

CZU: 504.3.054

DOI: 10.46727/c.v1.16-17-05-2024.p139-145

DEZVOLTAREA REȚELELOR DE MONITORIZARE A CALITĂȚII AERULUI PE BAZĂ DE VOLUNTARIAT ȘI UTILIZAREA DATELOR MĂSURATE

DEVELOPMENT OF THE AIR QUALITY MONITORING NETWORKS BASED ON VOLUNTEERING AND USE OF THE MEASURED DATA

Udriștioiu Mihaela Tinca, dr., lect. univ., Universitatea din Craiova, România
Amarie Dragos, dr., conf. univ., Universitatea Georgia Southern, Statesboro, GA, S.U.A

Udriștioiu Mihaela Tinca, PhD, lecturer, University of Craiova, Romania,
ORCID: 0000-0002-5811-5930, mtudristioiu@central.ucv.ro
Amarie Dragos, PhD, associate professor, Georgia Southern University, Statesboro, GA, USA,
ORCID: 0000-0001-7928-9385, damarie@georgiasouthern.edu

Rezumat. Dezvoltarea rețelelor de senzori pe bază de voluntariat ia amploare de la o zi la alta. Acest fapt apare ca o consecință a comunicării ineficiente a agențiilor locale de mediu. Cetățenii devin din ce în ce mai atenți la modul în care poluarea le afectează sănătatea și se implică în procesul de monitorizare a aerului, găzduind senzori. Va fi prezentat modul în care a fost dezvoltată o rețea de monitorizare a calității aerului din regiunea de Sud-Vest a României, prin intermediul proiectelor dezvoltate. Rețeaua produce un număr impresionant de date, în urma măsurătorilor efectuate de senzori la fiecare minut. De asemenea, vor fi prezentate câteva modalități de utilizare a acestor date pentru a face o serie de predicții legate de poluarea aerului și de a lansa avertismente pentru categoriile sensibile de populație. Nu în ultimul rând, va fi evidențiată componenta educativă a acestor proiecte și importanța acesteia în schimbarea unor mentalități legate de protejarea mediului, a sănătății umane și a biodiversității.

Cuvinte-cheie: senzori de particule în suspensie, rețele de senzori, monitorizare, calitate aer, date open source, măsurători, proiecte, voluntariat, Erasmus+, Fulbright

Abstract. The development of sensor networks based on community volunteers is gaining momentum daily. This trend propagates because of the ineffective communication of local and national environmental agencies. Citizens are becoming increasingly aware of their health being affected by pollution, thus becoming actively involved in air quality monitoring by hosting sensors. The following presents how an air quality monitoring network was developed in southwest Romania by employing different region development projects. The network records impressive data as sensors perform measurements every minute. To create a series of predictions and issue warnings to the sensitive categories of the population, we will present some methods of using this data. Finally, the educational component of these projects will be highlighted, as well as its importance in changing mentalities related to protecting the environment, human health, and biodiversity.

Keywords: PM sensors, sensor networks, monitoring, air quality, open-source data, measurements, projects, volunteering, Erasmus+, Fulbright

Introducere

Este bine cunoscut că poluarea aerului afectează starea de sănătate a populației. Agenția Europeană de Mediu a declarat în noiembrie 2023 că Europa a înregistrat în anul 2021 un număr de 253.000 morți premature datorită expunerii cronice la particulele fine în suspensie (PM). Mai mult, Raportul Calitatea Lumii (World Quality Report) publicat în 2021 a arătat că numai 3.4% din cele 6.735 orașe monitorizate au îndeplinit standardele stabilite de ghidurile și recomandările Organizației Mondiale a Sănătății (World Health Organization) în 2021. Poluarea aerului înseamnă costuri în

bugetul fiecărei țări. Spre exemplu, conform Raportului Alianței Europene de Sănătate, în România, costul pe cap de locuitor datorită poluării în 2020 este de 1.810 euro [1].

