

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-19>

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>

bozhkonew@ukr.net

Ірина МОРОЗОВА

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

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

izoom@ukr.net

НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

В роботі розглянуто нечітку модель для оцінювання якості атмосферного повітря на основі головного чинника – концентрації твердих часток типу PM_{2.5}. Іншими чинниками із зменшеним впливом на вихідну оцінку є: концентрація оксиду вуглецю CO, діоксиду сірки та діоксиду азоту. Модель побудована за алгоритмом Мамдані і має чотири входи і один вихід, у кожного з яких є по три функції належності. Джерелом вхідних даних є доступні із мережі в реальному часі результати вимірювань від станцій екологічного моніторингу. База нечітких правил налічує 81 формулу нечіткого виведення. Модель розроблена за допомогою пакету MATLAB. Врахування даних від додаткових вхідних каналів дозволяє підвищити достовірність оцінювання ризиків для здоров'я людей, особливо із вразливим дихальним трактом.

Ключові слова: індекс якості повітря AQI, тверді частки PM, нечітка логіка, алгоритм Мамдані.

Konstantin BOGKO, Iryna MOROZOVA

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

A FUZZY MODEL FOR ATMOSPHERIC AIR QUALITY ASSESSMENT

Currently, there is no single standard for assessing the quality of atmospheric air for all countries in the world. The most common is the method of assessing the air quality index AQI from the EPA agency (USA), which has two calculation algorithms: firstly, by the concentration of solid particles with a characteristic size up to 2.5 microns or PM_{2.5}[1] and secondly, according to the worst indicator of six factors, which include the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ solid particles, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, carbon monoxide (CO) and ozone. Determination of the air quality coefficient according to the first algorithm is adopted in Ukraine and it has the additional designation PM_{2.5}: "AQI (PM_{2.5})". The calculation of the AQI coefficient according to both algorithms is based on piecewise linear interpolation, as a result of which the rating scale has gaps of the second kind. This causes the emergence of an additional source of uncertainty of the evaluation result. In addition, evaluation by only one selected parameter, in our opinion, reduces both the reliability and accuracy of the evaluation. To implement the second algorithm, there is usually not enough data from one of the channels - the ozone concentration, the measurement of which is not provided by the majority of environmental monitoring stations in Ukraine. Thus, the issue of creating an effective expert system for monitoring the state of atmospheric air based on taking into account various factors of pollution remains open at the moment. The paper considers a fuzzy model for assessing the quality of atmospheric air based on the main factor - the concentration of solid particles of the PM_{2.5} type. Other factors with reduced influence on the initial estimate are: concentration of carbon monoxide CO, sulfur dioxide and nitrogen dioxide. The model is built according to the Mamdani algorithm and has four inputs and one output, each of which has three membership functions. The source of input data is the results of measurements from environmental monitoring stations available from the network in real time. The base of fuzzy rules includes 81 formulas of fuzzy derivation. The model was developed using the MATLAB package. Taking into account data from additional input channels allows to increase the reliability of risk assessment for the health of people, especially those with a vulnerable respiratory tract.

Key words: AQI air quality index, PM particulate matter, fuzzy logic, Mamdani algorithm

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Наразі не існує єдиного для усіх країн в світі стандарту для оцінювання якості атмосферного повітря. Найбільш поширеним є метод оцінювання індексу якості повітря AQI від агенції ЕРА (США), який має два алгоритми розрахунку: по-перше, за концентрацією твердих часток із характерним розміром до 2,5 мікрон або PM_{2.5}[1] і по-друге, за найгіршим показником із шести чинників, до яких належать концентрації твердих часток PM_{2.5} і PM₁₀, діоксиду сірки, діоксиду азоту, чадного газу (оксиду вуглецю CO) та озону. Визначення коефіцієнту якості повітря за першим алгоритмом прийнято в Україні і він має додаткове позначення PM_{2.5}: «AQI (PM_{2.5})».

Розрахунок коефіцієнту AQI за обома алгоритмами відбувається на основі кускової лінійної інтерполяції, шкала оцінювання внаслідок чого має розриви другого роду. Це спричиняє появу додаткового джерела невизначеності результату оцінювання. Крім того, оцінювання лише за одним обраним параметром, на нашу думку, зменшує як достовірність, так і точність оцінки. Для реалізації другого алгоритму зазвичай не вистачає даних від одного із каналів – концентрації озону, вимірювання якої не забезпечує більшість станцій екологічного моніторингу в Україні. Таким чином, питання створення дієвої експертної системи для моніторингу стану атмосферного повітря на основі врахування різних чинників забруднення залишається наразі відкритим.

