Culegere de articole științifice a Conferinței științifico-practice

„TEHNOLOGII FIZICE AVANSATE CU APLICAREA UVS ÎN MONITORIZAREA ȘI MODELAREA FACTORILOR DE MEDIU”,

Ediția a VI-a

Collection of scientific articles of the Scientific-Practical Conference

„ADVANCED PHYSICAL TECHNOLOGIES WITH UVS APPLICATION IN MONITORING AND MODELING OF ENVIRONMENTAL FACTORS”,

6th edition





14.11

TehFizUVS-2025

MOLDOVA STATE UNIVERSITY
INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS
Scientific Research Laboratory
"Environmental Physics and Complex Systems Modeling"

Book of Proceedings of the Scientific and Practical Conference
"**Advanced Physical Technologies with UVS Application in Monitoring and Modeling of Environmental Factors**"
(**TehFizUVS**), 6th Edition,
dedicated to the International Day of Science for Peace and Development
November, 14, 2025

Culegere de articole ale Conferinței științifico-practice
„TEHNOLOGII FIZICE AVANSATE CU APLICAREA UVS ÎN MONITORIZAREA ȘI MODELAREA FACTORILOR DE MEDIU"
(**TehFizUVS**), Ediția a VI-a,
dedicată Zilei Internaționale a Științei pentru Pace și Dezvoltare
14 noiembrie 2025

Chisinau, 2025

Book of Proceedings of the Scientific and Practical Conference
"**Advanced Physical Technologies with UVS Application in Monitoring and Modeling of Environmental Factors**" (**TehFizUVS**), 6th Edition,
dedicated to the International Day of Science for Peace and Development
November, 14, 2025

Culegere de articole ale Conferinței științifico-practice
„TEHNOLOGII FIZICE AVANSATE CU APLICAREA UVS ÎN MONITORIZAREA ȘI MODELAREA FACTORILOR DE MEDIU" (**TehFizUVS**)**,** Ediția a VI-a,
dedicată Zilei Internaționale a Științei pentru Pace și Dezvoltare
14 noiembrie 2025

Editorial Production:
PhD, associate professor, leading scientific researcher Veaceslav Sprincean, Moldova State University
PhD, senior scientific researcher Marianna Savva, Moldova State University

DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAŢIONALE A CĂRŢII DIN REPUBLICA MOLDOVA
"Tehnologii fizice avansate cu aplicarea UVS în monitorizarea şi modelarea factorilor de mediu" (TehFizUVS), conferinţă ştiinţifico-practică (6 ; 2025 ; Chişinău). Culegere de articole ale Conferinței științifico-practice "Tehnologii fizice avansate cu aplicarea UVS în monitorizarea și modelarea factorilor de mediu" (TehFizUVS), Ediția a 6-a, dedicată Zilei Internaționale a Științei pentru Pace și Dezvoltare, 14 noiembrie 2025 = Book of Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Advanced Physical Technologies with UVS Application in Monitoring and Modeling of Environmental Factors" (TehFizUVS), 6th Edition, dedicated to the International Day of Science for Peace and Development, November 14, 2025 / scientific committee: Veaceslav Sprincean [et al.]. – Chişinău : Editura USM, 2025. – 234, [1] p. : fig., tab. Cerinţe de sistem: PDF Reader.
Antetit.: Modova State University, Institute of Applied Physics, Scientific Research Laboratory, "Environmental Physics and Complex Systems Modeling". – Texte : lb. rom., engl., fr. – Rez.: lb. rom., engl. – Referinţe bibliogr. la sfârşitul art.
ISBN 978-9975-62-978-2 (PDF).
082=135.1=111=133.1
T 32
https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25

The event is organized within the research subprogramme "Advanced physical methods and UAV-based technologies for complex monitoring, evaluation and modeling" (PHYSTECH), subprogramme code 011210.
Note! The responsibility for the scientific quality of the articles published in this collection lies with the authors.

© Veaceslav Sprincean, Savva Marianna et al., 2025

©Moldova State University, 2025

Conference Scientific Committee:

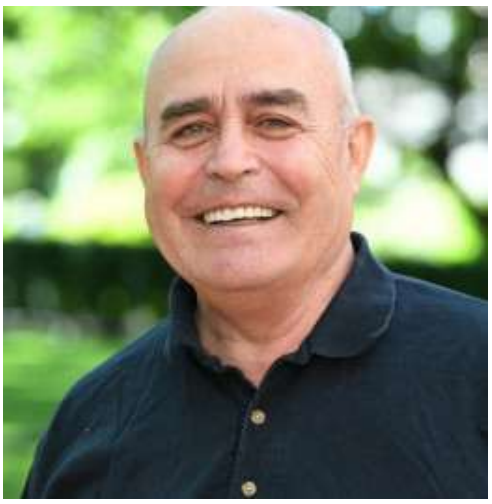
Veaceslav Sprincean	Moldova State University, PhD, associate professor, coordinating researcher, subprogram director
Florentin Paladi	Moldova State University, Dr. Habil., professor, principal researcher
Ion Tighineanu	Academy of Sciences of Moldova, president, academician, Dr. Habil., professor
Vladimir Fomin	University of Dresden, Leibniz Institute, Germany, honorary member of the Academy of Sciences of Moldova, Dr. Habil., professor
Tudor Spătaru	Columbia University, New York, United States of America, PhD, professor
Ala Cojocaru	University of Kiel, Phi-Stone AG, Germany, PhD
Tudor Braniște	Technical University of Moldova, PhD, senior researcher
Sergiu Matveev	Moldova State University, PhD, associate professor, coordinating researcher
Marianna Savva	Moldova State University, PhD, senior researcher
Ana Bîrsan	Moldova State University, PhD, associate professor, coordinating researcher
Alisa Moșneaga	Moldova State University, PhD, senior lecturer
Liliana Dmitroglo	Moldova State University, Faculty of Physics and Engineering, dean, PhD, associate professor
George Culea	"Vasile Alecsandri" University of Bacău, Romania, PhD, professor
Gabriel Puiu	"Vasile Alecsandri" University of Bacău, Romania, PhD, associate professor
Pasquale Daponte	University of Sannio, Benevento, Italy, Doctor Honoris Causa, professor

Luca de Vito	University of Sannio, Benevento, Italy, PhD, associate professor
Dorin Afanas	"Alexandru cel Bun" Military Academy of the Armed Forces, PhD, associate professor
Vasile Iarmulschi	Institute for Prehistoric Archaeology, Free University of Berlin, Germany, PhD, researcher
Andrei Asăndulesei	ARHEOINVEST Center, "Alexandru Ioan Cuza" University of Iași, Romania, PhD, researcher

CONFERENCE ORGANIZING COMMITTEE:

Veaceslav Sprincean	Moldova State University, PhD, associate professor, coordinating researcher, subprogram director
Marianna Savva	Moldova State University, PhD, senior researcher
Sergiu Matveev	Moldova State University, PhD, associate professor, coordinating researcher
Ana Bîrsan	Moldova State University, PhD, associate professor, coordinating researcher
Alisa Moșneaga	Moldova State University, PhD, senior lecturer

KEYNOTE SPEACKERS



Tudor SPĂTARU, Ph.D,
Columbia University, New York, USA

,,Aspecte inedite ale naturii legăturii chimice în enzimele dependente de corrinoide în decursul proceselor biochimice din corpul uman''

Tudor SPATARU is a chemical researcher and educator with extensive experience in inorganic and bioinorganic chemistry. He earned his Master's degree in Inorganic Chemistry in 1972 from the State University of Moldova under Isaac Bersuker, conducting quantum chemical studies on cobalt dioximine complexes. After working in Prof. V.V. Sobolev's laboratory on crystal optical properties, he joined the Institute of Chemistry of the Moldova Academy of Sciences, where he completed his Ph.D. in 1983 on the electronic structure and properties of dioximates. Between 1976 and 1999, he worked as a senior researcher in the Bioinorganic Chemistry Laboratory, applying electronic structure calculations and physico-chemical methods to bio-active compounds. He also supervised master's and doctoral students and taught the course "Application of Mathematical Methods in Chemistry" at the Moldova State University. From 1999 to 2004, Spataru was an associate researcher at the University of Padua, Italy, studying intermetallic and hydrogen-storage materials with Prof. Giovani Principi. He then continued his research at City College of CUNY (2004–2007) on the electronic structure of Vitamin B12 forms with Prof. Ronald Birke. In 2007, he joined the Chemistry Department at Columbia University. Tudor Spataru has published over 100 scientific papers, participated in more than 100 international conferences, and received the 1st prize at the Balkan Conference on Chemistry in 1996. He remains actively involved in both research and teaching.



Ala COJOCARU, Ph.D,
Phi-Stone AG, Kiel, Germany

,,Tetrapodal ZnO: Nanoscale Architecture, Macroscopic Impact''

Dr. Ala COJOCARU is a researcher originally from the Republic of Moldova, specializing in physics and nanomaterials. She obtained her PhD in Physics at the Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldova. In 2007, she was awarded a Humboldt Fellowship at the University of Kiel, Germany, where she worked for many years in scientific research. She is currently employed at Phi-Stone AG in Kiel, within the research and development department for functional materials. She is involved in international projects focused on nanoparticles, semiconductor structures, and industrial applications. She publishes scientific papers regularly and contributes to technology transfer between academia and industry, being recognized for her expertise in advanced materials and her involvement in European research projects.



Agoston RESTAS, Ph.D,
Ludovika University of Public Service, Faculty of Law Enforcement, Institute of Disaster Management, Department of Fire Protection and Rescue Operation Managment

,,Drone Application for Predicting Forest Fire Propagation''

Prof. Ágoston RESTÁS specializes in fighting against forest fires especially in economical analysis and the application of aerial equipment. He holds mechanical engineering, economist, and disaster manager degrees. In 2008 Restás defended his first PhD thesis, in 2013 defended his other PhD thesis, and habilitation was also passed in 2015 at the University of Public Service, Budapest, Hungary. Restás was appointed as full university professor in 2023. Restás was a helicopter pilot in the Hungarian Air Defense, afterwards worked at the Ministry of Interior, Directorate General for Disaster Management. Restás is a professor working at the Ludovika University of Public Service, Faculty of Law Enforcement, Institute of Disaster Management, Department of Fire Protection and Rescue Operation Management. His researches focus mainly on aerial firefighting and using drone supporting law enforcement activities like police, fire service and border control but he used drones even to fight against the new coronavirus. Restás has many publications on the topic of drone applications.

CUPRINS:
SUMMARY:

Aspecte inedite ale naturii legăturii chimice în enzimele dependente de corrinoide în decursul proceselor biochimice din corpul uman **pp. 11-15**
Tudor SPĂTARU, Columbia University in the City of New York, 3000 Broadway, New York, USA

Tetrapodal ZnO: Nanoscale architecture, macroscopic impact **pp. 16-21**
Ala COJOCARU, Daniel HUGENBUSCH, Andreas ROTH
Phi-Stone AG, Kiel, Germany

Drone application for predicting forest fire propagation **pp. 22-27**
Agoston RESTAS, Ludovika University of Public Service, Faculty of Law Enforcement, Institute of Disaster Management, Department of Fire Protection and Rescue Operation Management, Budapest, Hungary

Inovație și formare: ecosistemul ACETI–IDOMUS–USM pentru competențe IIOT **pp. 28-30**
Eduard MUȘUC[1], Victor DOMENTI[2,] Ion BODRUG[3,] Mircea PETIC[4]
[1,2]Compania IDomus, Chișinău, Republic of Moldova
[3,4]ACETI & DIH of Moldova, Balti, Republic of Moldova

Digital solutions in crop protection through the use of drones for soybean and pea treatments **pp. 31-34**
Dorin CEBANU, Costel GUȚU, Maxim PROZOROVSCHI
IP „Centrul Național de Cercetare și Producere a Semințelor”, s. Pașcani, r-nul Criuleni, Republica Moldova

Introducerea tehnologiilor uav în învățământul STEAM: experiențe și modele de bune practici **pp. 35-45**
Arina BRIGALDA, Military College of the Armed Forces "Alexandru cel Bun", Republic of Moldova

Sistem mecatronic de distribuție a semințelor controlat digital, cu dispozitiv de dozare și de conversie a fluxului imprimat 3D **pp. 46-54**
Andrei GHEORGHIȚA, Victor LESCO
Institutul Național de Cercetări Aplicative în Agricultură și Medicină Veterinară, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

Calculul traiectoriei de zbor a seminței prin tubul de conducere modernizat **pp. 55-62**
Andrei GHEORGHIȚA[1], Marin GUŢU[2], Alexandru BANARI[3]
[1]Universitatea Tehnică a Moldovei, Institutul Național de Cercetări Aplicative în Agricultură și Medicină Veterinară, Chișinău, Republica Moldova
[2,3]Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

Integrarea inteligenței artificiale în medii de realitate virtuală pentru simulări educaționale **pp. 63-70**
Olga DARII, Maria BELDIGA, Universitatea de Stat din Moldova

Inactivarea patogenilor prin absorbție de radiație UV-C pulsată în decontaminare avansată **pp. 71-76**
Ion MUNTEANU[1,2]
[1]Laboratorul de optică cuantică și procese cinetice, Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova
[2]Catedra de fiziologie și biofizică medicală, Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie "Nicolae Testemițeanu"

Algèbre aérienne” – modèle conceptuel pour l'intégration des données de drone dans l'analyse mathématique de l'environnement **pp. 77-87**
Dorin AFANAS, Académie Militaire des Forces Armées "Alexandru cel Bun", République de Moldavie

Monitorizarea și optimizarea procesului de evaluare prin instrumente digitale avansate **pp. 88-96**
Alisa CURLICOVSCHI, Universitatea de Stat din Moldova

Raportarea privind sustenabilitatea și performanța de mediu: practici și provocări ESG emergente **pp. 97-104**
Marian JALENCU, Moldova State University

Modelarea concentrațiilor de particule în suspensie pe platforma de monitorizare a calității aerului eALERT-TRACOM utilizând metoda 4DEnVar **pp.105-111**
Veaceslav SPRINCEAN, Adrian PALADI, Alexei LEU, Florentin PALADI
Universitatea de Stat din Moldova

Aplicarea metodei 4DEnVar în predicția poluării aerului **pp.112-118**
Adrian PALADI, Moldova State University

Modelarea suprafeței de rotație cu arie minimă cu aplicație în sisteme de mediu **pp. 119-123**
Adrian PALADI, Alexandr A. BARSUK, Florentin PALADI, Moldova State University

influența grosimii straturilor subțiri de CuO obținute prin metoda spray-piroliză asupra proprietăților electro-fizice **pp.124-129**
Lidia GHIMPU[1], Elena MONAICO[2], Victor SUMAN[3], Vadim MORARI[4], Emil V.RUSU[5]
[1,3,4,5]IIEN „D. Ghițu”, Universitatea Tehnică a Moldovei
[2]Centrul de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldovei

Caracterizarea proprietăților fizice și morfologice ale filmelor de Cu_2O obținute prin pulverizare magnetron **pp. 130-134**
Victor SUMAN, Vadim MORARI, Lidia GHIMPU, Emil V. RUSU
IIEN „D. Ghițu”, Universitatea Tehnică a Moldovei

Proprietăți fotofizice și fotochimice a ftalocianinei de Zn conjugate cu nanoparticule de metal nobil (AuNPs ȘI AgNPs) **pp. 135-140**
Victor SUMAN[1], Vadim MORARI[2], Ion LUNGU[3], Tamara POTLOG[4], Lidia GHIMPU[5], Anton AIRINEI[6]
[1,2,5]IIEN „D. Ghițu”, Universitatea Tehnică a Moldovei
[3,4]Laboratorul de Materiale Organice/Inorganice pentru Optoelectronică, Universitatea de Stat din Moldova
[6]Institutul de Chimie Macromoleculară „Petru Poni”, Iași, România, Laboratorul de Chimie Fizică a Polimerilor

Spray pyrolysis growth of ZnSnO thin films: structural and morphological analysis **pp. 141-147**
Vadim MORARI, Emil V. RUSU, IIEN „D. Ghițu”, Technical University of Moldova

Heterostructurile ITO/$Zn_{1-x}Mg_xO$:Al/Si cu diferite configurații pentru aplicații în celule solare **pp. 148-153**
Vadim MORARI[1], Victor SUMAN[2], Emil V. RUSU[3], Veaceslav URSAKI[4]
[1,2,3]Technical University of Moldova, IIEN „D. Ghițu,
[4]Academy of Sciences of Moldova

Adoptarea dronelor la realizarea produselor mediatice. aspecte etice, juridice și tehnologice **pp. 154-158**
Vitalie GUȚU, Universitatea de Stat din Moldova

Modernizarea predării cursului „arhitectura și avionica dronelor”: propuneri pentru creșterea relevanței și interactivității în predare **pp. 159-164**
Alisa MOŞNEAGA, Sergiu PASCARI, Anton DANICI, Mariana SAVVA, Universitatea de Stat din Moldova

Generarea și evaluarea modelului digital al terenului și coronamentului arborilor în grădina botanică națională prin tehnologia LiDAR montată pe UAV **pp. 165-173**
Sergiu PASCARI[1], Natalia ONICA[2], Ion ROSCA[3], Veaceslav SPRINCEAN[4]

[1,4]Universitatea de Stat din Moldova,
[2,3]Gradina Botanica Națională (Institut) Alexandru Ciubotaru, Universitatea de Stat din Moldova

Platformă hardware–software pentru controlul instrumentelor din seria Keithley 2400 **pp. 174-178**
Cătălin CRECIUNEL, Cătălin CECHIN, Daniel ȚÎRCHE, Vladimir CIOBANU
Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldova

Impactul procesului de armonizare europeană asupra sustenabilității infrastructurii de colectare, transport și valorificare a deșeurilor solide în Republica Moldova **pp. 179-191**
Vitalie TOMA, Boris COREȚCHI, Moldova State University

Inovație pentru un viitor verde: tehnologia UAV mijloc de învățare și protecție a mediului **pp. 192-197**
Serghei PASCARI, Universitatea de Stat din Moldova

Modelare și educație pentru un mediu sustenabil prin tehnologia UAV **pp. 198-201**
Anton DANICI, Universitatea de Stat din Moldova

Compararea senzorilor multispectrali (micasense, parrot sequoia, sentera) și elaborarea unei baze calibrate de imagini **pp. 202-209**
Valentina TÎRȘU, Alisa MAȘNIC, Nelea MANIN
Universitatea Tehnică a Moldovei

Proprietățile optice și structurale ale nanostructurilor din SNS ȘI SNS_2 obținute prin metoda CVT **pp. 210-214**
Andrei TIRON[1], Vladimir CIOBANU[1], Alin MAMOICO[1], Cătălin CRECIUNEL[1], Emil RUSU[2]
[1]Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldovei
[2]Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu”, Universitatea Tehnică a Moldovei

De la educație la cercetare: competențele științifice dezvoltate prin utilizarea dronelor **pp. 215-221**
Alisa MOŞNEAGA, Mariana SAVVA, Universitatea de Stat din Moldova

Modernizarea metodelor teoretico-practice, utilizate în studierea problemelor estetice ale peisajelor cu ajutorul tehnologiilor avansate **pp. 222-234**
Alexandru COCIN, Ana BÎRSAN, Universitatea de Stat din Moldova

CZU: 544.222.3:577.15 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.01**

ASPECTE INEDITE ALE NATURII LEGĂTURII CHIMICE ÎN ENZIMELE DEPENDENTE DE CORRINOIDE ÎN DECURSUL PROCESELOR BIOCHIMICE DIN CORPUL UMAN

NOVEL ASPECTS OF THE CHEMICAL BONDING NATURE IN CORRINOID-DEPENDENT ENZYMES DURING BIOCHEMICAL PROCESSES IN THE HUMAN BODY

Tudor SPĂTARU* **e-mail: ts2407@columbia.edu** **ORCID ID: 0000-0003-2607-692X**

***Columbia University in the City of New York, 3000 Broadway, New York, USA**

Abstract. *The scientific novelty and originality of this paper lie in the discovery of crucial aspects of the chemical bond concept in the studied biochemical compounds. These include the vibronic nature of vitamin B12-dependent bioprocesses, their control by the Pseudo-Jahn-Teller effect, the absence of energy barriers during their development, and the long-distance interactions between reagents. The paper also highlights unusual features of the electronic structure of these compounds, such as the formation of intermolecular orbitals between two molecules at 4-5 Å and orbital mixing at large distances between interacting molecules. Additionally, it discusses the transfer of electronic densities or electrons between two molecules at these intermolecular distances, which leads to catalysis of enzymatic processes, spin-dependent biochemical reactions, and other phenomena. This discovery opens new horizons in understanding chemical bonding in the bio-compounds and related fields.*

Keywords: *chemical bond nature, electronic structure, enzymes, MCSCF, pseudo Jahn-Teller-Effect.*

Compușii corrinoizi nu numai că catalizează sau participă direct la cele mai esențiale procese biochimice din corpul uman, dar reprezintă și unele dintre cele mai complexe structuri moleculare din natură. Prin urmare, înțelegerea legăturilor chimice în reacțiile biochimice care îi implică necesită cunoașterea structurii lor electronice unice. Natura legăturii chimice este factorul determinant pentru comportamentul compușilor chimici, structura lor spațială, electronică și micromagnetică, precum și pentru orice alte aspecte chimice relevante. De-a lungul deceniilor, studiul biochimiei vitaminei B12 a fost extrem de complex. În timp ce procesul de sinteză a metioninei, dependent de cofactorul metilcobalamină, poate continua aparent la nesfârșit, iar unele dintre procesele dependente de adenozilcobalamină funcționează cu constante de echilibru apropiate de unitate (cu bariere energetice aproape de zero), metodele DFT și QM/MM, bazate pe teoria funcțională a densității, cele mai utilizate și apreciate pentru calculul structurii electronice a moleculelor, au evidențiat distanțele Co-N mult mai scurte decât cele determinate experimental pentru cofactorii vitaminei B12 ai cobaltului(II), și bariere energetice mari, inadecvate pentru bioprocesele lor enzimologice [1]. Confuzia a crescut odată cu descoperirea unor date experimentale in vitro care arătau bariere mari în calea reacțiilor cofactorilor vitaminei B12. Astfel, cercetătorii de renume ai studiului proceselor biochimice ale vitaminei B12 au început să pună la îndoială oficial corectitudinea determinărilor experimentale ale distanțelor legăturilor chimice Co-N în cofactorii cobaltului(II) ai vitaminei B12.

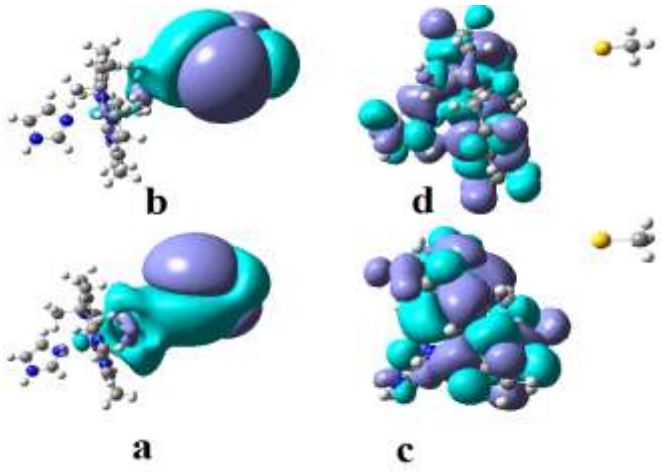


Figura 1. Suprafețele orbitale moleculare de frontieră MCSCF ale modelului imidazol-metilcob(II)alamină împreună cu ionul model al homocisteinei [1-3]: (a) HOMO2; (b) HOMO3; (c) LUMO1; (d) LUMO2.

Aceste discrepanțe sugerează că natura legăturii chimice în cofactorii vitaminei B12 este vibronică, iar metoda necesară pentru determinarea mecanismelor proceselor dependente de vitamina B12 este utilizarea metodei MCSCF, cunoscută și sub denumirea de efectul Pseudo-Jahn-Teller cu mai multe stări [1, 2]. Modelul, care implică cofactorul metilcobalamină și ionul negativ al homocisteinei (CH3S-), a fost utilizat în procedura de optimizare a geometriei CASSCF, folosind o zonă activă formată din 13 funcții de undă și 13 electroni [3]. Conform Figurii 1, primii doi orbitali moleculari, HOMO2 și HOMO3, sunt compuși exclusiv din orbitalii atomici ai modelului ionic al homocisteinei, în timp ce cei doi orbitali moleculari "neocupați" sunt formați exclusiv din orbitalii atomici ai atomilor din metilcobalamină. La începutul procedurii de optimizare a geometriei CASSCF, HOMO2 și HOMO3 sunt ocupați cu 1,17 electroni, respectiv 1,53 electroni, în timp ce LUMO1 și LUMO2 sunt ocupați cu 0,83 și, respectiv, cu 0,47 electroni. Este evident că, în etapa inițială a optimizării geometriei CASSCF, cel puțin un electron este transferat de la substratul ionului negativ al homocisteinei la cofactorul metilcob(II)alamină. Transferul unui electron de la substrat la cofactorul metilcob(II)alamină modifică starea de oxidare a atomului central de cobalt de la +2 la +1 la începutul procesului de optimizare a geometriei CASSCF.

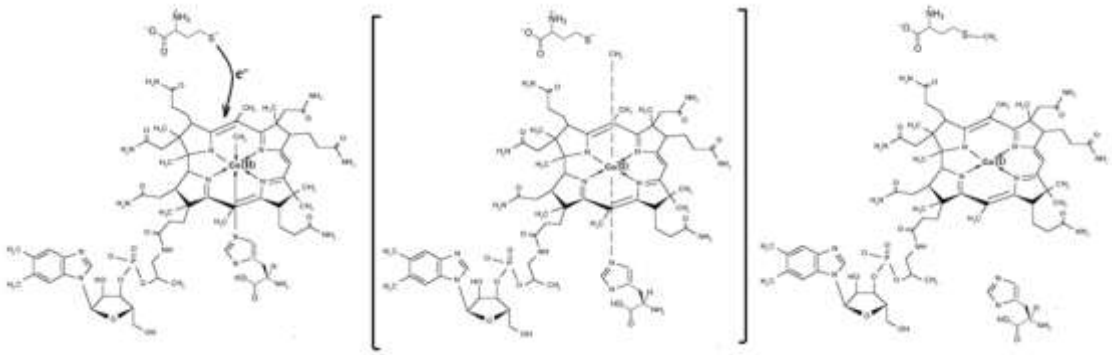


Figura 2.Etapele mecanismului interacțiunii dintre histidină-metilcob(II)alamină și ionul disociat de homocisteină [1-3].

Pe parcursul optimizării geometriei CASSCF, distanța legăturii Co-C crește continuu până când devine complet scindată. Radicalul metil este transferat și se leagă complet de homocisteină (Figura 2), transformându-se în metionină [1,3]. Mecanismul de clivaj al legăturii Co-N și îndepărtarea ligandului dimetilbenzimidazol de la inelul corin și de la atomul de cobalt este foarte similar. Mecanisme similare au fost determinate prin aceeași metodă de calcul în cazurile de rupere a legăturii Co-N în cofactorii metilcobalamină și adenosilcobalamină [4]; în cazul transferului radicalilor metil de la substratul Adomet la particula de cob(II)alamină [5]; și în cazul ruperii legăturii chimice Co-C în cofactorul adenosilcobalamină sub influența substraturilor biologice [6].

Un aspect nou, unic, al naturii legăturilor chimice este formarea unui nou tip de structură electronică a reactivilor reacțiilor biocatalitice - orbitali moleculari intermoleculari la distanțe între reactivi mai mari decât distanțele general acceptate pentru formarea legăturilor chimice. Calculele noastre arată că, în cazul interacțiunii particulelor AdoMet cu cele ale cob(II)alaminului inactiv, orbitali HOMO și LUMO intermoleculari sunt deja formați la o distanță Co-C (-CH3) de 4,00 Å. Aceștia includ atomii ambilor reactanți având populații de densitate de electroni egale cu 1,88 e- și, respectiv, 0,12 e- [5]. Prima are natură liantă, iar a doua are natură antilitantă. Astfel, transferul densității electronice de la HOMO la LUMO duce la slăbirea legăturii S-C (-CH3) în substratul AdoMet și la întărirea noii legături Co-C (-CH3) în cazul formării unui nou compus de metilcob(II)alamină. Acești orbitali includ și atomii de legătură S-C, care trebuie să se rupă pentru a transfera radicalul metil de la ionul AdoMet la particula inactivă de cob(II)alamină, precum și atomii de legătură Co-C, care trebuie să se formeze pentru a revitaliza particula inactivă a cofactorului cob(II)alamină. Optimizările geometriei CASSCF ale modelului studiat la diferite distanțe Co-C indică faptul că interacțiunea coulombică determină mișcarea reactanților unul către celălalt în modelul calculat, până când distanța Co-C devine egală cu 2,50 Å. Apoi, interacțiunea HOMO-LUMO devine factorul determinant pentru comportamentul modelului calculat. Optimizarea geometriei CASSCF a modelului studiat la distanțele Co-C sub 2,50 Å arată că legătura S-C (-CH3) crește până când se rupe, iar noua legătură Co-C se formează în metilcob(II)alamina nou formată, activă în procesul de sinteză a metioninei. În același timp, partea rămasă a substratului AdoMet se îndepărtează de radicalul -CH3 până când atinge o distanță S-C mai mare de 4,00 Å. Astfel, are loc transferul radicalului -CH3 de la substratul AdoMet la particula inactivă de cob(II)alamină, formând o nouă particulă de metilcob(II)alamină, care este activă în procesul biologic de sinteză a metioninei. Acest lucru demonstrează că reacțiile de rupere a legăturii S-C (-CH3) în substratul AdoMet și formarea legăturii chimice Co-C în noua particulă formată de metilcob(II)alamină sunt reacții concertate, iar procesul de transfer al radicalului -CH3 de la substratul AdoMet la particula inactivă de cob(II)alamină este o reacție de tip SN2. Astfel, atât interacțiunea coulombică dintre ionul negativ al cob(II)alaminului inactiv în procesul de sinteză a metioninei și ionul pozitiv al substratului AdoMet, cât și interacțiunea HOMO-LUMO a modelului comun, conduc la transferul radicalului -CH3 de la al doilea reactant la primul. În procesul de transfer al radicalului metil din cationul substratului AdoMet la particula inactivă de cob(II)alamină, densitatea electronică transferată de la HOMO la LUMO crește, atingând nivelul de 0,30 e-.

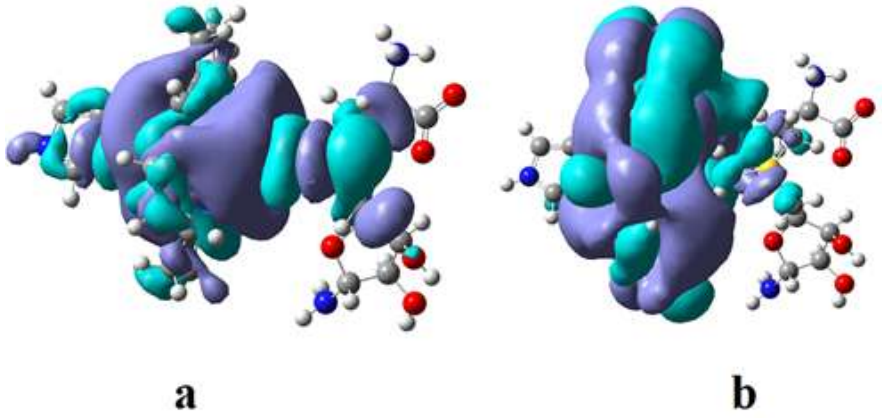


Figura 3.. Suprafețele HOMO (a) și LUMO (b) în timpul procesului de optimizare a geometriei CASSCF a modelului particulelor inactive cob(II)alamină și ionilor pozitivi de AdoMet [5].

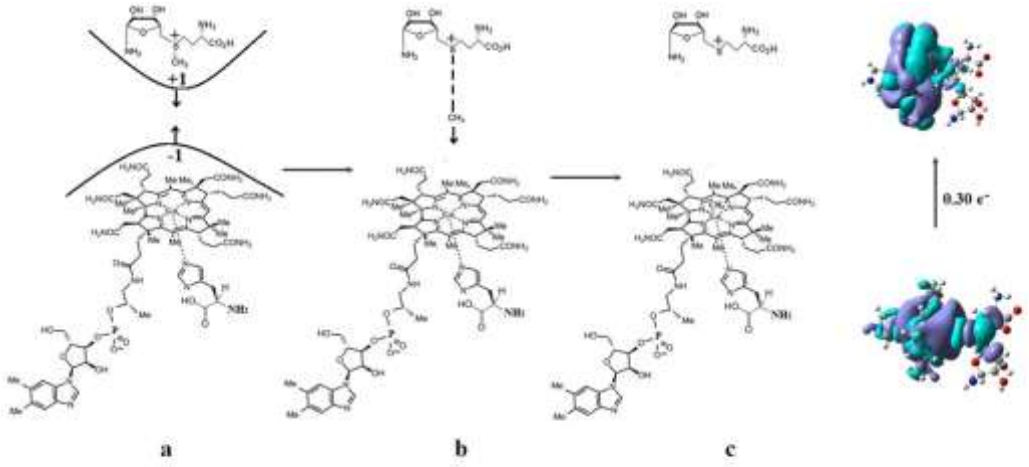


Figura 4. Mecanismul transferului grupării –CH_3 de la particula pozitivă AdoMet la cofactorul inactiv de cob(II)alamină [5]: (a) mișcarea componentelor modelului in timpul reactiei; (b) transferul radicalului metil; (c) produsele finale.

Formarea de orbitali intermoleculari între reactivi la distanțe mari a fost observată și în reacții care implică trecerea unui proton de la un reactant la altul prin metoda tunelării [6] sau în detoxifierea organismului uman de compuși organici halogenați toxici folosind vitamina B12 [7].

De asemenea, o inedită fațetă a naturii legăturii chimice este legătura dintre reactivitatea biochimică a enzimelor și starea lor de spin [8]. Având în vedere cele de mai sus, se pot spune următoarele: Ca urmare a amestecării orbitalilor ocupați și neocupați, apar noi tipuri de orbitali - intermoleculari. Interacțiunea acestor orbitali intermoleculari duce la transferul de electroni sau la densitatea de electroni de la un reactant la altul. Transferul de electroni sau densitatea de electroni duce la ruperea unor legături chimice și la formarea altora. În aceste cazuri, reacțiile chimice care implică interacțiuni ale reactanților au loc la distanțe mari - 4,5 Å sau mai mult - ceea ce, în chimia generală, nu este considerat o interacțiune chimică. Unele reacții implică o modificare a spinului în timpul proceselor, ceea ce face ca spinul să fie interzis.

Referințe:

1. SPATARU, T. The Miracle of Vitamin B12 Biochemistry. In: Reactions. 2024, vol. 5, nr. 1, pp. 20-76.
2. SPATARU, T., BIRKE, R.L. Carbon-cobalt bond distance and bond cleavage in one-electron reduced methylcobalamin: A failure of the conventional DFT method. In: The Journal of Physical Chemistry A. 2006, vol. 110, pp. 8599–8604.
3. SPATARU, T. The complete electronic structure and mechanism of the methionine synthase process as determined by the MCSCF method. In: Journal of Organometallic Chemistry. 2021, vol. 942, pp. 181211–181221.
4. SPATARU, T. The Co-N bond cleavage in the adenosylcobalamin cofactor in advance to Glutamete Mutase and Methylmalonyl-Co-A Mutase processes. In: Chemistry Journal of Moldova. 2023, vol. 18, pp. 96–104.
5. SPATARU, T. The First Step and the Cob(II)alamin Cofactor Inactive Particles Reactivation in the Updated Mechanism of the Methionine Synthase Process. In: Reactions. 2023, vol. 4, pp. 274–285.
6. SPATARU, T. The electronic structure and mechanism of the adenosylcobalamin-dependent bio-processes as determined by the MCSCF method. In: Journal of Medicinal Chemistry. 2021, vol. 11, pp. 595–606.
7. SPATARU, T., DUMITRESCU, T., MORARU, M., FERNANDEZ, F., SPATARU, P. The Mechanism of the Toxic Organic Halides Disposal under the Catalytic Influence of the Vitamin B12. In: Journal of Toxicology and Risk Assessment. 2023, vol. 9, pp. 1–9.
8. SPATARU, T., DASCALU, L-M., MORARU, A., MORARU, M. The Second Protonation in the Bio-Catalytic Cycles of the Enzymes Cytochrome P450 and Superoxide Reductase. In: *Reactions.* 2024, vol. *5,* pp. 778-788.

Acknowledgment

This research was supported in part by the National Science Foundation through TACC TeraGrid resources provided by the TeraGrid Science Gateways program under supercomputer grants CHE24013. The author gratefully acknowledges support from the National Agency for Research and Development of the Republic of Moldova through grant number 25.80013.5007.07RE.

CZU: 621.315.592 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.02**

TETRAPODAL ZnO: NANOSCALE ARCHITECTURE, MACROSCOPIC IMPACT
ZnO TETRAPODAL: ARHITECTURĂ NANOMETRICĂ ȘI IMPACT MACROSCOPIC

Ala COJOCARU[1] email: ac@phi-stone.de
Daniel HUGENBUSCH[2]
Andreas ROTH[3]

[1,2,3]**Phi-Stone AG, Kiel, Germany**

Rezumat
Oxidul de zinc tetrapodal (t-ZnO) reprezintă unul dintre cele mai avansate și multifuncționale materiale nanostructurate dezvoltate în ultimii ani. Combinând avantajele intrinseci ale oxidului de zinc — bandă interzisă largă, stabilitate chimică, piezoelectricitate, biocompatibilitate și activitate antivirală/antimicrobiană — cu o arhitectură tridimensională distinctă, t-ZnO creează o punte între ingineria la scară nanometrică și aplicațiile industriale sau medicale reale.
Metoda de Transport în Flacără (FTM) permite sinteza scalabilă a ZnO în multiple morfologii, dintre care forma tetrapodală se evidențiază prin capacitatea de interblocare mecanică, suprafața specifică mare și interacțiunea excelentă cu sistemele biologice. Acest articol oferă o prezentare integrată a caracteristicilor nanoscale ale t-ZnO, a procesului de sinteză și a transformării sale din cercetare fundamentală în producție certificată GMP la Phi-Stone AG. Sunt analizate aplicații în compozite polimerice, micro-dispozitive medicale, implanturi pentru glaucom, tratamente antivirale și formulări cosmetice sau pentru protecția suprafețelor. Se acordă o atenție specială mecanismelor antivirale dependente de morfologie împotriva virusului Herpes Simplex (HSV), precum și producerii Microbivac®, un material t-ZnO certificat GMP utilizat în produse comerciale. În ansamblu, t-ZnO ilustrează modul în care morfologiile nanometrice controlate pot genera impact semnificativ în medicină, biotehnologie și ingineria materialelor avansate.
Cuvinte-cheie: *oxid de zinc tetrapodal, nanomateriale, activitate antivirală, producție GMP, aplicații biomedicale*

1. Introduction

Nanostructured materials are central to modern technological development because they allow mechanical, biological, and optical properties to be tailored at the molecular and structural level. Among these materials, zinc oxide (ZnO) occupies a special place due to its multifunctionality, biocompatibility, and broad application potential. ZnO is a wide-bandgap semiconductor (3.37 eV) with a hexagonal wurtzite crystal structure, providing antiviral, antimicrobial, optical, and piezoelectric functionalities that make it one of the most versatile materials in contemporary materials science (Özgür et al., 2005; Janotti & Van de Walle, 2009; Borysiewicz, 2019). Advances in synthesis techniques have enabled ZnO to be engineered into a wide range of morphologies, from nanoparticles and nanowires to complex three-dimensional architectures. One morphology that has attracted scientific and industrial attention is tetrapodal ZnO (t-ZnO). It consists of four elongated single-crystalline arms emerging from a central core, forming a three-dimensional, self-supporting “micro-star” (Fig. 1). This architectural design gives t-ZnO high mechanical stability, a large specific surface area, and strong interactions with polymer matrices, biological tissues, and viral particles.

Phi-Stone AG has played a central role in the technological transfer of t-ZnO, scaling its production from laboratory-scale synthesis to industrial, GMP-certified manufacturing. This transition enables the integration of t-ZnO into medical, pharmaceutical, cosmetic, and advanced material applications, thus turning a scientific concept into concrete products and therapies.

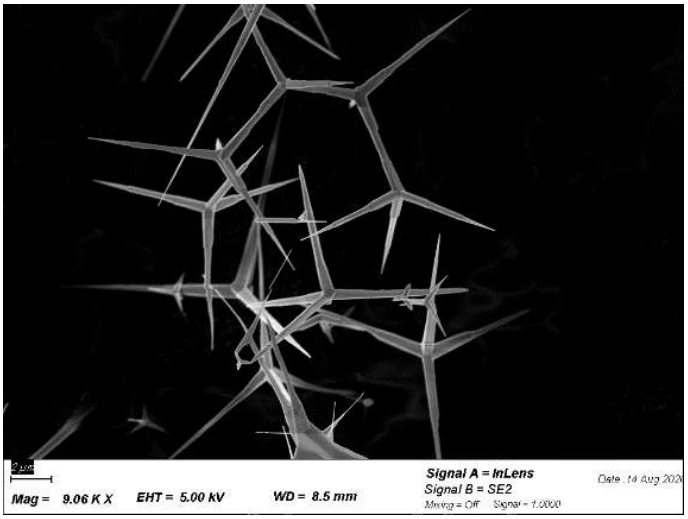


Fig. 1. SEM picture of Tetrapodal ZnO

2. Zinc Oxide as a Functional Material

2.1 Semiconductor properties

Zinc oxide is an II–VI semiconductor with a wide bandgap. Its hexagonal wurtzite crystal structure ensures high robustness and structural integrity (Janotti & Van de Walle, 2009). These properties form the basis for optoelectronic and piezoelectric applications, such as sensors, field-effect transistors, and nanogenerators (Wang et al., 2006).

2.2 Environmental and techno-economic advantages

From a practical perspective, ZnO is environmentally safe, relatively low-cost, and suitable for large-scale production, which is crucial for translational applications beyond the laboratory (Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014).

2.3 Biological and antiviral activity

ZnO also exhibits significant biological activity, including antiviral and antimicrobial effects. These arise from direct interactions at the particle surface and from the release of zinc ions (Zn^{2+}), which influence cellular pathways, modulate inflammation, and inhibit bacterial proliferation (Rasmussen et al., 2010; Sirelkhatim et al., 2015). Due to its inherent biocompatibility and capacity to interact with skin and tissue, ZnO is widely explored for wound healing, tissue regeneration, antiviral formulations, and drug delivery systems (Pasquet et al., 2014).

At the nanoscale, ZnO benefits from increased surface area, enhanced reactivity, and more efficient interactions with biological membranes and microorganisms (Mishra & Adelung, 2018; Wang, 2004). These features make nanoscale ZnO a strong candidate for next-generation biomedical technologies and multifunctional materials.

3. ZnO Morphologies and the Flame Transport Method

One of the main challenges in nanomaterials engineering is controlling morphology while maintaining scalability and reproducibility. The Flame Transport Method (FTM) offers a scalable, energy-efficient route to obtain diverse ZnO morphologies (Mishra et al., 2013; Kaps et al., 2014).

In FTM, metallic zinc is oxidized in a high-temperature, oxygen-rich flame, leading to the formation of structures such as:

- nanoparticles,
- nanowires,
- plates and multipods,
- tetrapods,
- complex hierarchical 3D architectures (Fig. 2).