Dacă discutăm numai despre particulele în suspensie (PM), de diametre foarte mici PM1, PM2.5 și PM10 (cu diametrul sub 1 μm , 2.5 μm și respectiv 10 μm), acestea sunt inhalate și produc boli respiratorii [2-4], generând boli cardiovasculare [5-6], producând disfuncționalități ale sistemului nervos central [7], cancer [8-10] și cresc probabilitatea de apariție a Parkinson-ului [11]. Dacă pentru concentrațiile de PM2.5 și PM10, Organizația Mondială a Sănătății a redus semnificativ valorile în 2021, pentru concentrațiile de PM1 încă nu au fost puse limite. Este evident că nivelurile de poluare a aerului depind și de alți factori dinamici, precum viteza și direcția de circulație a vântului. Masele de aer locale și vântul afectează modul în care microparticulele sunt transportate [12].

Poluarea aerului afectează nu numai sănătatea umană, ci și biodiversitatea [13]. Există specii de licheni care au dispărut, deoarece își absorb nutrienții direct dintr-o atmosferă poluată. Schimbările apărute în vegetația pădurilor datorită poluării și schimbărilor climatice, precum și reducerea zonelor necultivate au o serie de consecințe în ceea ce privește biodiversitatea. Spre exemplu, speciile sensibile la ozon, precum pinul, au fost înlocuite de cele mai puțin sensibile, cum ar fi stejarul sau chiar de diverse specii de arbuști, modificând diversitatea genetică în cadrul speciilor [14]. Ploile acide afectează vegetația sălbatică, dar și plantele de cultură [15].

La nivel internațional este utilizat indicele de calitate a aerului (AQI-air quality index), definit pe baza unei metodologii franceze CAQI (Common Air Quality Index), care ține cont de concentrațiile de CO, NO₂, SO₂, PM2.5 și PM10 măsurate de senzori. În această lucrare vom limita discuția numai la particulele în suspensie.

Tabelul 1. Semnificația AQI semnificanțe în ceea ce privește sănătatea

AQI ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Calitatea aerului pentru sănătate
0-50	Bună
51-100	Moderată
101-150	Nesănătoasă pentru grupurile sensibile
151-200	Nesănătoasă
201-300	Foarte nesănătoasă
301-500	Riscantă

Zone urbane în dezvoltare sunt afectate, deoarece praful provenit din șantierele de construcții înrăutățește calitatea aerului și a mediului. De asemenea, creșterea concentrației microparticulelor în suspensie este legată de dezvoltarea infrastructurii de transport. Problema nu este deloc simplă, deoarece infrastructura de transport este un element vital pentru dezvoltarea orașelor. Autoritățile trebuie să implementeze strategii care să ajute la decongestionarea orașelor, prin construcția unor centuri ocolitoare, a unor pasaje subterane și a unor drumuri supraterane, prin dezvoltarea conceptului de Smart city, cu semafoare inteligente care să redirecționeze traficul din zone aglomerate în altele mai puțin aglomerate ale orașului.

În cadrul unor proiecte de voluntariat (Clear Air Craiova, Clear Air Oltenia, Prevent), a fost dezvoltată o rețea de senzori low-cost la nivelul regiunii de Sud-Vest a României. În primă fază treisprezece senzorii au fost instalați în Craiova, în 2020, în cadrul unei campanii cu scop educativ. În urma derulării unei campanii de conștientizare în rândul liceelor, acestea au „adoptat” un senzor.

Câțiva cetățeni ai orașului Craiova s-au alăturat inițiativei proiectului și au achiziționat senzori care au fost adăugați rețelei. Proiectul Clear Air Craiova a continuat în 2021 cu extinderea rețelei în regiunea Sud-Vest a României cu încă 20 de senzori, în 2022 fiind adăugat un senzor de monitorizare a radiației ionizante. În perioada 2022-2024, a urmat un proiect de tip Erasmus+ (2021-1-RO01-KA220-HED-000030286, *Applying some advanced technologies in teaching and research, in relation to air pollution*) [16], care a făcut ca rețeaua să fie extinsă în Slovacia, Bulgaria și Turcia. Prin intermediul unui proiect Fulbright, rețeaua a fost extinsă și în statul Georgia din Statele Unite ale Americii.