Алгоритми нечіткої логіки дозволяють побудувати ефективну модель для загального оцінювання якості повітря із будь-яким набором вхідних каналів. Нечітка логіка дозволяє також обробляти дані із малою вибіркою. Вихідна функція при цьому буде позбавлена розривів другого роду. Техніку створення експертних систем на основі нечіткої логіки апробовано на вже створених моделях для задач екологічного моніторингу і кількісному оцінюванні сумарних викидів в атмосферу. Математичним знаряддям для нечіткого моделювання зазвичай є модуль Fuzzy Logic Tool Box пакету MATLAB. Джерелом отримання вхідних даних є всевітня мережа станцій екологічного моніторингу, доступ до яких є вільним через ресурс ЕСОВОТ[2].

Постановка проблеми і огляд останніх досліджень

Наразі в місті Києві розгорнуто 409 станцій екологічного моніторингу [2], які усі видають дані про викиди твердих часток типу PM_{2.5} в атмосферу, а також надають розрахований за концентрацією PM_{2.5} індекс якості повітря AQI(PM_{2.5}). Дві третини станцій видає також інформацію про концентрацію твердих часток типу PM₁₀. І тільки невелика частина станцій (не більше 10% від їх загальної кількості) видає розширену інформацію про концентрацію викидів інших джерел забруднення. Розбіжність кількості каналів даних від різних станцій і їх зміна в часі унеможливує здійснення порівняльного аналізу за повною базою даних, побудови адекватної мапи із осередками забруднення, тривалого спостереження за трендами екологічного стану, збереження достовірності аналізу на одному рівні і таке інше. Виникає задача створення такої нечіткої моделі, яка забезпечить оцінювання якості атмосферного повітря за обраною невеликою (від трьох до п'яти) кількістю чинників забруднення і яку можна адаптувати до зміни цих чинників без громіздкого переписування бази правил.

Підходи нечіткого моделювання в задачах екологічного моніторингу можна розділити на два великі класи: по-перше це моделі нечіткої логіки (Fuzzy Logic) із невеликою кількістю (до п'яти) вхідних функцій, які побудовані за схемою Мамдані; по-друге, це моделі нечітких нейронних мереж, в яких збільшена кількість вхідних каналів (до двадцяти і більше) і застосований алгоритм нечіткого виведення Такагі-Сугено. Другий клас моделей об'єднано в рамках технології ANFIS (Adaptive Neural Network Based Fuzzy Inference System) – адаптивної нейронної мережі на основі системи нечіткого виведення. Окремим класом наразі вважають моделі типу IFAHP – Intuitionistic Fuzzy Analytic Hierarchy Process, що означає «нечіткий процес інтуїтивного ієрархічного аналізу».

До задач нечіткого моделювання в сфері моніторингу викидів в атмосферу слід віднести порівняльний аналіз стану забруднення чадним газом у різних місцевостях Індії [3]. Розробкою нейронної мережі із нечітким виведенням для оцінки запиленості атмосферного повітря твердими частками із різною дисперсністю опікуються дослідники в роботі [4]. Розробка мапи забруднення повітря в столичному регіоні Ірану на основі нечіткого накладання різних чинників (усього їх вісім) стала результатом нечіткого моделювання [5]. Нейронну мережу із нечітким виведенням покладено в основу моделювання викидів твердих часток і діоксиду азоту в Англії [6]. При цьому наведено глибокий аналіз джерел невизначеності і їх розрахунок, складено відповідні таблиці.

Альтернативний підхід до оцінки якості повітря є індивідуальна оцінка за нечіткою моделлю «Мій індекс якості повітря» (My AQI), який запропоновано австралійсько-французьким колективом в рамках проекту «Розумне місто» (Smart City). Модель побудовано на складній нечіткій нейронній мережі і апробовано в місті Мельбурн[7].

Складну трьох-рівневу нечітку модель для визначення коефіцієнту якості повітря із застосуванням генетичного алгоритму наведено в [8]. Результатам обчислень середньоквадратичної похибки присвячено тут значну частину тексту.