Originally developed in the Functional Nanomaterials Group at Kiel University and later transferred to Phi-Stone AG, the FTM has been successfully upscaled from laboratory to industrial levels. By adjusting parameters such as temperature, oxygen concentration, partial pressure and growth duration, FTM enables the controlled formation of t-ZnO and high purity—conditions essential for medical and GMP-grade applications.

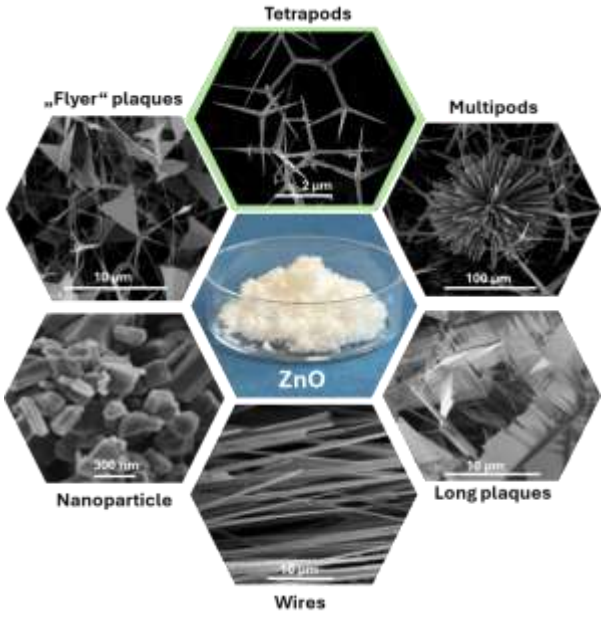


Fig.2 Different ZnO Morphologies

4. Architecture and Core Characteristics of Tetrapodal ZnO

Tetrapodal zinc oxide (t-ZnO) is built around a central nucleation point from which four monocrystalline arms extend in a tetrahedral arrangement (Fig. 1) (Willander et al., 2006/2007; Mishra & Adelung, 2018). This deterministic, anisotropic architecture produces structural, mechanical, and functional attributes that clearly differ from those of conventional ZnO morphologies such as spherical nanoparticles, rods, or platelets. When many tetrapods interpenetrate, they form self-supporting three-dimensional networks. Each arm acts as a robust wurtzite ZnO crystal capable of efficiently redistributing mechanical stresses across the interconnected architecture. As a result, these networks show:

- exceptional mechanical resilience,
- high porosity combined with structural stability,
- large accessible surface area for chemical or biological functionalization.

This open architecture makes t-ZnO suitable for applications ranging from mechanical reinforcement in composites to drug delivery, surface coatings, catalysis, and biomedical devices.

5. Morphology-Driven Functionality

A defining feature of t-ZnO is that its geometry—not only its composition—drives performance across multiple scales. The tetrapodal shape dramatically improves dispersion in polymer melts, liquid formulations, and elastomeric matrices by reducing the tendency to agglomerate. The rigid arms act as natural mechanical anchors within polymer networks, penetrating and interlocking with the host phase. This leads to:

- enhanced interfacial adhesion,
- improved load transfer,
- significant increases in tensile strength and fracture resistance.

Silicone–polythiourethane and thiourethane-based composites modified with t-ZnO show improved mechanical robustness, abrasion resistance, long-term flexibility, and stability under cyclic loading (Qiu et al., 2018; Feng et al., 2023). In comparison, spherical ZnO or short fibers are less effective at forming continuous, percolating networks.

In flexible ceramics and porous 3D semiconductor networks, interpenetrating t-ZnO structures enable lightweight, mechanically resilient morphologies (Mishra et al., 2013; Gröttrup et al., 2016). These networks efficiently distribute stresses and help prevent crack initiation and propagation.

5.2 Advanced interfacial adhesion and joining "un-joinable" materials

Because tetrapodal arms can penetrate multiple phases, t-ZnO can act as a three-dimensional "stitching" element between otherwise incompatible materials. When embedded at interfaces between low-surface-energy polymers, the tetrapods form mechanical bridges that enable strong adhesion without aggressive surface treatments (Jin et al., 2012; Jin et al., 2014).

This concept extends to polymer–metal and polymer–shape memory alloy (SMA) interfaces, where t-ZnO improves bonding, load transfer, and long-term stability (Gapeeva et al., 2023). Such interfacial engineering is particularly important for flexible electronics, smart implants, and mechanically demanding medical devices.

5.3 Biological and antiviral functionality enhanced by geometry

The tetrapodal morphology also has profound consequences for biological performance. t-ZnO shows higher antiviral and antimicrobial efficacy than spherical or rod-shaped ZnO due to:

- its accessible surface area,
- enhanced surface reactivity,
- favorable geometric interactions with cells and viral particles.

Antoine et al. (2012, 2016) demonstrated strong prophylactic, therapeutic, and neutralizing effects of t-ZnO against Herpes Simplex Virus type 2 (HSV-2). The proposed mechanism is morphology-driven: the tetrapods can trap viral particles on their surface and contribute to their inactivation before they infect host cells. In minimally invasive glaucoma stents, t-ZnO improves tissue integration, structural reliability, and resistance to microbial contamination (Gapeeva et al., 2023). In marine antifouling systems, tetrapods act both as physical anti-adhesion structures and as synergistic enhancers of the antimicrobial properties of polythiourethane and hybrid elastomeric matrices (Qiu et al., 2018; Feng et al., 2023).

Collectively, these examples show that geometry is a key driver of function:

- each arm acts simultaneously as a load-bearing element, an anchoring point, and a reactive surface.
- the interconnected 3D network prevents structural collapse.
- porosity and shape enable selective interactions with cells, microorganisms, and biomolecules.
- compatibility with diverse polymer matrices arises intrinsically from morphology rather than requiring extensive chemical modification.

6. From Laboratory Concept to GMP Production and Commercial Products

The translation of t-ZnO from fundamental research to industrial reality required not only materials innovation but also robust process engineering and quality control. Through the upscaling of the Flame Transport Method and the implementation of Good Manufacturing Practice (GMP) standards, Phi-Stone AG established a production route for highly pure, well-defined tetrapodal ZnO suitable for biomedical use. Within this framework, Microbivac® was developed as a GMP-certified t-ZnO material (www.phi-stone.de). It is used as an active component in commercial products, particularly in formulations targeting antiviral and antimicrobial performance. These activities illustrate how nanomaterial development can progress from university laboratories to regulated production environments and, ultimately, to end-user medical and consumer products.

7. Conclusions

Tetrapodal ZnO is a clear demonstration of how nanoscale architecture can be engineered to deliver macroscopic impact. By shaping ZnO into three-dimensional tetrapods:

- the mechanical behavior of composites and porous networks is dramatically improved through mechanical interlocking and efficient stress distribution;
- interfacial adhesion challenges between otherwise incompatible materials can be overcome by using t-ZnO as a three-dimensional mechanical linker;
- biological and antiviral functionalities are enhanced, enabling viral trapping, antimicrobial action, and improved tissue interaction in medical devices;
- industrial relevance is ensured through scalable synthesis by the Flame Transport Method and GMP-certified production, culminating in products such as Microbivac®.

The tetrapodal ZnO structure creates bridges—between soft and hard materials, between laboratory and industry, and ultimately between nanoscale design and real-world impact in medicine, biotechnology, and advanced materials engineering.

References:

1. ANTOINE, T. E., MISHRA, Y. K., TRIGILIO, J., TIWARI, V., ADELUNG, R., SHUKLA, D. Prophylactic, therapeutic and neutralizing effects of zinc oxide tetrapod structures against herpes simplex virus type-2 infection. Antiviral Research, 96(3), 2012, pp. 363–375.
2. BORYSIEWICZ, M. A. ZnO as a functional material: Properties and applications. Crystals, 9(9), 505, 2019.
3. FENG, K., QIU, H, GAPEEVA, A., FILIZ, V., ADELUNG, R., BAUM, M. Indole-functionalized polythiourethane/tetrapodal shaped ZnO nanocomposites for eco-friendly marine biofouling control. Progress in Organic Coatings, 185, 2023, 107939.
4. GAPEEVA, A., QIU, H., COJOCARU, A., et al. Tetrapodal ZnO-based composite stents for minimally invasive glaucoma surgery. ACS Biomaterials Science & Engineering, 9(3), 2023, pp. 1352–1361.
5. GRÖTTRUP, J., PAULOWICZ, I., SCHUCHARDT, A., et al. Three-dimensional flexible ceramics based on interconnected networks of highly porous pure and metal alloyed ZnO tetrapods. Ceramics International, 42(7), 2016, pp. 8664–8676.
6. JANOTTI, A., VAN DE WALLE, C. G. Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. Reports on Progress in Physics, 72(12), 2009, 126501.
7. JIN, X., STRUEBEN, J., HEEPE, L., KOVALEV, A., MISHRA, Y. K., ADELUNG, R., GORB, S. N., STAUBITZ, A. Joining the un-joinable: Adhesion between low surface energy polymers using tetrapodal ZnO linkers. Advanced Materials, 24(42), 2012, pp. 5676–5680.

8. JIN, X., HEEPE, L., STRUEBEN, J., ADELUNG, R., GORB, S. N., STAUBITZ, A. Challenges and solutions for joining polymer materials. Macromolecular Rapid Communications, 35(18), 2014, pp. 1551–1570.
9. KAPS, S., SCHUCHARDT, A., KETTNER, M., ADELUNG, R., MISHRA, Y. K. Flame transport synthesis of hollow ZnO tetrapods and networks. Beilstein Journal of Nanotechnology, 5, 2014, pp. 288–298.
10. KOŁODZIEJCZAK-RADZIMSKA, A., JESIONOWSKI, T. Zinc oxide—from synthesis to application: A review. Materials, 7(4), 2014, pp. 2833–2881.
11. MISHRA, Y. K., KAPS, S., SCHUCHARDT, A., et al. Fabrication of macroscopically flexible and highly porous 3D semiconductor networks from interpenetrating nanostructures by a simple flame transport approach. Particle and Particle Systems Characterization, 30(9), 2013, pp. 775–783.
12. MISHRA, Y. K., ADELUNG, R. (2018). ZnO tetrapod materials for functional applications. Materials Today, 21(6), 2018, pp. 631–651.
13. QIU, H., HÖLKEN, I., GAPEEVA, A., FILIZ, V., ADELUNG, R., BAUM, M. Mechanically durable silicone–polythiourethane composites modified with tetrapodal ZnO for marine fouling-release applications. Materials, 11(12), 2018, 2413.
14. WANG, Z. L. Zinc oxide nanostructures: Growth, properties and applications. Journal of Physics: Condensed Matter, 16(25), 2004, R829–R858.
15. WANG, X., ZHOU, J., SONG, J., LIU, J., XU, N., WANG, Z. L. Piezoelectric field effect transistor and nanoforce sensor based on a single ZnO nanowire. Nano Letters, 6(12), 2006, pp. 2768–2772.

CZU: 629.73:630*43 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.03**

DRONE APPLICATION FOR PREDICTING FOREST FIRE PROPAGATION

APLICAȚIE CU DRONE PENTRU PREZICEREA PROPAGĂRII INCENDIILOR DE PĂDURE

Agoston RESTAS[1] e-mail: Restas.Agoston@uni-nke.hu

[1]Ludovika University of Public Service, Faculty of Law Enforcement, Institute of Disaster Management, Department of Fire Protection and Rescue Operation Management, Budapest, Hungary

Rezumat*. Incendiile de pădure reprezintă o problemă din ce în ce mai gravă. Din cauza schimbărilor climatice, nu doar dimensiunea suprafețelor arse crește de la un an la altul, ci și costurile de stingere a acestora cresc drastic. Dronele, ca ramură a aviației cu cea mai dinamică dezvoltare, pot juca un rol important în stingerea incendiilor de pădure. Acestea pot furniza echipelor de intervenție o varietate de informații care nu pot fi evaluate de la sol. Articolul analizează în detaliu cele mai importante aspecte, precum detectarea timpurie a incendiilor, recunoașterea și monitorizarea intervențiilor, precum și posibilitățile de utilizare a dronelor după stingerea incendiilor.*

Cuvinte-cheie: *dronă, incendiu de pădure, recunoaștere, detectare puncte fierbinți, eficiență*

Introduction

The possibility of using drone in forest fires is mentioned in the recommendations of almost all manufacturers, but barely we find a proposal or example of its specific implementation [1]. One of the obvious reasons for this may be that the manufacturers have never examined or analyzed the details of this application with firefighting experts. The recommendation clearly focuses on aerial reconnaissance, although drones can now do much more than this. The concept of aerial reconnaissance includes active reconnaissance aimed at detecting the fire before the civil report; reconnaissance before the start of firefighting, which assists effective intervention with information; constant monitoring of the development of the fire during the firefighting process; and finding smoldering parts during the post-firefighting work following the extinguishing of the fire, obtaining information to prevent re-ignition [2]. The article presents the above options based on a structural division, focusing on the fire propagation.

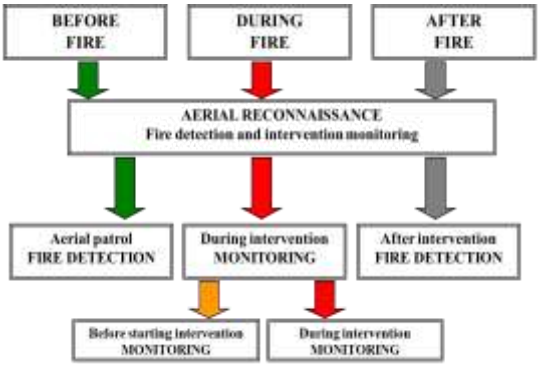


Figure 1. Structural division of drone applications in case of forest fires. Source: author

Aerial patrol for hot spot detection

The logical first option for using drones in forest fires is pre-fire activity, which can be implemented in the form of aerial patrolling [3]. The aim of aerial patrolling is to ensure faster fire detection than spontaneous reporting by individuals. This allows intervention to be started earlier, resulting in faster extinguishing and greater lost value. If aerial patrolling results in faster reporting than citizen reporting, then in absolute terms this method can be considered more efficient. By quickly detecting fires, we can not only start intervention earlier, but we can also learn a lot of other information about the characteristics of the fire. Thus, about the factors influencing their spread, and about the intensity of the fire. The implementation of aerial patrolling with drones is basically the same as the patrolling of classic aircraft with a crew on board. The difference is that instead of the crew on board the aircraft, the detection of fires is carried out by the crew in the monitoring center by monitoring the image transmitted by the camera installed on board the drone. The usefulness of the application should primarily be examined in terms of efficiency. If the increase in the value saved equals or exceeds the costs of aerial patrolling, then this method of detection is also economically efficient. The effectiveness of firefighting without aerial patrolling and with aerial patrolling should be demonstrated in the difference between the damage value and the value saved. If, as a result of the earlier report, the damage decreases to such an extent or the value saved increases to such an extent that at least equals or rather exceeds all the costs of aerial patrolling, then patrolling is also economically advantageous [4].

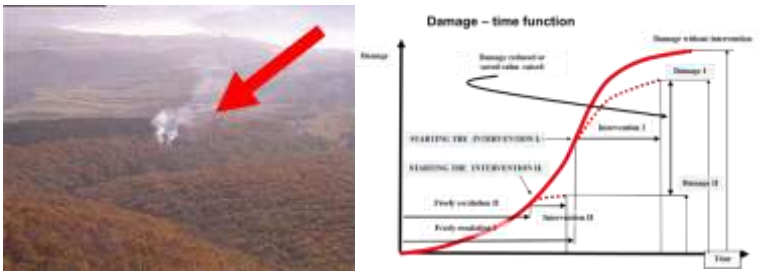


Figure 2. Hot spot detection (left) and the economic aspects of the drone application based on damage-time function (right). Source: author

For the implementation of aerial patrolling, a drone with operating parameters that allow for a few hours of airtime (1-3 hours), medium-altitude flight (1000-6000 m) and long-distance transmission of real-time data (min. 100 km) may be considered. The above definitions are approximate values, they fundamentally depend on the size and characteristics of the area to be monitored (flatland – mountainous area).

Aerial reconnaissance before starting intervention

Before starting firefighting, the most important thing is reconnaissance, which is used to obtain basic information that is essential for the intervention. Any method that can provide assistance in this regard can be considered effective from a professional perspective. Based on the above, the use of drones as a tool enabling aerial reconnaissance can be considered useful from a professional perspective. One of the most important criteria for reconnaissance is quickness [5]. Satisfying the lack of information before deployment as soon as possible helps to make firefighting more effective than the traditional

method – i.e. intervention without the support of drones. This also clearly follows from the analysis of the so-called damage -time function. The condition of rapid application can be considered fulfilled, based on author's own experience, if the drone is able to take off within 5 minutes of arriving at the fire front. Taking into account the time spent on ascent after take off and turning to fire direction, based on the experiments, we can get an evaluable picture of the fire within as quick as 2 minutes. During this time, the firefighter can cover a maximum of 420 meters on foot, which would only be enough to walk around a fire area with a radius of 67 meters. That is, the efficiency of pedestrian reconnaissance could be higher for a fire of this size at most, and in the case of a larger fire (T_{fire}>1.5 ha), the drone can provide information about the entire area faster.

The feasibility of the above requires a drone equipped with a visual and, if necessary, thermal camera, broadcasting the data to the decision-maker in real time. The immediate deployment excludes the possibility of this method of detection being provided as a service by an external body, so the firefighters must provide the application themselves. The latter generates new requirements, which include the training of some firefighters, end-user-friendly design and operation. This can be set as a condition that even one firefighter can operate the drone after it is launched. This can be easily achieved with the drone's autonomous control system (autopilot). Take-off within 5 minutes also dictates the technical requirements. Since the operation and servicing of internal combustion engines (fuel filling, maintenance, etc.) is significantly more complicated, the applicable drive can only be electric. [6]

The basic information necessary to start an effective intervention, the characteristics of the fire spread, must be provided within the shortest possible time. Based on my own experience, it is sufficient for the drone to remain in the air continuously for 15–20 minutes. If a longer flight time is needed, a landing must be made and the flight can be continued with a battery change.

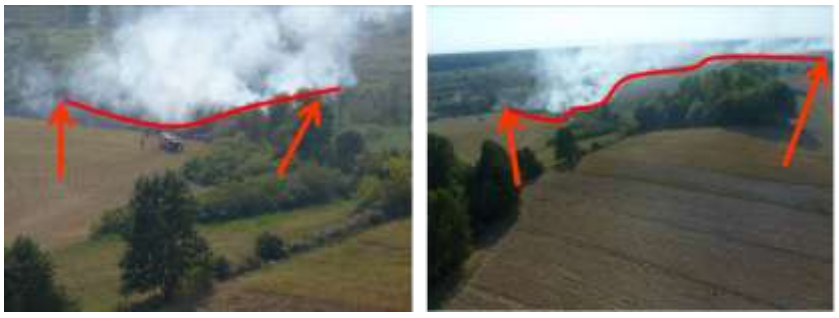


Figure 3. Estimated fire front after arriving to the fire scene without drone supported reconnaissance (left) and with drone supported reconnaissance (right). Source: author

From a firefighting tactical perspective, there are many advantages to using a drone. A number of examples can be presented to assess the objectivity of information related to the propagation of a fire. Topography and terrain conditions, as well as smoke formation and, occasionally, smoke settling in valleys, also limit reconnaissance. The firefighters who are far from each other, so their reports are based on their subjective assessment of their own situation. The information obtained about the propagation of the fire does not give the real picture, the relative proportions of the subjective reports distort it.

By using a drone, the higher altitude and the more favorable angle of view allow us to get a complete picture of the current situation and expected development of the forest fire. [7]

Aerial reconnaissance using a drone can not only be used to assess and judge the static situation, but also provides an accurate determination of the direction and speed of fire spread by conducting route flights at specific intervals. This allows for the appropriate pooling of forces and equipment and the professional, tactically optimal selection of the intervention site. This method of aerial reconnaissance leads to the discussion of its use during the intervention.

Aerial reconnaissance during intervention

Accurate reconnaissance is generally a requirement for professional intervention, but it plays a special role in forest fires. Due to the large extent of the fire, ground response personnel cannot see the entire area, so they are limited in their ability to accurately detect it. One of the fundamental characteristics of forest firefighting is that the burning area continues to grow during the extinguishing process, so the firefighter must take this into account when determining the effective extinguishing technique. In other words, the focus should not only be on the area that is already burning, but also on the parts that are expected to burn out, can be saved, etc. during the extinguishing process. The fire should be treated together with its surroundings [3]. This criterion determines that drone flights should not be carried out over the fire and should not provide close visibility of the fire front line, but should provide a perspective view of the entire area, which can be used to track the change in the fire front line, the change in vegetation, the possibility of access routes, etc.

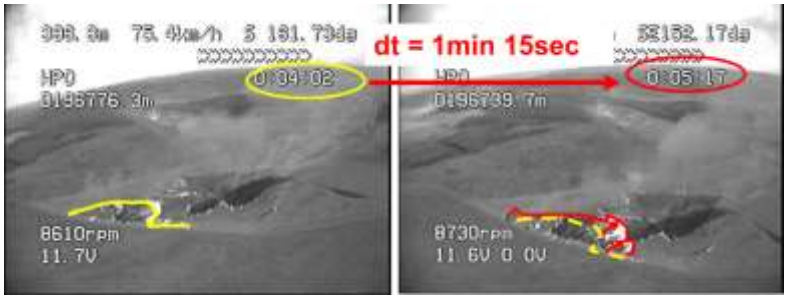


Figure 4. Estimated fire propagation based on drone supported intervention monitoring. Source: author

Based on the practical of aerial reconnaissance [4][5], and my own experience [2], a flight altitude below 500 meters already provides a sufficient view of the area, but even for extensive fires, a range below 1000 meters is sufficient. Drones will be used by first responders, so it is expected that the spread of the fire will still be limited. Therefore, we need to focus on monitoring a small area, which allow the viewing angle to be favorable even below 500 meters. The concentration of forces and equipment is expediently done in order to protect the most endangered objects and to control the most intensively burning areas. However, the intensity of the fire may change significantly over time.

This may be influenced by changes in the type of vegetation, the fire load of the given area, and natural obstacles. Intense spread at a given moment may later slow down and vice versa: the burning of a front line with a low spread may become more intense and its spread faster when it reaches an area with a higher fire load.

The consequence of the above is that effective extinguishing of forest fires requires not only the professional extinguishing of currently burning front lines, but also the selection of extinguishing locations adapted to the front lines expected in the future. Timely extinguishing of fires that are not burning or smoking in a significant area and that are beyond the field of view of ground observers can save the permanent commitment of forces and equipment in the future. New hot spots that form behind the fire line not only increase the number and length of the fire front lines, but if not detected in time, they also pose a threat to the safety of the responding personnel. The images provided by the drone show that the fire front line is sharply separated from its surroundings, so not only its exact location, but also its main characteristics, fire intensity, and main propagation directions can be determined.

Aerial patrol after suppression for remained hot spot detection

After extinguishing the fire, tasks include inspecting the area, searching for any smoldering areas, and extinguishing them completely. This prevents the fire from reigniting spontaneously or due to wind, making the extinguishing work previously carried out for nothing. Simultaneous monitoring of a large area can require significant resources [8]. The effectiveness of personal surveillance is limited, since the size of the simultaneously visible area depends significantly on the observer's position, and the search for glowing woods are only possible by detecting by its accompanying phenomenon that can be observed by humans, the glow and smoke. By using a thermal camera, parts below the visibility threshold can also be easily detected, objectively, based on the temperature of the environment, avoiding errors caused by subjective perception.

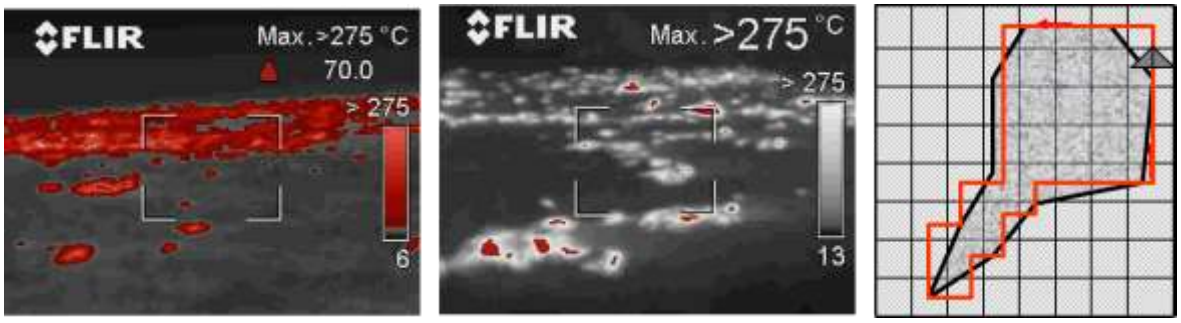


Figure 3. Hot spot detection by thermal camera after suppressing the visible fire (left, middle) and the planned flight path above the suppressed fire front (right). Source: author

If the surveillance of the extinguished area is carried out using a thermal camera and a drone, it is possible to simultaneously provide transparency of the given area and easily detect smoldering spots. From the point of view of the use of a drone, this task does not represent a significant difference from those outlined earlier, so the findings regarding the detection and monitoring of fires can be applied here as well. Its implementation is significantly facilitated by the fact that there is less responsibility compared to intervention, there is no obligation to take action and the task is simpler [6]. Therefore, it is excellently suited for the education and training of drone pilots.

References:

1. BLYENBURGH, P. (Edit. 2009/2010) UAS Yearbook, UAS—The Global Perspective, Paris, France.

2. RESTAS, A. Research and development of aerial firefighting (Hungarian), PhD thesis, Miklos Zinyi National Defence University, 2008.
3. AMBROSIA, V., HINKLEY, E., BRASS, J.A., BUECHEL, S., SULLIVAN, D., MYERS, J., SCHOENUNG, S. The Western States UAV Fire Mission. Eleventh Biennial USDA Forest Service, Remote Sensing Applications Conference RS-2006, Salt Lake City, Utah, USA, 24-28 April 2006.
4. RESTAS, A, HINKLEY, E.A. AMBROSIA, V.G. An Approach for Measuring the Effectiveness of Fire Detection Systems in Different Dimensions. Bolyai Szemle, 23, 2014, pp. 283-296.
5. PASTOR, E. Project SKY-EYE, Applying UAVs to Forest Fire Fighter, Support and Monitoring; Department of Computer Architecture; Technical University of Catalonia, Spain, 2008.
6. RESTAS, A. Robot Reconnaissance Aircraft. Presentation, UAVnet 9th Meeting, Amsterdam, Netherlands, 2004.
7. RESTAS, A. UAV Applications From Aerial Patrol to Prescribed Fires; Wildfire2011 The 5th International Wildland Fire Conference, Sun City, South Africa, 9-13 May 2011.
8. YANDOUZI, M., et al. Review on forest fires detection and prediction using deep learning and drones. J. Theor. Appl. Inf. Technol. 100(12), 2022, pp. 4565–4576.

CZU: [001.895 + 338.28 + 378](478) https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.04

INOVAȚIE ȘI FORMARE: ECOSISTEMUL ACETI–IDOMUS–USM PENTRU COMPETENȚE IIOT

INNOVATION AND TRAINING: THE ACETI–IDOMUS–USM ECOSYSTEM FOR IIOT SKILLS

Eduard MUȘUC[1]
Victor DOMENTI[2]
Ion BODRUG[3]
Mircea PETIC[4] e-mail: petic.mircea@aceti.md ORCID ID:0000-0001-6044-7646

[1,2]Compania IDomus, Chișinău, Republic of Moldova
[3,4]ACETI & DIH of Moldova, Balti, Republic of Moldova

Abstract. *This paper presents a narrative analysis of the collaborative ecosystem developed by ACETI, iDomus, and the Moldova State University (MSU), focused on strengthening education, research, and technological innovation in the fields of IoT and IIoT (Industrial Internet of Things). Centered around the IIoT Pro Center Ungheni—a Passive House powered by renewable energy sources and dedicated to production and research—the ecosystem connects academia, industry, and digital innovation support structures. The paper describes the project concept, the partners' roles, training and research activities, expected outcomes, and sustainability perspectives, drawing inspiration from European Digital Innovation Hub (DIH) models.*
Keywords: *IIoT, IoT, Innovation Ecosystem, Skills Development, Smart Technologies.*

1. INTRODUCERE

Transformările impuse de noile tehnologii disponibile au adus în prim-plan necesitatea dezvoltării unor competențe tehnice avansate și a unor infrastructuri care să faciliteze cercetarea aplicativă și colaborarea între actori diferiți: universități, companii, administrații publice și comunități locale. În Republica Moldova, unde ecosistemele tehnologice se află într-un proces accelerat de consolidare, devine evidentă nevoia unor modele colaborative care să ofere acces la tehnologie, instruire practică și posibilități de prototipare și experimentare. În acest context, parteneriatul dintre ACETI, compania iDomus și Universitatea de Stat din Moldova (USM) propune un ecosistem integrat care îmbină educația universitară, infrastructura industrială avansată și elementele unui Digital Innovation Hub modern. Elementul central al acestui ecosistem este IIoT Pro Center Ungheni, primul centru tehnologic de acest tip din țară, conceput ca platformă de inovare, instruire și producere pentru soluții IoT și IIoT, cu o infrastructură inspirată din bune practici ale hub-urilor europene de inovare.

2. CONCEPTUL PROIECTULUI ȘI DESCRIEREA PARTENERILOR

Modelul propus este construit pe o arhitectură de tip triple helix, în care universitatea, industria și organizațiile de suport pentru inovare contribuie împreună la formarea competențelor și la generarea de soluții tehnologice aplicate. IIoT Pro Center este conceput ca un spațiu în care conceptele de producere, cercetare și instruire se desfășoară într-un mediu comun. Clădirea, realizată după standarde Passive House și alimentată cu energie fotovoltaică, integrează un sistem Smart Building care permite monitorizarea și controlul consumului energetic, creând un laborator real pentru studiul eficienței energetice și al automatizărilor. Linia complet automatizată SMT, echipamentele de prototipare și infrastructura de testare electronice transformă centrul într-o platformă operațională, nu doar experimentală. Universitatea de Stat din Moldova contribuie prin componenta academică, având capacitatea de a integra în curriculum activități realizate în cadrul centrului și de a implica studenții în proiecte practice. Prin facultățile de Fizică și Inginerie, Matematică și Informatică, precum și prin laboratoarele sale specializate, USM aduce expertiză în electronică, modelare, programare embedded și cercetare interdisciplinară.

ACETI, prin DIH of Moldova, joacă rolul de catalizator între educație și industrie, facilitând accesul la resurse, organizând activități de instruire pentru IMM-uri și instituții publice și promovând cultura inovării. ACETI sprijină dezvoltarea competențelor, diseminarea rezultatelor și conectarea ecosistemului cu rețele europene de inovare.

iDomus este partenerul industrial care asigură infrastructura fizică, expertiza tehnologică și implementarea concretă a conceptelor IIoT. Internetul Industrial al Lucrurilor (IIoT) este un set de instrumente și aplicații care permit companiilor mari să creeze un mediu complet conectat end-to end. IIoT colectează o cantitate vastă de date de teren din fabrică, le transmite prin noduri de conexiune, le analizează pe servere și transformă informațiile în date utile și concrete pe o platformă cloud. Acest lucru încurajează companiile să ia decizii mai bune pentru piețele și publicul lor țintă specifice. Cu alte cuvinte, IIoT este un sistem care conectează dispozitive edge, cum ar fi senzori, controlere, comutatoare de conexiune, gateway-uri și computere personale industriale (IPC), la cloud [4]. Prin urmare este o extindere a IoT, care în general reprezintă un sistem de dispozitive interconectate, conectate la internet și care interacționează prin schimbul de informații prin intermediul unei rețele, fără a fi nevoie de contact uman cu un computer sau cu alte persoane. Prin construirea și operarea IIoT Pro Center, compania oferă mediul în care teoriile și prototipurile pot fi testate și transformate în produse reale.

3. ACTIVITĂȚI POSIBILE ÎN CADRUL ECOSISTEMULUI

Ecosistemul permite desfășurarea unui spectru larg de activități educaționale, de cercetare și de inovare, toate integrate într-o narațiune coerentă a formării competențelor pentru era digitală. Studenții și cercetătorii vor avea acces la infrastructura IIoT pentru realizarea proiectelor practice, iar activitățile curriculare pot fi completate cu module aplicate în electronică, IoT, instrumentație, programare embedded sau modelarea sistemelor inteligente.

Centrul poate deveni un mediu de cercetare aplicativă unde sunt dezvoltate și testate soluții pentru orașe inteligente, monitorizarea mediului sau procese industriale. În același spațiu, IMM-urile pot valida idei, pot obține rapid prototipuri funcționale și pot testa tehnologii noi fără a suporta costuri mari inițiale. Ecosistemul oferă de asemenea oportunități pentru programe de incubare și sprijinirea startup-urilor tehnice, facilitând colaborarea între studenți, ingineri și antreprenori.

4. REZULTATE ȘI IMPACT

Impactul ecosistemului este multiplu și converge spre crearea unui mediu tehnologic activ în Republica Moldova. În plan educațional, accesul la infrastructură reală permite dezvoltarea competențelor aplicate, consolidând legătura dintre învățământul universitar și cerințele pieței de muncă. Studenții vor avea posibilitatea să interacționeze direct cu tehnologii utilizate în industrie, ceea ce crește relevanța formării și reduce decalajul dintre teorie și practica industrială.

În plan de cercetare, posibilitatea de a prototipa și testa soluții în condiții reale deschide calea spre proiecte interdisciplinare, colaborări internaționale și dezvoltarea unor produse inovatoare. Ecosistemul poate deveni un spațiu în care soluțiile inteligente sunt testate, demonstrând eficiența și utilitatea lor pentru administrațiile publice și mediul economic.

Pe termen mediu, există potențialul ca regiunea Ungheni să devină un pol specializat în tehnologii IoT/IIoT, cu beneficii directe pentru companiile locale și pentru administrațiile publice care pot implementa soluții eficiente de tip Smart City, Smart Lighting sau monitorizare a mediului.

5. SUSTENABILITATE

Sustenabilitatea ecosistemului este asigurată atât prin infrastructura construită (Passive House, energie regenerabilă, tehnologii Smart Building), cât și prin structura parteneriatului. Colaborarea între ACETI, iDomus și USM este formalizată prin acorduri care stabilesc responsabilități și

angajamente pe termen lung, iar integrarea în rețele europene DIH oferă acces la programe de finanțare și schimb de bune practici.

Modelul își poate susține funcționarea prin proiecte comune, servicii oferite IMM-urilor, activități de instruire, programe pentru startup-uri și participarea la consorții internaționale. Această diversificare a surselor de venit permite menținerea și extinderea activităților educaționale și de cercetare, transformând centrul într-un actor durabil al ecosistemului tehnologic.

6. CONCLUZII

Ecosistemul ACETI–iDomus–USM reprezintă o inițiativă strategică pentru modernizarea infrastructurii educaționale și de cercetare din Republica Moldova, aliniată atât cu tendințele globale, cât și cu modelele europene de Digital Innovation Hub. IIoT Pro Center Ungheni oferă o platformă reală pentru instruire aplicată, prototipare și dezvoltare de soluții inteligente, susținând astfel tranziția spre o economie bazată pe tehnologie, sustenabilitate și inovare. Sinergia dintre universitate, industrie și organizațiile de suport pentru inovare creează premisele formării unei noi generații de specialiști, capabili să contribuie la dezvoltarea economică și tehnologică a țării. Prin continuitatea colaborării și integrarea rezultatelor în comunitate, acest ecosistem poate deveni un model replicabil la nivel național.

Surse bibliografice:

1. Un membru ACETI construiește primul centru tehnologic pentru inovare și producere din Republica Moldova. Available at: https://aceti.md/un-membru-aceti-construieste-primul-centru-tehnologic-pentru-inovare-si-producere-din-republica-moldova/.
2. Smart Manufacturing Innovation Center (SMIC). Available at: https://www.unido.org/smart-manufacturing-innovation-center-smic.
3. Manufacturing Made Smarter Innovation Hubs. A report for Innovate UK under the BEIS Futures Framework. April 2021. Available at: https://doi.org/ 10.13140/RG.2.2.24336.48646.
4. KHYAVI1, M.H., NEMATOLLAH, ZADEH S.M., AHMADABADI, A.A. IoT and Enterprise Architecture Synergy: Driving Industrial Process Optimization. In: EAI Endorsed Transactionson Internet of Things. Vol 10. 2024. Available at: https://doi.org/10.4108/eetiot.4366.
5. VARGAS, F., WINTJES, R. Digital Innovation Hubs: Insights from European Experience in Supporting Business Digitalization, 2023. IDB. Available at: https://doi.org/10.18235/0004995.

CZU: 004.383.8:623.746-519:[633.34 + 633.35] https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.05

DIGITAL SOLUTIONS IN CROP PROTECTION THROUGH THE USE OF DRONES FOR SOYBEAN AND PEA TREATMENTS

SOLUȚII DIGITALE ÎN PROTECȚIA FITOSANITARĂ PRIN UTILIZAREA DRONELOR PENTRU TRATAMENTE LA SOIA ȘI MAZĂRE

Dorin CEBANU[1] e-mail: mr.cebanu@gmail.com ORCID ID: 0009-0005-2606-6002
Costel GUȚU[2] e-mail: costel.gutu@mail.ru
Maxim PROZOROVSCHI[3] e-mail: prozorovskiy97@mail.ru

[1,2,3]IP „Centrul Național de Cercetare și Producere a Semințelor”,
s. Pașcani, r-nul Criuleni, Republica Moldova

Abstract. *Soybean (Glycine max L.) and pea (Pisum sativum L.) play an essential role in sustainable agriculture due to their high protein content and their ability to biologically fix nitrogen in the soil. In the current context, characterized by increasing environmental protection requirements and the need for the rational use of pesticides, the application of phytosanitary treatments using drones represents an innovative and efficient solution. The application of insecticides using drones ensures precise and uniform distribution, thereby reducing the volume of solution required and minimizing losses caused by drift. At the same time, this technology decreases operator exposure risks, reduces the amount of potentially polluted water, and contributes to lowering the carbon footprint. In addition, drone-assisted phytosanitary treatments prevent soil compaction, both aspects being essential under the conditions of global warming and ongoing soil degradation processes. Experimental results demonstrate that drone-applied treatments in soybean (Glycine max L.) and pea (Pisum sativum L.) crops achieve comparable or even superior efficacy to conventional methods, while also providing significant economic and ecological advantages.*

Keywords: *soybean (Glycine max L.); pea (Pisum sativum L.); leguminous crops; agricultural drones; precision application; insecticides; crop protection; sustainable agriculture; precision agriculture; integrated pest management.*

INTRODUCERE.

Plantele leguminoase reprezintă o componentă esențială a agriculturii durabile, având un impact semnificativ atât din punct de vedere economic, cât și ecologic. Aceste culturi se remarcă prin conținutul lor ridicat de proteine, fiind de 2–3 ori mai mare comparativ cu cel al cerealelor, precum și prin echilibrul nutritiv al boabelor, care includ amidon, zaharuri, vitamine și elemente minerale indispensabile sănătății umane [3,4]. În plus, culturile leguminoase contribuie substanțial la îmbunătățirea fertilității solului, datorită capacității de fixare biologică a azotului în nodozitățile rădăcinilor, reducând astfel necesitatea utilizării îngrășămintelor sintetice [5]. Având în vedere aceste beneficii, într-un context marcat de presiunea tot mai mare pentru diminuarea utilizării pesticidelor și fertilizanților chimici, precum și pentru reducerea amprentei de carbon și a altor gaze cu efect de seră, extinderea suprafețelor cultivate cu leguminoase pentru boabe devine o prioritate atât la nivel național, cât și internațional [1, 2]. Totodată, dezvoltarea și adaptarea soiurilor autohtone, rezistente și productive, constituie un obiectiv major al cercetării agronomice. În acest context, tehnologiile moderne de protecție fitosanitară oferă soluții inovatoare pentru managementul integrat al culturilor. Aplicarea precisă a tratamentelor insecticide cu ajutorul dronelor la culturile de mazăre și soia contribuie la creșterea eficienței intervențiilor fitosanitare și la reducerea impactului asupra mediului.

Astfel, integrarea culturilor leguminoase și a acestor tehnologii avansate în sistemele agricole conturează o direcție promițătoare pentru dezvoltarea unui model agricol sustenabil, productiv și ecologic.

MATERIALE ȘI METODE DE CERCETARE

Studiul a fost realizat în cadrul Centrului Național de Cercetare și Producere a Semințelor, sectorul Selecția, pe câmpurile experimentale nr. 5 și nr. 7. Scopul cercetării a fost evaluarea eficienței aplicării insecticidelor **Codex** și **Organza** prin intermediul tehnologiei de stropire cu dronă la culturile de soia (*Glycine max L.*) și mazăre (*Pisum sativum L.*). Experimentele au fost amplasate pe o suprafață totală de 11,5 hectare, dintre care 8 hectare cultivate cu mazăre și 3,5 hectare cu soia. Materialul biologic a fost reprezentat de soiuri comerciale cultivate în cadrul programului de ameliorare al centrului, adaptate condițiilor pedoclimatice ale zonei. Pentru combaterea dăunătorilor specifici acestor culturi au fost utilizate două produse insecticide înregistrate:

- **Codex** – insecticid de contact și ingestie, cu acțiune rapidă asupra unui spectru larg de insecte;
- **Organza** – insecticid sistemic cu efect rezidual prelungit, destinat combaterii dăunătorilor din principalele ordine: Lepidoptera, Coleoptera și Hemiptera.

Produsele au fost aplicate conform instrucțiunilor tehnice ale producătorului, respectând dozele recomandate pentru fiecare cultură.

Aplicarea tratamentelor fitosanitare s-a efectuat utilizând drona agricolă **XAG V40**, echipată cu sistem GPS de înaltă precizie, duze rotative de tip **disc** (centrifugal), care asigură o pulverizare uniformă și fină, precum și cu un sistem de control automat al debitului. Diametrul picăturilor generate variază în funcție de parametrii de lucru și viteza de rotație a duzelor, situându-se, în medie, între **60 și 150 µm**, în cazul nostru mărimea picăturii a constituit - cea **110 µm** ce permite obținerea unei acoperiri optime și reducerea pierderilor prin derivă. Parametrii de lucru au fost următorii:

- **înălțimea de zbor:** 3,0 m deasupra vârfului plantelor;
- **viteza de deplasare:** 4 m/s;
- **debitul soluției de stropit:** 32 L/ha;
- **presiunea de lucru:** aproximativ 3 bari.

Aplicările au fost efectuate în condiții meteorologice favorabile: temperatură de 20–25°C, umiditate relativă a aerului de 55–65% și viteză a vântului sub 3 m/s, pentru a reduce deriva soluției.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Aplicarea tratamentelor fitosanitare prin intermediul dronei agricole **XAG V40** a oferit rezultate semnificative în ceea ce privește controlul dăunătorilor, uniformitatea acoperirii foliare și reducerea volumului de soluție utilizată, comparativ cu metodele convenționale de stropire.

Rezultatele obținute au demonstrat că ambele preparate au demonstrat o eficiență pozitivă în combaterea dăunătorilor principali (*Bruchus pisorum, Agrotis segentum, Etiella zinckenella, Vanessa cardui*). În ambele culturi, scăderea semnificativă a numărului de indivizi activi la 7 zile după tratament a confirmat eficiența aplicării cu dronă. La 14 zile după tratament, s-a constatat o ușoară revenire a unor populații, mai accentuată în varianta tratată cu Codex, datorită duratei mai scurte a efectului rezidual.