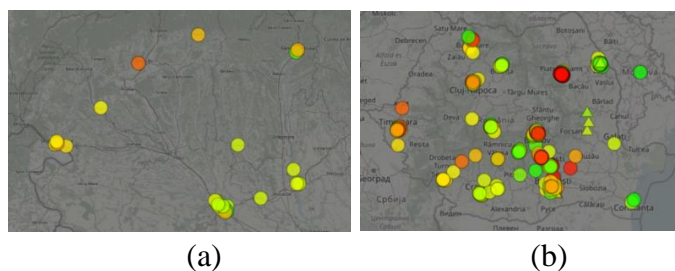


Fig. 1. Harta senzorilor din (a) regiunea SV România și (b) din România [17]

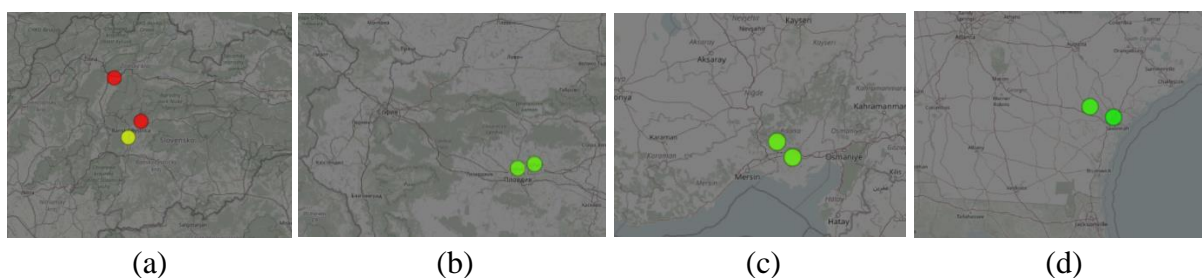


Fig. 2. Harta senzorilor din (a) Slovacia, (b) Bulgaria, (c) Turcia, (d) SUA [17]

Principalul obstacol întâlnit în cadrul proiectelor de voluntariat a fost legat de faptul că profesorii și elevii din licee și-au pierdut treptat interesul în întreținerea senzorilor. Senzorii nu au fost supravegheați din punctul de vedere al conexiunilor la WiFi și tensiune. Mai mult, elevii au folosit încărcătoarele senzorilor pentru a-și încărca telefoanele mobile. Cu toate acestea, a fost monitorizată calitatea aerului pentru o perioadă lungă de timp (aproape trei ani), ceea ce a demonstrat că dezvoltarea rețelei de senzori low-cost este o soluție complementară celei oficiale. O consecință a ceea ce s-a întâmplat cu unii dintre senzori a fost că unele date culese nu au fost continue, ceea ce a reprezentat un dezavantaj în ceea ce privește studiile realizate ulterior.

În cadrul proiectului Erasmus+, 40 de studenți internaționali au învățat să realizeze un senzor, să îl conecteze la rețea și să extragă date. Numărul de senzori realizat în cadrul școlilor de vară a fost mic, procesul de învățare a fost lent. Câteva kituri de senzori au fost distruse în acest proces. Mai mult, când s-au întors în țările de origine, studenții nu au conectat imediat senzorii realizați la rețea sau nu i-au conectat deloc. Cu toate acestea, doi sau trei senzori au devenit funcționali în fiecare dintre țările parteneriatului. În proiectul Fulbright, alți patru senzori au ajuns în Statele Unite din care doi sunt funcționali, urmând ca ceilalți doi să fie instalați în alte regiuni de interes.

Unul dintre beneficiile rețelei este că furnizează date open-source la fiecare minut care pot fi folosite în diferite studii. Densitatea senzorilor low-cost în orașe este cu mult mai mare decât cea a stațiilor care aparțin Agenției Naționale de Mediu și acest lucru ar putea contribui la o identificare

mai bună a surselor de poluare. Mai mult decât atât, aceste date, împreună cu cele de la sateliți (Copernicus, CAMS) și de la Agențiile de Mediu, cu ajutorul unor algoritmi de machine learning și de inteligență artificială, pot fi modelate, găsite corelații între diverși parametri, pot fi făcute predicții sau lansate avertismente când se depășesc valorile unor poluanți. Mai mult, când unul dintre sisteme nu funcționează din motive tehnice, cu ajutorul celorlalte date culese, pot fi înlocuite datele lipsă din sistem.