Модель із великою базою знань – 1025 правилами нечіткого виведення – наведено в роботі [9]. Тут було використано 500-бальну шкалу і шість вхідних функцій для основних чинників забруднення: діоксид сірки, діоксид азоту, чадний газ, озон, тверді частки PM_{2.5} та PM₁₀.

Часовий перебіг стану забруднення в межах великого міста описано за допомогою нечіткої моделі в [10]. Модель виконує тут прогностичну задачу.

Огляд літературних джерел із основних моделей нечітких нейронних мереж для оцінювання якості атмосферного повітря наведено в [11].

Науко-метричні дослідження публікацій в галузі визначення якості атмосферного повітря на основі застосування тою чи іншою мірою алгоритмів нечіткої логіки, які є наразі важливою складовою технологій штучного інтелекту, наведені в роботі [12]. Відповідно до висновків авторів стрімке зростання кількості наукових праць з цієї теми останніми роками свідчить про підвищений інтерес у світі до даних задач і застосування нечіткого моделювання для їх розв'язку. За темпами зростання кількості цих публікацій можна прослідкувати на графіку (Рис. 1).

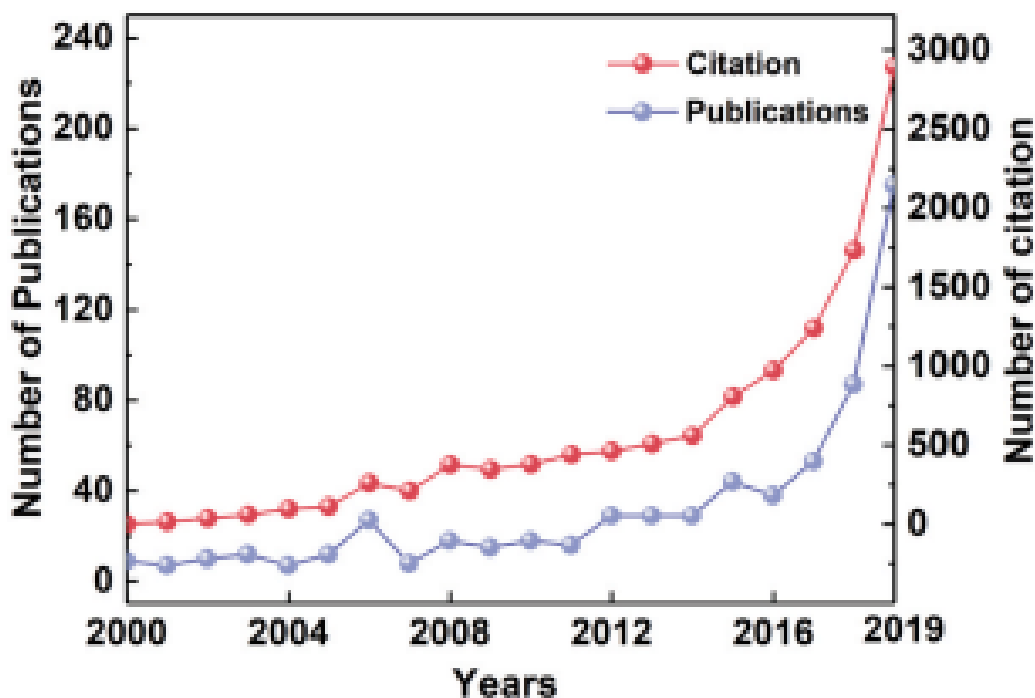


Рис. 1 Кількість наукових публікацій і цитувань на тему алгоритмів штучного інтелекту для визначення якості атмосферного повітря

Підвищений попит на моделювання якості атмосферного повітря спонукає нас також долучитись до розробки дієвої власної моделі і її апробації на даних по місту Києву.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка нечіткої моделі оцінювання загального забруднення атмосферного повітря на основі результатів вимірювання концентрації чотирьох чинників: твердих часток PM2.5, чадного газу, діоксиду сірки та діоксиду азоту.

Виклад основного матеріалу

З метою отримання більш достовірного оцінювання рівня викидів в атмосферу запропоновано модель на основі вимірювання концентрації твердих часток, подібно до визначення коефіцієнта AQI, проте додано ще три канали додаткової інформації від інших датчиків. При цьому моделювання здійснювалось за правилами нечіткої логіки. Авторами запропоновано модель на основі алгоритму Мамдані із чотирма входами:

- ✓ концентрація твердих часток типу PM2.5;
- ✓ концентрація чадного газу CO;
- ✓ концентрація діоксиду сірки SO₂ ;
- ✓ концентрація діоксиду азоту NO₂.

