CZU: 551.501.7:502.3:628.5:517.97 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.14**

MODELAREA CONCENTRAȚIILOR DE PARTICULE ÎN SUSPENSIE PE PLATFORMA DE MONITORIZARE A CALITĂȚII AERULUI eALERT-TRACOM UTILIZÂND METODA 4DEnVar

MODELING PARTICULATE MATTER CONCENTRATIONS ON THE eALERT-TRACOM AIR QUALITY MONITORING PLATFORM USING 4DEnVar METHOD

Veaceslav SPRINCEAN[1] e-mail: veaceslav.sprincean@usm.md ORCID ID: 0000-0001-6719-7387
Adrian PALADI[2] e-mail: adrian.paladi@usm.md
Alexei LEU[3] e-mail: alexei.leu@usm.md ORCID ID: 0000-0002-1862-153X
Florentin PALADI[4] e-mail: fpaladi@usm.md ORCID ID: 0000-0001-8099-9413

[1, 2,3, 4]Moldova State University

Abstract. *We illustrate the methodology and robustness of the four-dimensional ensemble-variational (4DEnVar) data assimilation technique. Spatial comparison is provided to evaluate how the assimilation process adjusts the model state toward a true distribution; that is, such spatial comparison is presented between the true $PM_{2.5}$ concentration values, the background state, and the analysis obtained from the 4DEnVar-like data assimilation experiment. Also, the Pearson correlation quantifies how similarly the particulate matter (PM) concentrations vary over the period of 3-28 February 2025, while diurnal averages of PM_1, $PM_{2.5}$, and PM_{10} profiles reveal typical daily patterns in particle concentrations, characterized by higher concentrations especially during morning hours and lower levels in the latter afternoon, which can be mainly attributed to traffic-related emissions.*

Keywords*: Environmental applications, 4DEnVar data assimilation, Pearson correlation, diurnal variation of particulate matter concentrations.*

INTRODUCERE

În articol este examinată o problemă de modelare computațională actuală, aflată la intersecția dintre științele mediului și modelarea sistemelor complexe bazată pe seturi mari de date. În contextul impactului asupra sănătății populației cauzat de particulele fine cu diametrul aerodinamic mai mic de 10 micrometri și al limitărilor serviciului de alertă din Republica Moldova, acest articol prezintă o abordare inovatoare care combină monitorizarea în timp real cu simulările computaționale avansate cvasi-dinamice pentru a îmbunătăți prognoza poluării mediului ambiant și evaluarea riscurilor de sănătate. Relevanța unor astfel de studii este determinată și de necesitatea crescândă de date de monitorizare a mediului cu o rezoluție spațial-temporală ridicată, necesare pentru luarea deciziilor bazate pe argumente fundamentate științific, în special în regiunile urbane expuse unor riscuri ecologice semnificative. Studiul [1] conține o prezentare comprehensivă a progreselor recente, dar și a provocărilor existente în integrarea măsurătorilor de mediu în cadrul modelelor de asimilare a datelor, evidențiind cercetări relevante privind utilizarea datelor reale de monitorizare în contextul diverselor tehnici de asimilare a datelor. Primele studii în acest domeniu se referă la estimarea parametrilor modelului de calcul. De exemplu, a fost aplicată o metodă de optimizare

pentru a minimiza diferența dintre rezultatele numerice ale modelului și setul corespunzător de date bazat pe măsurători. Ulterior, au fost introduse calcule mai complexe, prin includerea unui termen care descrie abaterile în raport cu estimările anterioare ale parametrilor și prin utilizarea formulărilor conexe ale modelului pentru a ameliora performanța de calcul [2, 3]. Aceste cercetări fundamentale demonstrează existența unei tranziții de la tehnicile clasice de optimizare la metodele variaționale mai complexe în formularea modelelor de mediu, creând premisele utilizării pe larg a metodei de asimilare a datelor de tipul ansamblu-variațional 4D (4DEnVar) în diverse studii contemporane de mediu.