Rezultate și discuții

Prezentăm câteva dintre rezultatele unor studii care au folosit ca bază datele fine culese de senzori. Primul articol [18] a prezentat primele rezultate date de rețea. În principal, au fost evidențiate episoadele de poluare la nivelul Craiovei și au fost făcute o serie de comparații cu datele din rețeaua oficială. De asemenea, au fost făcute comparații cu datele legate de poluare de la sateliți [19].

Următorul articol [20] arată pașii pentru realizarea unei rețele bazate pe sprijinul comunităților locale, rețeaua uRADMonitor (630 senzori), din care fac parte și senzorii instalați în proiecte. Folosind datele colectate în 2021, a fost realizată analiza nivelului de poluare cu PM10 în cele mai dens populate cinci orașe din România. Acest lucru a fost realizat pe baza a cinci indicatori statistici (media anuală, indicatorii 90.4 și 50 percentile, valoarea zilnică maximă și numărul de zile cu valori peste limitele stabilite) recomandați de Agenția Europeană de Mediu. În cazul orașului Timișoara au fost comparate datele de la senzorii low-cost cu cele date de rețeaua națională, fiind evidențiate episoadele de poluare. De asemenea au fost analizate alte experiențe de realizare a unor rețele independente în alte comunități [21]. A urmat un studiu statistic comparativ între rezultatele oferite de datele provenite de la senzorii din trei țări, România, Turcia și Slovacia [22]. Pentru început, a fost utilizat testul Kolmogorov-Smirnov pentru a verifica normalitatea distribuției variabilelor continue și, ulterior, aplicat testul U Mann-Whitney [23]. Pentru analiza corelațiilor variabilelor au fost utilizați coeficienții Pearson. Tabelul 2 arată variațiile temperaturii medii (°C), umiditatea relativă (%) și concentrațiile de particule în suspensie PM1, PM2.5, PM10 în lunile iunie, iulie și august în România. Aceeași statistică a fost aplicată datelor din Turcia și Slovacia pentru a arăta cât de mult contează înțelegerea poluării la nivel local.

Tabelul 2. Analiza descriptivă a datelor [22]

		Romania				
Lunile		T (°C)	H (%)	PM1	PM25	PM10
Iunie	Media	18.0	60.5	5.2	7.7	8.1
	Std. Dev.	5.9	12.2	7.7	9.1	9.7
Iulie	Media	20.1	60.1	5.3	7.6	8.1
	Std. Dev.	5.5	11.2	3.5	5.0	5.6
August	Media	20.4	64.3	6.3	8.9	9.4
	Std. Dev.	5.9	11.0	18.0	18.4	18.6

Tabelul 3 conține analiza corelațiilor pentru senzorul utilizat. Examinând relația dintre temperatură (T) și alte variabile, se observă cu ușurință o corelație negativă între temperatură și

umiditatea relativă, PM1, PM2.5 și PM10. Aceste corelații negative indică faptul că umiditatea și concentrațiile de particule în suspensie scad pe măsură ce crește temperatura. În plus, a fost evidențiată o corelație pozitivă semnificativă între umiditatea relativă și concentrațiile de PM1, PM2.5 și PM10, ceea ce arată că pe măsură ce umiditatea crește cresc și concentrațiile de PM.