Вихід моделі надає оцінку рівня викидів в атмосферу в межах 200-бальної шкали. Шкалу нормалізовано на границях відповідного інтервалу індексу якості повітря AQI.

Вхідні усереднені по місту Києву дані для цих чотирьох чинників забруднення взято з ресурсу [13]. Для окремих станцій є відкриті для загалу такі ж самі дані від ресурсу ЕСОВОТ [2], наприклад за адресою: вулиця Щусева, 21, які теж було використано авторами для апробації моделі. Зазначимо, що із 409 станцій екологічного моніторингу в місті Києві наразі активними є приблизно 100 (Рис.2). Суттєвим недоліком інформації від ЕСОВОТ є, на нашу думку, відсутність відкритих даних про напрям і швидкість вітру, що обмежує можливості побудови динамічних моделей з прогностичними функціями для експертних систем, які функціонують в реальному часі.

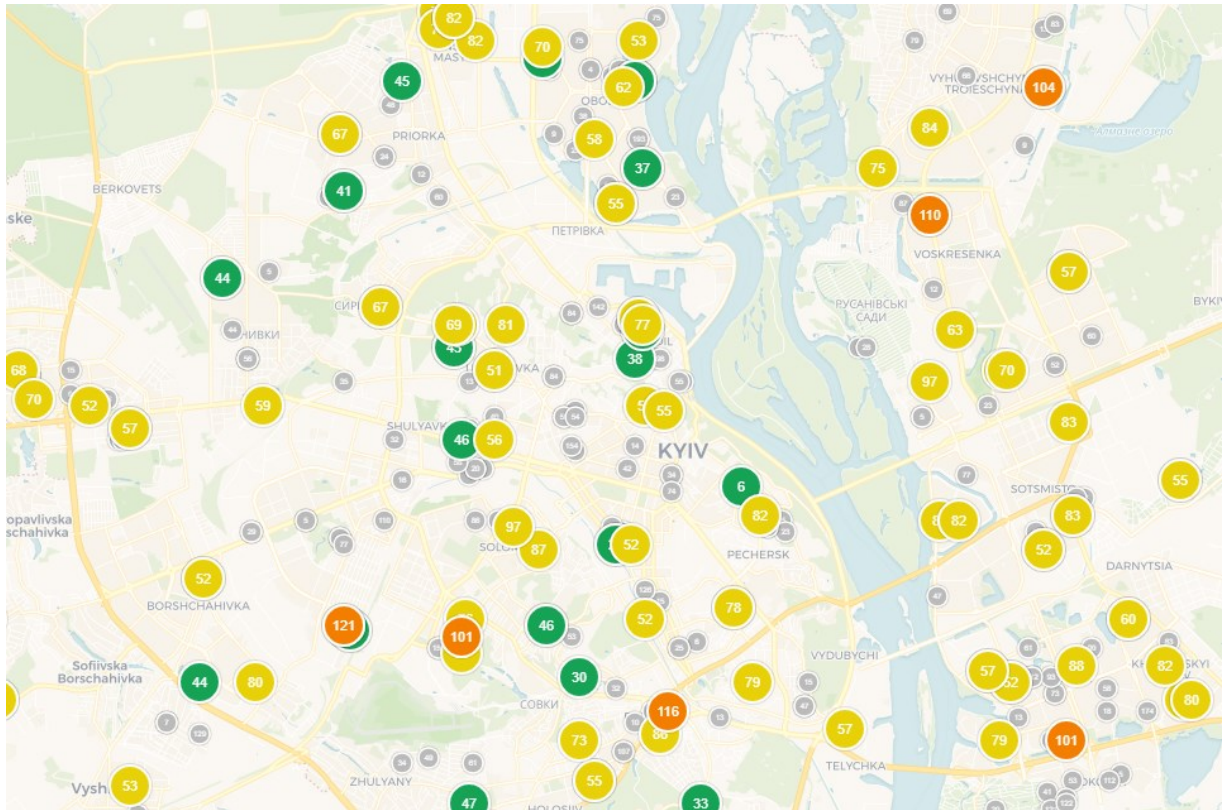


Рис. 2. Мапа Києва із результатами екологічного моніторингу (коефіцієнтом AQI) станом на 13 год. 30 хв. 23 жовтня 2022 року: неактивні станції позначено сірим кольором

Вибір 200-бальної шкали обумовлений кращою екологічною ситуацією в Києві у порівнянні із іншими мегаполісами світу (Рис.2). Крім того, на зменшеному відрізку шкали меншим є вплив нелінійності оцінювання концентрації того чи іншого чинника.