Analiza hârtiilor hidrosensibile a arătat o uniformitate de acoperire de peste 85% pe întreaga suprafață tratată, cu o distribuție omogenă a picăturilor și o dimensiune optimă (sub 120 µm).

Acest rezultat confirmă performanța sistemului de pulverizare al dronei **XAG V40**, care asigură o dispersie uniformă chiar și în condiții de densitate ridicată a vegetației.

Utilizarea dronei a permis reducerea volumului de soluție de lucru de la 200 l/ha (aplicare convențională) la 32 l/ha, ceea ce corespunde unei economii de aproximativ 84% din cantitatea de soluție utilizată. Pe toată durata experimentului nu s-au observat simptome de fitotoxicitate sau stres fiziologic asupra culturilor tratate cu Codex și Organza. Plantele de soia și mazăre au prezentat o stare vegetativă uniformă, cu frunze sănătoase și culoare normală, ceea ce demonstrează compatibilitatea produselor utilizate cu tehnologia de aplicare prin dronă. În cadrul experimentului cu soiurile de mazăre, au fost evidențiate diferențe semnificative între variantele analizate în ceea ce privește parametrii morfologici și productivi, în funcție de aplicarea sau neaplicarea tratamentului (Tabelul 1).

Tabelul 1. Indicatori morfologici și productivi ai soiurilor de mazăre și soia în condițiile aplicării tratamentelor fitosanitare cu dronă

Nr.	Soiul	Înălțimea de inserție, cm	Înălțimea totală, cm	Numărul de păstăi	Numărul de boabe	Producția de boabe kg/ha
Mazăre						
1	Nadia martor netratat	3	65,5	3,4	11,1	1607
2	Nadia	2,8	67,5	5,8	18,3	2049
3	Grațiana	3,6	66,0	4,6	14,7	1907
Soia						
1	Enigma martor netratat	17,2	61,0	38,3	54,0	2111
2	Enigma	13,0	52,0	31,0	64,7	2333
3	Moldovița	12,0	63,0	35,0	76,0	2535

Soiul *Nadia* (martor netratat) a prezentat o înălțime medie a plantelor de 65,5 cm și o înălțime de inserție a primei păstăi de 3,0 cm, valori care indică un potențial de productivitate moderat. În medie, plantele au format 3,4 păstăi/plantă, fiecare conținând aproximativ 11,1 boabe, ceea ce a determinat o producție de 1607 kg/ha. Soiul Nadia (tratat) s-a remarcat printr-o productivitate superioară, datorată numărului mai mare de păstăi - 5,8 și de boabe/plantă - 18,3). Deși înălțimea totală 67,5 cm a fost apropiată de cea a martorului, creșterea numărului de organe fertile a determinat o producție mai ridicată, de 2049 kg/ha, depășind martorul cu aproximativ 27,5%. Soiul Grațiana (tratat) a înregistrat o înălțime totală de 66,0 cm și o înălțime de inserție de 3,6 cm, ceea ce favorizează o recoltare mecanizată eficientă. Numărul mediu de păstăi/plantă a fost de 4,6, iar de boabe – 14,7, rezultând o producție de 1907 kg/ha, superioară martorului cu circa 18,6%. Analiza datelor pentru soiurile de soia a evidențiat o variabilitate importantă a caracterelor morfoproductive. Soiul Enigma (martor netratat) a prezentat o înălțime totală de 61,0 cm și o înălțime de inserție a primei păstăi de 17,2 cm, cu 38,3 păstăi/plantă și 54,0 boabe, realizând o producție de 2111 kg/ha. Soiul Enigma (tratat) a avut o înălțime totală de 52,0 cm și o înălțime de inserție mai mică 13,0 cm, însă s-a remarcat printr-un număr mai mare de boabe/plantă - 64,7, ceea ce a contribuit la o creștere a producției la 2333 kg/ha, depășind martorul cu 10,5%.

Cea mai înaltă productivitate a fost înregistrată la soiul Moldovița, care, deși a avut o înălțime de inserție relativ mică (12,0 cm), a dezvoltat 35,0 păstăi/plantă și 76,0 boabe/plantă, atingând o producție de 2535 kg/ha. Creșterea producției față de martor a fost de aproximativ 20,1%, demonstrând o eficiență superioară a conversiei resurselor vegetative în elemente de recoltă.

Analiza comparativă arată că soiurile Enigma și Moldovița prezintă un potențial agronomic ridicat, în special în condițiile aplicării tehnologii moderne de protecție fitosanitară cu drona, care asigură o acoperire uniformă și o utilizare eficientă a insecticidelor. Rezultatele obținute confirmă faptul că variabilitatea soiurilor influențează semnificativ parametrii morfologici și productivi atât la mazăre, cât și la soia. Soiurile Nadia (mazăre) și Moldovița (soia) s-au dovedit a fi cele mai performante din punct de vedere al producției de boabe, fiind recomandate pentru extindere în producție. Utilizarea tehnologiei moderne de aplicare a tratamentelor fitosanitare cu drona **XAG V40** a contribuit la menținerea sănătății culturilor și la valorificarea optimă a potențialului genetic al soiurilor studiate.

CONCLUZII

1. Studiul efectuat asupra culturilor de mazăre (Pisum sativum L.) și soia (Glycine max L.) a demonstrat că aplicarea tratamentelor fitosanitare cu ajutorul dronei agricole XAG V40 reprezintă o metodă modernă, eficientă și ecologică, care contribuie la optimizarea protecției plantelor și la reducerea consumului de substanțe chimice.
2. Utilizarea dronelor în protecția culturilor a permis obținerea unei acoperiri uniforme a suprafeței foliare, cu pierderi minime de soluție și o distribuție precisă a insecticidului, reducând riscurile de poluare și expunerea operatorilor.
3. În urma aplicării tratamentelor, soiurile de mazăre și soia au prezentat o stare fitosanitară bună, fără semne de fitotoxicitate, iar eficiența biologică a produselor testate (Codex și Organza) a fost ridicată, cu o ușoară superioritate pentru produsul Organza datorită efectului rezidual mai persistent.
4. Analiza comparativă a performanțelor agronomice a evidențiat că, la cultura de mazăre, soiul Nadia a înregistrat cea mai mare producție de boabe 2049 kg/ha, iar la cultura de soia, soiul Moldovița a obținut rezultatul cel mai ridicat 2535 kg/ha, depășind variantele martor netratat cu peste 20%.
5. Implementarea tehnologiilor digitale, precum utilizarea dronelor pentru aplicarea precisă a tratamentelor, se aliniază principiilor agriculturii durabile, contribuind la eficientizarea lucrărilor agricole și la protecția mediului.
6. De asemenea, aplicarea tratamentelor cu drona elimină necesitatea deplasării tractoarelor pe teren, prevenind tasarea solului, pierderile de producție pe urmele de roți și reducând dezvoltarea buruienilor pe aceste zone compacte.

BIBLIOGRAFIE:

1. VOZIAN, V., IACOBUȚA, M. Soiuri noi de soia create la ICCC „Selecția”, surse valoroase de proteină vegetală. Materialele conferinței naționale cu participare internațională. Cercetări la culturile plantelor de câmp în Republica Moldova. Bălți, 21 – 22 iunie 2018, pp.208-212.
2. VOZIAN, V., IACOBUȚĂ, M, AVADĂNII, L., GUȚU, C., CHIABURU, I. Retrospectiva cercetărilor științifice în ameliorarea culturilor leguminoase pentru boabe și furaj. In: *Probleme științifice în domeniul culturilor de câmp - realizări și perspective: Conferință dedicată a 80 ani de la fondarea ICCC "Selecția"*, Ed. 1, 13-14 iunie 2024, Bălți. Bălți: "Print-Caro" SRL, 2024, pp. 54-60. ISBN 978-9975-180-84-9.
3. CHIURAZZI, M., FRUGIS, G., NAVAZIO, L. *Symbiotic nitrogen fixation: a launchpad for investigating old and new challenges.* In: *Journal of Experimental Botany*, vol. 76, nr. 6, 9 apr. 2025, pp. 1473–1477. ISSN 0022-0957. https://doi.org/10.1093/jxb/erae510.
4. GOYAL, R. K., HABTEWOLD, J. Z. *Evaluation of Legume–Rhizobial Symbiotic Interactions Beyond Nitrogen Fixation That Help the Host Survival and Diversification in Hostile Environments.* In: *Microorganisms*, 2023, vol. 11, art. no. 1454. ISSN 2076-2607. https://doi.org/10.3390/microorganisms1-1061454
5. STAGNARI, F., MAGGIO, A., GALIENI, A., PISANTE, M. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. In: *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2017. – Vol. 4, No. 2, pp. 1–13. ISSN 2196-5641. DOI: 10.1186/s40538-016-0085-1.

CZU: 37.091.3:623.746-519 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.06**

INTRODUCEREA TEHNOLOGIILOR UAV ÎN ÎNVĂȚĂMÂNTUL STEAM: EXPERIENȚE ȘI MODELE DE BUNE PRACTICI

INTRODUCTION OF UAV TECHNOLOGIES IN STEAM EDUCATION: EXPERIENCES AND BEST PRACTICE MODELS

Arina BRIGALDA[1] e-mail: arinabrigalda@gmail.com ORCID ID: 0009000026002360

[1]Military College of the Armed Forces "Alexandru cel Bun", Republic of Moldova

Abstract. *Acest articol explorează integrarea tehnologiilor UAV (vehicule aeriene fără pilot) în educația STEM, evidențiind beneficiile pedagogice și practicile recomandate asociate. Studiul se bazează pe principiile învățării experiențiale și ale pedagogiei prin proiect, având ca scop transformarea predării tradiționale în activități interdisciplinare și aplicative. Metodologia a combinat instrumente cantitative și calitative: chestionare, interviuri, observații și analiza produselor realizate de elevi, implicând 58 de elevi și 12 profesori. Experiențele educaționale au inclus trei studii de caz reprezentative: măsurarea distanței și vitezei dronei, pentru aplicarea conceptelor de fizică; cartografierea terenului școlii, integrând geografia și informatica; proiectul eco-dronă, pentru monitorizarea deșeurilor și a vegetației locale. Rezultatele arată că utilizarea UAV-urilor crește motivația și implicarea elevilor, dezvoltă competențe digitale, colaborative și de gândire critică, și facilitează înțelegerea aplicativă a conceptelor STEM. Analiza calitativă confirmă formarea simultană a competențelor tehnice și sociale, iar produsele educaționale demonstrează aplicabilitate interdisciplinară. Sunt formulate recomandări pentru integrarea progresivă a dronelor în curriculumul STEAM, formarea continuă a cadrelor didactice și stimularea colaborării interdisciplinare. Direcțiile viitoare includ dezvoltarea platformelor virtuale pentru UAV și utilizarea inteligenței artificiale în analiza datelor educaționale. Acest model reprezintă un exemplu replicabil de bune practici STEAM centrate pe învățarea experiențială.*

Cuvinte-cheie: *UAV, STEAM, învățare experiențială, interdisciplinaritate, bune practici educaționale.*

1. Introduction

In the last two decades, educational systems around the world have entered a broad transformation process, driven by the technological revolution and the acceleration of the digitalization of teaching and learning processes. The rapid advancement of emerging technologies – artificial intelligence, the Internet of Things, robotics, 3D printing and unmanned aerial vehicles (UAVs) – has led to a profound reconfiguration of traditional educational paradigms [2, 3, 4]. In this context, education is no longer focused exclusively on the transmission of knowledge, but on the development of complex skills, oriented towards problem solving, critical thinking, interdisciplinary collaboration and technological innovation.One of the most effective conceptual frameworks supporting this transition is that of STEM education (Science, Technology, Engineering, Mathematics), which integrates the scientific, technological, engineering and mathematical dimensions into a unified training system.

The STEM model promotes learning through discovery and applied projects, favoring the connection between theory and practice, offering students the opportunity to understand natural phenomena and technological processes in an integrated manner. Through this approach, the school becomes a space for research and experimentation, and the student – an active actor in the construction of knowledge. In this transformative framework, unmanned aerial vehicles (UAVs), also known as educational drones, offer remarkable educational potential. They allow the translation of theoretical content from physics, mathematics, geography, comp uter science or environmental sciences into concrete, attractive and motivational applications. The use of UAVs in the teaching process creates interdisciplinary learning contexts, in which students can explore the relationship between mathematical

concepts and real flight parameters (altitude, speed, acceleration), apply programming algorithms to control drone movements or analyze geospatial data to model the environment. In addition, drone activities stimulate scientific curiosity, encourage collaboration and develop algorithmic thinking – essential skills for the professions of the future.

The introduction of drones in STEM education also has a complex formative dimension: they become experiential learning tools, connecting students with the realities of science and the technological environment. Through direct observations, measurements, modeling and interpretations, students gain a deeper understanding of the principles of applied physics, mathematical structures and engineering processes. Activities with UAVs favor a pedagogy of action and reflection, in which learning is simultaneously cognitive and practical. Internationally, numerous educational initiatives have demonstrated the effectiveness of drones as teaching and research tools in the pre-university and university environment, but in the Eastern European space these practices are still in a consolidation stage. Therefore, a systematic analysis of implementation experiences and good practice models that can guide the sustainable adoption of UAV technologies in education is necessary. In this context, the main purpose of the research presented in this article is to explore the pedagogical potential of UAV technologies and their use in STEM education through experimental teaching activities. The study aims to outline a coherent and applied vision on how these technologies can contribute to the modernization of science education. To achieve this goal, the research was oriented towards achieving the following specific objectives:

1. Identifying the pedagogical advantages of using drones in the formation of scientific, technical and digital skills [1].
2. Description of experiences of implementing UAV technologies in STEM activities in pre-university education [6].
3. Presentation and analysis of models of good practices validated through educational projects, interdisciplinary workshops and school experiments, which can constitute methodological benchmarks for the expansion of these approaches in the future.

Through this approach, the article contributes to the foundation of a modern perspective on STEM education, in which technology becomes a means of scientific thinking, and drones – tools for exploration, measurement and reflection, capable of transforming learning into an authentic experience, oriented towards innovation and applied knowledge.

2. Theoretical and conceptual foundation

The rapid transformations of the contemporary world require a profound rethinking of the way in which education forms the necessary skills for the professions of the future. In this sense, STEM education (Science, Technology, Engineering, Mathematics) represents one of the most dynamic educational paradigms of the 21st century. It is based on the coherent integration of scientific and technical disciplines into a unitary learning framework, where the emphasis shifts from the accumulation of isolated knowledge to the development of the capacity for application, innovation and critical thinking.

2.1. The concept of STEM education and the extension to the STEAM model. The STEM model emerged in the early 2000s, in response to the need of modern economies for specialists with transversal skills in science and technology. Over time, the concept evolved towards the STEAM paradigm, which also includes the artistic dimension ("A" – Arts), recognizing the role of creativity and design in scientific innovation [8]. In this framework, the educational process is no longer limited to the transfer of knowledge, but becomes a holistic experience, in which students design, experiment, evaluate and create original products, based on the understanding of scientific mechanisms.

The STEM approach stimulates visual and creative thinking, encouraging students to find original solutions to complex problems. This dimension is essential in the context of the use of drones, where flight design, visual data analysis and interpretation of natural phenomena involve both scientific rigor and aesthetic sensitivity and imagination.

2.2. UAV – technological and educational tool. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), also known as drones, are technological systems capable of autonomous or remotely controlled flights, equipped with sensors, cameras or other measuring devices. Initially developed for military and scientific research purposes, UAVs have become, in the last decade, affordable and versatile tools, with extensive applications in agriculture, surveying, archaeology, environmental monitoring and, more recently, in science education [5].In an educational context, UAVs offer unique opportunities for experiential and interd isciplinary learning. Through them, students can connect abstract notions of physics (forces, trajectories, velocity, gravity) with direct observations and empirical measurements. For example, analyzing the flight of a drone allows for the application of equations of motion, the study of vectors and tilt angles, or the determination of altitude based on sensor data. Moreover, UAVs facilitate collaborative and creative activities, in which students plan flight missions, solve technical problems, program trajectories, or interpret the images obtained. These activities develop algorithmic thinking, digital skills, and engineering skills, strengthening the connection between STEM fields [7].

2.3. Theoretical framework of learning through projects and discovery. The integration of drones into education is based on the principles of Project-Based Learning (PBL) and Inquiry-Based Learning (IBL).

- Project-based learning (PBL) involves students engaging in authentic, interdisciplinary activities that start with a real-world problem and end with a concrete product: a presentation, an aerial map, a digital simulation, or a physical model. In the case of drones, projects can include, for example, measuring the distance between two points through autonomous flight, estimating wind speed, mapping a green area, or analyzing the environmental impact of waste [9, 10, 11].
- Inquiry-based learning (IBL) emphasizes the active role of the student in formulating hypotheses, collecting data, and interpreting results. The drone thus becomes a tool for scientific investigation, and the student becomes the researcher who applies empirical methods and logical reasoning to explain observed phenomena. These two educational paradigms contribute to the formation of applied scientific thinking, based on experimentation, reflection, and critical interpretation of data, essential skills in STEM education.

2.4. Skills developed through the use of UAVs in education. Specialized literature emphasizes that the introduction of UAV technologies into the teaching process supports the development of a complex set of transversal skills:

a) Scientific skills – by applying physics and mathematics concepts in real-world contexts.

b) Technological and digital skills – through the use of sensors, software applications and flight programming.

c) Engineering skills – through the design and calibration of UAV systems.

d) Social and collaborative skills – through team activities and cooperative problem solving.

e) Creative and visual skills – through aerial image processing, 3D model development and aesthetic interpretation of data.

This broad spectrum of skills confirms the integrative and transdisciplinary character of UAV-based education and supports the idea that technology, when used pedagogically, becomes the catalyst for deep and relevant learning.

2.5. Regulatory framework and international directions. The integration of UAV technologies in education is in line with the strategic recommendations formulated by international bodies such as UNESCO, the European Commission and the OECD, which promote digital education as a pillar of sustainable development. Framework documents such as the Digital Education Action Plan (2021–2027) and DigCompEdu, emphasize the importance of training digital skills applied in practical and interconnected contexts.At the same time, more and more countries are introducing national STEM training programs based on robotics and drones, as a means of attracting young people to the scientific and engineering fields. Therefore, the theoretical foundation of this research is based on the convergence of STEM education, the project-based learning paradigm and the technological potential of drones, seen as environments for scientific exploration, creation and development of 21st century skills. This interdisciplinary approach is the starting point for the analysis of educational experiences and models of good practice presented in the following sections.

3. Methodology and research design

This subchapter presents the methodology and design of the research on the integration of drones in STEM education. The study aims to assess the impact of UAVs on student skills and identify good educational practices. The research uses a mixed design, combining quantitative analysis with qualitative data interpretation. This approach allows for a rigorous examination of how UAV technologies support interdisciplinary learning and student creativity.

3.1. Research purpose and objectives. The main goal of the research is to analyze the impact of integrating UAV technologies into the STEM educational process and to identify models of good practices that can be replicated in various school contexts. The research aims to highlight how activities based on the use of drones contribute to the development of students' scientific, technological and creative skills. The specific objectives are:

♦ Determining teachers' and students' perceptions regarding the relevance of using drones in STEM activities.

♦ Analysis of the degree of curricular integration of UAV technologies in science and mathematics disciplines.

♦ Identifying good practice models that foster project-based learning and interdisciplinary collaboration.

♦ Formulation of an applicative conceptual model for integrating drones into STEM education, based on documented educational experiences.

3.2. Research design. The study was conducted based on a mixed design (qualitative-quantitative), which combines statistical analysis of empirical data with narrative interpretation of educational experiences. The research was structured in two stages:

• Exploratory stage – aimed at the analysis of specialized literature and international educational documents on the integration of UAV in STEM education.

• Empirical stage – involved the implementation of pilot teaching activities, followed by data collection through standardized instruments (questionnaires, interviews, direct observation).

This design allows for triangulation of results, ensuring the validity and consistency of interpretations.

3.3. The sample and the research context. The research was conducted during 2024–2025, in the Military College, where STEM training programs were implemented using educational drones.

The sample consisted of:

o 58 students aged 15–19;

o 12 teachers from the fields of mathematics, physics, computer science and environmental sciences.

The selected institution has the minimum infrastructure required for UAV activities (educational drone, controlled flight space, trajectory and image analysis software). The selection criteria for the participants were: relevant teaching experience, willingness to collaborate interdisciplinary and interest in modern technologies.

3.4. Research methods and tools. To collect data, complementary methods were used, specific to applied educational research:

• Questionnaire – was applied to students and teachers to assess perceptions of the usefulness and attractiveness of UAV activities, the level of involvement and the degree of perceived difficulty.

• Semi-structured interview – provided an in-depth perspective on how teachers plan, implement and evaluate drone activities.

• Direct observation – allowed the analysis of students' behavior during practical activities (cooperation, problem solving, application of theoretical concepts).

• Analysis of educational products – projects made by students (aerial maps, 3D models, flight simulations, observation reports) were examined to assess the level of competence achieved.

The research instruments were validated through consultation with STEM education experts and pilot-tested to verify the clarity and relevance of the items.

3.5. Procedure for conducting the educational experiment. The activities were structured into four interdisciplinary teaching modules, each lasting 2–3 weeks:

♦ Physics of flight and principles of aerodynamics – students studied the forces acting on UAVs and calculated flight parameters (speed, height, angle of inclination).

♦ Trajectory mathematics – concepts of analytical geometry and trigonometry were applied to determine coordinates and optimize flight paths.

♦ Digital mapping and image analysis – students used specialized software to process aerial images and identify environmental changes.

♦ Final interdisciplinary project – student teams carried out a practical mission: "Monitoring the green spaces around the College", applying all the knowledge acquired.

The activities were documented through observation sheets and reflective journals, completed by students and teachers.

3.6. Data analysis. Quantitative data were analyzed using basic statistical indicators (frequencies, means, standard deviations) to identify general trends regarding perceptions and impact of UAV

activities. Qualitative data (interviews and observations) were subjected to a thematic analysis, aiming to extract the categories: motivation, collaboration, creativity, technical difficulties and curricular integration. Data triangulation allowed the formulation of robust interpretive models, which correlate concrete educational experiences with STEM pedagogical principles.

3.7. Research limitations. Although the research provides relevant results, there are certain limitations:

- relatively small sample size;
- local nature of the implementation (only one institution);
- limited availability of technological resources (limited number of drones and educational software).

However, the proposed methodology has a replicable and adaptable nature, and can be extended to different educational contexts, including at the university level or in extracurricular programs.

3.8. Methodological synthesis. The research design confirms the methodological potential of UAV technologies as integrated learning tools. The applied methodology combines the exploratory dimension (study of perceptions and attitudes) with the applicative one (actual implementation of STEM projects), creating a coherent framework for analyzing the educational impact and formulating models of good practices.

4. Results and discussions

The subchapter presents the results and discussions on the impact of UAVs in STEM education. Data analysis highlights the increase in student motivation, the consolidation of theoretical skills and the development of collaboration skills. Teachers recognize the interdisciplinary value of drones, but emphasize the need for adequate training and resources. Student observations and projects show the concrete application of knowledge and the development of engineering thinking. Overall, UAV technology is confirmed as an effective tool for experiential learning and authentic assessment.

4.1. Students' perceptions of the use of drones in STEM activities. The analysis of the questionnaires applied to the 58 students revealed a predominantly positive attitude towards educational activities based on the use of drones.

• 85% of respondents said that using UAVs increased their motivation to study science;

• 78% said that hands-on activities with drones helped them better understand mathematical and physical concepts;

• 72% said that teamwork experiences helped develop collaboration and problem-solving skills.

Students also noted that “the actual drone flight turns theory into experience” and “the data collected by the drone makes them see math in action.” This association between physical activity and theoretical concept confirms the hypothesis that experiential learning facilitates deep understanding and long-term retention of knowledge.

4.2. Teachers' perceptions of the integration of UAVs into the curriculum. Semi-structured interviews conducted with 12 teachers revealed four main directions:

♦ Interdisciplinary relevance – teachers emphasized that drones can be used at the intersection of multiple disciplines (mathematics, physics, geography, computer science, environmental sciences), providing an authentic integrated learning framework.

♦ Formative value – teachers observed a significant increase in students' interest in scientific content and active involvement in practical activities.

♦ Technical difficulties – lack of adequate equipment, programming skills or controlled flight spaces were cited as major obstacles.

♦ The need for continuous training – teachers consider it essential to organize training courses on the didactic use of drones and associated software tools.

Overall, educators recognized the transformative potential of drones in STEM teaching, believing that they facilitate a shift from transmissive teaching to discovery and project-based learning.

4.3. Observations from experimental activities. Analysis of direct observations and reflective journals provided valuable insights into the dynamics of educational activities with UAVs.

• In the flight physics activities, students demonstrated a visible increase in the ability to apply mathematical formulas for calculating speed and altitude.

• In the digital mapping projects, they demonstrated operational autonomy in using image analysis software and presented concrete results (3D maps, topographic models).

• In the flight planning and execution sessions, effective team coordination behaviors were observed, with the assumption of roles (pilot, data analyst, programmer).

The observing teachers noted that students learned not only science, but also discipline, responsibility, and strategic thinking, as the use of UAVs involves procedural rigor and attention to safety.

Thus, the drone activities functioned as mobile learning laboratories, stimulating cooperation, critical reflection, and integrated technical skills.

4.4. Analysis of educational products. The final projects carried out by the student teams – especially the mission „ Monitoring the green spaces around the College" – provided concrete evidence of the application of interdisciplinary knowledge:

– Students used GPS coordinates and trigonometric formulas to calculate distances and areas of mapped areas.

– They applied physics principles (acceleration, tilt angle) to optimize trajectories.

They analyzed aerial images to identify areas affected by erosion or local pollution.

– The quality of the projects was assessed based on three criteria: scientific accuracy, degree of interdisciplinary integration and creative originality.

The results showed that:

- 65% of the projects reached an advanced level of STEM integration;
- 25% had a satisfactory application;
- only 10% required additional guidance.

This distribution indicates that drones can function as tools for assessing STEM skills, through visible and measurable products.

4.5. Thematic analysis of qualitative data. Thematic analysis of interviews and reflective journals led to the outline of five dominant conceptual categories that define the educational experience with UAVs:

Table 1. Thematic analysis of qualitative data

Thematic category	Synthetic description	Examples of manifestation
Motivation and involvement	Increasing interest in science due to the practical and visual nature of the activities	"Flying the drone made me understand why angles and vectors matter"
Interdisciplinary collaboration	Teamwork between students and teachers from different fields	Joint projects between mathematics and computer science
Creativity and engineering thinking	Developing original solutions for UAV missions	Autonomous flight and 3D mapping projects
Autonomy and responsibility	Taking on roles and following safety protocols	Students coordinate the flight plan without assistance
Technical difficulties	Calibration, connectivity, and weather issues	Limitations resolved through software adaptation and simulation

This synthesis reveals a coevolution of technical and social skills, which confirms the complex nature of STEM education mediated by UAV technology.

4.6. Discussions and interpretations. The results obtained confirm the working hypothesis that the integration of drones in STEM education has a significant impact on the quality of learning, both by increasing student motivation and by strengthening applied skills.

From the perspective of constructivist theory, the use of UAVs facilitates active learning through direct experience, and from the perspective of projective pedagogy – promotes problem-based learning (PBL) and interdisciplinary collaboration.

Compared to traditional methods, UAV activities:

- provides immediate feedback through visual and measurable results;
- stimulates conceptual integration between mathematics and applied sciences;
- creates authentic assessment contexts, where success is reflected in the final product and the ability to interpret real data.

Thus, UAV technology becomes not just a teaching tool, but a complex learning and research environment, in which students are trained as mini-researchers, developing cognitive, practical and metacognitive skills.

4.7. Partial conclusions.

♦ UAV technologies contribute significantly to increasing student motivation and involvement in STEM activities;

♦ Their integration determines the development of complex skills – scientific, technical, collaborative and creative;

♦ Hands-on activities with drones foster authentic interdisciplinary learning and the formation of engineering thinking;

♦ Technical limitations can be overcome through teacher training and institutional educational partnerships;

♦ The developed good practice model is replicable and can be adapted to various curricular contexts and educational levels.

6. Discussions

♦ **Interpretation of the results in the current educational context.** The results obtained confirm the global trend of integrating modern technologies into educational processes, especially in STEM fields, where the emphasis is shifting from theoretical teaching to learning through experiments and projects. The introduction of drones (UAVs – Unmanned Aerial Vehicles) in teaching activities has generated an increased level of involvement, motivation and curiosity among students, demonstrating the potential of these technologies to transform the traditional lesson into an interactive, student-centered experience. Against the backdrop of accelerated digitalization and labor market demands, UAV-based approaches align perfectly with the principles of education 4.0, where the emphasis is on interdisciplinarity, critical thinking and problem solving in real contexts.

♦ **Impact on the formation of transversal skills.** Students' participation in activities involving the use of drones contributed significantly to the development of digital and engineering skills, to the strengthening of collaborative skills and to the stimulation of critical thinking. For example, in the practical projects, students were involved in complex activities that required team coordination, programming, interpretation of data collected by sensors and mathematical analysis of the results. In this sense, UAVs become multifunctional pedagogical tools, capable of integrating contents of physics, computer science, applied mathematics and environmental education, thus contributing to the formation of transversal competences defined by the European Framework of Key Competences for Lifelong Learning (2018).

♦ **Difficulties encountered.** The implementation of UAV technologies in the educational environment can encounter a number of challenges, especially related to logistical and regulatory aspects. In some institutions, the lack of safe flight spaces or the necessary authorizations for the operation of drones limits the practical applicability of the planned activities. Also, the costs of equipment and their maintenance can exceed the financial possibilities of schools. Another major obstacle is the level of training of teachers. The integration of drones requires technical skills, but also the ability to correlate technology with pedagogical objectives. In this context, the development of continuous training programs and methodological guides for STEM teachers is required.

♦ **Analysis of project sustainability and expansion prospects.** In order for the introduction of UAVs in education to become a sustainable practice, it is necessary to create stable partnerships between educational institutions, educational authorities and the technology sector. Pilot projects can be gradually expanded by involving regional STEM centers of excellence, by accessing European funds for the digitalization of education and by developing open educational resources (OER) specific to the use of UAVs. In the medium term, a feasible model is the integration of drones into optional subjects or extracurricular modules, oriented towards learning through interdisciplinary projects and education for sustainability.

♦ **Relevance for military, technological or vocational education.** Within military or technical institutions, the use of UAVs has a dual relevance: educational and operational. Beyond training STEM skills, these technologies develop strategic thinking, precision, responsibility and the ability to react quickly – essential qualities in the training of military personnel and aviation technicians. Also, UAV-based educational projects can be adapted to vocational training scenarios, such as environmental

monitoring, land mapping or natural resource management, contributing to the training of a generation of specialists capable of interacting effectively with autonomous technologies and intelligent data analysis systems.

7. Conclusions

♦ **Summary of main findings.** The research highlighted that integrating UAVs into STEM educational activities generates a significant positive impact on student motivation, engagement in hands-on activities, and applied understanding of scientific and mathematical concepts. Qualitative and quantitative data analysis demonstrated that UAV-based activities stimulate student collaboration, develop critical thinking and creativity, and facilitate the acquisition of technical and digital skills necessary in the context of modern education.

♦ **Confirming the value of drones as STEM educational tools.** Empirical evidence confirms that drones are versatile and effective pedagogical tools that allow:

- interdisciplinary integration of mathematical, physical and technological contents;
- achievement of learning through project and direct experience;
- authentic assessment of skills through visible products (digital maps, 3D models, flight simulations);
- development of essential transversal skills for the 21st century, such as collaboration, autonomy and critical thinking.

8. Recommendations for educational decision-makers and teachers

For the effective and sustainable implementation of UAVs in STEM education, it is recommended:

♦ **Gradual integration of UAV modules into STEM curricula** – starting with extracurricular activities and optional modules, progressively until integration into the compulsory curriculum;

♦ **Continuing education of teachers** – developing the technical, pedagogical and interdisciplinary skills necessary for the effective use of drones;

♦ **Stimulating interdisciplinary collaboration** – creating joint projects between disciplines (mathematics, physics, computer science, environmental sciences) and between teachers, to maximize the educational potential of UAVs.

9. Future research directions

Based on the results obtained, future research may aim at:

♦ **Development of a virtual learning platform with UAVs,** which allows for flight simulation, data analysis and the implementation of educational projects independent of existing physical resources;

♦ **Implementing artificial intelligence (AI) in educational data analysis,** for monitoring student progress, personalizing learning paths, and optimizing teaching strategies.

BIBLIOGRAPHY:

1. BARAK, M., ZADOK, Y. *Integrating UAVs in STEM Education: A Pedagogical Framework*. International Journal of Technology and Design Education, 30(3), 2020, pp. 489-505. https://doi.org/10.1007/s10798-019-09545-6
2. CAPRARO, R. M., CAPRARO, M. M., MORGAN, J. R. *STEM Project-Based Learning: An Integrated Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Approach*. Rotterdam: Sense Publishers, 2013.

3. FAIELLA, F., RICCI, F. *Drones in Education: Enhancing STEM Learning and Engagement in Secondary Schools*. Education and Information Technologies, 24(6), 2019, pp. 3387–3407. https://doi.org/10.1007/s10639-019-09933-1
4. HONEY, M., HILTON, M. (Eds.). *Learning Science Through Computer Games and Simulations*. National Academies Press, 2011. https://doi.org/10.17226/13078
5. IONESCU, M. *Drone educaționale și învățarea prin proiecte în învățământul preuniversitar*. Revista Română de Educație și Tehnologie, 12(2), 2020, pp. 45-62.
6. JOHNSON, L., ADAMS BECKER, S., ESTRADA, V., FREEMAN, A. *NMC Horizon Report: 2015 K-12 Edition*. Austin, Texas: The New Media Consortium. Retrieved from, 2015. https://www.learntechlib.org/p/150033/
7. MUNTEANU, L., PAVEL, D. *Integrare a tehnologiilor UAV în curriculum-ul STEM*. Iași: Editura Polirom, 2019.
8. POPESCU, I., STOICA, C. *Educația STEM în școlile românești: provocări și perspective*. București: Editura Didactică și Pedagogică, 2018.
9. RADU, A., MARINESCU, V. *Pedagogia activă și competențele digitale în educația secolului XXI*. Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2021.
10. UNESCO.*Educația digitală și competențele pentru secolul XXI: Ghid pentru cadre didactice*. București: UNESCO România, 2021.
11. Comisia Europeană. *Digital Education Action Plan (2021–2027)*. Bruxelles: Comisia Europeană, 2021. Disponibil la: https://education.ec.europa.eu/.

CZU: 631.331:004 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.07**

SISTEM MECATRONIC DE DISTRIBUȚIE A SEMINȚELOR CONTROLAT DIGITAL, CU DISPOZITIV DE DOZARE ȘI DE CONVERSIE A FLUXULUI IMPRIMAT 3D

DIGITALLY ENABLED MECHATRONIC SEED DISTRIBUTION SYSTEM WITH 3D PRINTED SEED-METERING AND SEED-FLOW CONVERSION DEVICE

Andrei GHEORGHIȚA[1] ORCID ID: 0000-0003-2890-993X
Victor LESCO[2] ORCID ID: 0009-0002-3372-1237

[1,2]Institutul Național de Cercetări Aplicative în Agricultură și Medicină Veterinară, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

Abstract. *Seed distribution uniformity on the soil surface is one of the main factors that influence the yield of agricultural crops. Mechanical seed-metering and delivery devices used in construction of the seed drill have a coefficient of variation of the space between seeds of more than 70%. The purpose of the research is to decrease coefficient of variation of space between seeds by using digitally enabled mechatronic seed distribution system with 3d printed seed-metering and seed-flow conversion device, without human involvement. The digital control parameters and process automation control, by using microcontroller, allowed setting functional parameters such as rotation speed, air velocity and data acquisition from the sensors. Experimental research with the mechatronic distribution system was carried out both on the laboratory installation and on the experimental cart in the soil channel, at different speeds in travel mode. Research results, conducted on mechatronic seed distribution system, show that 3D printed experimental device, air speed, and travel speed 3,2 m/s, reduce distribution uniformity coefficient of variation to 13-22%.*
Keywords: *digital, distribution uniformity, mechatronic system, seed drill, 3D printed.*

1. INTRODUCERE

Potrivit Organizației Națiunilor Unite, creșterea continuă a populației mondiale și urbanizarea vor duce la o creștere anuală treptată a presiunii cererii de produse agricole, cu 50 % în 2030 și cu 59 % până la 98 % în 2050 față de 2005/2007. Agricultorii din întreaga lume vor trebui să crească producția agricolă în condiții de deteriorare a solului, de scădere a disponibilității terenurilor și de fluctuații climatice tot mai mari. Presiunea treptată a cererii de produse agricole impune noi cerințe industriei agricole, atât în ceea ce privește tehnologiile pentru cultivarea culturilor, cât și în ceea ce privește utilajele utilizate. Randamentul culturilor de cereale depinde în mare măsură de calitatea lucrărilor agricole, iar aceasta din urmă depinde de construcția componentelor mașinilor. Principalele tendințe la nivel mondial se referă la adaptarea treptată a mașinilor agricole la nevoile industriei agricole 4.0 (Industria 4.0, Agricultura 4.0) [1, 4, 9, 22]. Atingerea acestui obiectiv implică modernizarea mașinilor și echiparea acestora cu sisteme mecatronice digitale pentru controlul proceselor tehnologice [5, 10, 11, 19], creând astfel posibilitatea creșterii preciziei și vitezei de lucru a mașinilor de semănat fără a modifica construcția dispozitivelor mecanice. Gestionarea digitală a sistemelor mecatronice de distribuție la semănători implică luarea de decizii cu privire la modul în care trebuie să evolueze cantitățile implicate în funcționarea acelui proces și, prin urmare, emiterea de comenzi pentru a asigura evoluția dorită. Deciziile de gestionare pot fi luate numai pe baza informațiilor obținute din cadrul procesului gestionat, informații care se referă la valorile

parametrilor semnificativi pentru caracterizarea procesului. Informațiile respective sunt obținute ca rezultat al unor operațiuni de măsurare.

Uniformitatea fluxului de semințe distribuit de cilindrul canelat este un aspect critic în construcția semănătorii, deoarece determină modul în care semințele sunt semănate de-a lungul rigolei și, prin urmare, poate afecta randamentul culturii. Prin utilizarea unui sistem mecatronic cu control digital, semănătoarea poate asigura un flux uniform de semințe și la o viteză constantă a cilindrului canelat, astfel încât fiecare canelură să distribuie aceeași cantitate de semințe [12, 13]. În plus, senzorii pot fi utilizați pentru a detecta potențiale blocaje sau probleme în fluxul de semințe și pentru a regla parametrii de menținere a uniformitatea distribuției semințelor. În acest sens, instalarea unui sistem mecatronic cu control digital poate îmbunătăți semnificativ uniformitatea distribuției semințelor.

În ciuda numeroaselor studii în acest domeniu [2, 3, 4, 13, 21, 22], există încă multe probleme legate de asigurarea calității funcționale a sistemelor de distribuție. Astfel, conform cercetărilor efectuate în cadrul Laboratorului de Mașini Agricole [6, 7, 8, 22], distribuția neuniformă a semințelor de-a lungul rândului în sistemele de distribuție ale semănătorilor pentru culturi cerealiere poate ajunge până la 70-80% [6, 7, 17, 22]. Această situație este cauzată în principal de procesul de funcționare a dispozitivelor de dozare și a sistemele de transport către organele de încorporare.

Cercetarea efectuată are ca scop reducerea coeficientul de variație al spațiului dintre semințe prin utilizarea unui sistem mecatronic de distribuție a semințelor cu control digital, fără intervenție omului, și utilizarea dispozitivului de dozare și dispozitivului de conversie a fluxului de semințe cu parametrii constructivi modificați, imprimate 3D.

2. MATERIALE ȘI METODE

Pentru a elimina erorile subiective care pot fi comise de cercetător, standul pentru efectuarea experimentelor pe sistemul de distribuție a fost organizat și automatizat în conformitate cu schema de principiu, cu proces automat de organizare a experimentelor (Figura 1).

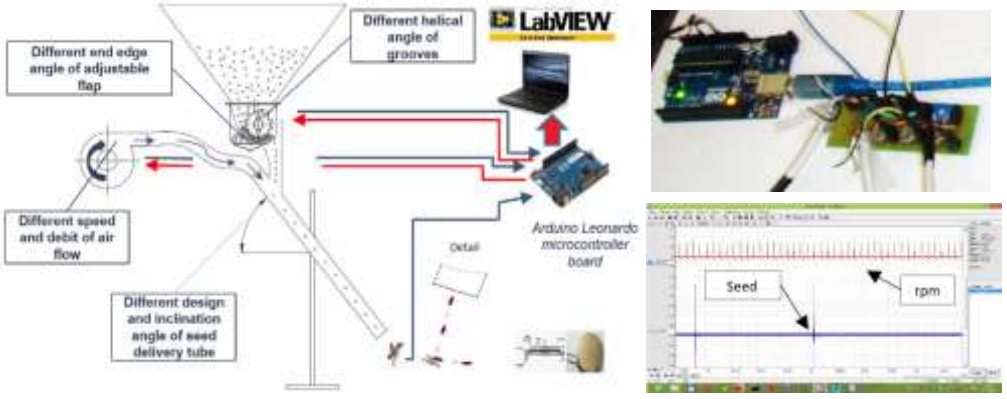


Figura 1. Schema principială de organizare a experiențelor pentru determinarea uniformității distribuției la sistemul mecatronic de distribuție a semințelor cu control digital semințelor.

Experimentele au fost realizate la instalației de cercetare a sistemului de distribuție elaborată în baza schemei principale de organizare a experimentelor în cadrul Laboratorului de Mașini Agricole. Controlul digital al experiențelor a fost efectuat de la calculator prin intermediul plăcilor electronice (microcontroler) de tip Arduino și al software-ului LabVIEW iar întreg procesul de control și achiziție de date la cercetarea experimentală a fost automatizat, iar eroarea umană exclusă.

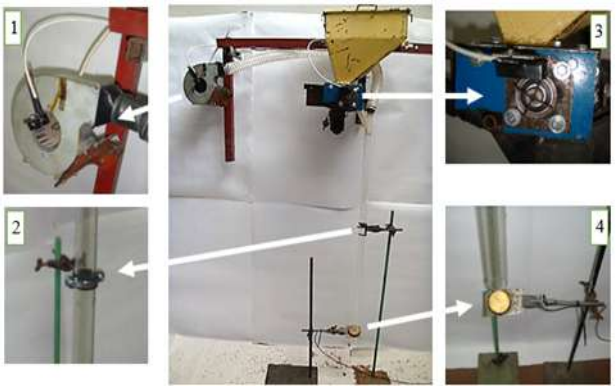


Figura 2. Sistem de distribuție a semințelor mecatronic cu control digital:
1 – ventilator, 2 – tub de refulare din sticlă cu dispozitiv de fixare, 3 – dispozitiv de menținere și înregistrare a rotațiilor arborelui de antrenare a cilindrul canelat, 4 – senzor piezoelectric cu dispozitiv de fixare.

Instalația a fost fixată pe un cadru metalic (Figura 2) la o înălțime de 1,5 metri de podeaua laboratorului pentru a asigura posibilitatea instalării tuburilor de alimentare de dimensiuni reale, precum și o mai bună accesibilitate și vizibilitate. Senzorul piezoelectric (3) este situat în zona de descărcare a semințelor. Controlul digital era realizat prin intermediul plăcii de procesare de tip Arduino Nano 3.0 bazată pe microcontrolerul ATMega 328, conectată la un notebook HP Probook 6310, a fost utilizată pentru a acționa și regla regimurile de funcționare ale motoarelor electrice.