Tabelul 3. Rezultatele corelațiilor pentru setul de date utilizat [22]

	Romania				
	T (°C)	RH (%)	PM1	PM25	PM10
T (°C)	1	-.74**	.02**	.02**	.0**
RH (%)	-.74**	1	.08**	.11**	.12**
PM1	.02**	.08**	1	.98**	.97**
PM25	.02**	.11**	.98**	1	.99**
PM10	.02**	.12**	.97**	.99**	1

Figura 3 indică media zilnică a măsurătorilor de calitatea aerului achiziționate de doi senzori din România. În iunie, temperatura medie înregistrată a fost de 17.97°C, iar umiditatea relativă a fost de 68.09%. Valorile medii pentru concentrațiile de particule în suspensie au fost 5.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pentru PM1, 7.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pentru PM2.5 și 7.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pentru PM10. În iulie, temperatura medie a crescut la 22.43°C, iar umiditatea relativă medie a fost 66.93%. Valorile medii pentru PM1, PM2.5 and PM10 au fost 6.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ și 10.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. În august, temperatura medie a fost 23.39°C, iar umiditatea de 67.15%. Valorile medii pentru PM1, PM2.5 și PM10 au fost de 6.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ și 10.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

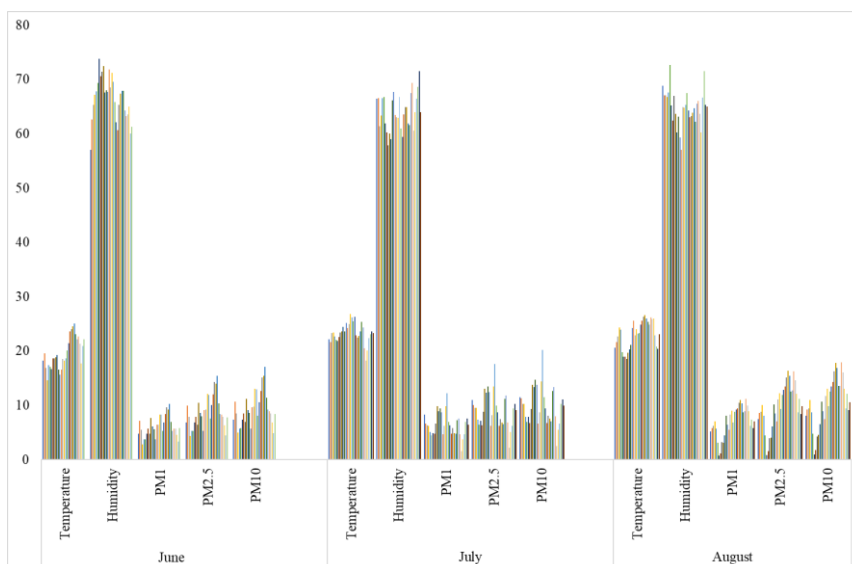


Fig. 2. Valorile medii ale parametrilor măsurători de senzorul din Craiova [22]

Folosind o serie de algoritmi hibridi (Artificial Neural Network, Decision Tree, Gaussian process regression, Liniar regression, Integral Feature Selection Method, Least Square Regression) de machine learning pe un set de date mai mare de șase luni și respectiv de un an, au fost realizate predicții, modelări și prognoze ale concentrațiilor de particule în suspensie și, respectiv, ale indicelui

de calitatea aerului [24]. Au fost analizate episoadele de poluare, au fost evaluate corelațiile existente între parametri meteorologici și indicele de calitate a aerului și concentrațiile de PM. De asemenea au fost investigate relațiile dintre fracțiile de PM și dioxid de carbon (CO₂), componente organice volatile (VOC), formaldehidă, ozon și zgomot.

Ulterior a fost studiat modul în care este influențată funcționarea panourilor fotovoltaice de poluare. A fost realizat acest lucru prin prisma potențialului de energie solară a regiunii de Sud-Vest a României. Concluzia a fost că atunci când poluarea atinge valori maxime, adică iarna, panourile fotovoltaice nu sunt afectate de poluare, randamentul maxim al panourilor fiind vara. Mai mult, prin aplicarea unor algoritmi de inteligență artificială, pot fi lansate o serie de avertismente pentru persoanele sensibile (bătrâni, persoanele cu boli cronice, copiii, femeile însărcinate).