METODOLOGIA DE CALCUL

Starea de fond, generată ca o distribuție uniformă a concentrației poluanților de 20 μg/m^3, caracterizează starea modelului înainte de asimilarea datelor experimentale. Observațiile bazate pe UAV cu stația de măsurare SOWA au fost asimilate în locații discrete distribuite la distanțe egale, fiind reprezentate grafic în punctele 10, 20, 30 și 40 (*Grid point*) [4, 5]. În procesul de asimilare a datelor de monitorizare, sunt atribuite ponderi optime observațiilor în raport cu modelul, aplicând corecții mai mari acolo unde incertitudinea modelului este mai ridicată. În acest cadru de modelare, dispersia ansamblului oferă o estimare a incertitudinii modelului, permițând ajustarea adaptivă a influenței fiecărei observații în funcție de variabilitatea locală și nivelul de incertitudine din starea de fond. Profilul real al poluării pentru concentrațiile de tipul $PM_{2.5}$ este evaluat inițial printr-o distribuție Gauss, definită exponențial în forma $100 \times e^{-0.1(x-25)^2}$, rezultând, astfel, într-o curbă simetrică, în formă de clopot, centrată în punctul cu valoarea 25 și având o concentrație maximă de 100 μg/m^3, cu o micșorare graduală spre exterior. Profilul Gaussian a fost ales în special pentru a modela un nor de poluanți localizat, cum ar fi cazul unor surse posibile de emisii urbane sau industriale din regiunea platformei de monitorizare eALERT-TRACOM, situată în zona industrială TRACOM, unde concentrațiile de poluanți ar putea scădea treptat în funcție de distanță datorită proceselor fizice de advecție-difuzie. Acest model elaborat în Python oferă un cadru simplificat pentru evaluarea performanței asimilării datelor, permițând o vizualizare explicită a modului în care metoda de modelare 4DEnVar corectează starea de fond în direcția estimărilor spațiale reale ale distribuției concentrației corespunzătoare de tipul $PM_{2.5}$.

Corelațiile bazate pe coeficientul Pearson au fost utilizate pe larg pentru a analiza concentrațiile de particule în suspensie în publicații recente [6, 7]. Aplicând ecuația Pearson în acest studiu, se va calcula, de exemplu, corelația dintre concentrațiile de tipul PM_1 și $PM_{2.5}$ cu ajutorul următoarei formule:

$$r_{\mathrm{PM}_1,\mathrm{PM}_{2.5}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{PM}_{1,i}-\langle \mathrm{PM}_1\rangle)(\mathrm{PM}_{2.5,i}-\langle \mathrm{PM}_{2.5}\rangle)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{PM}_{1,i}-\langle \mathrm{PM}_1\rangle)^2 \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{PM}_{2.5,i}-\langle \mathrm{PM}_{2.5}\rangle)^2}},$$

unde diferența este calculată între concentrațiile PM la fiecare măsurare *i*, adică $PM_{1,i}$ și $PM_{2.5,i}$, și valorile lor mediile $\langle PM_1 \rangle$ și $\langle PM_{2.5} \rangle$ sunt determinate pentru întreaga perioadă de măsurare, iar n=1123 reprezintă numărul total de măsurători realizate în perioada 3-28 februarie 2025; valorile coeficientului de corelație Pearson pot varia de la valoarea -1, pentru o corelație negativă perfectă, până la valoarea +1 în cazul unei corelații pozitive perfecte.