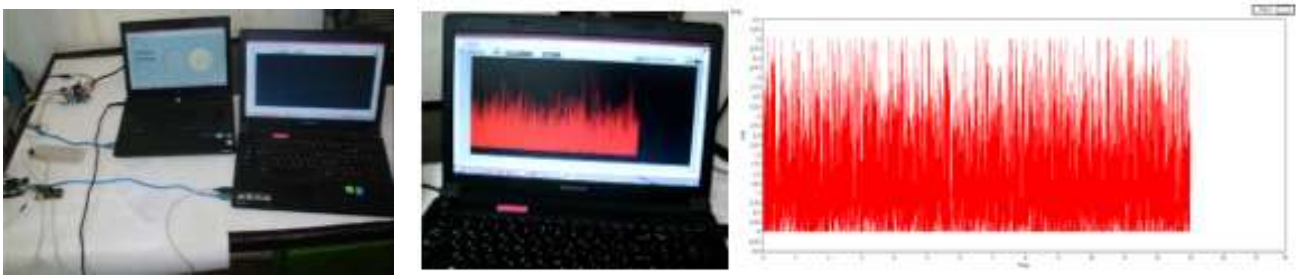


Figura 3. Sistemul automatizat de control și achiziție al sistemului mecatronic.

Motorul de curent continuu de 12-24 V era alimentat și controlat prin modularea lățimii de impuls (PWM) cu un amplificator de semnal de 5 V de la placa de achiziție prin optoizolator de tip 4n35 conectat la tranzistor MOSFET IRF530. Tranzistorul modula curentul care trecea de la sursă la drenaj în funcție de factorul de umplere al curentului aplicat la bază. Achiziția datelor de la senzorul piezoelectric a fost realizată prin placa de procesare Arduino Uno R3.0 (Figura 3) bazată pe microcontrolerul ATMega 328. Pentru a asigura comunicarea între LabVIEW și placa electronică Arduino, codul sursă Linx a fost compilat și încărcat în memoria plăcii electronice din interfața LabVIEW MakerHub.

Codul este prezentat în diagrama bloc (Figura 4), dezvoltat pentru achiziția și prezentarea datelor și reprezintă nodurile programului, precum și structurile decizionale, operatorii matematici, funcțiile de procesare logică prin care aplicația efectua calculele necesare pentru controlul și achiziția de date.

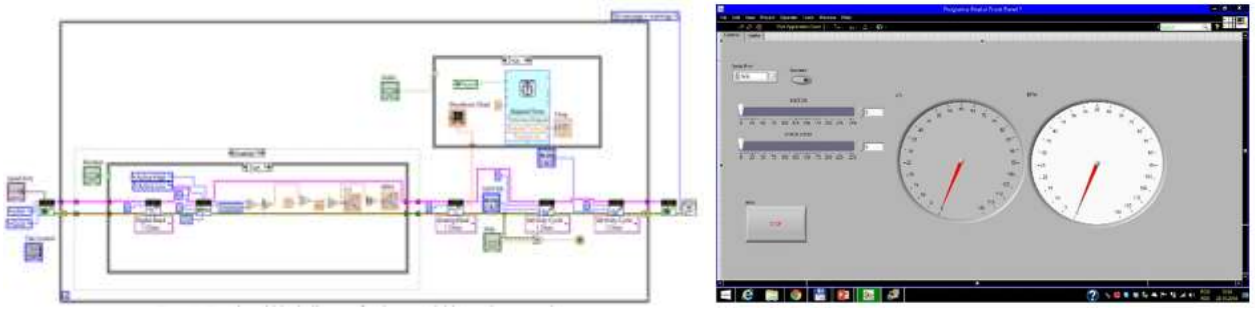


Figura 4. Diagrama bloc și panoul frontal de comandă.

Panoul frontal (Figura 4) constă dintr-un panou de control cu două file. Prima filă este utilizată pentru a controla viteza motorului electric. Pe aceasta sunt amplasate două indicatoare pentru a simula factorul de umplere al tipului de glisieră cu o scală de la 0 la 255.

Piesele fabricate 3D erau proiectate cu ajutorul programului DS Soliworks, au fost exportate în format STL, iar cu ajutorul programului AXON (Figura 5) au fost importate către imprimanta 3D.



Figura 5. Elaborarea elementelor constructive cu imprimanta 3D.

Fabricarea pieselor sistemului de distribuție (Figura 5), care ulterior au fost supuse încercărilor, s-a realizat la imprimanta 3D BfB, cu suprafața de printare 275x275x210 mm. Acest printer 3D permite realizarea modelelor din materiale plastice sau compozite ABS și Polylactic acid (PLA) cu definiție și rezoluție de până la 0,125 mm.

Studiul experimental privind sistemul mecatronic de distribuție cu dispozitivul de recepție și convertire a fluxului de semințe imprimat 3D și transportarea semințelor forțată prin folosirea fluxului de aer cu suprapresiune creată de ventilator a fost efectuat pe instalația experimentală pentru canalul cu sol (Figura 6).



Figura 6. Vederea generală a instalației experimentale pentru canalul cu sol și determinarea uniformității de repartizare a semințelor în rigolă.

La baza încercărilor în canalul cu sol a stat principiul deplasării relative a sistemului de distribuție față de sol. Experiențele în canalul de sol au fost realizate la treapta II, III și a IV (respectiv de 1; 2,1; 3,2

m/s) asigurându-se astfel deplasarea căruciorului cu o viteza de până la 11,2 km/h. Transportarea materialului semincer către brăzdar se efectua atât sub acțiunea gravitației cât și forțat în flux de aer cu suprapresiune, viteza acestuia fiind stabillită la 4; 8 m/s. Frecvența de rotație a cilindrului canelat (n) era setată prin intermediul software-ului LabVIEW instalat în Notebook la 20; 40 și 60 min^{-1}.

3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

3.1. Analiza repartizării semințelor la instalația de laborator.

Datele au fost prelucrate conform metodologiei și prezentate sub formă de diagrame pentru fiecare obiect al cercetărilor la regimurile respective de lucru. În figura 7 este prezentată influența turației cilindrului canelat asupra coeficientului de variație a timpului dintre semințe în funcție de tipul aparatului de distribuție.

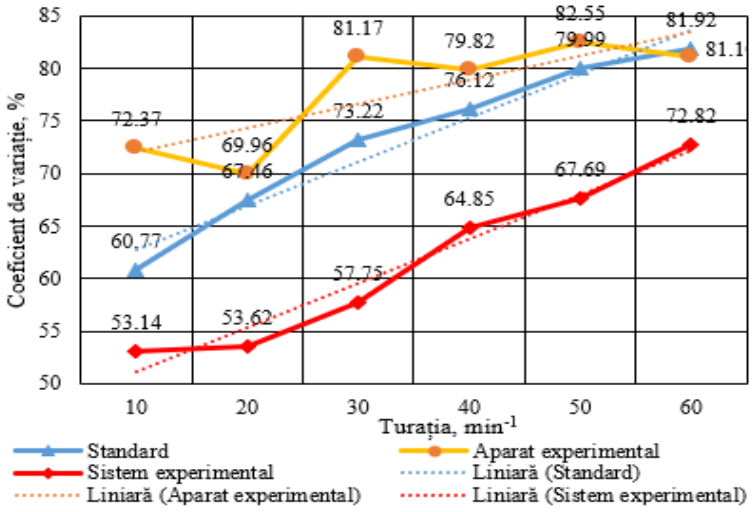


Figura 7. Influența turației asupra coeficientului de variație a timpului dintre semințe în funcție de tipul aparatului utilizat

Din analiza diagramei se observă că, cu cât este mai mare turația cilindrului canelat, cu atât mai mult crește aproximativ liniar coeficientul de variație a timpului la toate cele trei tipuri de aparate de distribuție. Cel mai mare coeficient de variație, în funcție de turație, se atestă la aparatul de distribuție experimental, având o fluctuație mai mare dintre valori la diferite turații. Polilinia formată de aparatul experimental de distribuție are caracterul cel mai puțin ascendent în comparație cu celelalte două tipuri de aparate de distribuție. La o privire pe ansamblu se observă că cele mai mici valori ale coeficientului de variație a timpului sunt la sistemul de distribuție experimental, care formează o linie aproximativ dreaptă, cu caracter ascendent mai puțin pronunțat, în comparație cu aparatul de distribuție standard, pe intervalul turației 10-60 min-1. Valoarea cea mai mică a coeficientului de variație a timpului este 53,14% la turația de 10 min-1 a cilindrului canelat al sistemului de distribuție experimental.

În baza rezultatelor experimentale obținute la cercetarea sistemului de distribuție experimental, în componența căruia intră și dispozitivul de recepție și convertire a fluxului de semințe prin care se refula un flux de aer cu viteze (v_a) în intervalul 0, 2, …8 m/s, la rotații a cilindrului canelat 10 ... 60 rot a fost obținut modelul matematic al frecvenței statistice a coeficientului de variație a distanței dintre semințele distribuite în dependență de valorile factorilor prestabiliți, care se descrie prin următoarea relație:

$$C_v = 54{,}2156 + 0{,}451258 \cdot n + 2{,}33255 \cdot V_a + 0{,}000197568 \cdot n^2 - 0{,}03251 \cdot n \cdot V_a - 0{,}499644 \cdot V_a^2 \quad (1)$$

Din analiza suprafețelor de răspuns (Figura 8) se observă că factorul respectiv tinde să-i atribuie suprafeței de răspuns o formă încovoiată. Valoarea cea mai mică a coeficientului de variație a timpului este atinsă la valoarea maximă a vitezei aerului, de 8 m/s.

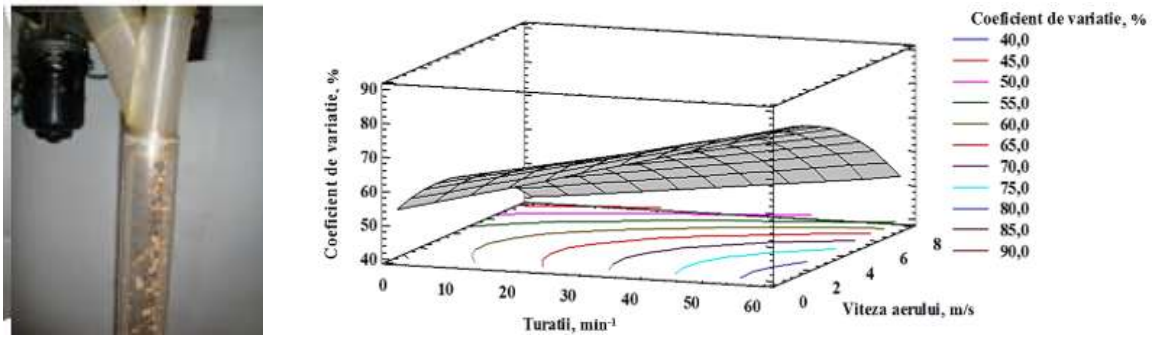


Figura 8. Uniformitatea distribuției semințelor și suprafața de răspuns a coeficientului de variație în raport cu turațiile cilindrului canelat și viteza aerului din tub la sistemul mecatronic

Valoarea optimă a coeficientului de variație a timpului C_v, după minim, este egală cu 42,83% pentru următoarele valori ale factorilor: turații – **10,0 min^{-1}**; viteza aerului – **8,0 m/s**.

3.2. Analiza repartizării boabelor de-a lungul rândului în canalul cu sol.

Rezultatele obținute în urma cercetărilor efectuate la canalul cu sol asupra sistemului de distribuție experimental la diferite regimuri de lucru au fost prelucrate conform metodologiei și prezentate sub formă de diagrame pentru fiecare regim de lucru. Reprezentarea grafică a influenței vitezei aerului din tubul de conducere asupra coeficientului de variație a distanței dintre semințe (Figura 9) este descrisă de o parabolă ale cărei ramuri descresc puțin pe intervalul vitezei aerului 0-4 m/s – de la 30,02% la 28,98%, cu o diferență de un punct procentual, și capătă caracter de creștere accentuat pe intervalul vitezei aerului 4-8 m/s – de la 28,98% la 35,30%, cu o diferență de 7 puncte procentuale.

Rezultatele obținute în urma cercetărilor efectuate la canalul cu sol asupra sistemului de distribuție experimental la diferite regimuri de lucru au fost prelucrate conform metodologiei și prezentate sub formă de diagrame pentru fiecare regim de lucru.

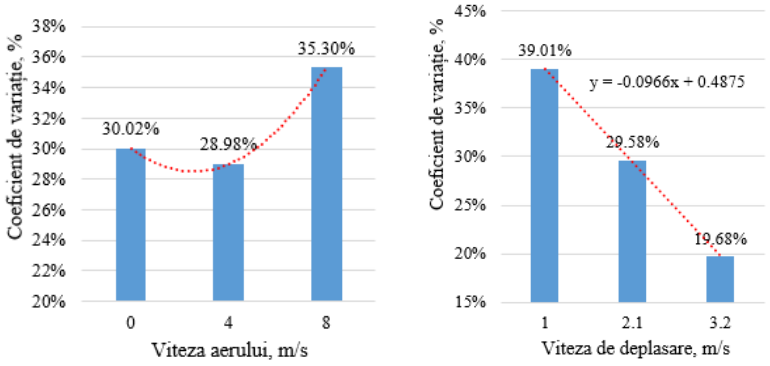


Figura 9. Influența vitezei aerului din tubul de conducere și vitezei de deplasare a căruciorului mobil asupra coeficientului de variație a distanței dintre semințe

Reprezentarea grafică a influenței vitezei aerului din tubul de conducere asupra coeficientului de variație a distanței dintre semințe (Figura 9) este descrisă de o parabolă ale cărei ramuri descresc puțin pe intervalul vitezei aerului 0-4 m/s – de la 30,02% la 28,98%, cu o diferență de un punct procentual, și capătă caracter de creștere accentuat pe intervalul vitezei aerului 4-8 m/s – de la 28,98% la 35,30%, cu o diferență de 7 puncte procentuale.

O vizualizare mai reprezentativă a influenței vitezei aerului la cele trei viteze de deplasare a căruciorului asupra coeficientului de variație a distanței dintre semințe este prezentată în figura 10.

Din analiza diagramei se observă că coeficientul de variație a distanței dintre semințe este descris de o funcție liniară descendentă în funcție de viteza de deplasare a căruciorului mobil la toate trei viteze ale aerului, de 0, 4 și 8 m/s.

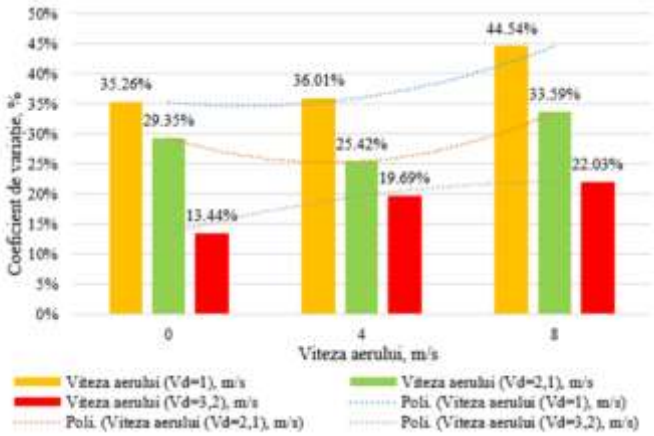


Figura 10. Influența vitezei aerului la diferite viteze de deplasare a căruciorului experimental asupra coeficientului de variație a distanței dintre semințe

Un caracter mai pronunțat de descreștere se observă la viteza aerului de 0 m/s, unde coeficientul de variație a distanței dintre semințe scade de la 35,26%, la viteza de deplasare 1 m/s, la 29,35%, la viteza de deplasare 2,1 m/s, adică cu 6 puncte procentuale, până la 13,44% la viteza de deplasare 3,2 m/s, ceea ce înseamnă o scădere cu aproximativ 16 puncte procentuale. Cele mai mici valori ale coeficientului de variație a distanței dintre semințe sunt la viteza de deplasare a căruciorului mobil de 3,2 m/s pe tot intervalul vitezei aerului de la 8 m/s – 22,03 %, 4 m/s – 19,69 % și 0 m/s – 13,44 %.

În baza rezultatelor experimentale obținute la cercetarea sistemului de distribuție experimental, în componența căruia intră și dispozitivul de recepție și convertire a fluxului de semințe prin care se refula un flux de aer cu viteze (v_a) în intervalul 0, 2, …8 m/s, la deplasarea acestuia față de suprafața solului cu ajutorul căruciorului mobil la viteze (v_d) de 1, 2,1 și 3,2 m/s, a fost obținut modelul matematic al frecvenței statistice a coeficientului de variație a distanței dintre semințele distribuite în dependență de valorile factorilor prestabiliți, care se descrie prin următoarea relație:

$$C_v = 54{,}2156 + 0{,}451258 \cdot \mathrm{n} + 2{,}33255 \cdot V_a + 0{,}000197568 \cdot n^2 - 0{,}03251 \cdot n \cdot V_a - 0{,}499644 \cdot V_a^2 \quad (2)$$

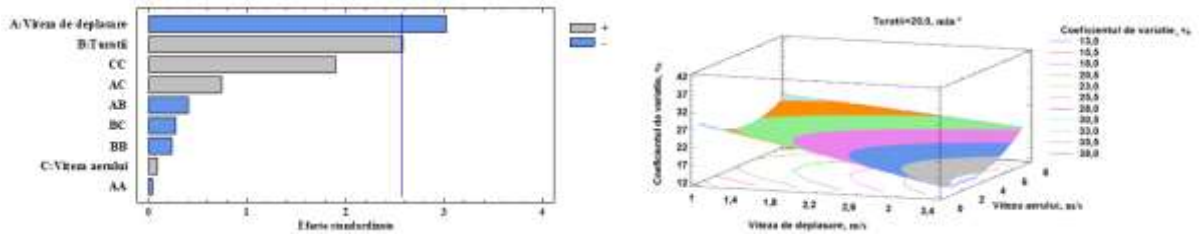


Figura 11. Diagrama standardizată a lui Pareto și estimarea evoluției coeficientului de variație a distanței dintre semințe în raport cu viteza de deplasare a căruciorului experimental și viteza aerului din tub.

Valoarea optimă a coeficientului de variație Cv, după minim, este egală cu 13,38 % pentru următoarele valori ale factorilor: viteza de deplasare – 3,2 m/s; turații – 10,0 min-1; viteza aerului – 2,9 m/s.

CONCLUZII

1. Datorită dispozitivului de recepție și convertire imprimat 3D se micșorează diametrul secțiunii transversale a fluxului de semințe la evacuare din tubul de conducere, care este egal sau mai mic de 20 mm, iar axa repartizării fluxului de semințe este orientată de-a lungul axei rigolei, ceea ce duce la o suprafață de repartizare a semințelor mai mică și mai uniformă de-a lungul rigolei.
2. Pentru a soluționa problema coordonării procesului de dozare a semințelor și transportarea acestora de-a lungul tuburilor de conducere viteza aerului în tubul de conducere a semințelor nu trebuie să o depășească pe cea critică și să fie în intervalul 4-8 m/s [18].
3. Reducerea timpului deplasării semințelor prin tubul de conducere permite majorarea vitezei de deplasare a agregatului cel puțin până la 3,2 m/s (12 km/h).
4. Rezultatele cercetărilor, efectuate asupra sistemului mecatronic de distribuție a semințelor, arată că dispozitivul experimental imprimat 3D, viteza aerului, și viteza de deplasare de 3,2 m/s, reduce coeficientul de variație al uniformității distribuției până la 13–22%.
5. Toate cel menționate mai sus contribuie la îmbunătățirea calității semănatului și, implicit, la creșterea productivității, la reducerea costurilor și pierderilor în producția culturilor cerealiere.

REFERINȚE:

1. LEZOCHE, M., HERNANDEZ, J., ALEMANY D., MARIA DEL MAR E., PANETTO, H., KACPRZYK, J. Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. In: Global Food Security: Elsevier B.V., vol. 117, 2020, 103187. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103187.
2. SUGIRBAY, A. M., ZHAO, J., NUKESHEV, S. O., CHEN, J. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming. Computers and Electronics in Agriculture, 179, 2020,105835. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105835.
3. XI, X., GU, C., SHI, Y., ZHAO, Y., ZHANG, Y., ZHANG, Q., JIN, Y., ZHANG, R. Design and experiment of no-tube seeder for wheat sowing. Soil and Tillage Research, 204, 2020, 104724. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2020.104724.
4. XIE, C., YANG, L., ZHANG, D., CUI, T., ZHANG, K., HE, X., DU, Z. Design of smart seed sensor based on microwave detection method and signal calculation model. Computers and Electronics in Agriculture, 199, 2022, 107178. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2022.107178.
5. XIE, C., ZHANG, D., YANG, L., CUI, T., YU, T., WANG, D., XIAO, T. Experimental analysis on the variation law of sensor monitoring accuracy under different seeding speed and seeding spacing. Computers and Electronics in Agriculture, 189, 2021, 106369. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2021.106369.
6. GHEORGHIȚA, A., SERBIN, V. Influenţa unghiului de orientare a canelurilor asupra masei seminţelor distribuite la aparatele de distribuţie cu cilindru canelat. Chişinău: s.n., 2013. pp. 108-112. ISSN 1857-0003.
7. GHEORGHIȚA, A. Rezultatele testării în cîmp a aparatului de distribuție cu cilindri canelați modernizați. Chișinău: Centrul editorial al UASM, 2013. pp. 83-87. Vol. 38. ISBN 978-9975-64-125-8.

8. GHEORGHIŢA, A., SERBIN, VL., BUMACOV, V., GOROBEŢ, V., GADIBADI, M. Aparat de semănat cu cilindru canelat. 989 Moldova, 06 02, 2015. BOPI nr. 1/2016.
9. KLERKX, L., DAVID, R. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?. In: International Journal: Elsevier B.V., vol. 24, 2020, pp. 100-107. ISSN 2211-9124. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347.
10. CHEN, C., HE, P., ZHANG, J., LI, X., REN, Z., ZHAO, J., HE, J., WANG, Y., LIU, H., KANG, J. A fixed-amount and variable-rate fertilizer applicator based on pulse width modulation. Computers and Electronics in Agriculture, 148, 2018, pp. 330–336. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.03.033.
11. HE, X., CUI, T., ZHANG, D., WEI, J., WANG, M., YU, Y., LIU, Q., YAN, B., ZHAO, D., YANG, L. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm. Computers and Electronics in Agriculture, 136, 2017, pp. 184–192. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.01.028.
12. GHEORGHIȚA, A. Optimizarea unghiului de orientare a canelurilor după masa semințelor distribuită la aparatele cu cilindri canelați. În: Lucrări ştiinţifice, UASM. Chişinău, 2013, vol. 38 (Inginerie Agrară și Transport Auto) p. 79-83, 0,2 c.a. ISBN 978-9975-64-251-4.
13. HU, J., ZHAO, X., LIU, W., YAO, M., & ZHAO, J. Development of a Seeding Control Method Based on Seed Height in the Hopper of a Precision Wheat Drill. Applied Engineering in Agriculture, 37(6), 2021, pp. 1131–1138. https://doi.org/10.13031/AEA.14441.
14. HUANG, J. Y., YANG, L. W., ZHANG, J. Q., HU, H., LIU, G. Granular Fertilizer Mass Flow Measurement and Vehicle Experiments Based on Microwave Doppler Method. Applied Engineering in Agriculture, 37(1), 2021, pp. 135–147. https://doi.org/10.13031/AEA.14013.
15. GHEORGHIŢA, A. Influence of seed tube inclination angle and air velocity on the seed flow dosed by devices with fluted rolle. In: Știința Agricolă, nr. 2, 2020, pp. 85-90. ISSN 1857-0003. DOI: 10.5281/zenodo.4321214
16. JIANG, M., LIU, C., DU, X., HUANG, R., DAI, L., YUAN, H. Research on continuous granular material flow detection method and sensor. Measurement, 182, 2021, 109773. https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109773.
17. SERBIN, VL., GHEORGHIŢA, A. Justification of the seed drill machines wheel parameters under the condition of rotation uniformity. In: Știința Agricolă. 2022, nr. 2. ISSN 1857-0003.10.5281.
18. KARAYEL, D., WIESEHOFF, M., ÖZMERZI, A., MÜLLER, J. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system. Computers and Electronics in Agriculture, 50(2), 2006, pp. 89–96. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2005.05.005.
19. KARIMI, H., NAVID, H., BESHARATI, B., BEHFAR, H., ESKANDARI, I. A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection. Computers and Electronics in Agriculture, 142, 2017, pp. 165–172. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.08.027.
20. KUŞ, E. Seed Damage Test for Roller-Type Device Designed at Different Flute Helical Angles. Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi, 7(3), 2021, pp. 495–502. https://doi.org/10.24180/IJAWS.938870.
21. SERBIN, V., GHEORGHIŢA, A. Theoretical researches of seed movement in radial seed tube. In: Ştiinţa Agricolă, nr. 2, 2019, pp. 103-108. ISSN 1857-0003. DOI: 10.5281/zenodo.3611185
22. GHEORGHITA, A., STIOPCA, O., PLATON, A. Evaluation of seed flow uniformity distributed by seed drill inclined fluted roller at computer aided instalation. ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING, [S.l.], v. 67, n. 2S, oct. 2024. ISSN 2393–2988. https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2428.

CZU: 631.331 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.08**

CALCULUL TRAIECTORIEI DE ZBOR A SEMINȚEI PRIN TUBUL DE CONDUCERE MODERNIZAT

CALCULATION OF SEED FLIGHT TRAJECTORY THROUGH A MODERNIZED SEED DELIVERY TUBE

Andrei GHEORGHIȚA[1] ORCID ID: 0000-0003-2890-993X
Marin GUȚU[2] ORCID ID: 0000-0002-3745-0289
Alexandru BANARI[3] ORCID ID: 0000-0001-9132-610X

[1]Universitatea Tehnică a Moldovei, Institutul Național de Cercetări Aplicative în Agricultură și Medicină Veterinară, Chișinău, Republica Moldova
[2, 3] Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

Abstract. *One of the factors that disrupt the normal functioning of the technological process of the seed drill when the working speed exceeds 9 km/h is the long travel distance of the seeds through the seed tube. This issue is most noticeable when sowing cereal crops, where the distribution system must ensure forced seed delivery to the bottom of the furrow. The paper presents a mathematical model of seed movement through the modernized delivery tube, aimed at improving the uniformity of seed distribution in the furrow. The study highlights the influence of air resistance and repeated collisions with the inner walls of the tube on the trajectory and velocity of the seeds. Parametric equations of motion were formulated, describing both the ricochet of the seed from the tube wall and its flight trajectory until exiting the tube. The results show that the seed exit velocity is approximately 1.73 m/s, and the flight distance is about 910–912 mm, regardless of the initial entry height into the delivery tube. The importance of using a pressurized airflow is also emphasized, as it reduces transport time and stabilizes the seed flow, enabling an increase in the technological working speed when sowing cereal crops.*
Keywords: *flight path, delivery tube, seed drill, precision agriculture, distribution uniformity.*

1. INTRODUCERE

Actualmente, chiar dacă agricultura 4.0 ne oferă tehnologii noi precum drone și agroboți pentru agricultura inteligentă, în mare parte pentru efectuare proceselor tehnologice agricole de înființarea culturilor agricole sunt utilizate sisteme mecatronice cu dispozitive electro-pneumo-mecanice de dozare a semințelor[1, 3, 9, 13, 14, 17, 18]. Unul din factorii care duc la perturbarea funcționării normale a procesului tehnologic al semănătorii la majorarea vitezei de lucru este distanța mare de deplasare a semințelor prin tubul de semănat. Cercetările efectuate privind sistemele de distribuție arată că pentru îmbunătățirea uniformității de distribuție a semințelor în brazdă este necesar de a reduce în mod semnificativ timpul în care semințele trec prin în tubul de conducere [1, 8, 16, 17]. S-a dovedit că, odată cu creșterea vitezei de mișcare a semănătorii, are loc subdozare și distribuirea inegală a semințelor pe suprafața solului, din cauza întârzierii în alimentarea cu semințe a dispozitivelor de dozare.

Această problemă se observă cel mai acut la cultivarea culturilor de cereale, a căror productivitate depinde în cea mai mare măsură de suprafața cultivată.

Astfel, la deplasarea mașinii de semănat cu o viteză mai mare de 9 km/h, sistemul de distribuție trebuie să asigure o alimentare forțată cu semințe pe fundul brazdei [2, 4, 5, 8, 10]. Prin urmare, pentru a

face o alegere rezonabilă a regimurilor de lucru ale semănătorii și pentru a le gestiona corect, este necesar să se dispună de date privind modelele de mișcare a semințelor prin tuburile de semănat.

2. MATERIALE ȘI METODE

Obiectul cercetării este sistemul de dozare și transportare a semințelor, dotat cu aparate de distribuție cu cilindru canelat, destinat semănatului culturilor cerealiere. Metodologia de cercetare include dezvoltarea unui model matematic al deplasării semințelor prin tubul de conducere în condiții de transport forțat în curent de aer cu suprapresiune și elaborarea programei care să permită analiza vitezei de deplasare a semințelor [6,12,15]. În baza modelului matematic a fost obținută și argumentată teoria suprafeței active de lucru ai cilindrului canelat și ai dispozitivului de recepție și convertire.

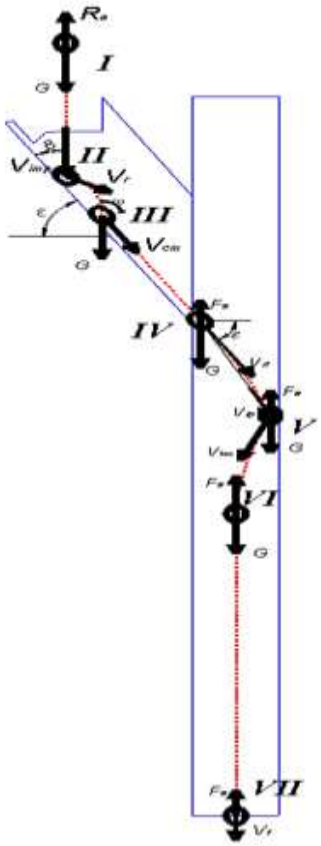


Figura 1. Schema de mișcare a seminței cu rezistența aerului

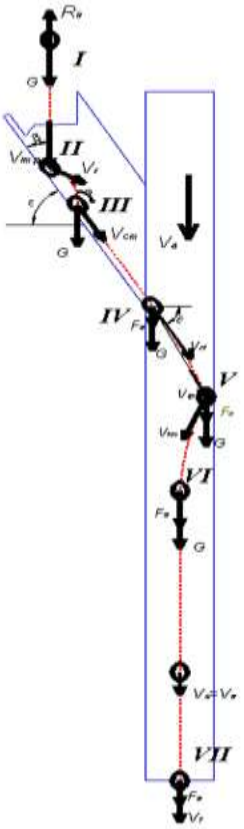


Figura 2. Schema de mișcare a seminței cu forța portantă a aerului

Dirijarea fluxului de semințe dozate spre brăzdarele mașinilor de semănat se realizează prin intermediul dispozitivelor de transportare sau al tuburilor de conducere. Acestea fac legătura dintre un element fix al mașinii de semănat (aparatul de distribuție) și un element mobil (brăzdarul) care în timpul lucrului își schimbă continuu poziția față de cadrul mașinii pentru a se adapta la neregularitățile terenului.

În timpul trecerii semințelor prin tuburile de conducere, fluxul de semințe suferă o modificare calitativă cauzată de modificarea regimului de mișcare a semințelor, urmare a ciocnirilor repetate cu pereții interiori ai tubului.

Influența ciocnirilor semințelor cu pereții tubului asupra uniformității fluxului de semințe va fi redusă la minimum în tuburile la care condițiile de producere a ciocnirilor repetate, precum și efectul lor vor fi eliminate.

Pentru alimentarea forțată, la fundul brazdei este folosită energia fluxului de aer. Aceasta comunică viteză suplimentară și energie cinetică materialului semincer, favorizând deplasarea prin tubul de conducere și învingând rezistența forțelor care apar în timpul deplasării. Există astfel oportunitatea de a mări calitatea de repartizare prin uniformizarea fluxului de semințe și micșorarea numărului de ciocniri cu peretele tubului și de a reduce timpul de transportare către zona de acoperire a brazdei.

Studiul deplasării seminței se desfășoară luând în considerare modificările în condițiile mișcării la șapte poziții, după cum se arată în figura 1 și figura 2.

Influența forței fluxului asupra seminței este condiționată de rezistența aerului, asociată cu fluxul de aer în jurul seminței, care generează forța motrică direcționată de-a lungul axei longitudinale a fluxului.

3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

3.1. Impactul bobului cu peretele interior al tubului de conducere

Viteza mișcării bobului după ricoșare de la peretele interior al tubului de conducere reprezintă suma a două mișcări individuale – mișcarea cu accelerație gravitațională pe verticală și mișcarea liniară pe orizontală.

Viteza semințelor v_{tm} (Figura 3) după punctul de impact cu peretele interior al tubului poate fi calculată cu ajutorul produsului dintre v_{ip}, calculată la deplasarea seminței între pozițiile IV și V, și coeficientul de recuperare a vitezei la impact. Făcând înlocuirile în formula, ecuația poate fi scrisă astfel:

$$v_{tm} = v_{ip} \sin \gamma_{tm} \sqrt{1 + k^2 \operatorname{ctg}^2 \gamma_{tm}} \leq v_{ip} \qquad (1)$$

unde γ_{tm} – unghiul dintre orizontală și vectorul vitezei seminței după ricoșare.

Unghiul dintre orizontală și vectorul vitezei seminței după ricoșare de la peretele interior γ_{tm} poate fi calculat după modelul formulelor (3.1), iar ecuația va avea forma:

$$\gamma_{tm} = 90 - arctg(k \cdot \operatorname{tg}(90 - \gamma_{ip})). \qquad (2)$$

Înlocuind termenii ecuațiilor (1) și (2) cu valorile cunoscute, putem afla valoarea unghiului dintre orizontală și vectorul vitezei după ricoșare γ_{tm} și valoarea vitezei seminței v_{tm} după punctul de impact cu peretele interior al tubului, calculate în funcție de înălțimea de cădere. Variația acestora este prezentată în figura 4.

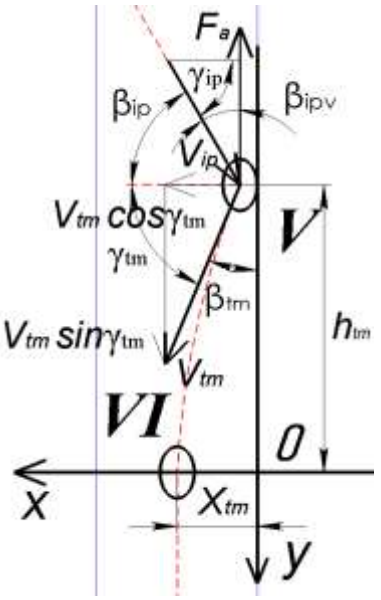


Figura 3. Schema de mișcare a seminței la poziția V

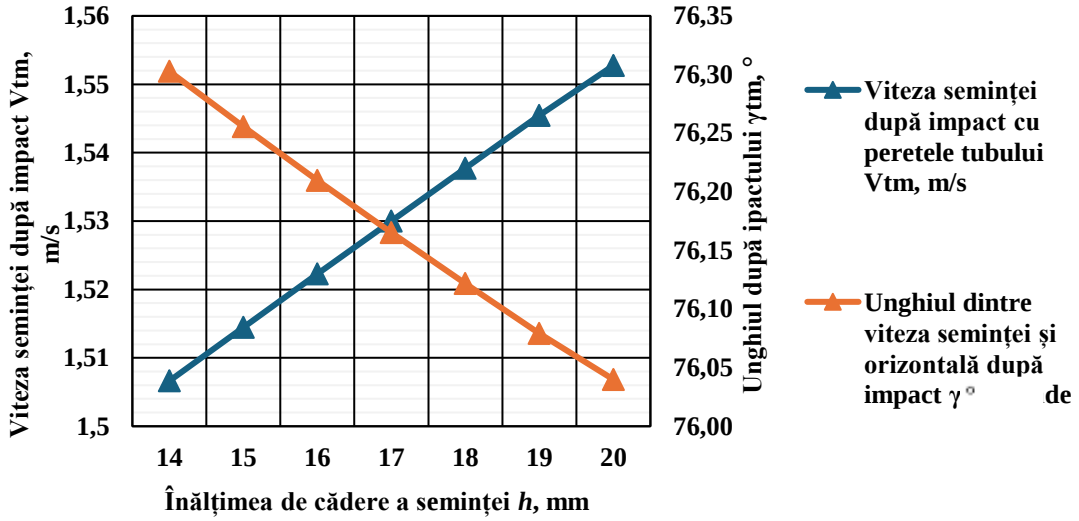


Figura 4. Variația vitezei seminței și a unghiului după impact în funcție de înălțimea de cădere a seminței

3.1. Calculul traiectoriei de zbor a seminței după ciocnire cu peretele interior al tubului de conducere (sectorul V–VI)

Pentru a determina ecuația traiectoriei de zbor a seminței după ricoșarea acesteia de la peretele interior al tubului sub un unghi γ_{tm} față de orizontală vom utiliza legea de mișcare aplicată pentru un punct material (bobul) de masă m, aruncat în câmp gravitațional de la înălțimea h, cu viteza $\overrightarrow{v_{tm}}$, care face cu orizontala unghiul γ_{tm}. Se va lua în considerare și forța aerului, reprezentată prin rezistența mediului, de forma $R_z = -cv$.

Înlocuind aceste valori și constantele în ecuația de mai sus, vom obține legea de mișcare:

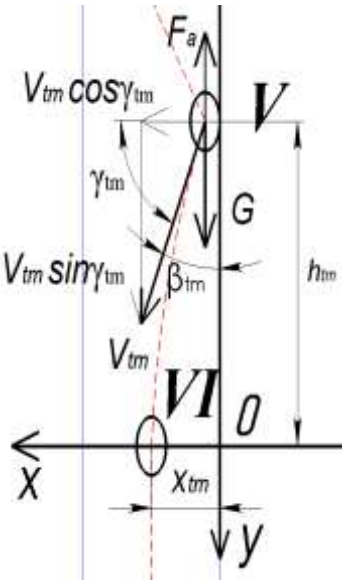


Figura 5. Schema de mișcare a seminței la poziția V–VI

$$\begin{cases} v_x = \dot{x} = v_{tm}\cos\gamma_{tm}\, e^{-\mu t} \\ v_y = \dot{y} = \left(v_{tm}\sin\gamma_{tm} - \dfrac{g}{\mu}\right) e^{-\mu t} + \dfrac{g}{\mu}. \\ v_z = \dot{z} = 0 \end{cases} \qquad (3)$$

Ecuațiile parametrice ale traiectoriei de zbor în funcție de timp vor fi:

$$\begin{cases} x = \dfrac{v_{tm}}{\mu}\cos\gamma_{tm}\,(1 - e^{-\mu t}) \\ y = -h_{tm} + \dfrac{1}{\mu}\left(v_{tm}\sin\gamma_{tm} - \dfrac{g}{\mu}\right)(1 - e^{-\mu t}) + \dfrac{g}{\mu}t' \\ z = 0 \end{cases} \tag{4}$$

care reprezintă ecuația unei parabole ce se găsește în planul *z = 0* (traiectoria este o curbă parabolică cu ramura îndreptată în jos). Conform ecuației (4), bobul va avea o mișcare curbilinie.

În momentul atingerii mijlocului distanței x_{tm} dintre pereții interiori ai tubului de conducere, valoarea coordonatei pe axa *y* în sistemul de coordonate va fi $y = 0$. Pentru a calcula timpul caracteristic acestui moment ar trebui să fie exclus din ecuația de mișcare pe axa *x*, timpul *t* și se obține:

$$t = -\frac{1}{\mu}\ln\left(1 - \frac{\mu}{v_{tm}\cos\gamma_{tm}}x_{tm}\right). \tag{5}$$

Obținând *t* și înlocuind această expresie în (4), obținem ecuația necesară a traiectoriei pentru momentul când $y = 0$, iar distanța pe axa orizontală x_{tm} va fi la mijlocul distanței dintre pereții tubului de conducere, în funcție de caracteristicile constructive. Prin urmare, egalând cu zero ecuația (4) și rezolvând-o în funcție de înălțimea la care bobul va atinge peretele la distanța x_{tm}, vom obține:

$$h_{tm} = \left(\tan\gamma_{tm} - \frac{g}{\mu v_{tm}\cos\gamma_{tm}}\right)x_{tm} - \frac{g}{\mu^2}\ln\left(1 - \frac{\mu}{v_{tm}\cos\gamma_{tm}}x_{tm}\right). \tag{6}$$

Viteza seminței la distanța x_{tm} poate fi calculată prin înlocuirea timpului caracteristic acestui moment în formulele vitezelor (3) din sistemul de ecuații pentru traiectoria de zbor:

$$\begin{cases} v_{mx} = v_{tm}\cos\gamma_{tm} - \mu x_{tm} \\ v_{my} = v_{tm}\sin\gamma_{tm} - \mu x_{tm}\tan\gamma_{tm} + \dfrac{g}{v_{tm}\cos\gamma_{tm}}x_{tm} \end{cases} \tag{7}$$

Luând în considerare că componenta vitezei după axa Ox este, în tot timpul mișcării, constantă rezultă:

$$\begin{aligned} v_m &= \sqrt{v_{mx}^2 + v_{my}^2} = \\ &= \sqrt{(v_{tm}\cos\gamma_{tm} - \mu x_{tm})^2 + \left(v_{tm}\sin\gamma_{tm} - \mu x_{tm}\tan\gamma_{tm} + \frac{g}{v_{tm}\cos\gamma_{tm}}x_{tm}\right)^2}. \end{aligned} \tag{8}$$

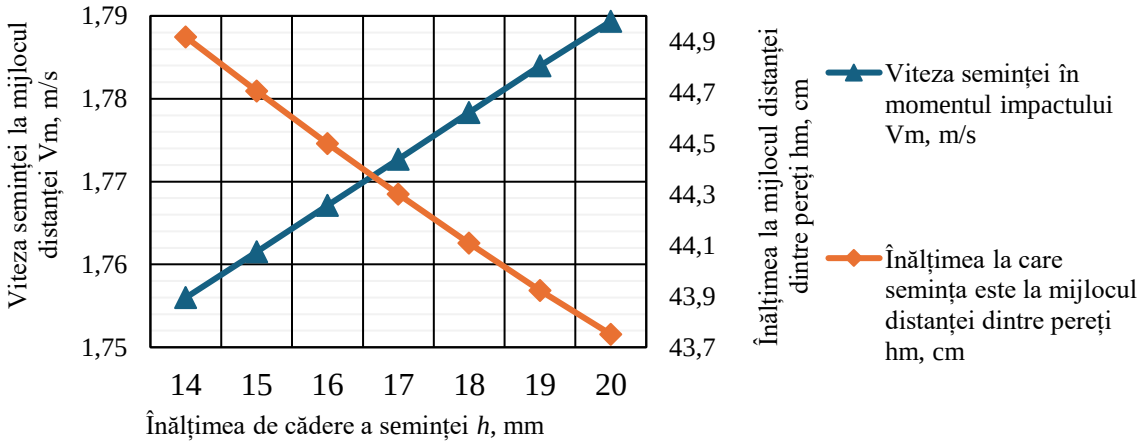


Figura 6. Variația vitezei seminței și a înălțimii la mijlocul distanței dintre pereții interiori ai tubului de conducere în funcție de înălțimea de cădere a seminței la poziția I–II

Astfel, cunoscând mijlocul distanței dintre pereții interiori ai tubului de conducere pe axa OX, adică x_{tm}, putem calcula înălțimea la care bobul va atinge această distanță și valoarea vitezei bobului v_m prin înlocuirea termenilor în ecuațiile (8) și (6). Variația valorilor vitezei în momentul când bobul atinge mijlocul distanței dintre pereții laterali v_m și înălțimea h_m, calculate în funcție de înălțimea de cădere a seminței la poziția I–II, este prezentată în figura 6.