Concluzii

Dezvoltarea rețelelor de senzori a condus la obținerea unor seturi de date consistente, care pot fi analizate și care pot reprezenta, alături de alte date, provenite din surse diferite, o resursă importantă pentru cercetare. Rețelele independente pot reprezenta o variantă complementară rețelelor oficiale, cu avantaje și dezavantaje. Identificarea surselor de poluare se poate face cu adevărat doar dacă există o distribuție uniformă a senzorilor. Accesarea fondurilor europene este o cale de a umple golul existent în ceea ce privește echipamentele de cercetare. Bazele de date open-source se dovedesc foarte utile, în condițiile în care ia amploare utilizarea inteligenței artificiale.

Mulțumiri

Autorii își exprimă recunoștința pentru sprijinul primit în cadrul proiectelor de voluntariat Clear Air Craiova, Clear Air Oltenia, Prevent, în cadrul proiectului de cercetare Fulbright (Implementing Research Based Assessment Instruments, The First Step Towards Standardization In Romanian Evaluation) finanțat de și proiectului Advtech_AirPollution project (Applying some advanced technologies in teaching and research, in relation to air pollution, 2021-1-RO01-KA220-HED-000030286) finanțat de Uniunea Europeană, în cadrul programului Erasmus+.

Bibliografie:

1. DE BRUIN, S. &. (2021). Health Costs of Air Pollution in European Cities and the Linkage with Transport, 2020. Delft: European Public Health Alliances. Available online: <https://cedelft.eu/publications/health-costs-of-air-pollution-in-european-cities-and-the-linkage-with-transport/> (vizitat 27 ianuarie, 2024)
2. GUO, X.; LIN, Y.; LIN, Y., ZHONG, Y.; YU, H.; HUANG, Y.; YANG, J.; CAI, Y.; LIU, F.D.; LI, Y.; ZHANG, Q.Q.; DAI, J. PM_{2.5} induces pulmonary microvascular injury in COPD via METTL16-mediated m⁶A modification, *Environmental Pollution*, 2022, 303, 119115, DOI:10.1016/j.envpol.2022.119115
3. MONOSON, A.; SCHOTT, E.; ARD, K.; KILBURG-BASNYAT, B.; TIGHE, R.M.; PANNU, S.; GOWDY, K.M. Air pollution and respiratory infections: The past, present, and future. *Toxicol. Sci.* 2023, 192, 3–14, DOI: 10.1093/toxsci/kfad003
4. LOAIZA-Ceballos, M.C.; MARIN-PALMA, D.; ZAPATA, W.; HERNANDEZ, J.C. Viral respiratory infections and air pollutants. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2022, 15, p. 105-114, DOI:10.1007/s11869-021-01088-6.
5. VELEA, L; UDRISTIOIU, M.T.; BOJARIU, R.; SARARU, S.C.; PRUNARIU, L. The influence of climate conditions on the mortality related to cardiovascular diseases in Dolj county (Southern Romania), *AIP Conf. Proc.* 2017, 1796, 040003 DOI: 10.1063/1.4972381