REZULTATE ŞI DISCUŢII

Fig. 1 compară distribuțiile concentrației de tipul $PM_{2.5}$ pentru starea reală, cea de fond și starea analizată a modelului, demonstrând ameliorarea obținută prin asimilarea datelor de măsurare utilizând cadrul de modelare de tipul 4DEnVar. Starea reală (curba albastră continuă) posedă un maxim distinct de poluare în apropierea centrului domeniului de monitorizare, care este complet omis de distribuția de fond (linia dreaptă întreruptă de culoare galbenă) și de media ansamblului (curba punct-linie de culoare verde). După asimilare, această medie se apropie de valorile datelor de măsurare, manifestând o concordanță mai bună cu starea reală, în special în apropierea punctelor de observație. Acest fapt demonstrează că sistemul de asimilare propagă eficient datele măsurătorilor prin covarianța ansamblului, reducând erorile sistematice și îmbunătățind reprezentarea spațială a concentrației poluanților. Rezultatele confirmă că chiar și un număr limitat de puncte de observație poate corecta semnificativ starea modelului și îmbunătăți acuratețea predicțiilor, subliniind importanța integrării măsurătorilor atmosferice într-un cadru de asimilare variațională bazat pe ansamblu (4DEnVar).

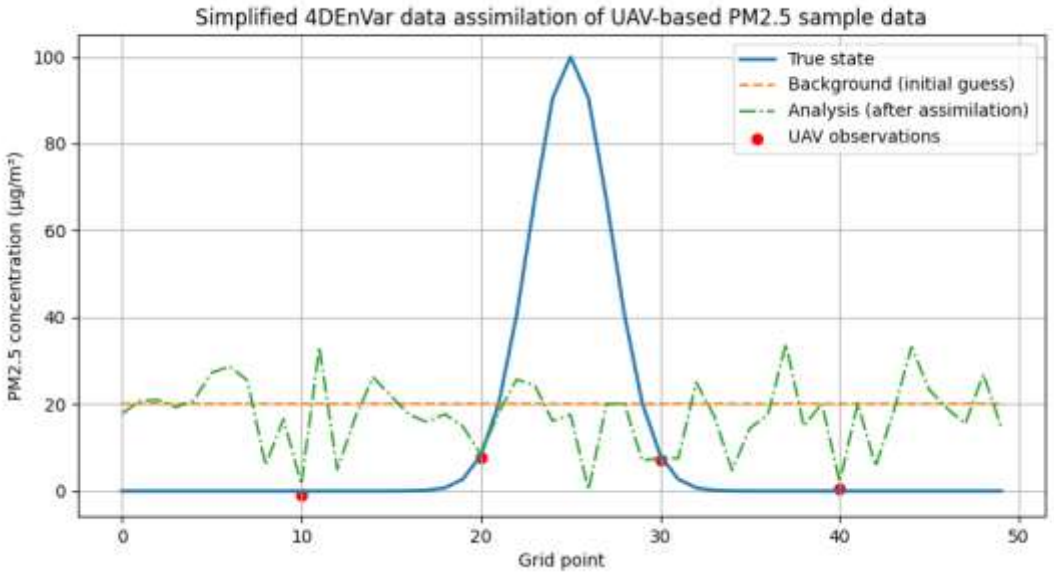


Fig. 1. Comparația spațială a stărilor pre- și post-asimilare a datelor $PM_{2.5}$.

Stația de monitorizare a calității aerului eALERT-TRACOM este situată în Chișinău, așa cum este prezentat în Fig. 2. Toate cele patru locații de monitorizare pot fi vizualizate pe platforma de monitorizare eALERT [8]. Pentru acest studiu, datele au fost preluate de la stația instalată în regiunea industrială TRACOM, denumită stația de monitorizare eALERT-TRACOM, pe adresa: str. Columna 170s, Chișinău, MD-2004. Intervalul de înregistrare al senzorilor este egal cu circa 30 de minute.



Fig. 2. Harta amplasării stației de monitorizare eALERT-TRACOM din Chișinău.