Для встановлення граничних значень концентрації чинників забруднення атмосфери використано рекомендації від агенції ЕРА[14,15]. Верхню границю для концентрації забруднювачів взято у відповідності до оцінки у 200 балів AQI. Визначено такі інтервали концентрації:

- для твердих часток типу PM2.5 від 0 до 120 мкг/куб.м;
- для чадного газу CO від 0 до 17 мг/куб.м;
- для діоксиду сірки SO₂ від 0 до 800 мкг/куб.м;
- для діоксиду азоту NO₂ від 0 до 280 мкг/куб.м.

Розробку моделі проводимо за допомогою Fuzzy Logic Tool Bar в середовищі MATLAB відповідно до [16]. Основним чинником забруднення визнано тверді частки, усі інші джерела забруднення є факторами зменшеного впливу на основний показник. Функції належності обрано такими:

- ✓ для входів – типу Гауса;
- ✓ для виходу – трикутні.

База знань створена на основі складання 81 правила нечіткого виведення за алгоритмом Мамдані.

Для нормалізації 200-бальної вихідної шкали на її границях експериментально визначено інтервал вихідної функції: [-41 241].

Отримано поверхню рішень для координат PM_{2.5} та SO₂ (Рис. 3).

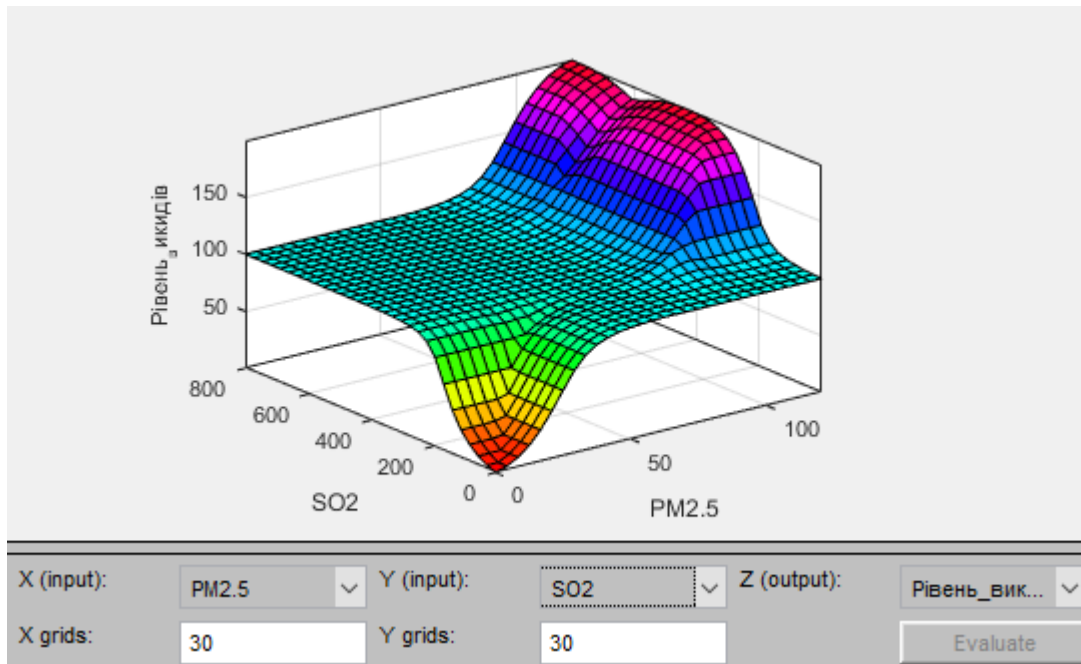


Рис. 3. Поверхня рішень в координатах: тверді частки, діоксид сірки

Поверхня рішень (рис. 3) не всюди опукла, що є додатковим джерелом невизначеності, проте цей негативний вплив є вкрай малий і, як показали додаткові дослідження, не перевищує 0,05 балів.