6. RAJAGOPALAN, S.; AL-KINDI, S.G.; BROOK, R.D. Air Pollution and Cardiovascular Disease: JACC State-of-the-Art Review, *J Am Coll Cardiol*, 72 (2018), p. 2054-2070. DOI: 10.1016/j.jacc.2018.07.099
7. SHAH, A.S.V.; LEE, K.K.; MCALLISTER, D.A.; HUNTER, A.; NAIR, H.; WHITELEY, W.; LANGRISH, J.P.; NEWBY, D.E.; MILLS, N.M. Short-term exposure to air pollution and stroke: Systematic review and meta-analysis, *BMJ*, 2015, p. 350, DOI: 10.1136/bmj.h1295
8. XUE, Y.; WANG, L.; ZHANG, Y.; ZHAO, Y.; LIU, Y. Air pollution: A culprit of lung cancer. *J. Hazard. Mater.* 2022, 434 128937, Doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128937
9. GUO, H.; WEI, J.; LI, X.; HO, H.C.; SONG, Y.; WU, J.; LI, W. Do socioeconomic factors modify the effects of PM1 and SO2 on lung cancer incidence in China?, *Science of The Total Environment*, 2021, 756, 143998, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143998
10. NIKMANESH, Y.; MOHAMMADI, M.J.; YOUSEFI, H.; MANSOURIMOGHADAM, S.; TAHERIAN, M. The effect of long-term exposure to toxic air pollutants on the increased risk of malignant brain tumors. *Reviews on Environmental Health* 2022, DOI:10.1515/reveh-2022-0033.
11. MURATA, H.; BARNHILL, L.M.; BRONSTEIN, J.M. Air Pollution and the Risk of Parkinson's Disease: A Review. *Movement Disorders* 2022, 37, 894-904, DOI:10.1002/mds.28922.
12. TSHEHLA, C.E.; WRIGHT, C.Y. Spatial and Temporal Variation of PM10 from Industrial Point Sources in a Rural Area in Limpopo, South Africa. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 3455. DOI: 10.3390/ijerph16183455.
13. BARKER, J.R.; TINGEY, D.T. *Air Pollution Effects on Biodiversity*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; ISBN 1461535387.
14. SINGH, V.; SHUKLA, S.; SINGH, A. The Principal Factors Responsible for Biodiversity Loss. *Open J. Plant Sci.* 2021, 6, 11–14, DOI: 10.17352/ojps
15. LU, X.; ZHANG, S.; XING, J.; WANG, Y.; CHEN, W.; DING, D.; WU, Y.; WANG, S.; DUAN, L.; HAO, J. Progress of Air Pollution Control in China and Its Challenges and Opportunities in the Ecological Civilization Era. *Engineering* 2020, 6, 1423-1431, DOI: 10.1016/j.eng.2020.03.014
16. Site proiect. Disponibil online: [http://advtech-airpollution.ucv.ro/index.php/en/\(vizitat 27 ianuarie 2024\)](http://advtech-airpollution.ucv.ro/index.php/en/(vizitat%2027%20ianuarie%202024))
17. uRADMonitor Dashboard. Disponibil online: <http://www.uradmonitor.com/dashboard> (vizitat 26 ianuarie 2024)
18. UDRISTIOIU M.T.; VELEA, L.; MOTISAN, R. First results given by the independent air pollution monitoring network from Craiova city Romania, *AIP Conf. Proc.* 2023, 2843, 040001 DOI: 10.1063/5.0152017
19. VELEA, L.; UDRISTIOIU, M.T.; BOJARIU, R.; SARARU, S.C. Statistical characteristics of particulate matter (PM10) concentration in Romanian selected urban areas based on CAMS-regional ensemble model reanalysis, *AIP Conf. Proc.* 2020, 2218, 030003 DOI: 10.1063/5.0001047
20. VELEA, L.; UDRISTIOIU, M.T.; PUIU, S.; MOTIȘAN, R.; AMARIE, D. A. Community-Based Sensor Network for Monitoring the Air Quality in Urban Romania. *Atmosphere* 2023, 14, 840. DOI:10.3390/atmos14050840
21. COMMODORE, A.; WILSON, S.; MUHAMMAD, O.; SVENDSEN, E.; PEARCE, J. Community-based participatory research for the study of air pollution: A review of motivations, approaches, and outcomes. *Environ. Monit. Assess.* 2017, 189, 378, DOI: 10.1007/s10661-017-6063-7
22. PEKDOGAN, T.; UDRISTIOIU, M.T.; PUIU, S.; YILDIZHAN, H.; HRUŠKA, M. A Multi-Country Statistical Analysis Covering Turkey, Slovakia, and Romania in an Educational Framework. *Sustainability* 2023, 15, 16735. Doi: 10.3390/su152416735
23. McKnight, P. E., & Najab, J. (2010). Mann-Whitney U Test. In *The Corsini Encyclopedia of Psychology*. DOI:10.1002/9780470479216.corpsy0524.
24. UDRISTIOIU, M.T.; EL MGHOUCHI, Y.; YILDIZHAN, H. Prediction, modeling, and forecasting of PM and AQI using hybrid machine learning, *Journal of Cleaner Production*, 2023, 421 138496, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138496