреслено задачу із моделювання рівня запиленості атмосферного повітря за трьома каналами: із розміром часток до 1 мкм, до 2,5 мкм та до 10 мкм. Включення до моделі каналу мало-дисперсного пилу із аеродинамічним розміром до 1 мкм обумовлено вкрай небезпечним впливом цих викидів у атмосферу на дихальний тракт людини. Модель створено засобами нечіткої логіки за алгоритмом Мамдані. Середовищем моделювання обрано модуль *FUZZY LOGIC TOOLBOX MATLAB*.

Розроблено два варіанти моделі – основний і модифікований. Обидва варіанти побудовані на трьох вхідних каналах – для концентрації часток із відповідним максимальним аеродинамічним діаметром та одним 300-бальним виходом. Вихідна шкала узгоджена із шкалою індексу якості повітря *AQI* на її границях. Всі входи та вихід мають по три функції належності. В першому варіанті моделі вхідні функції належності є гаусовими, а вихідні – трикутними. В модифікованому варіанті, навпаки, вхідні функції задані трикутними, а вихідні – гаусовими.

Експериментальні дослідження моделей на основі реальних даних, які були отримані від станції екологічного моніторингу з ресурсу *ECOBOT*, показали, що модифікована модель має більш наближену до *AQI* оцінку. Вибір правил нечіткої логіки забезпечив малу величину невизначеності для запиленості атмосферного повітря, яка склала 0,01 бали. Розглянуто лише одне джерело невизначеності – відхилення поверхні рішень від форми, яка є всюди опуклою. Таким чином, визначено величину неопуклості вихідної залежності для нечіткого виведення.

Окреслимо план наступних досліджень. По-перше, модель потребує апробації на більшому масиві даних реальних вимірювань концентрації твердих часток в атмосферному повітрі, наприклад від 15-20 станцій екологічного моніторингу. По-друге, необхідно дослідити несиметричні поверхні рішень, тобто коли правила нечіткої логіки надають перевагу для каналу вимірювання мало-дисперсних часток. Про-третє, необхідно створити модель із додатковим четвертим вхідним каналом для врахування впливу вітру на атмосферний склад викидів.

Після проведення необхідних досліджень і вдосконалення за їх результатами нечітка модель може бути прийнята до експлуатації в якості експертної системи для оцінювання рівня запиленості атмосферного повітря.

Література

1. <https://www.saveecobot.com/maps#12/50.4000/30.5307/aqi>
2. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI) – EPA 454/B-18-007 September 2018. – 22p.
3. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-04/documents/2012_aqi_factsheet.pdf
4. <https://www.pranaair.com/blog/what-is-air-quality-index-aqi-and-its-calculation/>
5. <https://airly.org/en/air-quality-index-caqi-and-aqi-methods-of-calculation/>
6. EPA-452/R-12-005 Regulatory Impact Analysis for the Final Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter // U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Health and Environmental Impacts Division Research Triangle Park. – 2012. – 474 p.
7. Yurchenko V. O. Doslidzhennia dyspersnoho skladu pylu kondyterskykh pidpriemstv / V. O. Yurchenko, K. S. Ponomarov, S. D. Ponomarova // Ekolohichna bezpeka. - 2017. - Vyp. 2. - S. 32-38. – Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekbez_2017_2_7Annals of the ICRP. – ICRP PUBLICATION 130. – 2015. – 188p.
8. Perez N. Partitioning of major and trace components in PM10-PM2.5-PM1 at an urban site in Southern Europe /Noemi Perez etc. // *Atmospheric Environment* 42(8). 2008. – Pp. 1677-1691. – DOI: [10.1016/j.atmosenv.2007.11.034](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.034)
9. Shi H. Characteristics and Source Analysis of PM1 in a Typical Steel-Industry City, Southwest China /Huibin Shi, Xin Cheng, Jinjin Wang, Zijing Li // *Atmosphere* 13(8):1304, August 2022. - DOI: [10.3390/atmos13081304](https://doi.org/10.3390/atmos13081304)
10. Hien Ph.D. A Comparison Study of Chemical Compositions and Sources of PM1.0 and PM2.5 in Hanoi /Pham Duy Hien etc. // *Aerosol and Air Quality Research* 21(10):210056. – 2021. – DOI: [10.4209/aaqr.210056](https://doi.org/10.4209/aaqr.210056)
11. Gautam S. A review on recent progress in observations, sources, classification and regulations of PM_{2.5} in Asian environments /Sneha Gautam etc. // *Environmental Science and Pollution Research*, volume 23. – 2016. – Pages 21165–21175.
12. Rodriguez A.D. Comparative study of ambient air particles in patients hospitalized for heart failure and acute coronary syndrome /Alberto Dominguez Rodriguez etc. // *Rev. Esp. Cardiol.* – 2011, Aug;64(8):661-6. DOI: [10.1016/j.recesp.2010.12.017](https://doi.org/10.1016/j.recesp.2010.12.017)
13. Johnson N. Air pollution and children's health-a review of adverse effects associated with prenatal exposure from fine to ultrafine particulate matter /Natalie Johnson etc. // *Environmental Health and Preventive Medicine*, Publ. 12 Juli 2021. – DOI: [10.1186/s12199-021-00995-5](https://doi.org/10.1186/s12199-021-00995-5)
14. Hassan R. Urban Air Pollution Forecasting Using Artificial Intelligence-Based Tools / Rafiul Hassan and Min LI // *Air Pollution*, Vanda Villanyi (Ed.), ISBN: 978-953-307-143-5, InTech. – 2010. – P.195-220. – Available from: <http://www.intechopen.com/books/air-pollution/urban-air-pollution-forecasting-using-artificial-intelligence-based-tools>
15. Kokkinos K. A comparative analysis of Statistical and Computational Intelligence methodologies for the prediction of traffic-induced fine particulate matter and NO₂ /K.Kokkinos, V.Karayannis, E. Nathanail, K. Moustakas // *Journal of Cleaner Production*, Vol. 328. – 2022. – 17 p. – Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129500>
16. Godfrey H. Fuzzy Logic with MATLAB. – Great Space Independent Publishing Platform. – North Charleston, SC, USA. – 2016. – 328p. Available from: <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/3126444>