Для твердих часток PM2.5 і чадного газу CO поверхня рішень (Рис. 4) має невеличкі зміни у порівнянні із попереднім рисунком, що обумовлено призначенням дещо більшого впливу на вихідну оцінку.

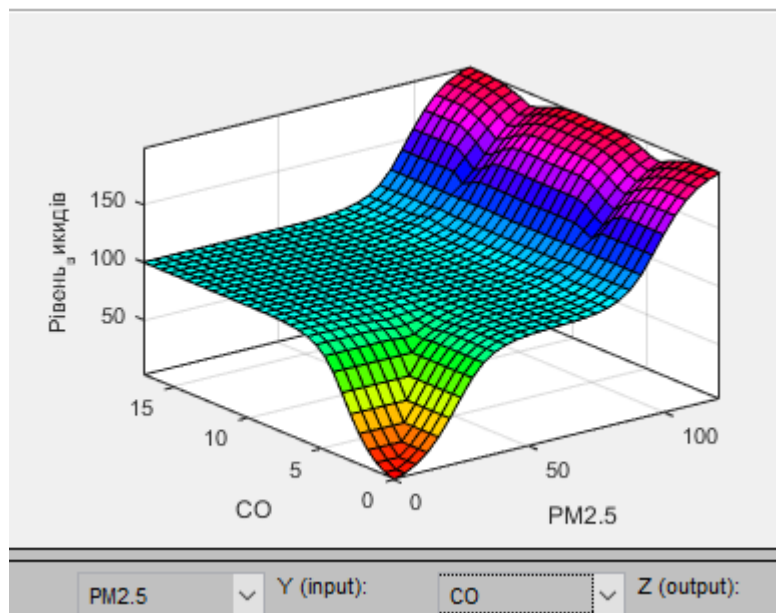


Рис. 4. Поверхня рішень в координатах: тверді частки, чадний газ

Усі три чинники забруднення атмосферного повітря – діоксиди сірки та азоту, чадний газ – впливають, проте не кардинально, на вихідну оцінку рівня викидів. Головним чинником тут залишається концентрація твердих часток PM2.5. Про цей факт свідчить форма поверхні рішень в координатах чинників зменшеного впливу, наприклад, концентрації діоксиду сірки і діоксиду азоту (Рис. 5).

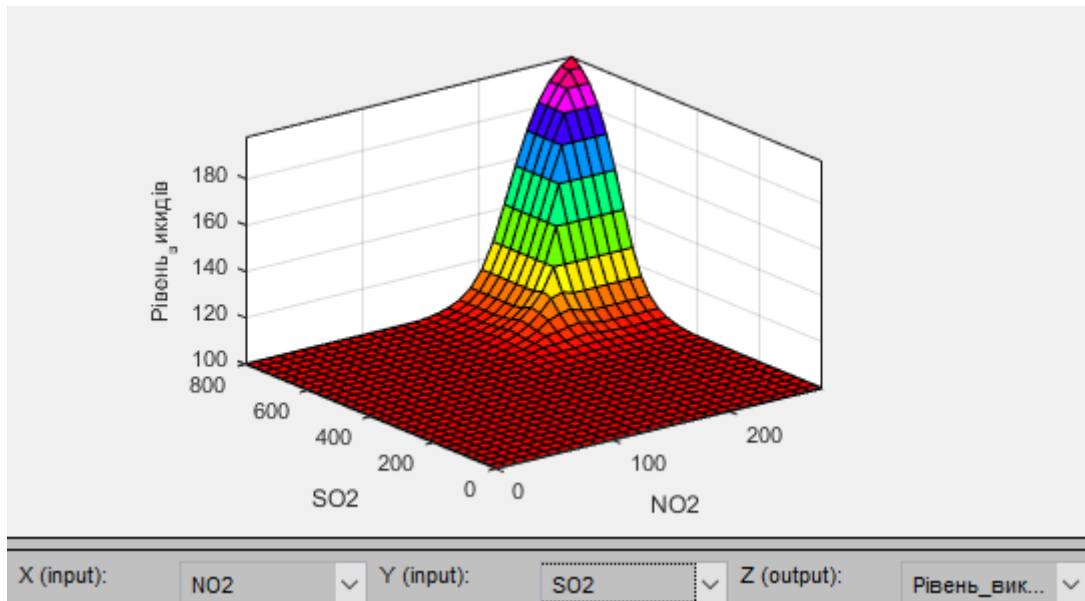


Рис. 5. Поверхня рішень в координатах: діоксид азоту, діоксид сірки

Для апробації моделі використано дані від станції екологічного моніторингу в місті Києві (Рис. 6).