3.3. Legea deplasării seminței prin tubul de conducere (poziția VI–VII)

Pentru a determina ecuația traiectoriei de zbor a seminței după ricoșarea acesteia de la peretele interior al tubului sub un unghi γ_m față de orizontală vom utiliza legea de mișcare aplicată pentru un punct material (bobul) de masa m (Figura 7), aruncat în câmp gravitațional de la înălțimea h, cu viteza $\overrightarrow{v_m}$. Se va lua în considerare și forța aerului, reprezentată prin rezistența mediului, de forma $R_z = -cv$.

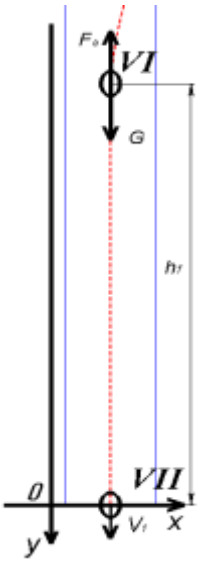


Figura 7. Schema de mișcare a seminței la poziția VI–VII

Înlocuind aceste valori și constantele în ecuația (3), vom obține legea de mișcare:

$$v_f = \dot{y} = \left(v_m - \frac{g}{\mu}\right) e^{-\mu t} + \frac{g}{\mu}. \qquad (9)$$

Ecuațiile parametrice ale traiectoriei de zbor în funcție de timp sunt:

$$y = -h_f + \frac{1}{\mu}\left(v_m - \frac{g}{\mu}\right)(1 - e^{-\mu t}) + \frac{g}{\mu}t, \qquad (10)$$

care reprezintă ecuația liniară ce se găsește în planul $x = 0$, $z = 0$ (traiectoria este o linie dreaptă).

În momentul ieșirii seminței din tubul de conducere vf, valoarea coordonatei pe axa y în sistemul de coordonate va fi $y = 0$. Prin urmare, egalând cu zero ecuația (10) și rezolvând-o în funcție de înălțimea maximă la care bobul va ieși din tubul de conducere h_f, vom obține:

$$h_f = \frac{1}{\mu}\left(v_m - \frac{g}{\mu}\right)(1 - e^{-\mu t}) + \frac{g}{\mu}t. \qquad (11)$$

Astfel, cunoscând distanța până la ieșirea seminței din tubul de conducere h_f, putem calcula vitezei bobului v_f prin înlocuirea termenilor ecuațiilor (9) și (11). Variația valorilor vitezei în momentul ieșirii bobului v_f și înălțimea h_f, calculate în funcție de înălțimea de cădere a seminței la poziția I–II, este prezentată în figura 8.

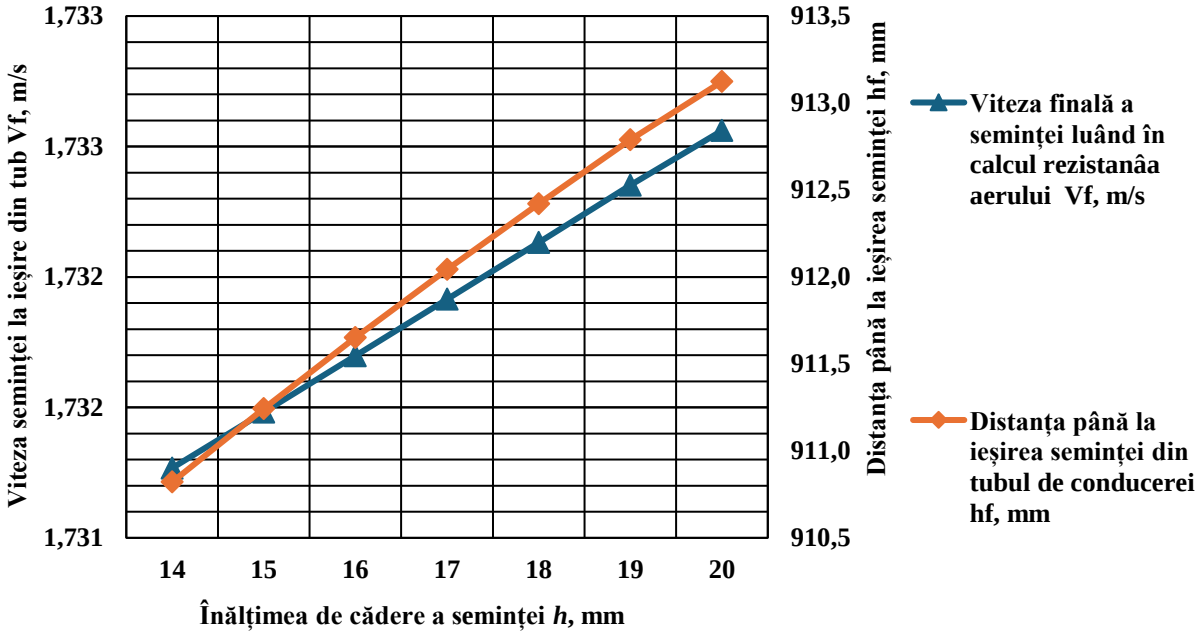


Figura 8. Variația vitezei seminței și a distanței la ieșirea seminței din tub în funcție de înălțimea de cădere a seminței la poziția I–II

În sectorul de distribuție, bobul iese din tubul de conducere nimerind în zona de încorporare în sol, unde este fixat de un strat de pământ, oprind astfel mișcarea seminței.

CONCLUZII

1. Viteza seminței la ieșire din tubul de conducere după parcurgerea distanței de h_f = 910 – 912 mm este aproximativ egală cu V_f= 1,73 m/s, iar înălțimea de cădere până la intrare în tubul de conducere este nesemnificativă.

2. În articol, este calculat teoria mișcării semințelor prin tubul de conducere, se demonstrează teoretic, modelul constructiv-tehnologic al mișcării materialului de însămânțare și se prezintă rezultatele aprioristice ale cercetărilor, care vor permite creșterea vitezei tehnologice de lucru la semănatul culturilor.

3. În scopul reducerii influenței asupra procesului de deplasare a semințelor către locul de însămânțare și a neuniformității care apare la distribuirea semințelor de către dispozitivul de însămânțare cu cilindru canelat, este recomandat accelerarea procesului de transport al semințelor într-un flux de aer cu presiune excesivă.

REFERINȚE:

1. ABDOLAHZARE, Z.; MEHDIZADEHB, S. A. Real time laboratory and field monitoring of the effect of the operational parameters on seed falling speed and trajectory of pneumatic planter. Elsevier BV, International Journal, v. 145, pp. 187-198, 2018. ISSN 0168-1699.

2. SUGIRBAY, A. M., ZHAO, J., NUKESHEV, S. O., CHEN, J. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming. Computers and Electronics in Agriculture, 179, 2020, 105835. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105835.
3. XI, X., GU, C., SHI, Y., ZHAO, Y., ZHANG, Y., ZHANG, Q., JIN, Y., ZHANG, R. Design and experiment of no-tube seeder for wheat sowing. Soil and Tillage Research, 204, 2020, 104724. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2020.104724.
4. TUDOR, A. Mașini Agricole. Manualul universitar pentru învățământ la distanță. Craiova: Universitatea din Craiova, 2010.
5. XIE, C., ZHANG, D., YANG, L., CUI, T., YU, T., WANG, D., XIAO, T. Experimental analysis on the variation law of sensor monitoring accuracy under different seeding speed and seeding spacing. Computers and Electronics in Agriculture, 189, 2021, 106369. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2021.106369.
6. GHEORGHIȚA, A., SERBIN, V. Influenţa unghiului de orientare a canelurilor asupra masei seminţelor distribuite la aparatele de distribuţie cu cilindru canelat. Chișinău: s.n., 2013. pp. 108-112. ISSN 1857-0003.
7. GHEORGHIȚA, A. Rezultatele testării în cîmp a aparatului de distribuție cu cilindri canelați modernizați. Chișinău: Centrul editorial al UASM, 2013. pp. 83-87. Vol. 38. ISBN 978-9975-64-125-8.
8. GHEORGHIȚA, A., SERBIN, VL., BUMACOV, V., GOROBEȚ, V., GADIBADI, M. Aparat de semănat cu cilindru canelat. 989 Moldova, 06 02, 2015. BOPI nr. 1/2016.
9. KLERKX, L., ROSE, D. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?. In: International Journal: Elsevier B.V., vol. 24, 2020, pp. 100-107. ISSN 2211-9124. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347.
10. KHOSHTAGHAZA, M.H., MEHDIZADEH, R. Aerodynamic property of wheat kernel and straw materials, v. III, 2006.
11. GHEORGHIȚA, A. Optimizarea unghiului de orientare a canelurilor după masa semințelor distribuită la aparatele cu cilindri canelați. În: Lucrări ştiinţifice, UASM. Chişinău, 2013, vol. 38 (Inginerie Agrară și Transport Auto) pp. 79-83, 0,2 c.a. ISBN 978-9975-64-251-4.
12. GHEORGHIȚA, A. Influence of seed tube inclination angle and air velocity on the seed flow dosed by devices with fluted rolle. In: Ştiinţa Agricolă, nr. 2, 2020, pp. 85-90. ISSN 1857-0003. DOI: 10.5281/zenodo.4321214.
13. SERBIN, VL., GHEORGHIȚA, A. Justification of the seed drill machines wheel parameters under the condition of rotation uniformity. In: Ştiinţa Agricolă. 2022, nr. 2. ISSN 1857-0003.10.5281.
14. JIANG, M., LIU, C., DU, X., HUANG, R., DAI, L., YUAN, H. Research on continuous granular material flow detection method and sensor. Measurement, 182, 2021, 109773. https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109773.
15. SERBIN, V., GHEORGHIȚA, A. Theoretical researches of seed movement in radial seed tube. In: Ştiinţa Agricolă, nr. 2, 2019, pp. 103-108. ISSN 1857-0003. DOI: 10.5281/zenodo.3611185.
16. GHEORGHITA, A., STIOPCA, O., PLATON, A. Evaluation of seed flow uniformity distributed by seed drill inclined fluted roller at computer aided instalation. ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING, [S.l.], v. 67, n. 2S, oct. 2024. ISSN 2393–2988. https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2428.
17. HE, X., CUI, T., ZHANG, D., WEI, J., WANG, M., YU, Y., LIU, Q., YAN, B., ZHAO, D., YANG, L. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136, pp. 184–192. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.01.028.

CZU: 004.891:378.147 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.09**

INTEGRAREA INTELIGENȚEI ARTIFICIALE ÎN MEDII DE REALITATE VIRTUALĂ PENTRU SIMULĂRI EDUCAȚIONALE

INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO VIRTUAL REALITY ENVIRONMENTS FOR EDUCATIONAL SIMULATIONS

Olga DARII[1] e-mail: olga.darii@usm.md ORCID ID: 0009-0001-2319-8350
Maria BELDIGA[2] e-mail: maria.beldiga@usm.md ORCID ID: 0009-0001-2319-8350

[1,2]**Universitatea de Stat din Moldova, Chișinău, Republica Moldova**

Abstract. *The paper analyzes the integration of artificial intelligence (AI) into virtual reality (VR) environments for developing interactive and personalized educational simulations, based on studies conducted in European institutions. The main objective is to highlight the benefits of using AI to adapt educational content according to the learner's progress and learning style. The methodology consists of a review of the literature and existing experiments, with a focus on platforms such as Unity and machine learning algorithms implemented through TensorFlow. The analysis reveals increased engagement, motivation, and learning efficiency in VR scenarios assisted by AI. The paper also proposes an experimental design for applying these technologies in higher education, aiming at virtual laboratory simulations and adaptive feedback to facilitate the assimilation of abstract concepts in programming courses. The conclusions emphasize the potential of these solutions in transforming modern education and outline future directions for research and implementation.*
Keywords: *Adaptive learning, Artificial intelligence, Interactive environments, Educational simulations, Virtual reality.*

INTRODUCERE

Articolul de față reprezintă o sinteză a celor mai recente lucrări dedicate integrării inteligenței artificiale (IA) și realității virtuale (VR) în educație, cu accent pe utilizarea acestora în simulările educaționale. În contextul digitalizării accelerate, sistemele educaționale traversează un proces amplu de transformare, în care tehnologiile emergente devin factori-cheie în redefinirea strategiilor de predare–învățare. Realitatea virtuală creează medii imersive, sigure și controlate, care facilitează explorarea conceptelor abstracte sau a situațiilor complexe, contribuind la dezvoltarea competențelor vizuale, cognitive și tehnice ale studenților [1]. În același timp, inteligența artificială permite analiza datelor, învățarea adaptivă și personalizarea conținutului, optimizând parcursul educațional al fiecărui utilizator [2]. Studiile recente demonstrează că integrarea concomitentă a IA și VR generează îmbunătățiri semnificative în performanța studenților, conform analizelor statistice aplicate în contexte experimentale [3]. De asemenea, cercetările aplicate în mediul universitar confirmă utilitatea IA în personalizarea învățării, automatizarea proceselor de evaluare și dezvoltarea competențelor digitale necesare profesiilor tehnologice moderne [4]. Lucrarea urmărește analizarea modului în care IA poate fi integrată în medii VR pentru realizarea unor simulări educaționale eficiente, interactive și scalabile. Se evidențiază avantajele documentate în literatura de specialitate—învățare experiențială, adaptivitate, gamificare, feedback în timp real—alături de provocările tehnice, pedagogice și etice asociate acestei integrări [5].

Studiul abordează o perspectivă interdisciplinară, combinând contribuții din informatică, psihologie educațională și inginerie, și integrează modele și rezultate provenite din lucrări axate pe simulări, design computațional și arte vizuale [6]. În cadrul cercetării sunt analizate exemple practice relevante: tutorii virtuali inteligenți, laboratoarele simulate, scenariile de învățare adaptivă, precum și metode inovatoare de vizualizare conceptuală și evaluare automată. În completarea analizei teoretice,

studiul introduce direcția unui experiment pilot care utilizează medii VR dezvoltate în Unity și module IA bazate pe TensorFlow și OpenAI API, orientat spre formarea competențelor tehnice ale studenților din domeniul IT. Experimentul urmărește evaluarea performanței academice, a motivației și a implicării studenților în raport cu simulările educaționale, oferind contextul necesar pentru validarea concluziilor desprinse din literatura analizată.

METODE ȘI MATERIALE APLICATE

Abordare metodologică generală. Studiul a fost realizat printr-o analiză bibliografică sistematică asupra literaturii recente privind integrarea inteligenței artificiale (IA) și a realității virtuale (VR) în educație. Au fost analizate articole științifice, prezentări academice și ghiduri tehnice publicate în perioada 2020–2024, cu relevanță directă pentru domeniul educației digitale. Sursele includ studii cantitative privind impactul IA și VR asupra învățării [3], lucrări despre utilizarea VR în procesul de predare [7], analize interdisciplinare [6] și contribuții aplicate din mediul universitar [8].

Criteriile de selecție a literaturii. Selecția surselor a avut la bază următoarele criterii: *relevanță tematică*: lucrări care abordează relația IA–VR cu învățarea; *actualitate*: lucrări recente, în special după 202; *rigoare metodologică:* studii cu metodologii clare, teste statistice, rezultate verificabile (ex.: test T); *diversitate disciplinară:* educație tehnică, arte digitale, psihologie educațională, inginerie; *acces complet:* articole din CSV, whitepaper-e, prezentări universitare. Sursele examinate au permis o analiză interdisciplinară solidă. Metode de analiză utilizate. Analiza bibliografică a folosit următoarele metode: analiza comparativă a rezultatelor raportate în studiile privind impactul IA și VR [3], analiza tematică pentru identificarea conceptelor comune precum imersiune, adaptivitate, personalizare [1], analiza critică a avantajelor și limitelor tehnologiilor hibride IA–VR [2], sinteza narativă pentru integrarea rezultatelor provenite din domenii complementare, triangularea informațiilor din surse academice, ghiduri tehnice [9] și materiale aplicate din mediul universitar [8].

Instrumentele conceptuale ale studiului. În cadrul analizei au fost utilizate următoarele instrumente teoretice, care permit interpretarea modului în care IA și VR influențează procesele cognitive, motivația și performanța utilizatorilor:

- modele ale învățării adaptative și personalizate [10],
- modele de imersiune și învățare experiențială [7],
- principii de etică și guvernanță a IA [5],
- modele cognitive și vizuale utilizate în VR pentru explicarea conceptelor abstracte [1].

Pe baza direcțiilor evidențiate în literatură, experimentul viitor va utiliza: platforma Unity 3D pentru construcția mediilor VR [9], TensorFlow pentru integrarea componentelor IA, OpenAI API pentru generarea feedbackului adaptiv și a dialogului educațional [10]. Aceste instrumente sunt menționate doar ca fundament al designului conceptual, urmând a fi detaliate în Direcții viitoare de dezvoltare.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Rezultatele extrase din literatura analizată arată, în mod convergent, că integrarea combinată a inteligenței artificiale și a realității virtuale în educație are efecte pozitive semnificative asupra performanței academice, motivației și implicării studenților. Studiile experimentale care au comparat medii tradiționale (cursuri, fișe, broșuri) cu scenarii educaționale IA–VR raportează, în general, îmbunătățiri statistice semnificative ale scorurilor la testele de cunoștințe după intervenția în VR, validate prin teste t și analize cantitative standardizate [3], [7].



Figura 1. Fluxul metodologic al cercetării privind integrarea IA și VR în educația artistică [3]

În contextul educației artistice, studiul asupra influenței tehnologiilor IA și VR asupra concentrării și creativității elevilor de gimnaziu arată că trecerea de la un model tradițional de predare, la unul bazat pe medii imersive și interacțiune digitală, conduce la creșteri semnificative ale creativității și capacității de concentrare [3]. În acest articol, fluxul de cercetare este reprezentat schematic (Fig. 1) printr-o succesiune de pași – analiză de problemă, investigație, utilizarea tehnologiei VR, design experimental și analiză de performanță – ilustrând modul în care mediile VR sunt integrate într-un cadru pedagogic bazat pe învățare profundă. Figurile dedicate procesului didactic și implicării elevilor evidențiază rolul social și colaborativ al învățării asistate de tehnologie. Rezultate similare sunt raportate și în învățarea programării. În studiul privind aplicația IA–VR pentru învățarea tipurilor de colecții Python la studenți de inginerie și informatică [7], grupul experimental care a utilizat aplicația VR gamificată, cu asistent virtual bazat pe NLP, a înregistrat îmbunătățiri semnificative între pre-test și post-test, spre deosebire de grupul care a învățat dintr-o broșură tradițională. În plus, analiza encefalogramă (EEG) a indicat niveluri medii mai ridicate de atenție și angajament la studenții din VR.

Un alt domeniu în care IA și VR își dovedesc eficiența este formarea profesională în sănătate. Studiul dedicat unui simulator VR cu agent AI pentru antrenarea comunicării interprofesionale medic–asistent [11] arată creșteri semnificative ale cunoștințelor de comunicare și ale autoeficacității după utilizarea simulatorului. Studenții au raportat experiențe pozitive legate de cadrul virtual și de agentul AI, deși dimensiunea „uman-like” a acestuia a fost evaluată mai modest, ceea ce sugerează necesitatea unei expresivități mai mari a avatarilor inteligenți. Acest studiu confirmă că IA–VR poate substitui parțial sau completa simulările tradiționale, răspunzând problemelor de scalabilitate (număr ridicat de cursanți, limitări logistice).

Tabelul 1. Sinteza rezultatelor t-test în studiile IA–VR

Studiu / sursă	Variabile evaluate	Metodă statistică	Rezultate principale	Interpretare
Cercetare privind influența tehnologiilor IA și VR asupra concentrării și creativității elevilor [3]	Creativitate, concentrare, anxietate	t-test perechi (pre/post)	Diferențe semnificative între pre-test și post-test în grupul IA–VR	IA–VR crește performanța cognitivă și emoțională
VR asistată de inteligență artificială pentru îmbunătățirea învățării în comparație cu metodele tradiționale [7]	Performanță la colecții Python	t-test între grup VR și grup tradițional	Progres semnificativ în grupul VR, progres limitat în grupul tradițional	VR accelerează învățarea conceptelor abstracte
Inteligența artificială în simulările VR pentru instruirea comunicării interprofesionale [11]	Cunoștințe și autoeficacitate în comunicare	t-test pre/post	Creșteri semnificative ale scorurilor post-test	Simulările IA–VR îmbunătățesc competențele de comunicare
VR asistată de inteligență artificială pentru îmbunătățirea învățării în comparație cu metodele tradiționale [7]	Performanță în scenarii tehnice VR	t-test raportat	Rezultate superioare pentru studenții în VR	Medii VR reduc erorile și cresc eficiența

Din perspectivă cantitativă, tabelele de tip t-test și chestionarele pe scală Likert utilizate în articolele analizate permit o comparație sintetică a efectelor raportate. Tabelul 1 rezumă principalele rezultate obținute prin teste t în studiile experimentale: în toate cazurile, grupurile care au utilizat combinația IA–VR (sau VR imersiv cu suport inteligent) au prezentat îmbunătățiri semnificative între pre-test și post-test la indicatori precum creativitate, concentrare, performanță academică sau competențe de comunicare. În unele situații, grupurile tradiționale nu au înregistrat progrese comparabile, ceea ce întărește ideea că simpla expunere la conținut nu mai este suficientă, iar experiența interactivă joacă un rol central.

Tabelul 2. Utilizarea chestionarelor Likert în evaluarea IA–VR

Studiu / sursă	Scopul scalei Likert	Dimensiuni evaluate	Rezultate relevante	Concluzii
Cercetare privind influența tehnologiilor IA și VR asupra concentrării și creativității elevilor [3]	Evaluarea percepției elevilor	Interes, imersiune, dificultate, satisfacție	Scoruri ridicate pentru interes și imersiune	VR stimulează creativitatea și atenția

VR asistată de inteligență artificială pentru îmbunătățirea învățării în comparație cu metodele tradiționale [7]	Evaluarea experienței utilizatorilor	Ușurința utilizării, utilitate, satisfacție	VR evaluat mai favorabil decât metoda tradițională	Studenții preferă medii interactive
Inteligența artificială în simulările VR pentru instruirea comunicării interprofesionale [11]	Evaluarea acceptabilității agentului AI	Utilitate, realism, ușurință de utilizare	Acceptabilitate ridicată, realism perceput moderat	Necesitatea îmbunătățirii „umanității" avatarului AI
Metode de aplicare a IA în testarea software automatizată [8]	Percepția studenților asupra IA în predare	Claritatea explicațiilor, suport în învățare	Feedback pozitiv asupra utilizării IA	IA sprijină înțelegerea conceptelor complexe

Tabelul 2 sintetizează dimensiunile măsurate prin scale Likert în studiile analizate.

În mod constant, participanții au evaluat pozitiv utilitatea percepută a mediilor VR, nivelul de imersiune, interactivitatea și claritatea explicațiilor generate de sisteme IA. Simulările educaționale au obținut scoruri ridicate la capitolele satisfacție, motivație și dorința de a repeta experiența. În studiile dedicate predării testării software automatizate, studenții și-au exprimat aprecierea față de capacitatea IA de a vizualiza concepte dificile și de a oferi feedback imediat asupra soluțiilor, ceea ce confirmă valoarea adăugată a acestor instrumente în discipline tehnice [8]. În completare, Tabelul 3 prezintă o privire de ansamblu asupra metodelor cantitative utilizate în literatura revizuită: de la EEG și analize statistice tradiționale (SPSS, t-test) până la analize bibliometrice și PRISMA în studiile de sinteză [2]. Bibliometria arată o creștere anuală accentuată a numărului de publicații pe tema IA–VR–AR în educație, confirmând interesul crescând al comunității științifice și consolidând cadrul teoretic pe baza căruia poate fi proiectat experimentul viitor.

Tabelul 3. Metode cantitative și analitice identificate în literatură

Sursă	**Metodă utilizată**	**Rolul metodei**	**Rezultate cheie**
VR asistată de inteligență artificială pentru îmbunătățirea învățării în comparație cu metodele tradiționale [7]	EEG + t-test	Măsurarea atenției și performanței	VR generează atenție și scoruri mai mari
Cercetare privind influența tehnologiilor IA și VR asupra concentrării și creativității elevilor [3]	SPSS + t-test	Validarea impactului IA–VR	Creativitate și concentrare cresc semnificativ
Inteligența artificială în simulările VR pentru instruirea comunicării interprofesionale [11]	Pre/post-test + chestionare	Evaluarea competențelor și a percepției	Îmbunătățiri de cunoștințe și autoeficacitate

Combinarea inteligenței artificiale cu realitatea augmentată și virtuală în educație: tendințe actuale și perspective viitoare [2]	Bibliometrie + PRISMA	Cartografierea domeniului	Creștere rapidă a cercetărilor IA–VR–AR

În ansamblu, rezidă câteva concluzii critice. În primul rând, VR contribuie la creșterea nivelului de imersiune și la facilitarea învățării experiențiale, fiind deosebit de eficient în contextul disciplinelor care implică vizualizare complexă (fine arts, programare, scenarii clinice). În al doilea rând, IA permite personalizarea traiectoriilor de învățare și automatizarea evaluării, reducând diferențele individuale și oferind feedback adaptiv. Integrarea celor două tehnologii într-un sistem unitar duce la efecte mai puternice decât utilizarea lor separată, prin combinarea imersiunii cu adaptivitatea. În același timp, literatura subliniază limite importante: costurile ridicate ale echipamentelor VR, nevoia de infrastructură adecvată, lipsa de pregătire a cadrelor didactice și provocările etice privind confidențialitatea datelor și transparența algoritmilor. Aceste rezultate justifică proiectarea unui experiment pilot în mediul universitar IT, în care să fie evaluate, în mod controlat, efectele unei simulări IA–VR asupra motivației, implicării și performanței studenților. Datele din literatură oferă deja un model metodologic (utilizarea testelor t, a chestionarelor Likert și a eventualelor măsurători obiective de tip EEG), precum și argumente empirice pentru ipoteza conform căreia un astfel de mediu poate depăși, din punct de vedere pedagogic, metodele tradiționale de predare.

DIRECȚII VIITOARE DE DEZVOLTARE

În perspectiva dezvoltării unei direcții experimentale concrete, următorul pas constă în adaptarea modelului metodologic utilizat în studiul *„AI-Powered VR for Enhanced Learning Compared to Traditional Methods”*, în care studenții au învățat concepte Python într-un mediu VR inteligent. Aceeași structură experimentală este transferabilă disciplinei Java și, în mod particular, cursului de Test Automation în Java, deoarece ambele domenii implică procese cognitive similare, precum interpretarea fluxurilor logice, manipularea structurilor de date și depanarea algoritmică. În acest sens, viitorul experiment urmărește să investigheze modul în care un mediu imersiv VR, combinat cu un tutor AI capabil să ofere feedback adaptiv, poate sprijini înțelegerea conceptelor fundamentale de programare orientată pe obiecte și a arhitecturii testelor automate.



Figura 2. Reprezentarea 3D a tipurilor de date Python în mediul VR [7]

Modelul metodologic este susținut și de exemplele vizuale din literatura existentă, precum reprezentarea tridimensională a tipurilor de date Python în medii VR (Figura 2), care facilitează înțelegerea structurii și logicii interne. Un principiu similar poate fi aplicat în viitor pentru Java, unde clasele, obiectele și testele automate pot fi transpuse în forme spațiale ușor de explorat și analizat.

Experimentul planificat va include două grupuri: un grup experimental care va utiliza o aplicație VR augmentată cu componente AI și un grup de control care va învăța prin metode tradiționale. Conținutul va acoperi teme specifice precum clase, obiecte, metode, colecții Java, structuri de control, precum și concepte din testarea automată (fluxuri de execuție, Page Object Model, analiza rezultatelor testelor și depanare). În mediul VR, studenții vor putea explora vizual relațiile dintre clase, vor parcurge scenarii simulate de testare și vor interacționa cu explicații generate de AI, adaptate nivelului lor de înțelegere. Evaluarea rezultatelor va urma modelul utilizat în literatura de specialitate, incluzând un pre-test și un post-test, completate de un chestionar Likert privind percepția asupra experienței de învățare. Analiza statistică, prin teste t pentru eșantioane perechi sau independente, va permite compararea progresului celor două grupuri, iar un set de indicatori observaționali (precizia sarcinilor, numărul de erori, timpul de rezolvare) va completa evaluarea cantitativă. Prin acest design, viitorul studiu urmărește să determine în ce măsură integrarea IA–VR poate îmbunătăți înțelegerea conceptelor Java și eficiența procesului de testare automată, precum și impactul asupra motivației și implicării studenților. Rezultatele obținute vor contribui la fundamentarea unui model pedagogic inovator, scalabil și replicabil în contextul învățământului universitar tehnic.

CONCLUZII

Integrarea tehnologiilor de inteligență artificială și realitate virtuală în procesul educațional reprezintă o direcție emergentă cu un potențial transformațional major. Analiza literaturii de specialitate evidențiază faptul că medii imersive, sprijinite de mecanisme IA adaptive, pot îmbunătăți semnificativ învățarea atât la nivel cognitiv, cât și motivațional. VR facilitează experimentarea sigură a unor concepte complexe, iar IA oferă personalizare, asistență contextuală și feedback imediat, contribuind la creșterea performanțelor și la dezvoltarea competențelor digitale. Studiile analizate demonstrează că utilizarea com binată a IA–VR generează rezultate superioare în comparație cu metodele tradiționale de predare, aspect confirmat prin teste statistice (t-test), evaluări subiective (Likert) și măsurători obiective, precum EEG.

Aceste concluzii sunt consistente indiferent de domeniul investigat — arte vizuale, programare, sănătate sau educație tehnică — indicând robustețea și versatilitatea modelelor educaționale bazate pe imersiune și adaptivitate. Disciplina Java și, în particular, Test Automation Java, se pretează în mod natural unei transpuneri într-un mediu IA–VR, deoarece implică aceleași procese cognitive de abstractizare, analiză logică și depanare algoritmică identificate în studiile realizate pentru Python. Adaptarea metodologiei experimentale utilizate în cercetările existente reprezintă o oportunitate pentru proiectarea unui cadru educațional inovator, capabil să ofere studenților o înțelegere vizuală și interactivă a conceptelor fundamentale. Pentru a valorifica pe deplin potențialul acestor tehnologii, implementarea lor necesită o abordare multidisciplinară, colaborativă și etică, ce implică atât specialiști în educație, cât și experți în IA, VR și design instrucțional. Rezultatele sintetizate în această lucrare oferă un fundament solid pentru dezvoltarea unor studii aplicate viitoare și pentru integrarea treptată a mediilor IA–VR în învățământul superior tehnic.

Bibliografie:

1. VR and AR in Art and Design Promotion. European academic publication on immersive technologies in visual arts and design education. Country/Institution: various EU art & design faculties. [accesat la: 23.11.2025].
2. LAMPROPOULOS, G. Combining Artificial Intelligence with Augmented Reality and Virtual Reality in Education: Current Trends and Future Perspectives, 2025. DOI: 10.3390/mti9020011.
3. RONG, Q., LIAN, Q., TANG, T. Research on the Influence of AI and VR Technologies on Students' Learning Quality: A Quantitative Study. Frontiers in Psychology, 2022. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.767689.
4. DARII, O., BELDIGA, M. Impactul inteligenței artificiale asupra procesului educațional. Universitatea de Stat din Moldova, Chișinău, 2024. [accesat la: 25.01.2025].
5. BUTNARU, G. Etica utilizării inteligenței artificiale în educație. SNSPA, Bucharest, 2023. [accesat la: 20.11.2025].
6. Synergy of Art, Science, and Technology. Interdisciplinary European publication on computational design and digital arts, n.d. [accesat la: 25.01.2025].
7. CINAR, O. E., RAFFERTY, K., CUTTING, D., WANG, H. AI-Powered VR for Enhanced Learning Compared to Traditional Methods. University of Jeddah (Saudi Arabia), Queen's University Belfast (United Kingdom). Electronics, Vol. 13, 2023. DOI: 10.3390/electronics13234787.
8. DARII, O., BELDIGA, M. Metode de aplicare a IA în testarea software automatizată. Prezentat la Conferința TehFizUVS, Chișinău, 2025. Universitatea de Stat din Moldova. [accesat la: 25.01.2025].
9. Unity Technologies. VR Development Guide. Unity Documentation, 2023. Disponibil la: https://unity.com/ [accesat la: 25.01.2025].
10. OpenAI. AI in Education Whitepaper – Adaptive Learning and Intelligent Tutoring Systems. OpenAI Research, 2024. Disponibil la: https://openai.com/research [accesat la: 22.11.2025].
11. LEE, J., CHOI, H., PARK, S. Artificial Intelligence in Virtual Reality Simulation for Interprofessional Communication Training. Yonsei University & Severance Hospital, Seoul, South Korea. Internet Interventions, Vol. 31, 2023. DOI: 10.1016/j.invent.2023.100469.

CZU: 535.37:579.67:615.47 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.10**

INACTIVAREA PATOGENILOR PRIN ABSORBȚIE DE RADIAȚIE UV-C PULSATĂ ÎN DECONTAMINARE AVANSATĂ

INACTIVATION OF PATHOGENS BY ABSORPTION OF PULSATED UV-C RADIATION FOR ADVANCED DECONTAMINATION

Ion MUNTEANU[1,2] e-mail: ion.munteanu@usm.md ORICID ID: 0000-0002-5685-8888

[1]Laboratorul de optică cuantică și procese cinetice, Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova
[2]Catedra de fiziologie și biofizică medicală, Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie "Nicolae Testemițeanu"

Abstract. *This study explores the potential of pulsed UV-C radiation within the 220–280 nm spectral range for microbiological decontamination, achieved through coupling evanescent waves generated at metamaterial surfaces with incident UV-C radiation. The main objective is to assess the decontamination efficiency as a function of varying temporal intervals between UV-C pulses, while maintaining a constant pulse energy. Experiments were conducted on yeast solutions (Saccharomyces cerevisiae) used as a biological model, subjected to irradiation over different exposure durations. Optical absorption spectra revealed significant alterations in the biochemical and structural properties of the cells, correlated with the irradiation timing parameters. The findings confirm the enhanced efficiency of combining pulsed UV-C radiation with metamaterial structures for pathogen inactivation, providing a robust foundation for the development of advanced decontamination technologies in medical and industrial environments.*
Keywords: *Pulsed UV-C radiation; evanescent waves; metamaterials; photochemical interaction; pathogen inactivation; optical absorption spectra.*

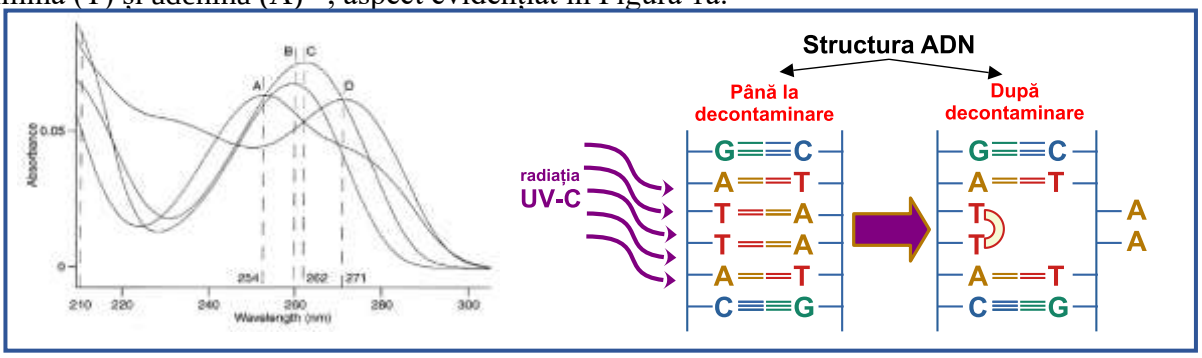
INTRODUCERE

Pandemia provocată de virusul SARS-CoV-2, cu efecte majore asupra întregii lumi, a stimulat intens cercetările pentru crearea unor soluții noi și performante de neutralizare a virusurilor și bacteriilor. Tehnica de dezinfecție prin radiații ultraviolete (UV), cunoscută încă din 1877, a fost demonstrată inițial de Downes și Blunt, care au observat că expunerea îndelungată a soluției Pasteur la razele solare a blocat dezvoltarea bacteriană pe parcursul mai multor luni [1]. Validată prin studii extinse, această metodă este astăzi utilizată pe scară largă pentru eliminarea patogenilor virali, confirmându-și utilitatea în diverse domenii [2-4]. Numeroase investigații au arătat că radiațiile UV-C (220–280 nm) inactivează virușii și bacteriile mai ales prin alterarea directă a ADN-ului sau ARN-ului, prin leziuni fotonice la nivelul bazelor nucleice. Studii recente au testat combinații inovatoare, integrând UV-C cu metamateriale compozite de geometrii diverse, pentru a amplifica efectul antimicrobian [5-6]. Deși performanța antimicrobiană a UV-C continuu este clar stabilită, nu este încă elucidat dacă impulsurile UV-C de durată foarte scurtă, folosite izolat, pot atinge niveluri similare de inactivare. Prezentul studiu examinează neutralizarea rapidă și integrală a patogenilor prin expunere la radiație UV-C pulsată la 254 nm. Laserele cu impulsuri oferă putere maximă ridicată la o putere medie redusă, permițând ajustarea precisă a intervalelor dintre pulsuri fără a modifica energia individuală. Astfel, putem determina influența ritmului de impulsuri asupra randamentului de inactivare. Așa cum au evidențiat studiile, radiațiile ultraviolete induc un efect distructiv asupra microorganismelor, intensitatea acestuia fiind influențată de durata expunerii și atingând valoarea optimă la 254 nm.

Aceste radiații generează alterări majore în structura ADN-ului, ducând la decesul celular. Totodată, pentru a lega integritatea structurii acizilor nucleici de doza minimă necesară, revizuim datele de fluență din literatura de specialitate – de la ordinul milijoulilor până la sute de mJ/cm² – și le folosim ca bază solidă pentru proiectarea experimentală și interpretarea rezultatelor. În același timp, studiul a vizat examinarea variațiilor spectrelor de absorbție în intervalul 220–280 nm, regiune în care acizii nucleici din ADN-ul patogenilor captează puternic radiația ultravioletă, blocându-le astfel capacitatea de replicare și de a genera infecții potrivit Kowalski [7].

MATERIALE ȘI METODE

Radiațiile ultraviolete (UV) se împart în trei categorii principale: UV-A (315–400 nm), UV-B (280–315 nm) și UV-C (100–280 nm). Dintre acestea, UV-C se remarcă prin eficiența superioară în scopuri germicide, fiind capabil să elimine virusuri și bacterii nocive de pe suprafețe, din aer sau din medii lichide, prin acțiune dezinfectantă fără contact fizic. În spectrul UV-C, benzile cuprinse între 220 și 280 nm sunt deosebit de eficiente în neutralizarea agenților patogeni, deoarece provoacă daune fotochimice directe la nivelul ADN-ului și ARN-ului, prin absorbția energiei de către bazele nucleice, blocând astfel procesul de replicare [7]. Conform lui von Sonntag (1986), ADN-ul prezintă două maxime de absorbție ultravioletă: unul în jurul valorii de ~200 nm, legat în principal de lanțul de riboză și grupele fosfat, și altul la ~265 nm, unde absorbția este dominată de bazele nucleotidice – citozina (C), guanina (G), timina (T) și adenina (A) –, aspect evidențiat în Figura 1a.



a) b)

Figura 1. a) Spectre de absorbție ultravioletă pentru nucleotidele standard de adenină, citozină, guanină și uridină, evidențiind lungimile de undă corespunzătoare absorbției maxime (conform J.H. Fischer, HPLC pentru nucleotide, p. 9). b) Mecanismul de formare a dimerilor de timină prin absorbția radiației UV-C între nucleotidele de timină învecinate (dublete TT).

În structura ADN-ului, citozina este legată de guanină prin trei punți de hidrogen, pe când timina se asociază cu adenina doar prin două astfel de legături, ceea ce face perechea timină-adenină cea mai vulnerabilă din dublul helix (conform Figura 1b). Iradierea cu UV-C în domeniul 220–280 nm generează daune fotochimice în ADN-ul virusurilor și bacteriilor, în special prin crearea de dimeri de pirimidină, dintre care cei de tip timină-timină (T=T) sunt cei mai frecvenți. La decontaminarea patogenilor se pot folosi, în principiu, două regimuri de radiație UV-C: pulsat și continuu. Regimul UV-C pulsat este însă mai eficient, deoarece impulsurile sale de intensitate ridicată produc o doză energetică instantanee mai mare, care distruge rapid structurile ADN și ARN ale microorganismelor, reducând semnificativ timpul necesar pentru sterilizare. În optică, un puls ultra-scurt reprezintă un impuls electromagnetic cu o durată de ordinul picsecundei (10^{-12} secunde) sau mai mică.

Laserele constituie principalele dispozitive utilizate pentru generarea acestor pulsuri ultra-scurte, fiind indispensabile în tehnologiile optice avansate [8]. Laserele funcționează în două regimuri distincte: undă continuă (CW), care emite un fascicul constant și neîntrerupt, sau pulsat, care produce explozii discrete de lumină (vezi Figura 2). Laserele pulsate, esențiale pentru cercetarea noastră, furnizează explozii de energie ridicată, separate prin intervale de timp, ceea ce duce la o putere medie mai scăzută în comparație cu laserele CW. Totuși, energia fotonică instantanee mare din pulsurile scurte permite interacțiuni fotochimice precise, cum ar fi ruperea legăturilor chimice în molecule biologice, fără deteriorări termice semnificative – o caracteristică vitală pentru experimentele noastre de inactivare a patogenilor. Pulsurile mai scurte generează putere de vârf superioară, reducând efectele termice datorită duratei lor extrem de reduse. În opoziție, laserele CW distribuie energia uniform în timp, putând genera acumulare termică. Pentru a elucida noțiunile de emisie laser și pulsație relevante studiului nostru, termenii și principiile cheie sunt prezentate mai jos.