Fig. 3 prezintă harta corelației dintre concentrațiile PM_1, $PM_{2.5}$ și PM_{10} măsurate la stația de monitorizare eALERT-TRACOM. Corelațiile bazate pe coeficientul Pearson cuantifică gradul de similaritate al variației concentrațiilor de particule în suspensie în perioada 3-28 februarie 2025. Fiecare coloană a setului de date de monitorizare reprezintă o serie temporală a concentrațiilor de poluanți PM_1, $PM_{2.5}$ și PM_{10}, iar fiecare rând corespunde unei măsurători simultane efectuate la un interval de 30 de minute. Această analiză a corelației indică o relație liniară puternică și un comportament temporal aproape identic între PM_1 și $PM_{2.5}$ ($r_{PM_1,PM_{2.5}} = 0.95$), sugerând faptul că particulele fine domină variabilitatea ambelor fracții și, cel mai probabil, posedă surse comune de emisii și procese atmosferice similare (Fig. 4). Corelația moderată dintre $PM_{2.5}$ și PM_{10} ($r_{PM_{2.5},PM_{10}} = 0.75$) reflectă o suprapunere parțială a surselor acestora, datorită mecanismelor distincte de emisie și depunere, în timp ce corelația mai slabă dintre PM_1 și PM_{10} ($r_{PM_1,PM_{10}} = 0.66$) indică existența unor contribuții suplimentare care influențează variabilitatea particulelor în suspensie de tipul PM_{10}. În timp ce $PM_{2.5}$ este dominat de procesele de formare chimică secundară și transportul la distanțe mari, PM_{10} este controlat de emisiile mecanice primare și depunerea locală rapidă. Masa și inerția mai mare a acestora le fac susceptibile la depunerea pe vegetație, clădiri și sol într-un interval de la câteva ore până la câteva zile.

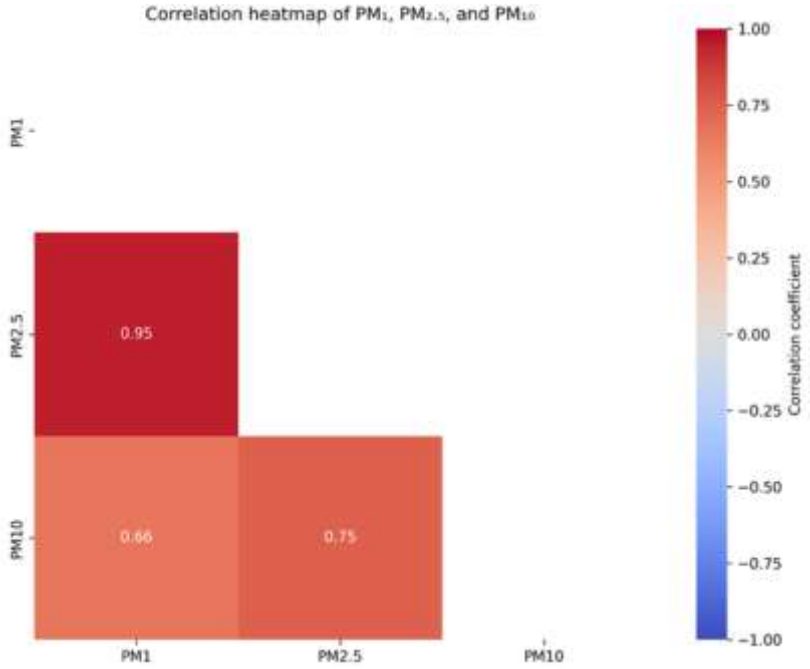


Fig. 3. Harta corelației concentrațiilor de particule în suspensie.

Hărțile corelațiilor concentrațiilor bazate pe coeficientul Pearson sunt utilizate pentru a realiza astfel de analize ale concentrațiilor de particule în suspensie în literatura contemporană [6, 7]. Rezultatele prezentate în studiul nostru sunt în concordanță cu cele raportate de către alți cercetători și demonstrează faptul că particulele fine (PM_1, $PM_{2.5}$) sunt mai strâns corelate în variabilitatea temporală decât PM_{10}, indicând surse comune de emisii și o dinamică atmosferică similară.