Рис.6. Дані екологічного моніторингу на вулиці Щусєва, 21 з 21 по 23 жовтня 2022 року

Первинні дані на 23 жовтня 2022, о 13:50, такі:
адреса: місто Київ, вулиця Щусєва, 21

AQI=67

PM1: 14.5 мкг/м³ (23 жовтня 2022, 13:30)

PM2.5: 15.7 мкг/м³ (23 жовтня 2022, 13:30)

PM10: 17.7 мкг/м³ (23 жовтня 2022, 13:30)

Температура: 11.2 °C (23 жовтня 2022, 13:30)

Відносна вологість: 97 % (23 жовтня 2022, 13:30)

Атмосферний тиск: 990.3 гПа (23 жовтня 2022, 13:30)

Діоксид азоту (NO₂): 12.9 мкг/м³ (6.6 ppb) (23 жовтня 2022, 13:30)

Чадний газ (CO): 0.26 мг/м³ (0.2 ppm) (23 жовтня 2022, 13:30)

Діоксид сірки (SO₂): 8.33 мкг/м³ (3.1 ppb) (23 жовтня 2022, 13:30)

γ-Радіація: 110 нЗв/год

За результатами моделювання в меню VIEW/RULES (Рис. 7) на основі застосування нечіткого алгоритму отримано оцінку рівня викидів 7,6 балів (результат округлено до десятої).

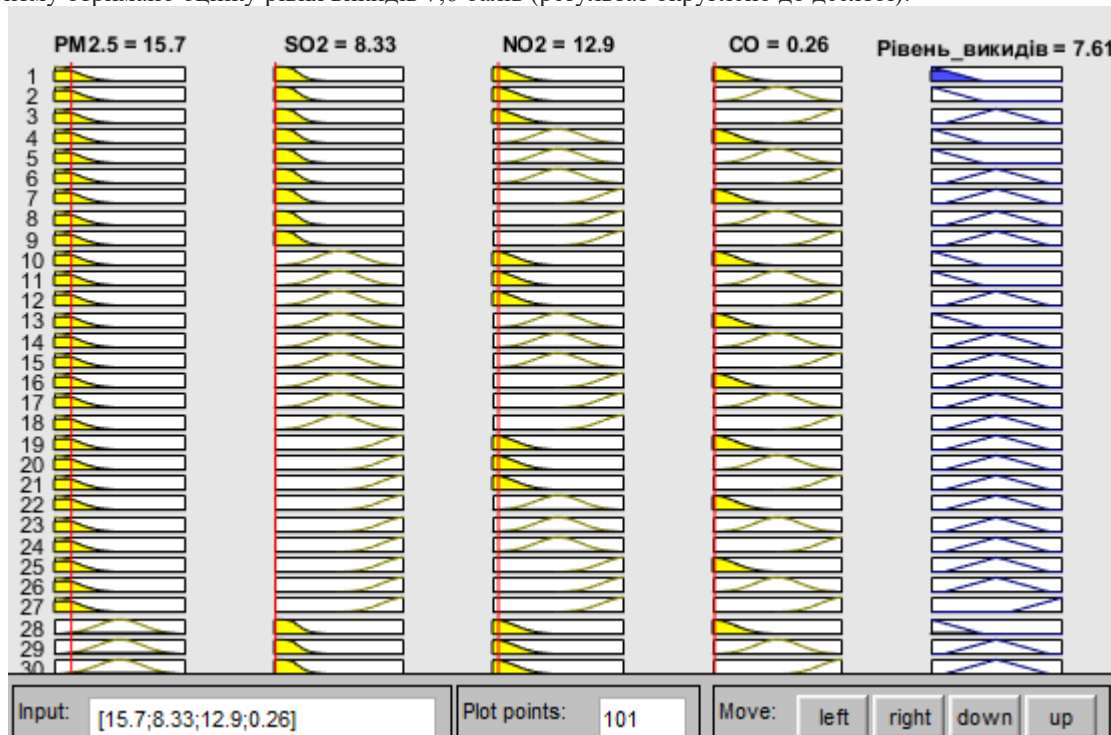


Рис. 7. Результат апробації нечіткої моделі: рівень викидів дорівнює 7,6 балів

Результат моделювання відрізняється від індексу AQI(PM2.5). Це можна пояснити вкрай низьким рівнем забруднення чадним газом і діоксидами сірки та азоту. Тобто екологічний стан в місті Києві є кращим від оцінки AQI(PM2.5). Крім того, в моделі не враховано нелінійне зростання концентрації зазначених вище чинників в шкалі AQI на відміну від кусково-лінійної залежності для концентрації твердих часток PM2.5.