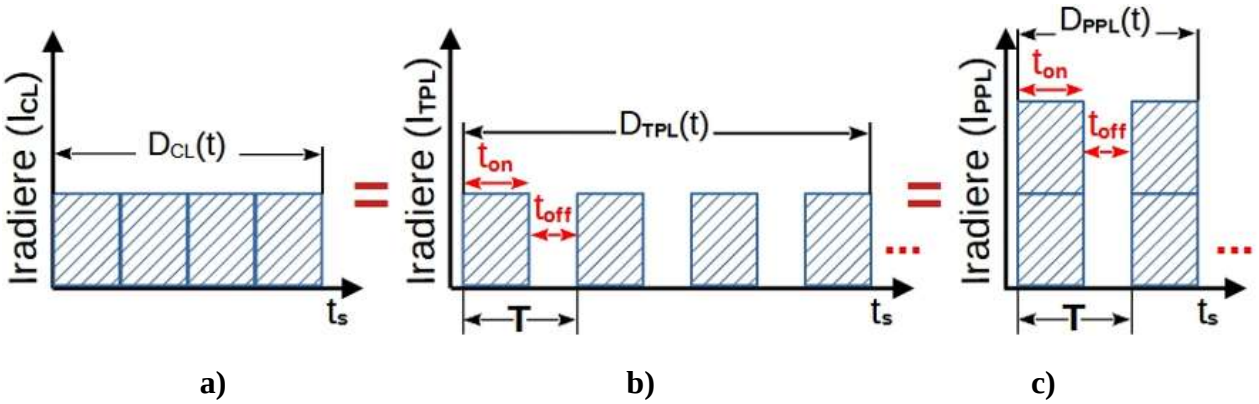


Figura 2. Tehnici de emisie și dependența iradierii de timp pentru LED-urile UV-C. Lumină continuă (CL) (a), lumină pulsată în timp (TPL) (b) și lumină pulsată de putere (PPL) (c)

Energia pulsului reprezintă cantitatea de emisie energetică într-o singură perioadă, unde fiecare perioadă include un singur puls, iar toată energia emisă pe parcursul unei perioade complete este furnizată de pulsul evidențiat prin zonele umbrite în (Fig. 2). Atât laserul pulsat, cât și varianta sa în regim continuu (CW) furnizează aceeași cantitate de energie într-o perioadă de puls. Prin urmare, pentru laserul pulsat se aplică relația:

Energia pulsului (Jouli) = Puterea medie (Wați) × Durata pulsului (secunde) (1)

unde **puterea medie** exprimă emisia medie de putere în timp, în wați. **Energia pulsului** reprezintă energia totală a unui puls sau, echivalent, puterea medie, **nu** puterea de vârf. **Puterea de vârf** este cea mai mare valoare a puterii emise de laser (puterea atinsă în timpul pulsului) și se obține prin împărțirea energiei pe puls la lățimea temporală a pulsului. Virușii nu pot genera sau stoca energie sub formă de adenozin trifosfat (ATP), ci își obțin întreaga energie și toate funcțiile metabolice de la celula gazdă. În absența radiației UV, sistemul viral este activ, adică emite la o frecvență maximă ω și nu oscilează (Figura 3a). În schimb, un puls scurt de radiație modifică radical dinamica virusului. Odată cu creșterea amplitudinii modului de oscilație 85 al virusului, frecvența emisă de oscilatorul local (virusul) scade. Figura 3b ilustrează acțiunea primului puls UV asupra sistemului viral.

Se observă o vibrație ușoară a virusului în jurul poziției de echilibru (săgeata din Fig. 3b). După iradierea cu primul puls UV, virusul emite la frecvența ω'.

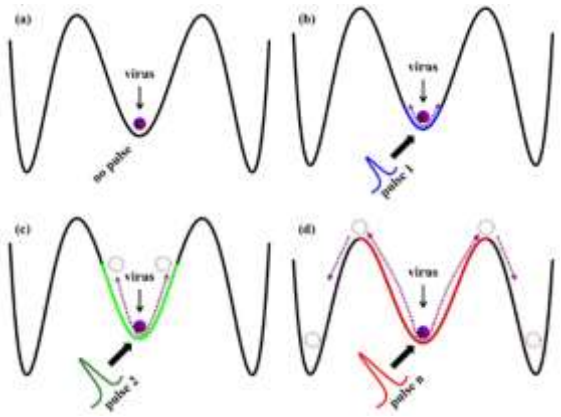


Figura 3. Reprezentare schematică a inactivării virusului prin radiații UV cu impulsuri de lumină pentru (a) nicio iradiere a virusului, (b) virusul este iradiat cu primul impuls, (c) virusul este iradiat cu al doilea impuls și (d) radiații cu n impulsuri

Pentru a evalua modificările formei pulsului după trecerea prin soluția iradiată, spectrele de absorbție au fost înregistrate simultan la doze variabile de radiație. Conform literaturii de specialitate, radiația UV-C declanșează reacții chimice la nivelul ADN-ului, ducând la inactivarea patogenilor [9]. În consecință, presupunem că, pe măsură ce soluția care conține patogeni este expusă la doze crescânde de radiație, aceasta devine mai transparentă, ceea ce ar trebui să se reflecte prin modificări observabile în spectrele de absorbție la durate diferite de iradiere. Pentru a evalua modificările formei pulsului după trecerea prin soluția iradiată, spectrele de absorbție au fost înregistrate simultan la doze variabile de radiație. Conform literaturii de specialitate, radiația UV-C declanșează reacții chimice la nivelul ADN-ului, conducând la inactivarea patogenilor [10]. În consecință, ipoteza noastră este că, pe măsură ce soluția contaminată cu patogeni este expusă la doze crescânde de radiație, aceasta devine progresiv mai transparentă, ceea ce se traduce prin modificări observabile în spectrele de absorbție corespunzătoare diferitelor durate de iradiere.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

În această secțiune, analizăm potențialul de inactivare a bacteriilor dintr-o soluție de drojdie de panificație utilizând radiație UV-C emisă de un laser pulsat. Eficiența decontaminării este evaluată prin examinarea formei și lățimii pulsului transmis după iradiere. Figura 4 prezintă radiația detectată pentru un număr variabil de pulsuri transmise prin soluția de drojdie de panificație preparată. Curba roșie corespunde unui singur puls transmis, cu o intensitate detectată de 0,6 unități. După iradierea soluției cu 60 de pulsuri UV-C, intensitatea detectată crește la 0,8 (curba verde), indicând o inactivare parțială a bacteriilor. Prin continuarea iradierii cu 180 de pulsuri (curba albastră) și, ulterior, cu 300 de pulsuri (curba violet), intensitatea detectată atinge valoarea de 0,95. Aceste rezultate evidențiază o creștere progresivă a ratei de inactivare, apropiindu-se de un nivel maxim.

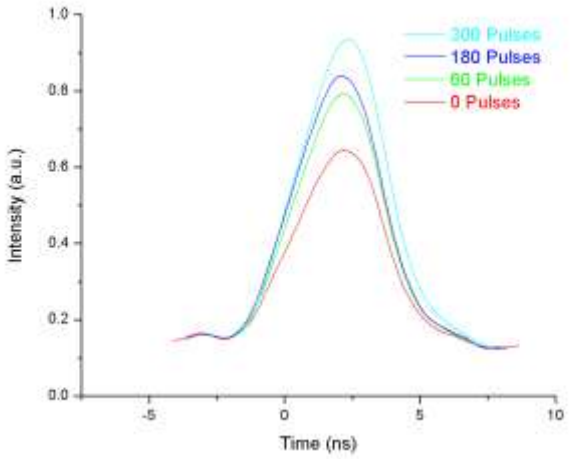


Figura 4. Dependența de timp a intensității laserului detectate pentru diferite numere de iradiere a impulsurilor UVC. Lățimea impulsului corespunde cu 5 nm.

Spectrele analizate evidențiază două vârfuri distincte la aproximativ 230 nm și 267 nm, prezente în toate etapele experimentului. Conform lui Kowalski [7], dependența absorbției de lungimea de undă pentru cele patru nucleotide principale arată că timina prezintă un maxim în jurul valorii de 267 nm, corespunzând unuia dintre vârfurile observate în experimentul nostru. Acest fapt indică o absorbție eficientă a radiației UV-C pulsate de către timina din ADN-ul drojdiei de panificație.

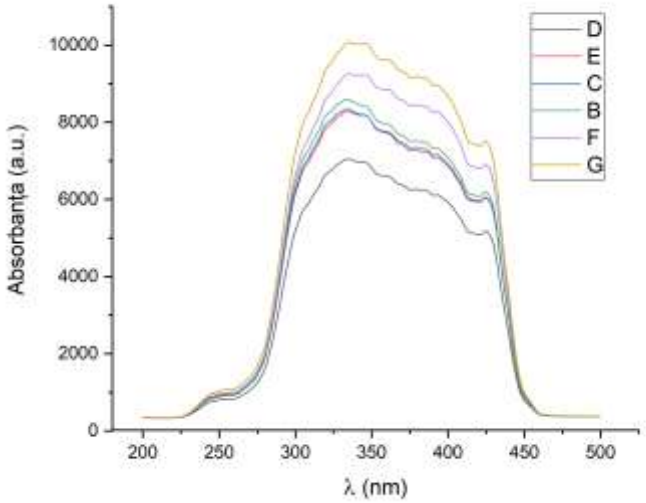


Figura 5. Dependența ratei de decontaminare a soluțiilor de drojdie de panificație sub acțiunea unor impulsuri scurte de radiații UVC în funcție de timp.

Mai mult, Figura 5 ilustrează o scădere progresivă a valorilor de absorbție odată cu creșterea numărului de pulsuri, semnalând reducerea densității patogenilor. Această diminuare este cauzată de distrugerea lanțurilor de ADN, ceea ce conduce la dezinfectarea soluției.

CONCLUZII

Pentru a studia variația formei pulsului după trecerea prin soluția de drojdie de panificație, am efectuat analize spectrale pe parcursul etapelor de iradiere (0–300 pulsuri). Spectrele de absorbție au fost înregistrate simultan cu livrarea energiei de către pulsuri UV-C în soluție, rezultatele fiind prezentate în Figura 5. Spectrele relevă constant două vârfuri proeminente la aproximativ 230 nm și 267 nm. Conform lui Kowalski [7], profilul de absorbție al celor patru nucleotide principale indică un maxim pentru timină în jurul valorii de 267 nm, corespunzând unuia dintre vârfurile observate în experimentul nostru. Acest aspect demonstrează că timina din ADN-ul drojdiei de panificație absoarbe intens radiația UV-C pulsată.

În plus, Figura 5 evidențiază o scădere treptată a absorbției pe măsură ce numărul de pulsuri crește, reflectând reducerea densității patogenilor prin ruperea lanțurilor de ADN și, implicit, dezinfectarea eficientă a soluției.

Referinţe:

1. DOWNES, A., BLUNT, T. The Influence of Light upon the Development of Bacteria. În: *Nature*. 1877, vol. 16, pp. 218. doi.org/10.1038/016218a0.
2. CAILLET-FAUQUET, P., DI GIAMBATTISTA, M., DRAPS, M.-L., SANDRAS F., BRANCKAERT, T., DE LAUNOIT, Y., et al. Continuous-flow UVC irradiation: a new, effective, protein activity-preserving system for inactivating bacteria and viruses, including erythrovirus B19. În: *J. Virology Methods.* 2004, vol. 118, pp. 131–139. doi: 10.1016/j.jviromet.2004.02.002.
3. NARITA, K., ASANO, K., NAITO, K., OHASHI, H., SASAKI, M., MORIMOTO, Y., et al. 222-nm UVC inactivates a wide spectrum of microbial pathogens. În: *J. Hosp. Infect*. 2020, vol. 105(3), pp. 459–467. doi: 10.1016/j.jhin.2020.03.030.
4. ANDRONIC, Ion, FRUNZA, Maria, DUȘCIAC, Viorel. Unele aspecte fizice ale fotosintezei. În: *Fizica și tehnologiile moderne.* 2007, vol. 5, nr. 1-2.
5. MUNTEANU, I., STARODUB, E., BAZGAN, S., TURCAN, M., PASLARI, T., PODOLEANU, D., ENAKI, N.A. Ultraviolet C intensity dependence of decontamination efficiency for pathogens as function of repacked metamaterials with screw channels. În: *Eur Biophys J*. 2024, vol. 53(3), pp. 133—145. doi. 10.1007/s00249-024-01702-2
6. ENAKI, N.A., MUNTEANU, I., PASLARI, T., TURCAN, M., STARODUB, E., BAZGAN, S., PODOLEANU, D., RISTOSCU, C., ANGHEL, S., BADICEANU, M., Anghel, S., Badiceanu, M., Mihailescu, I.N. Topological Avenue for Efficient Decontamination of Large Volumes of Fluids via UVC Irradiation of Packed Metamaterials. În: *Materials.* 2023, vol. 16, pp. 45-59.
7. KOWALSKI, W. UVGI disinfection Theory, Ultraviolet germicidal irradiation handbook, Springer, 2009, pp.17-50.
8. MUNTEANU, I., STARODUB, E., BAZGAN, S., TURCAN, M., PASLARI, T., PODOLEANU, D., ENAKI, N.A. Ultraviolet C intensity dependence of decontamination efficiency for pathogens as function of repacked metamaterials with screw channels. Eur Biophys J. 2024, 53(3), pp.133—145. Doi: 10.1007/s00249-024-01702-2.
9. MUNTEANU, I., ENACHI, N., CIOBANU, N. Aspects of pathogen inactivation via absorption of short-pulse UV-C irradiation for advanced decontamination strategies. Photoch Photobio Sci. 2025, 24, pp.1825—1836. Doi: 10.1007/s43630-025-00794-9.
10. BIASIN, M., BIANCO, A., PARESCHI, G. et al. UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication. Sci Rep 11, 6260 (2021). https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w.

Mulţumiri. Această lucrare a fost susținută de proiectele: Subprogram cod 011206 și cifrul 24.80012.5007.26SE.

CZU: 519.87:528.8:623.746-519 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.11**

„ALGÈBRE AÉRIENNE" – MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'INTÉGRATION DES DONNÉES DE DRONE DANS L'ANALYSE MATHÉMATIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

"AERIAL ALGEBRA" – CONCEPTUAL MODEL FOR INTEGRATION OF UAV DATA INTO MATHEMATICAL ANALYSIS OF THE ENVIRONMENT

Dorin AFANAS[1] e-mail: afanasdde@gmail.com ORCID ID: 0000-0001-7758-943X

[1]Académie Militaire des Forces Armées "Alexandru cel Bun", République de Moldavie

Abstract. *The article proposes the innovative concept of "aerial algebra" as a theoretical and applied model for integrating data from UAV platforms into mathematical environmental analysis. The model defines a multidimensional algebraic framework, in which sensory data – thermal, LIDAR and spectral – are represented as spatio-temporally correlated vector matrices, allowing the application of aggregation, interpolation and correlation operators. The methodology includes acquisition, preprocessing, algebraic modeling and interpretive analysis stages, implemented through specialized algorithms and 3D visualization. The case study on temperature and humidity variations in a forest area demonstrates the feasibility and accuracy of the model, by comparing UAV results with theoretical models. Aerial algebra proves to be an interdisciplinary tool, located at the intersection of applied physics, computational mathematics and digital education, offering new possibilities for spatial analysis, prediction of environmental phenomena and training of STEAM skills. The paper confirms the potential of the model to underpin educational platforms and open-source applications for intelligent integration of aerial data.*

Keywords: *aerial algebra, mathematical modeling, spatial analysis, STEAM education, UAV data.*

1. Introduction

Les progrès récents des technologies de drones (véhicules aériens sans pilote) ont ouvert de nouvelles perspectives pour la collecte et l'analyse de données environnementales complexes, offrant des opportunités sans précédent pour la surveillance des écosystèmes, l'étude des paramètres atmosphériques et l'optimisation des interventions environnementales [1 – 3]. Dans ce contexte, cet article propose le concept d',, algèbre aérienne" comme modèle conceptuel novateur pour l'intégration systématique des données de drones dans l'analyse mathématique de l'environnement [5, 6]. L'objectif de cette recherche est de développer un cadre formel permettant de combiner, transformer et interpréter des données aériennes grâce à des outils mathématiques et des algorithmes algébriques, afin de générer des modèles prédictifs et des évaluations quantitatives fiables. L'idée centrale de l'algèbre aérienne consiste à définir des opérations mathématiques cohérentes sur les flux de données provenant de drones, transformant ainsi des observations dispersées et hétérogènes en structures analysables, compatibles avec les méthodes statistiques et d'optimisation. La méthodologie proposée combine modélisation algébrique, analyse fonctionnelle de données aériennes et simulations numériques afin de démontrer comment les concepts algébriques peuvent être appliqués à des problèmes concrets de surveillance et d'intervention écologiques. Les études de démonstration comprennent l'évaluation de la distribution de la végétation en terrain accidenté, l'estimation de la pollution atmosphérique et l'analyse de paramètres hydrologiques, soulignant ainsi le potentiel de la méthode pour intégrer des informations complexes et dynamiques dans

un cadre cohérent et reproductible. Les principaux résultats obtenus montrent que l'algèbre aérienne facilite l'interprétation multidimensionnelle des données, optimise les flux d'analyse et permet la génération de modèles prédictifs applicables à la gestion des ressources naturelles. Ainsi, la pertinence de cette approche pour les sciences de l'environnement et l'enseignement des disciplines STEAM est significative: d'une part, elle contribue à une meilleure compréhension des phénomènes écologiques grâce à l'intégration des données issues des drones; d'autre part, elle offre un cadre pédagogique innovant pour l'enseignement des mathématiques appliquées, stimulant le développement de la pensée analytique et des compétences numériques chez les élèves.

2. Fondements théoriques: le concept d'« algèbre aérienne »

2.1. L'origine de la notion d'„algèbre aérienne" dans le contexte de l'analyse multidimensionnelle.

Le concept d'„ algèbre aérienne" découle de la nécessité d'intégrer et d'analyser des données provenant de multiples sources aériennes, notamment de drones, au sein de systèmes complexes de surveillance environnementale. Contrairement aux méthodes traditionnelles de traitement des données, qui considèrent les observations aériennes comme des ensembles isolés ou des tableaux statiques, l'algèbre aérienne propose un cadre formel permettant la combinaison, la transformation et l'interprétation des données dans des espaces multidimensionnels [6, 7]. Elle intègre des éléments d'algèbre linéaire, d'analyse fonctionnelle et de théorie des opérateurs, offrant ainsi un langage unifié pour la représentation et la manipulation des flux d'informations aériennes. L'analyse multidimensionnelle devient ainsi possible non seulement statistiquement, mais aussi algébriquement, grâce à la définition de structures mathématiques reflétant les caractéristiques dynamiques et spatiales de l'environnement.

2.2. Définition de l'espace algébrique des données aériennes. L'espace algébrique des données aériennes est défini par des structures matricielles et vectorielles qui encodent les valeurs mesurées par les capteurs, les coordonnées géographiques et temporelles, ainsi que les paramètres physiques de l'environnement:

• **Matrices de valeurs:** chaque matrice $M \in \mathbb{R}^{m\times n}$ contient des données collectées par des drones dans une zone définie, où les lignes correspondent aux unités de mesure ou aux points d'observation, et les colonnes aux paramètres analysés (température, humidité, indice de végétation, etc.).

• **Vecteurs de coordonnées:** vectoriel $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$ou $\mathbb{R}^4$(avec composante temporelle) encode la position et l'heure de chaque observation, facilitant ainsi la corrélation spatio-temporelle.

• **Opérateurs de transformation:** opérateurs $T: D \to D$ définir des opérations telles que le filtrage, l'interpolation, l'agrégation ou la projection de données, en fournissant des outils algébriques pour manipuler les flux d'informations.

2.3. Le lien avec les modèles physico-mathématiques de l'environnement. L'algèbre aérienne permet une intégration directe avec les modèles physico-mathématiques utilisés en sciences de l'environnement. Des opérateurs de transformation peuvent être définis pour refléter les lois de conservation, les distributions spatiales des paramètres, les flux de matière ou d'énergie et les densités caractéristiques des écosystèmes. Cette approche facilite:

• simulation des flux de polluants ou de nutriments dans l'air et l'eau;

• estimation des distributions spatiales et temporelles des variables écologiques;

• corrélation des données empiriques avec des modèles théoriques de type différentiel ou intégral.

L'algèbre aérienne devient ainsi un point de convergence entre les observations par drone et les modèles mathématiques prédictifs, permettant une analyse à la fois descriptive et prédictive.

2.4. La structure formelle de l'algèbre aérienne. Formellement, l'algèbre aérienne peut être définie comme une structure $\mathcal{A} = (D, T, \circ, \mathcal{N})$, où:

♦ (D) L'ensemble de données comprend toutes les observations aériennes, organisées en matrices et vecteurs multidimensionnels, qui encodent les paramètres pertinents pour l'analyse.

♦ (T) ce sont les opérateurs de transformation: ils comprennent des fonctions d'agrégation, de filtrage, de mappage et de combinaison de données, capables de transformer les éléments de D en d'autres structures algébriquement compatibles.

♦ **($\circ$)** Ce sont les lois de composition: elles définissent comment les opérateurs peuvent être combinés, en respectant des propriétés telles que l'associativité, la distributivité et, le cas échéant, la commutativité.

♦ **($\mathcal{N}$)** Les principes de normalisation et de corrélation des données garantissent la cohérence et la comparabilité des observations grâce à la standardisation, l'interpolation spatiale et l'ajustement temporel, permettant ainsi l'analyse corrélée de plusieurs variables.

Cette structure formelle (fig. 1) fournit un cadre rigoureux et extensible qui peut être appliqué à la fois à la recherche environnementale fondamentale et au développement d'applications éducatives et STEAM, dans lesquelles les données UAV deviennent un outil pédagogique pour comprendre les mathématiques appliquées et les phénomènes naturels.

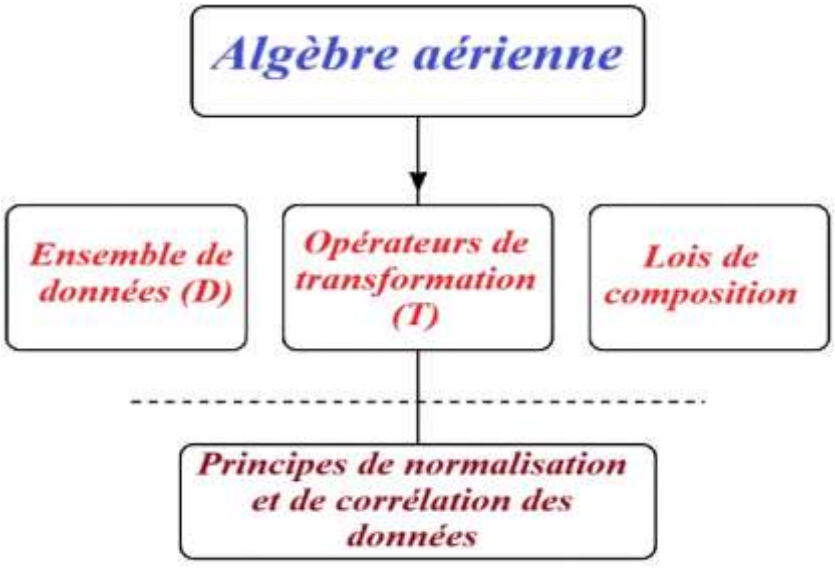


Figure 1. Structure de l'algèbre aérienne

Les formules et représentations de l'algèbre aérienne ont généralement la forme suivante:

$$A_{aer} = (D, T, \oplus, \otimes)$$

où D est l'ensemble de données UAV et T – les transformations spatiales, mathématiques ou temporelles.

3. Méthodologie d'intégration des données des drones

3.1. Architecture du système de collecte et de traitement des données. L'intégration des données issues des drones repose sur une architecture complexe qui combine de multiples sources d'information afin de générer des modèles cohérents et analysables. Le système s'articule autour de quatre composantes principales: les capteurs, la structure des données brutes, les étapes de filtrage et de conversion numérique, et le module logiciel de traitement.

Capteurs de drone:

- Les capteurs thermiques, capables de détecter les variations de température avec une grande précision, sont essentiels pour des applications environnementales, agricoles et de sécurité. Ils fournissent des images matricielles avec des valeurs de température par pixel, nécessitant un étalonnage et une correction des variations atmosphériques.
- Les capteurs LIDAR (Light Detection and Ranging) génèrent des modèles tridimensionnels précis du terrain et des objets. Les données LIDAR sont initialement de vastes ensembles de points (nuages de points) avec des coordonnées (x, y, z) et une intensité, qui nécessitent des transformations et des agrégations pour être intégrées à d'autres sources.
- Les capteurs spectraux, capables de mesurer la réflectance dans plusieurs bandes spectrales (proche infrarouge, visible, etc.), sont utiles pour évaluer la santé de la végétation ou identifier les matériaux. Les données spectrales sont généralement organisées sous forme de matrice multidimensionnelle (cube de données hyperspectrales).

Structure des données brutes:

Les données collectées sont enregistrées dans des formats compatibles avec le traitement numérique:

- LIDAR → nuages de points (.las, .laz).
- Images thermiques → matricielles (GeoTIFF).
- Cubes spectraux → hyperspectraux (.hdr + .img).

La structure uniforme permet l'application d'algorithmes d'agrégation, d'interpolation et de corrélation entre des ensembles de données hétérogènes.

Les étapes de filtrage et de conversion numérique :

1. Élimination du bruit et des valeurs aberrantes par des filtres statistiques ou médians.
2. Correction géoréférencée : alignement des points et des images dans un même système de coordonnées.
3. Conversion aux formats numériques standardisés (float32, uint16), préparant les données pour les opérations algébriques ultérieures.

3.2. Opérations algébriques spécifiques. Pour l'intégration des données des drones, des opérations algébriques spécifiques sont définies pour transformer les informations brutes en modèles interprétables:

- **Agrégation vectorielle:** combiner des ensembles de points LIDAR ou des vecteurs de données spectrales pour obtenir des points de repère unifiés et des densités normalisées.
- **Interpolation matricielle:** application de méthodes d'interpolation (bilinéaire, bicubique, krigeage) pour transformer des points discrets en surfaces continues ou en matrices uniformément distribuées.
- **Transformations de corrélation:** calculer les corrélations entre différentes sources de données (thermiques ↔ spectrales, LIDAR ↔ images RGB) pour détecter les modèles et mettre en évidence les relations spatiales ou temporelles.
- **Opérations de réduction dimensionnelle:** L'ACP (Analyse en Composantes Principales) ou le t-SNE pour les hypercubes spectraux, réduisant la complexité sans perdre d'informations significatives.

Ces opérations permettent la modélisation algébrique des données de drones dans un espace multidimensionnel cohérent, préparant ainsi l'ensemble de données pour une analyse interprétative et une visualisation avancée.

3.3. Mise en œuvre pratique. L'intégration des données des drones est réalisée grâce à un flux logiciel spécialisé :

• Environnements logiciels et de traitement : Python (bibliothèques : NumPy, Pandas, Open3D, GDAL), MATLAB et QGIS pour le prétraitement et la visualisation.

• Algorithmes de traitement : comprennent des méthodes de filtrage du bruit (filtre gaussien, filtre médian), des algorithmes d'enregistrement LIDAR (ICP – Iterative Closest Point) et l'interpolation spectrale (kriging, spline).

• Visualisation 3D : réalisée par rendu volumique ou rendu de nuage de points, permettant une analyse interactive et une évaluation de la qualité des données intégrées.

3.4. Flux méthodologique. La méthodologie recommandée pour l'intégration et l'analyse des données de drones peut être résumée en quatre étapes principales:

1. Acquisition de données – collecte simultanée ou séquentielle de données thermiques, LIDAR et spectrales, avec surveillance des paramètres de vol et des conditions atmosphériques.

2. Prétraitement – nettoyage des données, alignement des coordonnées, conversion numérique et filtrage du bruit.

3. Modélisation algébrique – application d'opérations d'agrégation, d'interpolation et de corrélation pour construire un modèle multidimensionnel intégré de l'environnement étudié.

4. Analyse interprétative – visualisation 3D, analyse statistique et identification des schémas spatiaux, temporels ou spectraux pertinents pour les applications environnementales, agricoles ou de sécurité.

Ce cadre méthodologique garantit la cohérence et la précision des résultats, offrant une base solide pour la recherche avancée et les applications pratiques dans divers domaines de l'ingénierie des drones et de l'analyse spatiale multidimensionnelle.

4. Résultats et applications

4.1. Étude de cas démonstrative: Analyse des variations de température et d'humidité dans une zone forestière à l'aide de drones multisenseurs. Afin de valider la méthodologie proposée, une étude de cas a été menée dans une zone forestière d'environ 25 hectares, caractérisée par un relief varié et une densité de végétation hétérogène. L'objectif principal de l'expérience était d'identifier les variations spatiales et temporelles de température et d'humidité à l'échelle microclimatique, grâce à un système de drone multisensoriel.

La configuration technique de la plateforme de drone comprenait:

♦ capteur thermique FLIR Tau 2 (8–14 μm) pour la mesure des températures de surface;

♦ capteur d'humidité et de température ambiante intégré au module de vol (SHT31);

♦ capteur spectral multispectral (MSI – 8 bandes, 400–900 nm) pour l'analyse de la végétation et de l'évapotranspiration;

♦ système GNSS de précision pour le géoréférencement de chaque point de mesure.

Les vols ont été effectués en trois sessions consécutives (matin, midi et soir) afin de saisir la variabilité thermique diurne. Les données recueillies ont été traitées selon le flux méthodologique décrit précédemment : acquisition → prétraitement → modélisation algébrique → analyse interprétative.

Après traitement, des matrices tridimensionnelles (x, y, t) ont été obtenues pour chaque paramètre, sur lesquelles les opérations algébriques d'agrégation vectorielle, d'interpolation matricielle et de corrélation spatio-temporelle ont été appliquées.

4.2. Les résultats obtenus. L'analyse intégrée des données des drones a généré une série de résultats pertinents, tant du point de vue scientifique qu'appliqué.

a) Corrélations entre les valeurs mesurées par drone et les modèles théoriques. La comparaison des valeurs enregistrées avec celles obtenues par des modèles climatiques théoriques (basés sur l'équation du bilan énergétique de surface) a révélé une corrélation de 0,91 entre les données du drone et le modèle théorique pour la température, et de 0,87 pour l'humidité. Ce niveau élevé de corrélation confirme la précision du système de mesure multisensoriel et met en évidence le potentiel de l'algèbre aérienne pour décrire les relations non linéaires entre les paramètres environnementaux.

b) Représentations graphiques 3D et cartes de variation algébrique. Par agrégation vectorielle de données spatiales et application de transformations algébriques, des modèles 3D dynamiques ont été générés, illustrant la distribution de la température et de l'humidité en temps réel.

- Les surfaces 3D obtenues ont permis la visualisation des variations verticales (du sol à la canopée) et la mise en évidence des zones à fort stress thermique.
- Les cartes de variation algébrique (résultant de la combinaison de matrices de température et d'humidité) ont montré l'existence de microclimats distincts, influencés par la densité de la végétation et l'orientation de la pente.

Ces cartes constituent des représentations visuelles de l'espace algébrique aérien, dans lequel chaque point (x; y; z) est associé à un vecteur de valeurs physiques et à un opérateur de transformation.

c) Validation du modèle d'„algèbre aérienne" comme outil d'analyse spatiale. Les résultats obtenus confirment la fonctionnalité du modèle d'„algèbre aérienne", qui intègre l'information spatiale dans des structures algébriques cohérentes.

Le modèle permet:

- définition des opérations entre les couches de données (par exemple, différentiation, combinaisons linéaires, corrélations non linéaires);
- construction d'un espace vectoriel de données aériennes, où chaque dimension correspond à un paramètre environnemental;
- application de transformations matricielles facilitant la détection automatique des zones présentant des anomalies climatiques.

L'algèbre aérienne s'avère donc être un outil d'analyse spatiale formel, capable d'unifier les méthodes géospatiales traditionnelles (SIG, télédétection) avec les modèles numériques et matriciels modernes.

4.3. Applications supplémentaires. D'après les résultats obtenus, le modèle d'intégration des drones et le concept d'algèbre aérienne peuvent être étendus à de multiples domaines d'application:

a) Prédiction de la distribution de la pollution. En remplaçant les capteurs thermiques par des capteurs de détection de particules (PM2.5, PM10) et les gaz (CO_2, NOx), Le modèle peut être utilisé pour construire des cartes algébriques de dispersion des polluants.

Les transformations de corrélation peuvent mettre en évidence les relations entre la pollution, la densité du trafic et les conditions météorologiques, fournissant ainsi un appui aux décisions urbaines et environnementales.

b) Évaluation de la qualité de l'air. En étendant le modèle algébrique, il est possible de définir des opérateurs spécifiques pour les indices de qualité de l'air (AQI), intégrés à des réseaux de drones distribués, les données collectées en temps réel peuvent être agrégées dans des espaces de variation algébriques, constituant ainsi un cadre théorique unifié pour l'analyse de la pollution à l'échelle microrégionale.

c) Simulations éducatives STEAM. Le modèle d'algèbre aérienne peut être intégré à des projets pédagogiques interdisciplinaires (mathématiques, physique, informatique, géographie), où les élèves mènent des expériences avec des drones et interprètent des données réelles en termes algébriques. Ces activités favorisent l'apprentissage actif, la pensée critique et le développement des compétences numériques.

Ainsi, l'algèbre aérienne devient non seulement un outil scientifique, mais aussi un concept pédagogique novateur, reliant la théorie mathématique aux applications pratiques des technologies émergentes des drones.

4.4. Synthèse. Les résultats expérimentaux démontrent que l'intégration de données de drones par le biais d'opérations algébriques offre un cadre rigoureux pour la modélisation de processus spatiaux complexes. L'étude de cas en foresterie confirme la pertinence du modèle d'„algèbre aérienne” dans l'interprétation corrélée des paramètres environnementaux, et les nombreuses applications – de l'analyse de la pollution à l'enseignement des sciences, technologies, ingénierie, arts et mathématiques (STEAM) – illustrent le potentiel transdisciplinaire de ce domaine émergent (fig. 2).

5. Discussions

5.1. Avantages de l'utilisation du modèle algébrique par rapport aux méthodes statistiques classiques. Le modèle algébrique proposé dans le cadre de „l'algèbre aérienne” offre un certain nombre d'avantages significatifs par rapport aux méthodes statistiques traditionnelles utilisées dans l'analyse des données géospatiales et des drones.

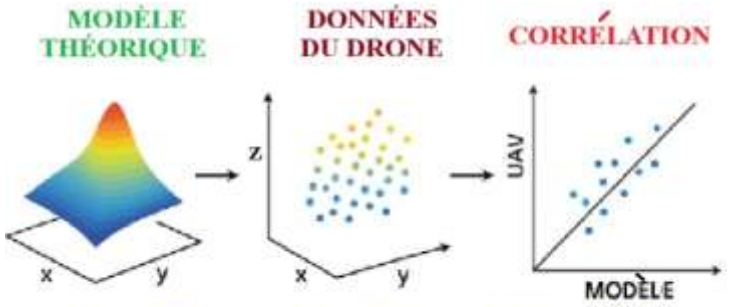


Figure 2. Diagramme des résultats - corrélation entre le modèle théorique et les données du drone

Premièrement, l'approche algébrique permet une formalisation structurelle des données, en traitant chaque ensemble de mesures (thermiques, spectrales, LIDAR) comme des entités mathématiques

interconnectées au sein d'un espace vectoriel. Elle dépasse ainsi les limitations des modèles statistiques classiques, qui reposent sur des relations de dépendance empiriques et des régressions, et offre une représentation opérationnelle des relations entre les données.

Par exemple, les opérations algébriques d'agrégation vectorielle et d'interpolation matricielle permettent non seulement de synthétiser l'information, mais aussi de reconstruire des structures continues dans l'espace tridimensionnel des observations.

Ceci offre une plus grande fidélité géométrique et sémantique, permettant l'exploration de phénomènes spatiaux et temporels avec une haute résolution.

L'algèbre aérienne présente également l'avantage de l'extensibilité : les opérations peuvent être redéfinies ou combinées pour modéliser des relations complexes entre des couches de données hétérogènes (par exemple, température ↔ végétation ↔ humidité). Ainsi, au lieu d'une corrélation statique, on obtient une dynamique algébrique du système analysé, capable de décrire de multiples évolutions et interactions.

De plus, le modèle algébrique se prête facilement à une implémentation algorithmique, étant compatible avec les langages de calcul symbolique et numérique (Python, MATLAB, Mathematica).

Cet aspect le rend particulièrement adapté au traitement massif de données issues de drones et à l'intégration dans des réseaux de calcul distribués (cloud computing ou edge computing).

Par conséquent, l'algèbre aérienne ne se limite pas à une simple méthode d'analyse, mais fournit un cadre formel unificateur entre les mathématiques, la physique et la science des données, constituant une base pour la modélisation prédictive et la visualisation intelligente de l'environnement.

5.2. Limites du modèle. Comme tout modèle formel, l'„algèbre aérienne" présente des limitations méthodologiques et pratiques dont il faut tenir compte lors de son application.

L'une des principales limitations réside dans sa dépendance à la qualité et à l'homogénéité des données des drones. Les erreurs d'étalonnage des capteurs, les variations atmosphériques, les interférences électromagnétiques ou les défaillances du GNSS peuvent introduire des écarts significatifs dans les résultats finaux. Ces écarts peuvent affecter la précision des opérations de corrélation et d'interpolation, nécessitant des procédures rigoureuses de filtrage et de validation.

La densité du réseau d'observation influe également sur les performances du modèle algébrique. Un réseau de drones clairsemé peut entraîner des interpolations excessives et une perte de détails spatiaux fins. À l'inverse, une densité d'observations trop élevée implique un volume de données important et un coût de calcul accru, nécessitant des optimisations algorithmiques pour un traitement efficace.

Une autre limite tient à l'abstraction excessive du modèle: l'algèbre aérienne, bien qu'élégante mathématiquement, peut s'avérer difficile à interpréter pour les utilisateurs non spécialistes, tels que les écologues, les agronomes ou les ingénieurs en applications concrètes. Il est donc nécessaire de développer des interfaces visuelles et des outils pédagogiques qui traduisent les structures algébriques en représentations intuitives.

Enfin, la pleine applicabilité du modèle dépend de l'existence de normes ouvertes pour l'interopérabilité des données de drones, permettant l'intégration multiple et évolutive de sources sensorielles.

5.3. Potentiel interdisciplinaire. Le concept d'„algèbre aérienne" possède un potentiel interdisciplinaire important, reliant des domaines apparemment disparates grâce à une formalisation mathématique commune.

- En physique appliquée, le modèle peut décrire le transfert d'énergie, les flux de chaleur ou la distribution du rayonnement solaire grâce à des opérateurs matriciels, fournissant ainsi un cadre pour les simulations thermodynamiques aéroportées.

• En mathématiques computationnelles, l'algèbre aérienne ouvre un nouveau champ de recherche sur la manipulation des données spatiales en tant qu'entités vectorielles, permettant le développement d'algorithmes de réduction de dimensionnalité, de détection d'anomalies et de modélisation non linéaire.

• Dans le domaine de l'éducation numérique et des sciences, technologies, ingénierie, arts et mathématiques (STEAM), l'algèbre aérienne sert de plateforme d'apprentissage intégrée où les concepts mathématiques (matrices, vecteurs, fonctions de corrélation) sont appliqués à des données réelles issues de vols de drones. Cette approche contribue au développement de la pensée computationnelle, de l'analyse critique et de l'interdisciplinarité.

Ainsi, l'algèbre aérienne peut être considérée comme un langage scientifique commun entre les sciences exactes et les technologies émergentes, unifiant les concepts théoriques et les applications expérimentales.

5.4. Propositions pour étendre le modèle. Les orientations futures de la recherche visent à étendre le modèle algébrique à deux dimensions principales : l'analyse temporelle et les systèmes multi-drones.

a) Extension à l'analyse temporelle. En introduisant une dimension temporelle explicite, le modèle peut être transformé en un espace algébrique dynamique, où les opérateurs agissent non seulement sur les coordonnées spatiales (x; y; z), mais aussi sur le paramètre temporel t.

Cette extension permettrait:

• modélisation de l'évolution des phénomènes environnementaux (par exemple, les variations diurnes et saisonnières de la température);

• identification des tendances à l'aide d'opérateurs de dérivée temporelle et de corrélation décalée;

• intégration dans des modèles prédictifs basés sur l'algèbre différentielle.

b) Extension aux systèmes multi-drones. Une étape naturelle dans le développement de ce concept consiste à l'adapter aux réseaux collaboratifs de drones, où chaque drone devient un nœud dans un graphe algébrique de collecte de données.

Les opérations de composition entre nœuds peuvent être formalisées par des transformations de réseau, aboutissant à un système distribué capable d'effectuer des calculs algébriques en temps réel. Cette approche a des implications directes dans des domaines tels que:

• surveillance aérienne adaptative;

• cartographie dynamique des environnements hostiles;

• réseaux de capteurs intelligents.

5.5. Conclusions interprétatives. Les discussions soulignent que l'« algèbre aérienne » représente non seulement un nouveau cadre de traitement des données de drones, mais aussi un modèle conceptuel d'intégration des mathématiques, de la physique et de la technologie. Elle redéfinit le rapport entre observation et modélisation, entre phénomène et représentation numérique.

Grâce à sa nature extensible, ce modèle a le potentiel de devenir une base théorique pour l'analyse spatio-temporelle multidimensionnelle, capable de sous-tendre de futures applications dans la recherche, l'éducation et l'industrie (fig. 3).

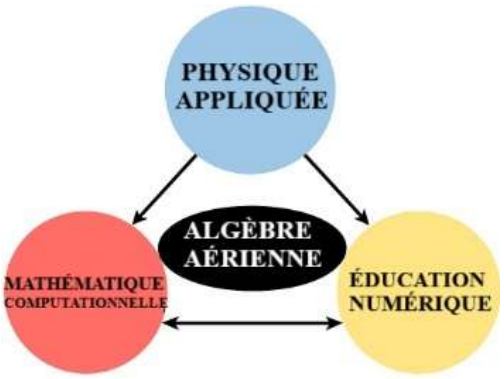


Figure 3. Le potentiel interdisciplinaire de l'algèbre aérienne

CONCLUSIONS

Cet article a démontré la validité et la valeur épistémologique du concept d'„algèbre aérienne" en tant que modèle intégratif pour l'analyse et l'interprétation des données issues de systèmes de drones multisensoriels. D'un point de vue théorique, *l'algèbre aérienne* a été formulée comme un cadre mathématique multidimensionnel, dans lequel les données thermiques, spectrales, topographiques ou d'humidité sont représentées sous forme de matrices et d'opérateurs vectoriels. Cette approche dépasse le niveau descriptif des méthodes statistiques classiques, en fournissant une représentation structurelle et relationnelle des phénomènes observés. Les contributions appliquées ont consisté à définir une méthodologie cohérente d'intégration et de traitement des données de drones, depuis l'architecture de collecte (capteurs thermiques, LiDAR et spectraux) jusqu'à l'implémentation algorithmique des transformations algébriques: agrégation vectorielle, interpolation matricielle et corrélation spatiale. L'étude de cas portant sur les variations de température et d'humidité en zone forestière a démontré la capacité du modèle à générer des représentations tridimensionnelles et des cartes algébriques d'une précision supérieure aux méthodes conventionnelles. Ainsi, ce travail confirme la faisabilité opérationnelle du modèle, validant *l'algèbre aérienne* comme outil d'analyse spatiale et de simulation scientifique adaptable aux contextes éducatifs, d'ingénierie et de recherche.

Les résultats obtenus démontrent que *l'algèbre aérienne* est un modèle robuste et extensible, capable d'intégrer des informations hétérogènes provenant de différents types de capteurs, de les transformer en structures cohérentes et de permettre une analyse comparative avec des modèles théoriques de dynamique environnementale.

La faisabilité du modèle a été confirmée par:

- Corrélation précise entre les données des drones et les modèles analytiques;
- Validation graphique et numérique par visualisations tridimensionnelles;
- La reproductibilité méthodologique, qui permet la réplication des expériences dans des contextes similaires.

De ce point de vue, *l'algèbre aérienne* apparaît non seulement comme une méthode mathématique, mais aussi comme une philosophie d'intégration des données — une synthèse entre la pensée abstraite et la réalité physique, entre l'analyse numérique et la visualisation interactive.

Orientations de développement futures

Sur la base des fondements théoriques et expérimentaux établis, les orientations de recherche et de développement suivantes sont proposées:

1. Développement d'un logiciel éducatif dédié à la visualisation et au traitement algébrique des données de drones, permettant aux élèves d'explorer directement les phénomènes aériens grâce à des simulations 3D et des interfaces intuitives. Cet outil faciliterait l'intégration de ce concept dans les programmes d'études STEAM et favoriserait la pensée informatique par le biais de modèles visuels.