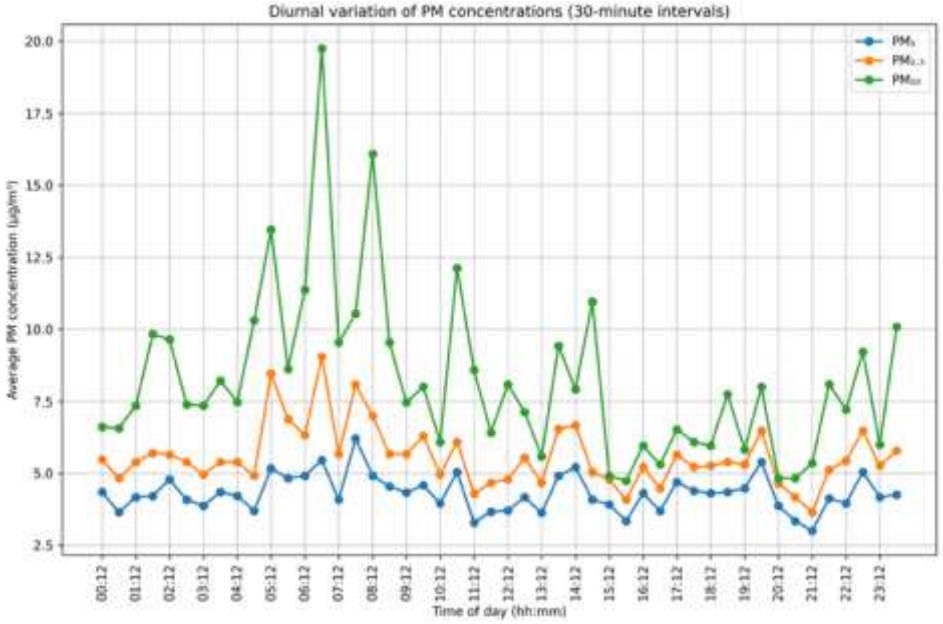


Fig. 4. Variația diurnă a concentrațiilor de particule în suspensie.

Totodată, valorile concentrațiilor medii prognozate pentru data de 28 februarie 2025 de PM_{10}≈35 μg/m^3, $PM_{2.5}$≈20 μg/m^3 și PM_1≈18 μg/m^3 sunt considerate drept poluare moderată a aerului. Aceste valori se situează sub limitele de 24 de ore ale Organizației Mondiale a Sănătății, însă peste intervalul ideal al aerului curat [9]. Expunerea prelungită poate provoca efecte ușoare asupra sănătății în rândul populației sensibile, inclusiv copii, vârstnici și persoane cu afecțiuni respiratorii. Un indice al calității aerului (AQI) de 59, raportat pentru Chișinău pe data de 28 februarie 2025, corespunde unor concentrații de tipul $PM_{2.5}$ de 15-20 μg/m^3, în funcție de calibrarea locală. Valorile respective se încadrează în categoria poluării moderate și este în concordanță cu nivelul prognozat în acest studiu de $PM_{2.5}$≈20 μg/m^3. Măsurători comparabile includ valori de $PM_{2.5}$=14 μg/m^3 și PM_{10}=23 μg/m^3 înregistrate la stația Ambasadei SUA din Chișinău [10], situată într-o zonă urbană mai puțin poluată comparativ cu locația de monitorizare eALERT-TRACOM, care se află în zona industrială TRACOM din partea de jos a orașului. Rezultatele prognozei demonstrează că modelarea computațională descrie în mod fiabil nivelurile moderate de poluare a aerului din Chișinău cu particule în suspensie.