Таким чином, отримана шкала для рівня викидів потребує подальшого доопрацювання і вдосконалення, перш за все лінеаризації вхідних даних.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеного нечіткого моделювання отримана експертна система з оцінювання загального рівня викидів в атмосферу на основі 200 бальної шкали і граничних значеннях, які є узгодженими із шкалою AQI.

Оцінювання за даною моделлю відрізняється від оцінювання за шкалою AQI, хоча модель і побудована за одним і тим самим головним чинником – концентрацією твердих часток PM2.5.

Наступним етапом моделювання є вдосконалення моделі, яке можливе за рахунок застосування логарифмічного масштабу для шкали чинників зменшеного впливу – концентрації діоксиду сірки, діоксиду азоту і чадного газу.

References

1. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI) – EPA 454/B-18-007 September 2018. – 22p.
2. <https://www.saveecobot.com/maps#12/50.4576/30.5274/aqi>
3. Dass A. Air pollution: A review and analysis using fuzzy techniques in Indian scenario /Anuli Dass , Smriti Srivastava , Gopal Chaudhary //Environmental Technology & Innovation, Vol.22. – 2021. – 19 p. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101441>
4. Lin Y. Air quality prediction by neuro-fuzzy modeling approach /Yu-Chun Lin, Shie-Jue Lee, Chen-Sen Ouyang, Chih-Hung Wu //Applied Soft Computing Journal, Vol.86. – 2020. – 13 p. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105898>
5. Pahlkavani P. Assessment of an air pollution monitoring network to generate urban air pollution maps using Shannon information index, fuzzy overlay, and Dempster-Shafer theory, A case study: Tehran, Iran /Parham Pahlavani, Hossein Sheikhan, Behnaz Bigdeli //Atmospheric Environment, Vol. 167. – 2017. – Pp. 254-269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.039>
6. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129500>
7. Schurholz D. Artificial intelligence-enabled context-aware air quality prediction for smart cities /Daniel Schürholz, Sylvain Kubler, Arkady Zaslavsky //Journal of Cleaner Production, Vol.271. – 2020. – 19 p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121941>

-
8. Saini J. Fuzzy Inference System Tree with Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm: A novel approach for PM10 forecasting //Jagriti Saini, Maitreyee Dutta, Gonçalo Marques //Expert Systems With Applications, Vj1.183. – 2021. – 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115376>
 9. Raheja S. Modeling and simulation of urban air quality with a 2-phase assessment technique / Supriya Raheja, Mohammad S. Obaidat, Balqies Sadoun, Sahil Malik, Anuj Rani, Manoj Kuma , Thompson Stephan // Simulation Modelling Practice and Theory, Vol.109. – 2021. – 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102281>
 10. Li R. A dynamic evaluation framework for ambient air pollution monitoring /Ranran Li, Yuqi Dong, Zhijie Zhu, Chen Li, Hufang Yang //Applied Mathematical Modelling, Vol.65. – 2019. – Pp. 52-71. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.052>
 11. Liu H. Intelligent modeling strategies for forecasting air quality time series: A review /Hui Liu, Guangxi Yan, Zhu Duan, Chao Chen //Applied Soft Computing Journal, Vol.102. – 2021. – 26 p. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106957>
 12. Li Y. Air quality forecasting with artificial intelligence techniques: A scientometric and content analysis /Yanzhao Li, Ju Guo, Shaolong Sun, Jianing Li, Shouyang Wang, Chengyuan Zhang //Environmental Modelling and Software, Vol.149. – 2022. – 17p. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105329>
 13. <https://www.iqair.com/ukraine/kyiv/kyiv-c>
 14. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-04/documents/2012_aqi_factsheet.pdf
 15. 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.
 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>
-