2. Création d'une plateforme open source pour la communauté scientifique, destinée au traitement collaboratif des données aériennes. Celle-ci pourrait inclure des modules d'étalonnage des capteurs, d'interpolation matricielle, d'analyse temporelle et de visualisation géospatiale, basés sur des opérateurs définis dans *l'algèbre aérienne*.

3. Extinderea modelului spre analiza temporală și rețelele multi-drone, prin implementarea unor operatori tensoriali care să descrie dinamica evenimentelor spațio-temporale, oferind un cadru unificat pentru analiza fenomenelor atmosferice complexe.

En conclusion, cette recherche démontre que *l'algèbre aérienne* n'est pas seulement un concept théorique novateur, mais aussi une infrastructure cognitive et technologique moderne, qui redéfinit la manière dont les données des drones peuvent être comprises, traitées et utilisées. Elle jette les bases d'un nouveau paradigme scientifique et pédagogique, où mathématiques, physique et technologie convergent dans un langage commun d'exploration de la réalité aérienne et spatiale.

BIBLIOGRAPHIE:

1. BĂDESCU, G. Tehnologii UAV și aplicații în monitorizarea mediului. București: Editura Universitară, 2021. 254 p.
2. IONIȚĂ, C., DUMITRU, A. Analiza matematică a datelor geospațiale. Iași: Editura Polirom, 2020. 318 p.
3. POPESCU, L. Modelare ecologică și tehnologii aeriene în cercetarea mediului. Cluj-Napoca: Editura Presa Universitară Clujeană, 2022. 207 p.
4. BOURDON, S. Analyse multidimensionnelle des données environnementales. Paris: Éditions Lavoisier, 2021. 289 p.
5. DURAND, M., LEFÈVRE, T. Technologies UAV et modélisation écologique. Lyon: Presses Universitaires de Lyon, 2020. 254 p.
6. LAMBERT, A. Algèbre linéaire appliquée aux systèmes complexes. Paris: Dunod, 2022. 312 p.
7. ROUSSEAU, P. Méthodes mathématiques pour l’étude de l’environnement. Bruxelles: De Boeck Supérieur, 2019. 340 p.

CZU: 004.42:378.146(478) **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.12**

MONITORIZAREA ȘI OPTIMIZAREA PROCESULUI DE EVALUARE PRIN INSTRUMENTE DIGITALE AVANSATE

MONITORING AND OPTIMIZATION OF THE ASSESSMENT PROCESS THROUGH ADVANCED DIGITAL TOOLS

Alisa CURLICOVSCHI[1] e-mail: alisacurlicovschi@usm.md ORCID ID: 0000-0000-2874-0944

[1]Universitatea de Stat din Moldova, Chișinău, Republica Moldova

Abstract. *The ongoing digital transformation of higher education has fundamentally redefined academic assessment, shifting from traditional summative practices to continuous, data-driven evaluation supported by advanced technologies. This paper explores how digital assessment tools and artificial intelligence contribute to the modernization of evaluation processes in Moldovan universities, with a focus on platforms such as Moodle and AI-enhanced analytical systems. The study examines the benefits of digital and AI-assisted assessment: including increased objectivity, efficiency, transparency, and accessibility, alongside emerging risks related to academic integrity, privacy, and algorithmic fairness. Drawing on institutional practices in engineering and medical education, the research highlights the role of automated feedback, adaptive testing, and learning analytics in improving the quality of student learning and supporting informed pedagogical decisions. A comprehensive operational model is proposed, integrating technological, pedagogical, administrative, and ethical-legislative components to ensure a sustainable and credible ecosystem of intelligent assessment in higher education.*

Keywords: academic integrity; adaptive testing; artificial intelligence; continuous evaluation; digital assessment; higher education; learning analytics.

Introducere

Transformările profunde generate de digitalizare asupra învățământului universitar duc la reconfigurarea completă a procesului de evaluare. În mod tradițional, evaluarea era privită ca o etapă finală a procesului didactic, centrată pe verificarea nivelului de însușire a cunoștințelor după încheierea instruirii. În prezent, odată cu introducerea instrumentelor digitale avansate, evaluarea devine o activitate continuă, integrată, flexibilă și cu rol de optimizare a învățării**.** Mai mult, nu doar metodele de examinare se schimbă, ci însăși filozofia evaluării: accentul trece de la cuantificarea performanței la monitorizarea progresului și orientarea studentului spre autodezvoltare [4]. În învățământul superior din Republica Moldova, platforma Moodle s-a impus treptat ca infrastructură educațională digitală standardizată, fiind implementată la nivel instituțional în numeroase universități publice și private. Aceasta oferă un cadru unitar pentru organizarea activităților de predare, învățare și evaluare, facilitând administrarea testelor, monitorizarea progresului studenților, feedbackul imediat și arhivarea trasabilă a rezultatelor academice. Majoritatea instituțiilor universitare, inclusiv universități cu profil tehnic, pedagogic, medical, economic și artistic, care utilizează platforma Moodle pentru evaluarea curentă, verificările parțiale și examenele semestriale, beneficiind de interoperabilitatea instrumentelor digitale și de integrarea itemilor multimodali, adaptată specificului disciplinar. Prin extinderea utilizării Moodle la nivel național, evaluarea digitală devine un proces mai transparent, mai eficient și aliniat tendințelor contemporane ale educației universitare europene.

Transformările profunde din învățământul superior, determinate de digitalizare și globalizarea accesului la cunoaștere, au impus necesitatea regândirii proceselor de evaluare academică. Într-un context educațional orientat spre competențe, eficiență și transparență, evaluarea nu mai poate fi privită exclusiv ca un act de verificare finală, ci ca un proces continuu de monitorizare, sprijin și optimizare a învățării. Dezvoltarea rapidă a tehnologiilor digitale și, mai recent, integrarea inteligenței artificiale (IA) în procesele educaționale au generat premise favorabile pentru modernizarea metodelor de e-assessment, contribuind atât la creșterea calității evaluării, cât și la augmentarea experienței de învățare.

În acest cadru, instituțiile de învățământ superior din Republica Moldova adoptă tot mai frecvent platforme digitale, precum Moodle, pentru organizarea și administrarea probelor de evaluare, beneficiind de suportul tehnologic în automatizarea corectării, diversificarea itemilor, personalizarea traseului de învățare și creșterea accesului pentru toți studenții. De asemenea, instrumentele avansate, precum algoritmii de analiză a răspunsurilor, generarea adaptivă a testelor și sistemele IA de prevenire a plagiatului, conturează noi modele de evaluare, axate pe obiectivitate, validitate și trasabilitate.

Premisele conceptuale care fundamentează implementarea evaluării digitale avansate includ:

- ✓ orientarea spre o învățare centrată pe student, prin feedback imediat și reglarea continuă a performanței;
- ✓ digitalizarea proceselor administrative și a fluxurilor de lucru în evaluare;
- ✓ asigurarea integrității academice prin autentificare și monitorizare tehnologică;
- ✓ optimizarea timpului pentru cadrele didactice în proiectarea și corectarea testelor;
- ✓ analiza datelor educaționale pentru luarea deciziilor informate la nivel instituțional.

Prin urmare, evaluarea prin instrumente digitale avansate nu reprezintă doar o alternativă modernă la metodele tradiționale, ci un demers esențial pentru creșterea calității actului educațional și pentru alinierea sistemului universitar la standardele internaționale ale educației inteligente și durabile care permit:

- ✓ administrarea automatizată a testelor scrise, grilelor și examinărilor complexe,
- ✓ colectarea în timp real a datelor privind performanța, comportamentul de învățare și dificultățile studentului,
- ✓ generarea de rapoarte statistice detaliate accesibile cadrelor didactice,
- ✓ diversificarea modalităților de evaluare prin integrarea conținutului multimedia,
- ✓ personalizarea traseului de învățare și furnizarea feedbackului imediat.

Studiile realizate la USM arată că migrarea evaluării în mediul electronic a sporit calitatea actului evaluativ, reducând erorile subiective, timpul de corectare și influența factorilor externi asupra notării. La USMF, testele digitale sunt folosite intensiv în evaluarea cunoștințelor medicale applicative, de exemplu, prin itemi contextualizați, analiza imaginilor radiologice sau interpretarea ECG, creând premise pentru o evaluare autentică, apropiată de practica profesională [] (Bragăru, 2017).

În ultimii doi-trei ani, dezvoltarea rapidă a inteligenței artificiale generative (ChatGPT, Gemini, Claude) reprezintă o nouă etapă în evoluția evaluării digitale. Modelele lingvistice de mari dimensiuni (LLM) pot genera automat itemi, pot identifica incoerențe conceptuale în răspunsurile studenților, pot crea variante multiple ale acelorași examene în câteva secunde și pot oferi un feedback explicativ adaptat nivelului fiecărui cursant. Această capacitate transformă evaluarea dintr-o tehnică de măsurare într-un instrument de învățare asistată inteligent.

Totuși, extinderea evaluării digitale ridică și numeroase provocări: securitatea academică, autentificarea autoratului, transparența algoritmilor de corectare automată, riscul utilizării neadecvate a AI de către studenți, precum și necesitatea pregătirii cadrelor didactice pentru noi roluri, de la evaluatori la manageri ai datelor educaționale. Pentru a înțelege de ce evaluarea digitală este nu doar utilă, ci necesară, această lucrare propune o analiză doctrinară fundamentată pe literatură, politici educaționale și pe studii aplicate în universitățile din Republica Moldova, în special USM și USMF. Sunt prezentate șapte doctrine care justifică implementarea tehnologiilor digitale avansate și a instrumentelor AI în evaluarea universitară, însoțite de exemple concrete de monitorizare și optimizare a procesului de evaluare.

Doctrine fundamentale în modernizarea evaluării universitare

Doctrina transformării digitale în evaluarea academică

Transformarea digitală reprezintă unul dintre pilonii centrali ai modernizării învățământului superior, fundamentată pe trecerea de la procese educaționale predominant tradiționale către ecosisteme digitale inteligente, susținute de tehnologii emergente. În contextul societății bazate pe cunoaștere, digitalizarea evaluării nu mai este percepută ca un demers opțional, ci drept o condiție esențială pentru asigurarea calității, eficienței administrative, transparenței și competitivității instituționale. Doctrina transformării digitale se întemeiază pe premisa că evaluarea academică poate fi optimizată prin integrarea platformelor de management educațional (LMS), instrumentelor automatizate de evaluare, sistemelor de proctorizare avansată și aplicațiilor de inteligență artificială**,** capabile să gestioneze și să analizeze volume mari de date educaționale cu acuratețe crescută. În această paradigmă, rolul cadrelor universitare evoluează substanțial: profesorul devine arhitect al evaluării **și** analist al performanțelor academice**,** orientat către luarea deciziilor pedagogice bazate pe evidențe.

Exemple din practica universitară confirmă dinamica acestui proces. La Universitatea de Stat din Moldova (Facultatea de Fizică și Inginerie; Facultatea de Matematică și Informatică), platforma Moodle este utilizată pentru proiectarea, administrarea și analiza evaluărilor formative și sumative, incluzând testarea randomizată, corectarea automatizată și raportarea statistică a progresului. La Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie „Nicolae Testemițanu”, evaluările computerizate MCQ, simulările digitale și probele practice asistate tehnologic contribuie la standardizarea certificării competențelor clinice**.** [12]

Astfel, transformarea digitală susține tranziția către evaluarea continuă, predictivă și integrată**,** în care tehnologiile digitale și analitice devin instrumente indispensabile pentru managementul calității și perfecționarea învățării universitare.

Doctrina accesibilității și echității educaționale

Doctrina accesibilității educaționale se întemeiază pe principiul dreptului egal la învățare și evaluare**,** consacrat în directivele europene privind incluziunea academică. Evaluarea digitală susține această doctrină prin extinderea accesului la resurse și examinări pentru toți studenții, indiferent de constrângerile geografice, socio-economice sau fizice. Implementarea instrumentelor de testare online permite participarea în condiții flexibile, sincron sau asincron, facilitând continuitatea studiilor în perioade de mobilitate academică ori în situații excepționale (cum a fost pandemia). Mai mult, evaluarea realizată prin mecanisme tehnologice asigură reducerea biasului uman și standardizarea criteriilor de corectare, consolidând încrederea studenților în corectitudine și transparență.

Un aspect deosebit de important îl constituie adaptarea evaluărilor pentru studenții cu dizabilități: interfețe compatibile cu tehnologii de asistare, timp suplimentar, structurarea vizuală a conținutului sau accesibilitatea multiplatformă, în conformitate cu standardele internaționale WCAG pentru e-incluziune.

La USM, extinderea evaluărilor online a favorizat accesul studenților aflați în mobilități Erasmus+ sau în situații economice precare, reducând abandonul universitar. În același sens, la USMF, digitalizarea evaluărilor în modulele clinice și preclinice a permis studenților implicați în stagii medicale să participe la probe de evaluare în mod adaptat și echitabil.

Prin urmare, această doctrină argumentează necesitatea utilizării evaluării digitale ca mijloc de democratizare a educației**,** oferind fiecărui student posibilitatea reală de a demonstra competențele dobândite în condiții de echitate academică.

Doctrina centrată pe student în evaluarea modernă

Reformele curriculare contemporane accentuează trecerea de la un model educațional centrat pe predare la unul axat pe învățarea activă a studentului**,** în care evaluarea nu se limitează la certificarea finală a rezultatelor, ci devine mecanism fundamental al învățării**.** Doctrina centrată pe student susține că evaluarea trebuie să ofere feedback formativ imediat**,** să stimuleze autoreglarea, reflecția critică și implicarea conștientă în procesul educațional.

Prin capacitățile sale tehnice, evaluarea digitală facilitează:

- ✓ personalizarea traseelor de învățare în funcție de necesitățile academice individuale;
- ✓ exercițiul autonom al autoevaluării și implicarea în evaluarea colegială;
- ✓ creșterea motivației intrinseci, datorită caracterului interactiv al instrumentelor digitale;
- ✓ monitorizarea analitică a progresului, pe baza unor indicatori relevanți ai învățării [8].

În arhitectura evaluării academice, evaluarea sumativă rămâne un mecanism esențial pentru certificarea competențelor și decizia asupra progresului universitar. Literatura autohtonă evidențiază faptul că aceasta contribuie la validarea rezultatelor învățării și la asigurarea calității actului educațional [2]. În contextul digitalizării, aceste funcții sunt menținute, dar se transformă prin tehnologii care permit automatizarea analizei performanței, reducerea variabilității subiective și optimizarea trasabilității procesului evaluativ. În universitățile moldovenești, utilizarea rapoartelor analitice din Moodle a permis cadrelor didactice să identifice din timp dificultățile studenților și să reactiveze activități remediale. În domeniul medical, USMF valorifică evaluarea repetată prin simulări formative pentru consolidarea competențelor profesionale critice**.**

Astfel, evaluarea digitală își consolidează funcția de partener al învățării, implicând studentul ca participant activ, reflexiv și responsabil în parcursul propriei formări profesionale.

Fundamentele modernizării evaluării universitare prin instrumente digitale avansate

Transformările tehnologice accelerate și orientarea sistemelor educaționale spre inovare au determinat o reevaluare a rolului evaluării în formarea competențelor profesionale. În învățământul superior, procesul de evaluare trebuie să asigure obiectivitate, eficiență, flexibilitate și validitate**,** răspunzând noilor cerințe impuse de societatea cunoașterii și digitalizării structurale. Instituțiile universitare din Republica Moldova, precum Universitatea de Stat din Moldova, Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie „Nicolae Testemițanu”, Universitatea Tehnică a Moldovei, Universitatea de Stat „Alecu Russo” din Bălți, Universitatea de Stat din Tiraspol ș.a. utilizează de mai mulți ani platforme de

management educațional, în special Moodle, ca bază tehnologică pentru desfășurarea evaluărilor formative și sumative. Acest model permite:

- ✓ administrarea centralizată a testelor
- ✓ accesibilitate crescută pentru studenți, inclusiv cei în mobilitate sau cu dizabilități
- ✓ automatizarea parțială a corectării și eliminarea biasurilor de evaluare
- ✓ feedback imediat, favorizând reglarea procesului de învățare
- ✓ monitorizarea progresului prin sisteme analitice integrate

Necesitatea consolidării procesului de evaluare digitală derivă și din schimbările post-pandemice, care au evidențiat vulnerabilități ale evaluării tradiționale și au accelerat adoptarea strategiilor digitale ca normă a sustenabilității educației**.**

Evaluarea asistată de inteligență artificială: beneficii, riscuri și direcții de optimizare

Integrarea inteligenței artificiale (IA) în evaluarea universitară marchează o etapă decisivă în evoluția pedagogiei digitale contemporane. Aceasta favorizează tranziția de la un model de evaluare static, centrat pe măsurarea punctuală a performanței, către un sistem adaptiv, inteligent**,** orientat spre îmbunătățirea continuă a învățării. Numeroase cercetări subliniază potențialul IA de a spori obiectivitatea evaluării**,** de a automatiza procesele de analiză a performanțelor și de a personaliza traseele educaționale**,** contribuind la optimizarea rezultatelor academice [3], [7].

Beneficiile evaluării asistate de IA

O primă categorie de avantaje derivă din automatizarea activităților repetitive și consumatoare de timp**.** Algoritmii specializați permit evaluarea rapidă a itemilor obiectivi și generarea de rapoarte analitice detaliate, reducând sarcina administrativă a cadrelor didactice și permițând orientarea acestora spre activități cu valoare pedagogică ridicată [5]. Un alt beneficiu major îl reprezintă testarea adaptivă, care ajustează nivelul dificultății în funcție de răspunsurile succesive ale studentului [9]. Fundamentată pe teoriile moderne ale măsurării (IRT, Item Response Theory), aceasta oferă o apreciere mult mai fidelă a competențelor reale și elimină riscul supra- sau subevaluării [7]. În contextul dezvoltărilor recente ale modelelor generative, feedbackul automat personalizat devine o componentă cheie a autoreglării învățării. GenAI poate furniza explicații detaliate, sugestii remediale și recomandări adaptate nivelului studentului, sporind atât eficiența învățării, cât și motivația intrinsecă. [3], [10]. De asemenea, IA contribuie la consolidarea integrității academice, prin dezvoltarea unor sisteme avansate de proctorizare, recunoaștere facială și detectare a plagiatului, inclusiv a conținuturilor generate automat [11]. Aceste instrumente sunt deja testate și utilizate în universitățile moldovenești, în special la USMF, în probele de certificare a competențelor clinice. Prin urmare, evaluarea asistată de IA nu doar eficientizează mecanismele tradiționale, ci redefinește însuși scopul evaluării de la verificarea statică a rezultatelor, la sprijinirea învățării adaptative și formarea competențelor profesionale autentice [8].

Riscuri, limitări și controverse etice

În paralel cu avantajele evidente, literatura atrage atenția asupra unui set de provocări ce trebuie abordate prin reglementări și politici academice coerente.

O preocupare majoră privește facilitarea fraudelor tehnologice, întrucât aceleași sisteme care pot genera feedback pot produce în mod automat răspunsuri sau chiar lucrări complete, afectând validitatea

măsurării performanțelor reale [13]. De asemenea, caracterul opac al unor algoritmi, fenomen cunoscut în literatura de specialitate ca *„black box AI”*, ridică întrebări privind justețea evaluării, biasurile sistemice și responsabilitatea decizională [1].

Un alt aspect critic este cel al confidențialității datelor, deoarece implementarea IA implică procesarea unor seturi sensibile de date comportamentale și biometrice, impunând respectarea cu strictețe a normelor GDPR și a eticii academice [14]. Nu în ultimul rând, se conturează riscul unei dependențe cognitive excesive, studenții putând delega IA sarcini care sunt esențiale în dezvoltarea competențelor superioare, precum gândirea critică sau creativitatea [6].

Aceste limitări solicită un echilibru între beneficiile tehnologice și autonomia cognitivă a studentului**,** garantând că IA servește învățarea, fără a o substitui.

Direcții de optimizare a implementării IA în evaluarea universitară

Calitatea integrării inteligenței artificiale depinde de maturitatea digitală a instituțiilor universitare și de capacitatea acestora de a adopta o cultură a responsabilității digitale. Literatura de specialitate sugerează următoarele direcții strategice, Tabelul 1:

Tabelul 1 Direcții strategice de optimizare a implementării IA în evaluarea universitară

Direcție strategică	Măsuri recomandate	Beneficii așteptate
Dezvoltarea competențelor digitale ale cadrelor didactice și studenților	Programe de formare continuă, certificări digitale	Utilizare critică, sigură și etică a IA
Transparență și audit algoritmic	Politici de explicabilitate, criterii publice de evaluare	Reducerea biasurilor și sporirea încrederii
Integrarea graduală a IA în platformele LMS	Module de analiză predictivă și feedback adaptiv	Monitorizarea timpurie a progresului studenților
Norme instituționale de etică a IA	Politici riguroase privind protecția datelor și integritatea academică	Respectarea principiilor de echitate și confidențialitate
Cercetare pedagogică aplicată	Studii longitudinale de impact	Îmbunătățirea continuă a practicilor de evaluare

În universitățile din Republica Moldova se recomandă:

- ✓ extinderea Learning Analytics în Moodle pentru analiza progresului studenților;
- ✓ utilizarea sistemelor antiplagiat avansate și a proctorizării IA în examenele de certificare;
- ✓ feedback automatizat adaptiv în programele cu structură practică, precum cele inginerești (USM) și medicale (USMF).

Model operațional de optimizare a evaluării digitale în învățământul superior din Republica Moldova

Modernizarea evaluării universitare în Republica Moldova necesită o viziune sistemică, aliniată transformărilor educaționale internaționale și adaptată contextului instituțional autohton. În acest sens, se configurează un model operațional care îmbină evoluțiile tehnologice cu exigențele pedagogice, administrative și etic-legislative, în scopul consolidării unui ecosistem evaluativ inteligent, funcțional și credibil. Acest model își propune să transforme evaluarea într-un instrument continuu de optimizare a învățării și de asigurare a calității academice.

Primul pilon al sistemului îl constituie infrastructura tehnologică, care devine suportul indispensabil al tuturor intervențiilor ulterioare. Dezvoltarea platformelor digitale robuste și interoperabile, precum Moodle, integrarea analiticii educaționale și a algoritmilor de inteligență artificială pentru proctorizare și analiză automată a performanțelor permit gestionarea eficientă a proceselor evaluative. În cadrul USM, de exemplu, utilizarea funcționalităților extinse ale Moodle facilitează colectarea și interpretarea datelor educaționale, susținând un proces decizional fundamentat pe evidențe. În mediul medical universitar, cum este cazul USMF „Nicolae Testemițanu", simulările digitale și testarea computerizată MCQ contribuie la standardizarea evaluării competențelor clinice, esențiale pentru siguranța actului profesional. În această perspectivă, infrastructura tehnologică nu este doar un mediu de distribuție a testelor, ci o componentă strategică a modernizării evaluării.

Dimensiunea pedagogică a modelului subliniază necesitatea ca evaluarea digitală să funcționeze în serviciul învățării autentice și autoreglate. În acest sens, evaluarea se reconfigurează dintr-un moment static într-un proces dinamic, orientat spre îmbunătățirea continuă a performanței studenților. Feedback-ul imediat, testarea adaptivă, portofoliile electronice, evaluarea colegială și instrumentele de remediere generate automat devin resurse care stimulează reflecția, dezvoltarea competențelor cognitive superioare și asumarea responsabilității pentru progresul individual. La USM, aceste practici se dovedesc relevante în formarea competențelor inginerești, în timp ce USMF le valorifică în învățarea clinică, unde repetitivitatea, evaluarea formativă periodică și analiza obiectivă a performanțelor sunt indispensabile profesionalizării. Acest proces educațional modern nu poate funcționa eficient în absența unei guvernanțe administrative adecvate. Formarea continuă a cadrelor universitare, certificarea competențelor digitale, clarificarea rolurilor instituționale implicate în gestionarea platformelor educaționale și monitorizarea recurentă a calității evaluării digitale sunt elemente esențiale pentru funcționalitatea sistemului.

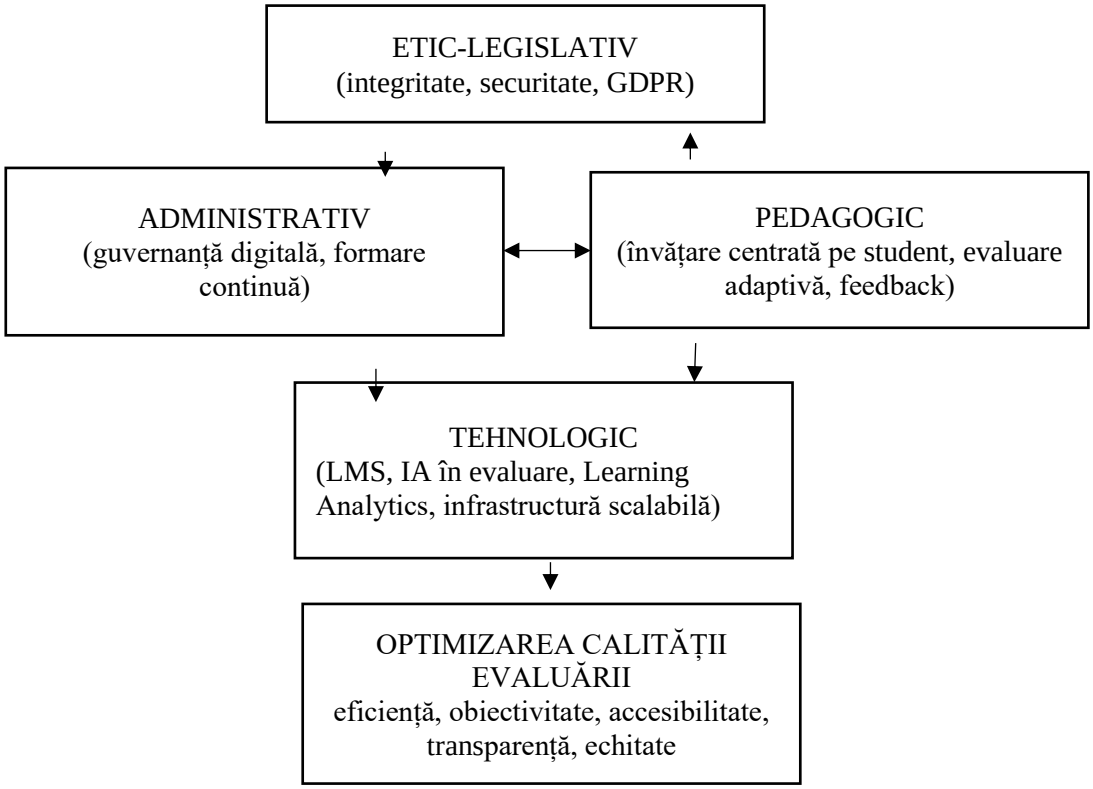


Figura 1. Structura modelului operațional de optimizare a evaluării digitale în învățământul superior

Instituțiile de învățământ superior trebuie să constituie centre de expertiză în e-assessment, care să dezvolte metodologii comune, să ofere suport pedagogic și să asigure uniformitatea practicilor evaluative. În plus, o planificare academică coerentă este necesară pentru evitarea suprasolicitării actorilor implicați și asigurarea unei tranziții sustenabile spre evaluarea digitală la scară instituțională extensibilă [15], [16]. În fine, utilizarea tehnologiilor inteligente în evaluare implică responsabilități etice, juridice și instituționale semnificative. Protecția datelor studenților, transparența algoritmică, prevenirea abuzurilor tehnologice, garantarea integrității academice și armonizarea cu principiile europene de confidențialitate devin imperative strategice [14]. Adaptarea regulamentelor academice la noile forme de evaluare, instituirea unor norme instituționale privind utilizarea IA și mecanismele de contestare a deciziilor automatizate contribuie la menținerea credibilității sociale a rezultatelor evaluării universitare, Figura 1. Prin integrarea coerentă a celor patru dimensiuni, tehnologică, pedagogică, administrativă și etic-legislativă, modelul propus configurează o viziune holistică a transformării evaluării universitare. Tehnologia oferă cadrul operațional, pedagogia valorifică potențialul educațional al instrumentelor digitale, administrația reglează coerența implementării, iar etica și legislația protejează echitatea și drepturile studenților. În această formulă, evaluarea digitală devine un vector de calitate și un garant al competitivității internaționale a sistemului universitar din Republica Moldova, contribuind la alinierea instituțiilor de învățământ superior la standardele unei educații inteligente și sustenabile.

Concluzii

Transformarea digitală a evaluării universitare constituie o direcție strategică esențială pentru modernizarea învățământului superior și pentru alinierea acestuia la standardele europene ale educației inteligente. Studiul realizat evidențiază faptul că integrarea instrumentelor digitale avansate și a inteligenței artificiale în evaluare determină o schimbare profundă atât în metodologia evaluativă, cât și în filosofia procesului de învățare. Evaluarea nu mai este concepută ca un demers final și static, ci ca un proces continuu, dinamic și orientat spre sprijinirea performanței academice și dezvoltarea competențelor profesionale. Analiza doctrinară demonstrează că modernizarea evaluării prin tehnologie se întemeiază pe trei piloni conceptuali majori: transformarea digitală, accesibilitatea și centrare pe student. Aceștia converg spre un model de evaluare obiectiv, eficient, flexibil și echitabil. Contribuțiile platformelor LMS, precum Moodle, sunt deja vizibile în universitățile din Republica Moldova, unde evaluarea digitală a permis reducerea sarcinilor administrative, creșterea trasabilității și a transparenței procesului evaluativ, precum și extinderea accesului la învățare pentru studenți în contexte variate.

Integrarea inteligenței artificiale deschide noi oportunități pedagogice: automatizarea corectării, personalizarea feedbackului, analiza predictivă a rezultatelor și monitorizarea în timp real a progresului studenților. În același timp, această evoluție ridică provocări relevante, precum riscul utilizării incorecte a tehnologiilor generative, opacitatea algoritmică, protecția datelor cu caracter personal și nevoia dezvoltării unei culturi academice a responsabilității digitale. Modelul operațional propus în lucrare oferă o viziune structurată asupra optimizării evaluării digitale prin abordarea simultană a patru dimensiuni complementare: tehnologică, pedagogică, administrativă și etic-legislativă. Doar prin corelarea coerentă a acestor dimensiuni se poate asigura sustenabilitatea și credibilitatea unui ecosistem evaluativ inteligent.

În concluzie, evaluarea prin instrumente digitale avansate reprezintă nu doar o soluție modernă pentru eficientizarea procesului academic, ci un element fundamental al transformării educației universitare în direcția inovației, competitivității și excelenței educaționale. Extinderea cercetărilor aplicate, investiția în formarea competențelor digitale ale cadrelor didactice și dezvoltarea politicilor instituționale etice constituie direcții necesare pentru consolidarea unei evaluări universitare riguroase și orientate spre viitor.

Bibliografie:

1. BARRETT, N., PACK, T. Ethics and algorithm transparency in education. International Journal of Educational Technology, 2023.
2. BÎRNAZ, N. Evaluarea sumativă în învățământul universitar. În: Didactica universitară: studii și experiențe. Chișinău: Centrul Editorial-Poligrafic al USM, 2013, pp. 124–134.
3. CHIU, T. K., LI, K. C. Feedback personalization with generative AI in learning environments. Educational Technology Research and Development, 2023, 71(2), pp. 445–467.
4. CROITOR, M., BENEDICT, V., HĂMURARU, V. Testarea electronică – metodă eficientă de învățare. Conferinţa Ştiinţifico-Practică „INOVAŢII PRIN INTERMEDIUL TIC ÎN ÎNVĂŢĂMÎNTUL UNIVERSITAR ŞI PREUNIVERSITAR DIN REPUBLICA MOLDOVA”, Universitatea de Stat „B.P. Hasdeu” din Cahul, 2020, pp. 378–381.
5. GAMAGE, K. A. A., SILVA, E. K. DE, GUNAWARDHANA, N. Online and hybrid learning: Enhancing online assessment in universities. Education Sciences, 9(2), 2019. 51 p.
6. GUO, Y., WANG, P. Overreliance on AI tools and its impact on learners' autonomy. Higher Education Research & Development, 2023.
7. IFENTHALER, D. Digital Learning and Assessment: Item Response Theory Applications. Springer, 2012.
8. IFENTHALER, D., GREIFF, S. AI-based assessment in higher education: Opportunities and challenges. British Journal of Educational Technology, 52(4), 2021, pp.1–15.
9. LEE, S., JUNG, H., KO, E. Adaptive assessment leveraging item response theory and machine learning. Computers & Education, 175, 2021, 104323.
10. MARTIN, F., WHITMER, J. Automated feedback and its impact on learner performance. Computers in Human Behavior, 62, 2016, pp. 314–324.
11. MOORHOUSE, B. L., LI, Y., WALSH, C. Academic integrity challenges in the era of generative AI. Assessment & Evaluation in Higher Education, 2023.
12. PECA, A. Evaluarea digitală în procesul de învățământ contemporan. Extras din lucrare universitară, USMF „Nicolae Testemițanu”, 2019.
13. PERERA, D., LANKATHILAKE, K. AI-supported cheating: Risks and countermeasures. Technology, Pedagogy and Education, *32*(5), 2023, pp. 589–608.
14. RAJABI, M., KARAMI, A., REED, S. AI proctoring and privacy in higher education: GDPR implications. Computers & Security, *129*, 2023,103245.
15. Regulamentul privind evaluarea academică a studenților. Chișinău: USM. (aprobat prin Hotărârea Senatului USM nr. 2/2022), Universitatea de Stat din Moldova**,** 2022.
16. Regulamentul privind evaluarea rezultatelor învățării la programele de studii superioare. Chișinău: USMF. (aprobat prin Hotărârea Senatului USMF nr. 14/2021.

CZU: 502/504(094) **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.13**

RAPORTAREA PRIVIND SUSTENABILITATEA ȘI PERFORMANȚA DE MEDIU: PRACTICI ȘI PROVOCĂRI ESG EMERGENTE

SUSTAINABILITY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE REPORTING: EMERGING ESG PRACTICES AND CHALLENGES

Marian JALENCU[1] e-mail: marian.jalencu@usm.md ORCID ID: 0000-0001-7690-7432

[1]Moldova State University, 60 A. Mateevici Street, MD-2009, Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. *Articolul cercetează evoluțiile recente în raportarea performanței de mediu și a sustenabilității, concentrându-se pe practicile ESG emergente și provocările organizațiilor. Scopul este de a analiza modul în care companiile integrează indicatorii de mediu, divulgările climatice și aspectele de sustenabilitate în sistemele de raportare, în contextul cerințelor regulatorii și al așteptărilor părților interesate. Studiul aplică o abordare calitativă, combinând analiza standardelor internaționale de raportare (GRI, ESRS, ISSB, CDP) cu revizuirea literaturii academice și a rapoartelor corporative. Este realizată o comparație a practicilor de raportare a performanței de mediu între sectoare și regiuni, identificând provocări metodologice precum consistența datelor, delimitarea granițelor, evaluarea materialității și cerințele emergente de asigurare. Rezultatele arată progrese în raportarea indicatorilor de mediu (emisii de carbon, eficiență energetică, gestionarea deșeurilor), dar persistă probleme legate de calitatea datelor, armonizarea metodologică și integrarea în deciziile strategice. Noile cadre de reglementare (CSRD, ESRS) sporesc comparabilitatea și responsabilitatea, dar cresc complexitatea și cerințele de conformitate. Originalitatea articolului constă în sinteza integrativă a practicilor ESG emergente, axată pe performanța de mediu, oferind perspective valoroase pentru cercetători, practicieni și decidenți în domeniul sustenabilității corporative.*

Cuvinte-cheie: *Raportare ESG, Performanță de Mediu, Practici de Sustenabilitate, Divulgare Corporativă, Cadre Reglementare*

INTRODUCTION

In recent years, sustainability reporting has evolved from a peripheral corporate communication tool into a central instrument for demonstrating organizational accountability, risk management capacity, and long-term value creation. Among the three ESG pillars—environmental, social, and governance - *environmental performance has gained particular importance*, driven by accelerating climate change, biodiversity loss, resource scarcity, and rising regulatory expectations. Governments, investors, rating agencies, and civil society increasingly demand clear, comparable, and decision-useful information on how companies measure, manage, and mitigate their environmental impacts. As a result, reporting practices that were once voluntary and fragmented have begun transitioning toward structured frameworks, standardized metrics, and externally assured disclosures.

Environmental performance reporting now encompasses a wide range of indicators, including greenhouse gas (GHG) emissions, energy consumption, water efficiency, waste management, circularity practices, pollution control, and climate-related risk exposure. The growing prominence of climate-related financial risks, highlighted in frameworks such as the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD), has further strengthened expectations for quantitative, forward-looking,

and scenario-based environmental information. Similarly, the EU Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) and the European Sustainability Reporting Standards (ESRS) require companies to conduct double materiality assessments and disclose both environmental impacts and financial dependencies. This regulatory shift places environmental performance at the front line of corporate sustainability strategies and stakeholder evaluations.

Despite progress, significant challenges persist. Companies often struggle with measurement inconsistencies, limited availability of reliable environmental data, and difficulties in aligning internal management systems with new regulatory requirements. Small and medium-sized enterprises face additional capacity constraints as they adapt to emerging ESG expectations. Moreover, the integration of environmental performance indicators into strategic decision-making, risk assessment, and long-term planning remains uneven across sectors.

This article investigates these developments by analyzing current sustainability and environmental performance reporting practices and the emerging challenges associated with ESG disclosure. Through this examination, the study contributes to a deeper understanding of how organizations navigate evolving regulatory frameworks, rising stakeholder expectations, and the complex demands of environmental accountability. The findings aim to support both academic inquiry and practical decision-making, offering insights that enhance the transparency, reliability, and strategic relevance of environmental performance reporting.

LITERATURE REVIEW

Environmental performance reporting has become a fundamental component of corporate sustainability disclosure, reflecting the increasing recognition of environmental risks as material strategic challenges for organizations. The academic literature emphasizes that environmental performance encompasses both quantitative and qualitative indicators related to emissions, resource efficiency, pollution control, waste management, and biodiversity impacts (Schaltegger & Burritt, 2018). Early studies focused on voluntary environmental reporting practices, highlighting the significant variation in scope, methodological rigor, and comparability across companies (Gray, Kouhy & Lavers, 1995). However, the regulatory landscape has since evolved, driven by global commitments to climate neutrality and the rising influence of ESG-oriented investors.

Environmental Accounting and Performance Metrics. Environmental performance is closely linked to environmental accounting, which provides the measurement and analytical basis for evaluating ecological impacts. According to Burritt, Schaltegger, and Carter (2002), environmental accounting systems are essential for generating reliable data that enable companies to monitor environmental efficiency and assess lifecycle impacts. More recent studies (Qian & Schaltegger, 2017) argue that environmental performance assessments should integrate both direct environmental impacts—such as GHG emissions, water use, and waste generation—and indirect impacts embedded in supply chains, requiring companies to improve traceability and data collection capabilities.

The emergence of standardized reporting frameworks has attempted to harmonize environmental metrics. The Global Reporting Initiative (GRI), particularly GRI 302 (Energy), GRI 303 (Water), and GRI 305 (Emissions), establishes widely adopted environmental indicators. Similarly, the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD, 2017) emphasizes forward-looking assessments of

climate risks and resilience strategies. Scholars such as Eccles and Krzus (2018) emphasize that such frameworks stimulate comparability and reduce information asymmetry between companies and stakeholders.

Environmental Performance and Regulatory Developments. Regulation plays an increasingly influential role in shaping environmental reporting practices. The European Union has become a global leader in this field, with the recent Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) and European Sustainability Reporting Standards (ESRS E1–E5) imposing mandatory requirements for detailed environmental disclosures. Academic analyses (La Torre et al., 2023) highlight that ESRS introduces a higher level of standardization and granularity, particularly regarding climate change mitigation, pollution prevention, water and marine resources, and circular economy practices. The shift toward mandatory environmental reporting addresses the well-documented limitations of voluntary disclosure, such as selective reporting and greenwashing (Cho & Patten, 2007).

Assurance and Reliability of Environmental Reporting. A significant stream of literature examines the assurance of environmental and sustainability information. Simnett, Vanstraelen, and Chua (2009) demonstrate that external assurance enhances the credibility and perceived reliability of environmental disclosures, particularly when assurance is provided by established audit firms. Recent studies (Boiral, Heras-Saizarbitoria & Brotherton, 2020) argue that assurance also contributes to organizational learning by encouraging more robust internal environmental management systems. The introduction of ESRS and growing investor pressure intensify the need for rigorous third-party verification to ensure the accuracy of environmental data and to combat symbolic disclosure.

Environmental Performance and Corporate Strategy. Research also emphasizes the strategic role of environmental performance within broader corporate sustainability agendas. According to Porter and van der Linde (1995), improved environmental performance can enhance competitive advantage by reducing resource costs and stimulating innovation. More recent perspectives (Dangelico & Vocalelli, 2017) suggest that environmental performance reporting drives eco-innovation, enabling firms to identify environmental hotspots and develop more sustainable business models. The literature further indicates a positive relationship between high-quality environmental reporting and improved financial performance, mediated by enhanced stakeholder trust (Clark, Feiner & Viehs, 2015).

Challenges in Environmental Performance Reporting. Despite regulatory progress, significant challenges remain. Companies face methodological difficulties in measuring complex environmental impacts, especially those associated with Scope 3 emissions (Kling et al., 2021). Data fragmentation, limited digital infrastructure, and inconsistent boundary definitions hinder comparability across sectors. Scholars (Hahn & Kühnen, 2013) also point to tensions between comprehensive reporting and information overload, raising questions about the balance between transparency and relevance. Furthermore, SMEs encounter disproportionate compliance burdens due to limited technical and financial resources (European Commission, 2023).

Overall, the literature reveals a dynamic evolution in environmental performance reporting, driven by regulatory innovation, stakeholder expectations, and the growing recognition of environmental risks as central to business continuity. However, the operationalization of high-quality environmental reporting remains complex, underscoring the need for further research and capacity building.

MATERIALS AND METHODS

This study employs a qualitative, comparative, and document-based research design to explore sustainability and environmental performance reporting practices, with a specific focus on emerging ESG requirements in *Republica Moldova***,** *România*, and the *European Union*. The methodological approach was structured in four stages: (1) selection and analysis of regulatory frameworks; (2) collection of corporate sustainability and environmental reports; (3) coding and thematic content analysis; and (4) comparative cross-jurisdictional assessment. This combined methodological structure ensures both depth and contextual accuracy in evaluating how organizations approach environmental performance disclosures amid evolving ESG expectations.

Regulatory and Policy Documents. To examine the institutional context influencing reporting practices, the study draws upon a comprehensive set of regulatory documents, strategically selected to capture the full spectrum of environmental and sustainability reporting obligations:

- *European Union:* In the European Union, corporate sustainability reporting is shaped by several key regulatory frameworks and guidance documents, including the *Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD, 2022)***,** the *European Sustainability Reporting Standards (ESRS, E1–E5, 2023)***,** the *EU Taxonomy Regulation (2020)***,** and the earlier *Non-Financial Reporting Directive (NFRD, 2014)***.** These are complemented by the *EU Green Deal communications (2019–2024)* and *EFRAG's TCFD-aligned guidance (2021–2023)***,** which collectively establish the standards for ESG disclosure, assurance, and corporate transparency across member states.