CONCLUZII

Comparația spațială ilustrează eficiența asimilării datelor în ajustarea modelului computațional la o distribuție reală a concentrației de tipul $PM_{2.5}$. De asemenea, analiza bazată pe corelația Pearson în caracterizarea coerenței și variabilității particulelor în suspensie demonstrează că particulele fine sunt mai strâns corelate în variabilitatea lor temporală decât cele de tipul PM_{10}, fapt ce indică existența surselor comune de emisii și a unei dinamici similare din atmosferă. Mai mult ca atât, corelațiile observate în raport cu condițiile meteorologice demonstrează sensibilitatea concentrațiilor de particule la procese de advecție-difuzie și niveluri specifice de umiditate și temperatură. Suplimentar, graficul ciclului diurn ilustrează atât coerența statistică dintre particulele în suspensie PM_1, $PM_{2.5}$ și PM_{10}, cât și evoluția zilnică a concentrațiilor de particule la stația eALERT-TRACOM, care este în concordanță cu alte studii recente din domeniul evaluării calității aerului.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE:

1. SUJAY, K., KOLASSA, J., REICHLE, R. et al. An agenda for land data assimilation priorities: realizing the promise of terrestrial water, energy, and vegetation observations from space. În: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2022, vol. 14, no. 11, article e2022MS003259, 29 p. ISSN 1942-2466.
2. KNORR, W., HEIMANN, M. Impact of drought stress and other factors on seasonal land biosphere CO_2 exchange studied through an atmospheric tracer transport model. În: *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 1995, vol. 47, no. 4, pp. 471-489. ISSN 1600-0889.
3. KAMINSKI, T., KNORR, W., RAYNER, P.J., HEIMANN, M. Assimilating atmospheric data into a terrestrial biosphere model: A case study of the seasonal cycle. În: *Global Biogeochemical Cycles*. 2002, vol. 16, no. 4, pp. 14-1-14-16. ISSN 0886-6236.
4. SPRINCEAN, V., PALADI, A., ANDRUH, V., DANICI, A., LOZOVANU, P., PALADI, F. UAV-based measuring station for monitoring and computational modeling of environmental factors. In: *IEEE Xplore*. Proceedings of the IEEE 8th International Workshop on Metrology for Aerospace, 23-25 June 2021, Naples, Italy: IEEE Digital Library, 2021, pp. 80-85. ISSN 2575-7490.

5. SPRINCEAN, V., PALADI, A., ANDRUH, V., CHIRITA, A., PALADI, F. UAV-based monitoring and AFM analysis of airborne pollutants. In: *IEEE Xplore*. Proceedings of the IEEE 9th International Workshop on Metrology for Aerospace, 27-29 June 2022, Pisa, Italy: IEEE Digital Library, 2022, pp. 1-6. ISSN 2575-7490.
6. MA, Z., LUO, W., JIANG, J., WANG, B., MA, Z., LIN, J., LIU, D. Spatial and temporal characteristics analysis and prediction model of $PM_{2.5}$ concentration based on SpatioTemporal-Informer model. În: *PLOS ONE*. 2023, vol. 18, no. 6, article e0287423, 21 p. ISSN 1932-6203.
7. ISLAM, N., TOHA, T.R., ISLAM, M.M., AHMED, T. Spatio-temporal variation of meteorological influence on $PM_{2.5}$ and PM_{10} over major urban cities of Bangladesh. În: *Aerosol and Air Quality Research. Special Issue: Air Pollution and its Impact in South and Southeast Asia (IX)*. 2023, vol. 23, no. 1, article 220082, 20 p. ISSN 1680-8584.
8. *eALERT monitoring platforms*. eALERT website [citat 04.11.2025]. Disponibil: https://ealert.md.
9. *WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization, 2021, 285 p. ISBN 978-92-4-003422-8.
10. *Chisinau U.S. Embassy Air Quality Index (AQI)*. Air Pollution [citat 04.11.2025]. Disponibil: https://www.aqi.in/us/dashboard/moldova/chisinau/chisinau/chisinau-us-embassy.

Autorii menționează proiectul de cercetare PHYSTECH cu cifrul 011210 (subprogram) finanțat de către Ministerul Educației și Cercetării și contribuția lui Pavel Bîzgu, PRIDE SYSTEM, la prelucrarea datelor de monitorizare.