- *Romania:* In Romania, the implementation of non-financial reporting requirements has been guided by the *transposition of Directive 2014/95/EU on Non-Financial Reporting***,** supported by *Order no. 1938/2016 issued by the Ministry of Finance***,** relevant *ANAF guidelines on non-financial reporting***,** and aligned with the country's strategic objectives outlined in the *National Strategy for Sustainable Development 2030.*

- *Republic of Moldova*: In the Republic of Moldova, the regulatory framework for non-financial and environmental reporting is primarily based on the *Law on Accounting and Financial Reporting (No. 139/2017)***,** supplemented by *regulations on non-financial reporting in the public sector***,** the *National Environmental Strategy 2030***,** and the *National Action Plan for Environment and Climate (NAP)***.** These are further supported by related guidelines and documents issued by the *Ministry of Environment* and the *National Commission of the Financial Market***,** collectively establishing the national standards and practices for ESG and environmental performance disclosure.

These documents were selected based on their direct relevance to environmental performance reporting, as well as their importance in establishing the ESG compliance framework.

Corporate and Institutional Reports. For the applied analysis, sustainability reports and integrated reports from the period 2020 - 2024 were analyzed, representing: companies listed on the Bucharest Stock Exchange (Romania); - multinational companies operating in Romania; - large utilities, energy, agro-industrial and telecommunications enterprises from the Republic of Moldova; - reports of European companies considered leaders in environmental performance reporting (e.g. Enel, Siemens, IKEA).

The selection criteria included: public availability, reporting according to GRI/ESRS/TCFD, relevance for sectors with high environmental impact and the presence of environmental performance indicators.

Limitations of the Methodology. The methodology presents several important limitations:

- lack of detailed ESG reports for Moldovan companies (reporting is still voluntary);
- very high variation in reporting maturity across sectors;
- lack of access to internal operational data for indicator verification;
- low comparability of environmental indicators between companies using GRI and those applying ESRS.

Despite these limitations, the dataset and methodological approach allow for robust assessment of trends, convergences and differences across jurisdictions. All documents analyzed are public, do not involve personal data or confidential information, and comply with academic principles regarding citation and limited reproduction of content.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis of sustainability reports from the Republic of Moldova, Romania and the European Union reveals a significant differentiation in the level of maturity in environmental performance reporting. The results indicate three distinct trajectories:

1. *EU* - advanced maturity, detailed reporting, aligned with ESRS/GRI/TCFD;
2. *Romania* - intermediate maturity, with accelerated growth due to the adoption of CSRD;
3. *Republic of Moldova* - emerging maturity, with a predominant focus on voluntary reporting and fragmented indicators.

Table 1. Level of detail of environmental indicators

Country	GHG indicators	Energy	Water	Waste	Roundness	Biodiversity
EU	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Average - Advanced	Average
Romania	Average	Average	Average	Average	Low-Average	Low
Republic of Moldova	Low	Low	Low	Low	Low	Non-existent

The EU presents almost complete coverage of the indicators required by the ESRS E1–E5, while Romania is in a process of alignment and Moldova continues to show structural gaps.

The analysis of environmental performance at the European Union level provides an essential context for understanding the gaps and progress recorded by the Republic of Moldova and Romania. Structured on indicators such as GHG emissions, waste management, renewable energy, energy efficiency and air quality, the comparison highlights both structural and institutional differences.

In 2023, total EU emissions fell by around 30% compared to 1990, supported by the energy transition and ambitious climate policies. Romania, similarly, recorded a reduction of over 50% compared to 1990, as a result of post-industrial restructuring and investments in renewable energy

(Eurostat, 2024). In contrast, the Republic of Moldova shows a slower reduction, of around 15–18% compared to the 1990s, partly due to its dependence on energy imports and outdated industrial infrastructure (Ministry of Environment of the Republic of Moldova, 2024). The EU has reached a share of 23% renewable energy in gross final consumption in 2023, in line with the Fit for 55 targets. Romania exceeds the European average, standing at around 25%, due to investments in hydropower and wind power (ANRE, 2024). Moldova, however, has a share of only 4–5%, which highlights a major energy vulnerability and a critical need for diversification (EEA, 2024).

The EU is moving towards circular models, with a recycling rate of 48%. Romania continues to face systemic problems, reporting a recycling rate below 14%, being monitored in infringement procedures (European Commission, 2024). The Republic of Moldova has even lower performances, around 7–8%, reflecting the lack of infrastructure for separate collection and recycling (Environmental Agency of the Republic of Moldova, 2024). These data confirm that environmental performance in the two countries is predominantly influenced by institutional capacity, public investment, the degree of digitalization, and the pressures exerted by European policies, to which Moldova only aspires and is not yet fully aligned.

In Europe, the main ESG constraints are:

- the complexity of the Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) standards;
- the need to allocate resources for internal ESG auditing;
- insufficient digitalization of non-financial reporting in SMEs.

For Romania, the major challenge lies in the coherent implementation of the legislation and the capacity of companies to produce verifiable reports, especially in energy-intensive sectors.

The *Republic of Moldova* faces additional challenges:

- the lack of mandatory ESG reporting for most companies;
- limited infrastructure for measuring emissions;
- lack of certified experts in the field of sustainability reporting.

A recurring obstacle in all three areas analyzed is data quality. In the EU, large companies already have robust data collection systems, but SMEs are lagging behind. In Romania, environmental data is often fragmented, relying on slow and sometimes incomplete administrative reporting. In Republic of Moldova, the shortcomings are even more pronounced — many companies lack equipment to measure emissions, resulting in incomplete reports or reports not aligned with international methodologies. Although companies in the EU are required to link ESG indicators to strategic plans, companies in Romania and Moldova often view environmental performance as a bureaucratic exercise. This limits the real impact of reporting. *The lack of strategic integration causes a significant gap between formal reporting and actual environmental performance*.

Table 2. Cross-country Comparative Analysis: Institutional Maturity Level

Country	ESG maturity level	Reporting obligations	Institutional capacity	Observations
EU	Advanced	CSRD/ESRS mandatory	Advanced	Global leader
Romania	Average	CARD transposition	Average	Under consolidation
Republic of Moldova	Low	Voluntary	Low	Gradual alignment

We note that according to the EPI 2024 indicator (Environmental Performance Index), which results from a global analysis that provides a picture of the environmental performance of countries in terms of sustainability, environmental protection and ecological health, the EU occupies 7 - 80 places among the top 50 worldwide, Romania - 77th place, and the Republic of Moldova - 97th place.

These differences reflect the capacity to implement green infrastructure, investments in clean energy and the degree of adoption of decarbonization policies.

The results of the analysis undertaken by us confirm the following essential conclusions:

1. Environmental performance is closely correlated with the level of European integration. Romania benefits from EU pressures and opportunities, while Moldova remains dependent on international cooperation for progress.

2. ESG reporting does not automatically equate to improving environmental performance. Without concrete measures and investments, reporting becomes a formality.

3. Data quality is the biggest obstacle for Moldova and Romania. Equipment, digitalization and standardization are insufficient.

EU companies are already at an advanced stage of ESG maturity, which is a model for the two countries analyzed.

CONCLUSIONS

This study provides a comprehensive analysis of sustainability and environmental performance reporting, with a particular emphasis on environmental indicators within the ESG framework, across the European Union, Romania, and the Republic of Moldova. The findings highlight significant differences in reporting maturity, regulatory alignment, and actual environmental performance, reflecting both institutional capacities and the degree of integration into the European regulatory ecosystem. First, the analysis demonstrates that *EU-based companies* exhibit the highest level of environmental reporting sophistication. This is largely driven by the mandatory frameworks of CSRD and ESRS, which ensure that disclosures are not only standardized but also externally assured. EU companies report extensively on greenhouse gas emissions (Scopes 1–3), energy efficiency, water usage, waste management, circularity, and, increasingly, biodiversity. These reports are often integrated into corporate governance structures, linking environmental performance to strategic decision-making and executive incentives. Consequently, the credibility, comparability, and reliability of the environmental data are significantly enhanced, reinforcing stakeholder trust and fostering the transition toward climate neutrality. Second, *Romania* shows considerable progress in aligning with European ESG standards. Large enterprises and multinational subsidiaries demonstrate proactive reporting practices, particularly in energy-intensive sectors. Romania’s recent transposition of CSRD and national sustainability strategies (SNDD 2030) contributes to better data collection and reporting consistency. However, limitations remain in reporting Scope 3 emissions, circular economy metrics, and biodiversity indicators, particularly among small and medium-sized enterprises. These gaps highlight the need for enhanced technical support, capacity building, and regulatory guidance to achieve full compliance and meaningful environmental impact.

Third, the *Republic of Moldova* represents an emerging context, where sustainability reporting is largely voluntary and concentrated among larger companies.

Environmental performance metrics are fragmented, focusing primarily on energy consumption and, to a limited extent, greenhouse gas emissions. Data on waste management, water use, and biodiversity are minimal or absent, reflecting infrastructural constraints, lack of standardized methodologies, and limited regulatory pressure. These challenges underscore the importance of international cooperation, capacity building, and gradual alignment with European frameworks to improve environmental performance and reporting credibility.

Overall, the comparative analysis reveals the following main key conclusions:

- Regulatory frameworks are essential drivers of environmental reporting maturity and quality, as evidenced by the EU experience.

- Data quality, transparency, and integration into strategic governance remain critical factors for achieving environmental performance improvements across all jurisdictions.

- Emerging economies like Moldova require targeted support to develop institutional capacities, adopt standardized methodologies, and enhance ESG reporting, which can facilitate sustainable development and integration with EU practices.

In conclusion, enhancing environmental performance reporting is not merely a compliance exercise; it is a strategic tool for improving corporate sustainability, fostering stakeholder confidence, and supporting the broader transition to a low-carbon, circular economy. The study provides evidence-based insights that can inform policymakers, regulators, and corporate managers in shaping effective ESG strategies and environmental disclosure practices in diverse European contexts.

SELECTIVE BIBLIOGRAPHY:

1. Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), 2022. European Commission. https://eur-lex.-europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022L2464
2. European Sustainability Reporting Standards (ESRS), 2023. EFRAG. https://www.efrag.-org/Activities/2205111120213412/European-Sustainability-Reporting-Standards
3. National Agency for Energy Resources (ANRE) (2024). Annual renewable energy report Romania. Bucharest: ANRE.
4. Ministry of Environment, Republic of Moldova. National Environmental Strategy 2030. Chișinău: Government of Republic of Moldova, 2024.
5. TCFD. (2021). Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Financial Stability Board, 2021.
6. European Environment Agency (EEA). Renewable Energy Progress in Europe. Copenhagen: EEA, 2024.
7. World Bank. Republic of Moldova Environmental Indicators. Washington, DC: World Bank, 2023.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 101179323.

Disclaimer: Views and opinions expressed are, however, those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the Research Executive Agency (REA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

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).

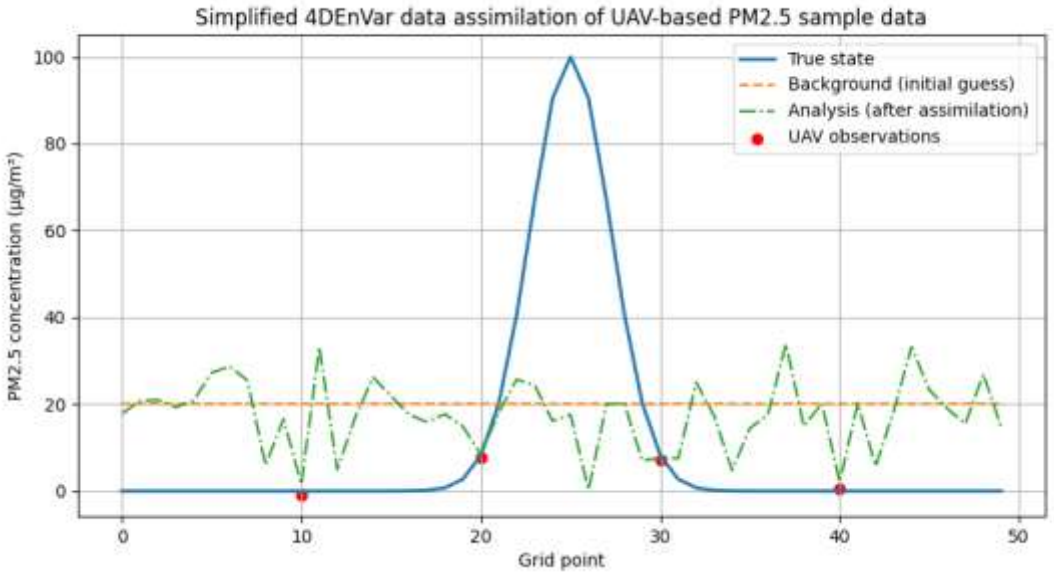


Fig. 1. Comparația spațială a stărilor pre- și post-asimilare a datelor $PM_{2.5}$.

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.

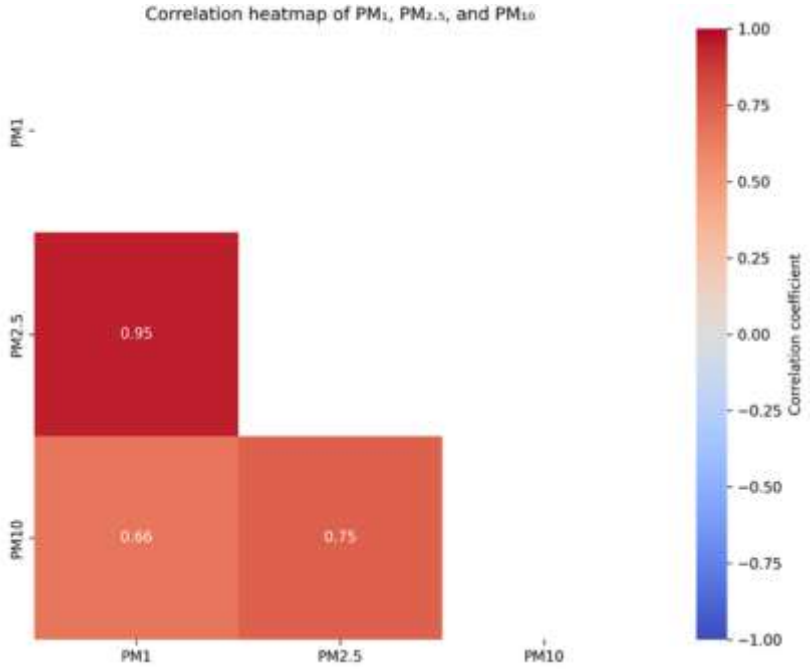


Fig. 3. Harta corelației concentrațiilor de particule în suspensie.

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.

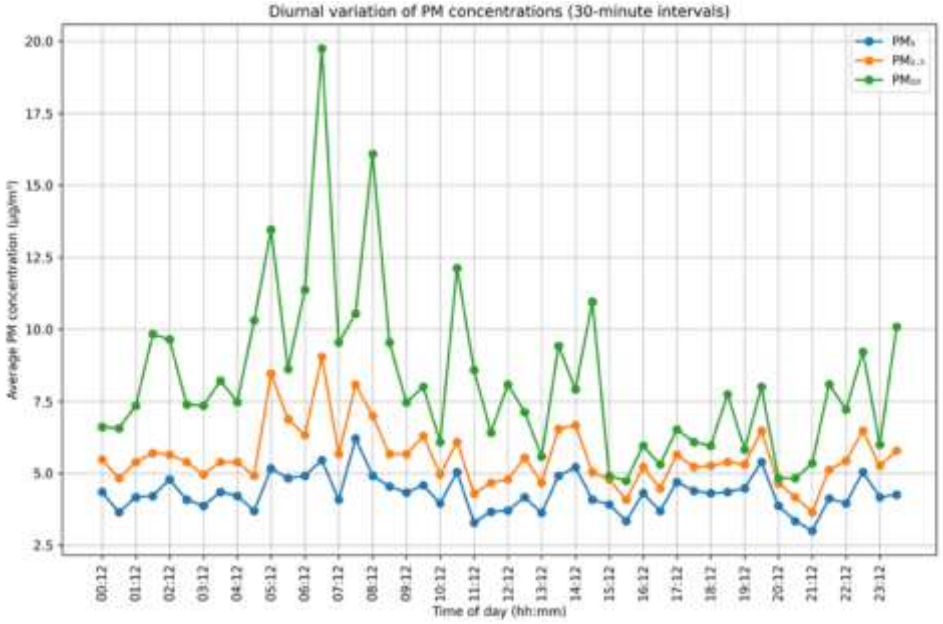


Fig. 4. Variația diurnă a concentrațiilor de particule în suspensie.

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.

CZU: 551.501.7:502.3:517.97:004 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.15**

APLICAREA METODEI 4DEnVar ÎN PREDICȚIA POLUĂRII AERULUI
APPLICATION OF THE 4DEnVar METHOD IN AIR POLLUTION PREDICTION

Adrian PALADI[1] email: adrian.paladi@usm.md

[1]Moldova State University

Rezumat. *Acest articol prezintă dezvoltarea și implementarea unui cadru computațional bazat pe Python, construit pe tehnica cvasi-dinamică de asimilare a datelor de tipul ansamblu-variațional 4D (4DEnVar), pentru monitorizarea poluării aerului în Chișinău în cadrul platformei eALERT. Modelul computațional propus poate integra, de asemenea, observații de mediu provenite din mai multe locații, utilizând un model simplificat de tipul advecție-difuzie, ale cărui parametri sunt estimați empiric pe baza variabilității temporale derivate din observații. Un ansamblu de stări inițiale perturbate este utilizat pentru a reprezenta incertitudinea dependentă de flux și pentru a propaga dinamica modelului la fiecare ciclu de asimilare. Prin această abordare hibridă ansamblu-variațională, sistemul generează analize ale concentrațiilor poluanților atmosferici și prognoze pentru o zi cu o acuratețe ridicată. Rezultatele validării indică reducerea erorii medii pătratice și un scor pozitiv al performanței pentru indicatorii monitorizați, confirmând o precizie ameliorată și o eficiență computațională susținută pentru aplicațiile de mediu.*

Cuvinte-cheie*:Aplicații de mediu, calculul variațional, asimilarea datelor 4DEnVar, scripting în Python.*

INTRODUCTION

Medium-range numerical environmental pollution prediction aims to forecast pollution levels over 1-10 days from the current state by solving the initial value problem of a set of partial differential equations (PDEs). Data assimilation (DA) is a key technique used to enhance forecast accuracy by optimally estimating the current state of the environment through the integration of observational data and model forecasts. In this study, a four-dimensional ensemble variational, that is, 4DEnVar, DA method was developed, using air pollution data from the eALERT monitoring platform [1, 2].

Compared to the standard four-dimensional variational, that is, 4DVar, approach, which is widely regarded as one of the most advanced DA techniques, the method employed in this research offers three notable advantages: dynamically estimates the background error covariance (BEC) throughout the assimilation cycle, unlike 4DVar, which typically uses a pre-estimated, static BEC; employs a fully anisotropic ensemble covariance, improving the representation of spatial error structures, and avoids the need for adjoint models, making it more suitable for handling nonlinear problems efficiently.

4DVar assimilation is a technique that uses a perfect forecast model to find the best-fitting model trajectory within a time window, while 4DEnVar is a hybrid method that combines the strengths of 4DVar and ensemble methods to overcome limitations. Variational calculus is the broader mathematical field that underpins both 4DVar and 4DEnVar, which are specific applications that minimize the objective function to fit observations with a model. In essence, 4DEnVar is a type of variational calculus application, but it adds an ensemble component to improve the traditional 4DVar by not relying as heavily on a model fitting or the use of adjoint computational models.

METHODOLOGY

The workflow for implementing the 4DEnVar algorithm for air pollution prediction begins with the preparation of an ensemble of this model possible states that represent uncertainty in the system, including variations in initial pollutant concentrations [3]. The ensemble mean and perturbations from that mean are then computed to characterize the background error statistics. Each ensemble member is subsequently propagated forward in time using the selected atmospheric chemistry and diffusion models across the defined assimilation window, with model outputs stored at the observation times and locations used for assimilation. At each observation time, ensemble mean and perturbations are recalculated, and model data are mapped to observation space to simulate the values that would be observed by each ensemble member. Observational data from sensors are compiled and assigned realistic error estimates that reflect both measurement uncertainty and representativeness error [4]. To suppress false long-range correlations, localization is applied to restrict the spatial influence of ensemble perturbations on observations, and hybrid blending with static climatological background-error covariances may be employed to improve stability in regions with scattered observational coverage. The analysis update is formulated in a reduced control space as a linear combination of ensemble perturbations at the initial time, and the corresponding objective function is minimized iteratively using efficient optimization algorithms such as the conjugate-gradient or limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno quasi-Newton update formula methods to determine the optimal weighting coefficients [3]. Limited memory here refers to an algorithm modification that stores only a small number of past updates, making the algorithm practical for large-scale problem. The objective function minimization balances the fit to observations with a penalty on deviations from the prior (background) state, and re-linearization may be applied if the observation operator exhibits nonlinear behavior. The optimal combination of ensemble perturbations is then applied to the ensemble mean to produce the analysis state at the initial time, with consistent transformation of ensemble perturbations if an analysis ensemble is required to represent updated uncertainty. This analysis state serves as the initial condition for generating forecasts, during which the model is integrated forward, and any necessary chemistry and diffusion adjustments are applied. Diagnostic evaluation and quality control follow, involving the comparison of observations and model equivalents before and after assimilation to compute residual (*observed value - predicted value*) statistics, assess the consistency between ensemble spread and forecast error, and evaluate rank histograms or normalized residuals, that is, it measures how much the members of an ensemble differ from each other, and therefore reflects the uncertainty or confidence of the forecast. Spatial maps of analysis increments, biases, and pollutant concentration changes are inspected to assess the physical plausibility and impact of the assimilation. Finally, the system parameters, including localization radii, inflation factors, hybrid blending weights, and observation error magnitudes, are adjusted iteratively based on diagnostic feedback and forecast performance. Computational implementation requires additional considerations such as parallelization of ensemble runs and evaluations for computational efficiency, data compression for memory management, and systematic validation through observing system simulation experiments or twin experiments prior to deployment in real-time applications.

RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 illustrates the workflow of the 4DEnVar general algorithm as applied to air pollution modeling and forecast. Also, the schematic of the 4DEnVar system used in the study [5] clearly describes the integration of ensemble-based forecasts with variational data assimilation within the Global and Regional Assimilation and Prediction System - Global Forecast System (GRAPES-GFS) model, which is used for simulating and predicting atmospheric conditions on a global scale. It is widely used in studies on numerical weather prediction, data assimilation, and air pollution modeling. Ensemble members generated from perturbed initial conditions provide a probabilistic representation of the atmospheric state, while observations from satellites and ground stations are assimilated to correct model biases. The analysis increment, guided by an objective function, updates the model's initial conditions over a four-dimensional assimilation window, both temporal and spatial, enhancing the accuracy of air quality and weather predictions.

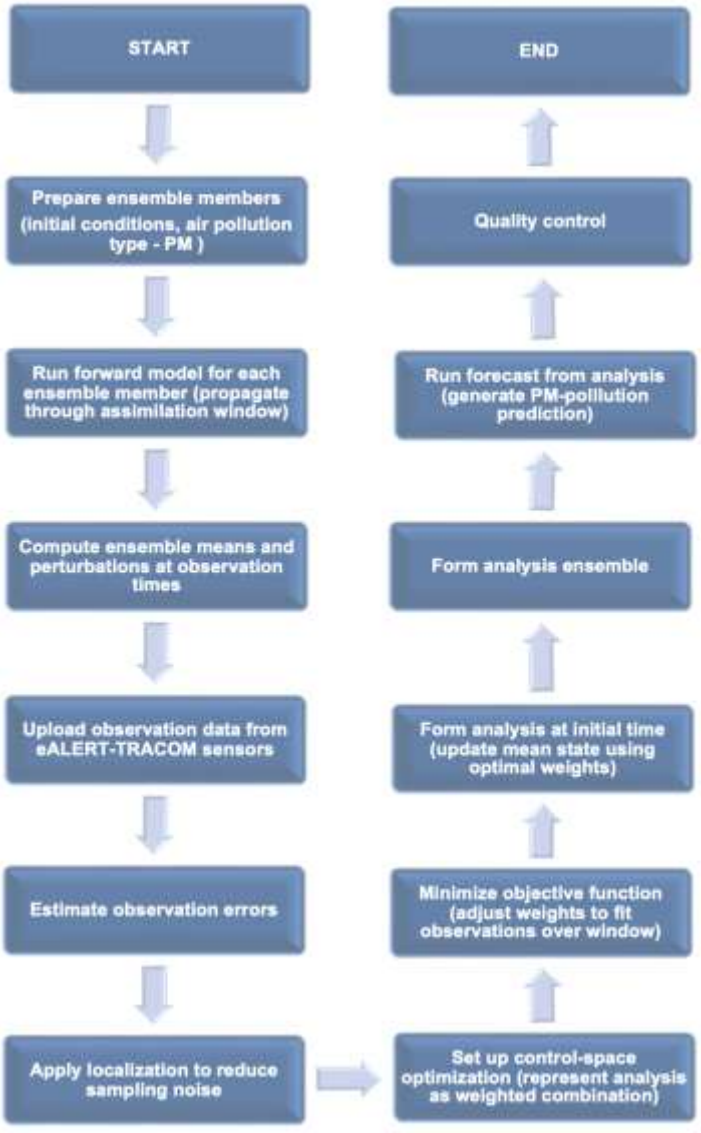


Fig. 1. Workflow of the 4DEnVar algorithm for air pollution prediction.

The main components of Python simulation script for the generic 4DEnVar algorithm applied to the eALERT air quality monitoring platform can be grouped by their functional purpose and numbered as 15 modules according to the script's structure as follows:

I. Data and model initialization: 1. Load observation data (reads time series data, extracts time steps and observation matrix, defines number of time steps (T) and number of monitoring stations (N)); 2. Estimate forward model parameters (empirical estimation of diffusion (*D*) and advection (*u*) coefficients from observed air pollution variability); 3. Define calibrated forward model, as follows:

```
MODULE 1. DATA INPUT & PREPARATION
↓ Input:
    - eALERT_TRACOM_PM_03-27.02.2025.xlsx (time, PM data)
↓ Processes:
    - Load observation data (time series, sites)
    - Extract dimensions (T, N)
↓ Output:
    - obs_values[t, n]
    - times[t]
MODULE 2. PARAMETER ESTIMATION
↓ Input: obs_values
↓ Processes:
    - estimate_diffusion(obs_values) → D_est
    - estimate_advection(obs_values, D_est) → u_est
↓ Output:
    - Calibrated model parameters (D, u)
MODULE 3. FORWARD MODEL DEFINITION
↓ Input: D_est, u_est
↓ Processes:
    - Define function forward_model(state, D, u, dt)
↓ Output:
    - Ready-to-use forward operator for time evolution
```

II. Ensemble initialization and assimilation setup: 4. Initialize ensemble (creates ensemble of perturbed initial states to represent model uncertainty), and 5. Assimilation arrays (pre-allocates arrays for forecasts and analyses):

```
MODULE 4. ENSEMBLE INITIALIZATION
↓ Input: obs_values[0], N
↓ Processes:
    - Generate ensemble_size members with Gaussian perturbation
↓ Output:
    - ensemble[ensemble_size, N]
```

III. Core 4DEnVar data assimilation: 6. 4DEnVar assimilation loop (propagates ensemble through time using the forward model, computes ensemble means and covariance, applies the Kalman gain, updates analysis states with observations, perturbs ensemble members for next cycle), that is:

```
MODULE 6. 4DEnVar ASSIMILATION LOOP
↓ Input:
    - obs_values[t, n]
    - ensemble_forecast[t-1, m, n]
    - forward_model()
↓ Processes:
    - Forecast step: propagate ensemble → mean_forecast
    - Compute background covariance Pb
    - Compute Kalman gain: K = Pb Hᵀ (H Pb Hᵀ + R)⁻¹
    - Update: analysis = mean_forecast + K (obs − H mean_forecast)
    - Ensemble update around analysis
↓ Output:
    - analysis_series[t, n] (assimilated states)
    - ensemble_forecast[t, m, n] (updated ensemble)
```

IV. Output and visualization: 7. Save analysis results, and 8. Visualization of data assimilation.

V. Forecasting and validation: 9. 1-day forecast generation (extends assimilation results 1 day forward (48 steps), uses ensemble mean to predict pollutant concentrations); 10. Plot assimilation and forecast (combines observed, assimilated, and forecasted series for visualization); 11. Forecast skill decay (compares forecast to validation observations, computes root mean square error (RMSE) evolution to evaluate forecast degradation), for example:

```
MODULE 9. 1-DAY FORECAST GENERATION
↓ Input: analysis_series[-1], forward_model()
↓ Processes:
    - Run 48-step ensemble forecast
    - Compute ensemble mean as forecast state
↓ Output:
    - forecast_series[48, N]
    - forecast_df saved as 4DEnVar_1day_forecast.xlsx
MODULE 10. ASSIMILATION + FORECAST VISUALIZATION
↓ Input: analysis_series, forecast_series, obs_values, times
↓ Processes:
    - Plot continuous timeline (assimilation + forecast)
↓ Output:
    - Extended forecast plot
```

VI. Statistical and performance analysis: 12. Performance metrics computation (calculates per-pollutant RMSE, bias, and correlation for both forecast and analysis, computes skill score, saves results); 13. Skill score visualization (bar plot of RMSE improvement (%) per pollutant indicator); 14. Forecast heatmap analysis (1-day pollutant-wise RMSE and bias heatmaps over forecast lead time); 15. Forecast degradation summary (computes overall forecast deterioration and improvement ratios, produces a compact final figure layout summarizing all data assimilation and forecast diagnostics).

CONCLUSIONS

4DEnVar-based computer simulations are characterized as quasi-dynamic because these simulations are based on or built using hybrid ensemble-variational method as their core data assimilation approach: the 4DEnVar method is not fully dynamic like 4DVar but rather a hybrid, quasi-dynamic approach. It represents the time evolution of forecast errors through an ensemble, providing a dynamic-like treatment of covariances without requiring the adjoint model. Thus, the 4DEnVar data assimilation technique uses ensemble-based flow-dependent covariances that vary in time like a dynamic system, but it does not integrate the full model adjoint during minimization. Instead, it uses ensemble members at multiple time slots to represent the time evolution of errors. Finally, it captures time-dependent relationships (temporal correlations) between model states within the assimilation window, but in a computationally more efficient, static variational framework.

REFERENCES:

1. *eALERT monitoring platform*. eALERT website [citat 07.11.2025]. Disponibil: https://ealert.md
2. SPRINCEAN, V., PALADI, F., LEU, A., JALENCU, M., SAVVA, M., CIOBU, V. *Ghid de utilizare a platformei eALERT*. Ghid științifico-metodic elaborat în baza proiectului de inovare și transfer tehnologic „Crearea platformei eALERT pentru monitorizarea mediului în regim de timp real și avertizarea instantanee a populației din Chișinău în cazul hazardurilor naturale și antropogene

periculoase (2022-2023)", cu cifrul 22.80015.7007.262T. Chișinău: Editura USM, 2023. 96 p. ISBN 978-9-97562-662-0. Disponibil online: https://ephysimlab.usm.md/wp-content/uploads/Ghid_eALERT_versiunea_21_12_2023.pdf

3. BANNISTER, R.N. A review of operational methods of variational and ensemble-variational data assimilation. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2017, vol. 143, no. 703, pp. 607-633. ISSN 0035-9009.
4. KALNAY, E. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press, 2002, 368 p. ISBN 978-0-52179-629-3.
5. ZHU, S., WANG, B., ZHANG, L. et al. A four-dimensional ensemble-variational (4DEnVar) data assimilation system based on GRAPES-GFS: System description and primary tests. In: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2022, vol. 14, no. 7, article e2021MS002737, 25 p. ISSN 1942-2466.

CZU: 517.97:502.3:532.6:628.5 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.16**

MODELAREA SUPRAFEȚEI DE ROTAȚIE CU ARIE MINIMĂ CU APLICAȚIE ÎN SISTEME DE MEDIU

MODELING THE MINIMAL SURFACE OF REVOLUTION WITH APPLICATION IN ENVIRONMENTAL SYSTEMS

Adrian PALADI[1] e-mail: adrian.paladi@usm.md
Alexandr A. BARSUK[2] e-mail: a.a.barsuk@mail.ru ORCID ID: 0000-0003-0601-545X
Florentin PALADI[3] e-mail: fpaladi@usm.md ORCID ID: 0000-0001-8099-9413

[1,2,3]Moldova State University

Abstract. *An analysis is presented for the classical variational problem of determining the shape of a surface of revolution with minimal area. The optimized functional attains a local minimum for all solutions obtained by solving the corresponding Euler equation. The properties and mathematical models of catenoids are relevant in various areas of environmental research, particularly those involving fluid interfaces, surface tension, and porous media. Their properties can therefore be applied to specialized problems related to surface tension, fluid interfaces, nanostructured pollutants, and porous media research. Additionally, catenoids serve as idealized models in computational simulations involving minimal energy configurations in environmental systems.*
Keywords*: Environmental applications, calculus of variations, minimal surface of revolution modeling.*

INTRODUCERE

În contextul analizei soluțiilor problemei variaționale clasice privind determinarea formei unei suprafețe de rotație cu arie minimă, au fost formulate condițiile de solvabilitate ale problemei variaționale, o caracteristică cheie fiind prezența unor constrângeri implicite de inegalitate de rând cu ecuația neliniară respectivă. Se demonstrează că aceste constrângeri de inegalitate modifică semnificativ condițiile de bifurcație ale soluțiilor în problema variațională examinată. Curbele generatoare ale suprafețelor minimale și ariile lor corespunzătoare sunt calculate pentru valorile parametrilor de bifurcație [1]. În acest context este necesar să fie cercetat și un exemplu de catenoid reprezentând o suprafață minimă de rotație pentru un set dat de parametri. În modelarea dinamicii fluidelor de mediu, de exemplu, suprafețele minimale ajută la modelarea interfețelor dintre diferite straturi de lichid, cum ar fi interfețele ulei-apă în studiile de poluare ale mediului ambiant. În cercetarea aerosolilor, geometria de tip catenoid poate apărea în simulări de agregare a particulelor, formare a picăturilor sau interacțiuni ale suprafețelor poluanților din aer. În contextul particulelor din atmosferă, catenoizii nu sunt studiați direct ca formă fizică a particulelor de poluanți în sine, dar geometria și proprietățile lor matematice pot fi relevante în modelarea anumitor fenomene, în special la nano- și microscară, unde tensiunea superficială, suprafețele minimale și comportamentele de interfață devin semnificative, cum ar fi formarea agregatelor sau clusterelor de particule observate prin microscopia de forță atomică și microscopia de fluorescență [2, 3].

METODA DE CALCUL

Pentru început vom analiza cazul unei suprafețe de rotație, care permite o examinare completă a formării agregatelor de particule în condiții de mediu ambiant. Este necesar de remarcat faptul că, chiar și în acest caz relativ simplu, determinarea suprafeței minimale prezintă caracteristici importante relevante pentru această clasă de probleme. În special, a fost identificată existența unor soluții multiple și a bifurcațiilor asociate acestora. Modelul matematic al problemei variaționale utilizat pentru a determina suprafața minimală a fost examinat prin aplicarea condițiilor necesare Legendre pentru minimul funcționalei optimizate. A fost efectuată analiza asimptotică, precum și analize de bifurcație clasice și non-clasice ale soluțiilor numerice, însoțite de reprezentările grafice corespunzătoare [1].

Vom considera o funcție nenegativă $y(x) \geq 0$ în intervalul $[0,l]$ pe axa x de rotație, unde $y(0) = R_1$ și $y(l) = R_2$ pentru valorile $x = 0$ și $x = l$, respectiv. În timpul rotației în jurul axei x, curba $y(x)$, adică generatoarea, formează o suprafață de rotație a cărei arie este calculată printr-o expresie de forma următoare [4]:

$$S[y(x)] = 2\pi \int_0^l y(x)\sqrt{1 + y'(x)^2}\, dx .$$

Este în continuare cercetată problema variațională a determinării funcției $y(x)$ din condiția pentru minimul funcționalei, prin urmare:

$$y(x):\ S[y(x)] = 2\pi \int_0^l y(x)\sqrt{1 + y'(x)^2}\, dx \to \min_{y(x)},\ y(0) = R_1,\ y(l) = R_2 . \qquad (1)$$

Se poate observa că implementarea fizică directă a soluțiilor acestei probleme variaționale se referă la calculul formei unei particule lichide formate între două inele concentrice paralele cu razele R_1 și R_2, care sunt amplasate perpendicular pe axa care trece prin centrele inelelor și situate la distanța l unul de celălalt. În cazul analizat, energia potențială V a peliculei exterioare este definită de formula $V = \sigma S$, unde σ este coeficientul de tensiune superficială și S este aria suprafeței [5], iar în condițiile de echilibru avem relația

$$V[S] \to \min_S , \qquad (2)$$

și pentru un coeficient constant de tensiune superficială, condiția (2) este formulată într-o formă echivalentă $S \to \min$, care coincide cu formula (1). Pentru o analiză mai detaliată a soluțiilor problemei variaționale, se va lua în considerare în continuare $R_1 \leq R_2$ și introducând în consecință notațiile $r = R_1$, $R = R_2$, și $\kappa = \dfrac{r}{R}$, se obține:

$$y(x) = R\kappa\left(\cosh(\beta x) - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\beta\kappa}\right)^2}\sinh(\beta x)\right),\ 0 \leq x \leq 1, \qquad (3)$$

$$S[y] = \pi R^2\left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\beta}\right)^2} + \kappa^2\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\beta\kappa}\right)^2} + \frac{\lambda^2}{\beta}\right). \qquad (4)$$

Parametrii λ, β, și κ satisfac condiția $\frac{\lambda}{\beta\kappa} \le 1$ ca urmare a cerinței de non-negativitate a expresiilor de sub semnul radical în ecuațiile (3) și (4).

Să prezentăm, de asemenea, soluția acestei probleme variaționale în cazul valorii parametrului $\kappa = 1$ ($R_1 = R_2 = R$), pentru care calculele sunt simplificate semnificativ, iar o analiză exhaustivă a problemei este posibilă. Expresia (4) pentru $\kappa = 1$ poate fi scrisă în următoarea formă:

$$S[y] = 2\pi R^2 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\beta}\right)^2} + \frac{\lambda^2}{2\beta} \right).$$

Au fost obținute graficele liniilor asimptotice $y = y(x)$ pentru suprafețele minime, împreună cu valorile de bifurcație calculate ale parametrilor problemei variaționale și valorile corespunzătoare ale suprafețelor [1]. Aceste calcule numerice se bazează pe ecuațiile prezentate mai sus.

REZULTATE ŞI DISCUŢII

În baza unei abordări variaționale, suprafețele Delaunay sunt caracterizate ca suprafețe de rotație care minimizează suprafața laterală pentru un anumit volum închis (a se vedea, de exemplu, [6]). Dintre acestea, catenoidele sunt clasificate ca suprafețe Delaunay de spața a doua și sunt singurele suprafețe minime de rotație. Catenoidul prezentat în Fig. 1 este generat prin rotirea curbei de profil în raport cu axa de simetrie pentru κ=1 și valorile maximale ale parametrilor λ_*=1.3255 și β_*=2.3995.

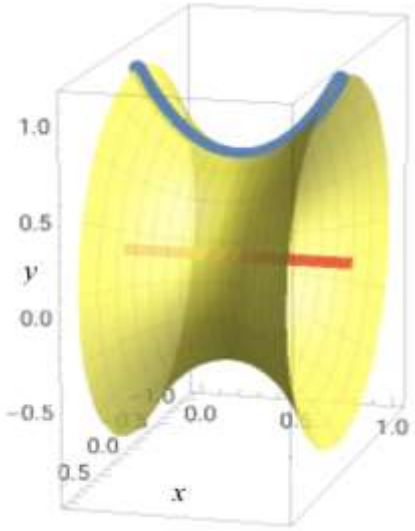


Fig. 1. Catenoid obținut prin rotirea curbei de profil (în albastru) în raport cu axa *x* (în roșu), unde $0 \le x \le 1$, $\kappa = 1$: $\lambda_* = 1.3255$, $\beta_* = 2.3995$, $S_* = 7.53783$.

În acest studiu sunt analizate soluțiile problemei clasice de calcul variațional privind determinarea formei unei suprafețe de rotație cu arie minimă. O caracteristică distinctivă a acestei probleme este faptul că relațiile care descriu condiția de formare a suprafeței includ atât constrângeri de egalitate, cât și de inegalitate în formă implicită, ceea ce complică semnificativ analiza soluției. Pe lângă oferirea unui suport teoretic nou și independent, precum și validarea rezultatelor deja publicate referitoare la

suprafețele minime de rotație în scopul promovării reproductibilității în știință, sunt identificate și valorile parametrilor pentru care există bifurcații ale soluțiilor problemei variaționale. Sunt discutate, de asemenea, particularitățile bifurcațiilor soluțiilor în sistemele caracterizate de relații ce conțin atât egalități, cât și inegalități. Reprezentările asimptotice ale soluțiilor sunt analizate în detaliu. Sunt prezentate rezultatele calculelor numerice și reprezentările grafice ale soluțiilor, împreună cu valorile corespunzătoare ale ariei minime a suprafeței. În special, catenoidele sunt obținute prin rotirea curbelor profil în jurul axei de simetrie.

CONCLUZII

Atât atunci când particulele aflate în suspensie în aer absorb umiditatea din atmosferă, cât și în urma unui proces de condensare, se pot forma punți lichide microscopice între particule sau între o particulă și o suprafață. Geometria acestor punți, în special în regiunile cu curbură mare, poate aproxima forme de suprafețe minime, cum ar fi catenoidele. Aceste forme influențează semnificativ dinamica procesului de agregare și stabilitatea clusterilor rezultați. Astfel de parametri sunt esențiali pentru modelarea proprietăților mecanice, a proceselor de depunere, a caracteristicilor optice și a riscurilor potențiale pentru sănătate cauzate de poluanții atmosferici. Prin urmare, studiile viitoare care combină date obținute prin microscopia de forță atomică și cea de fluorescență cu modele ce includ geometria punților capilare pot oferi o înțelegere mai profundă a dinamicii de agregare în clustere, în special în condiții de umiditate ridicată sau în sisteme complexe formate din particule eterogene. O altă problemă clasică din calculul variațional este problema aerodinamică a lui Newton, care constă în determinarea formei suprafeței unui corp de rotație ce minimizează rezistența la deplasarea printr-un mediu rarefiat. Au fost realizate calcule numerice ale funcționalului asociat pentru forme specifice, cum ar fi conul și emisfera. Rezultatele evidențiază un efect semnificativ de optimizare, demonstrat prin comparația dintre valorile funcționalului pentru aceste forme standard și cea corespunzătoare conturului optim [7].

REFERINȚE:

1. PALADI, A., BARSUK, A.A., PALADI, F. Finding the minimal surface of revolution: asymptotic representation, classical and non-classical bifurcation analyses of the variational problem solutions. În: *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2025, in press.
2. SPRINCEAN, V., PALADI, A., ANDRUH, V., CHIRITA, A., PALADI, F. UAV-based monitoring and AFM analysis of airborne pollutants. În: *IEEE Xplore*. Proceedings of the IEEE 9th International Workshop on Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 27-29 June 2022, Pisa, Italy: IEEE Digital Library, 2022, pp. 1-6. ISSN 2575-7490.
3. SPRINCEAN, V., CHIRITA, A., LEONTIE, L., ASTILEAN, S., FOCSAN, M., CRACIUN, A.M., PALADI, A., ANDRUH, V., PALADI, F. *Advanced physical technologies with the UVS application in environmental security. In: Monitoring and protection of critical infrastructure by unmanned systems* (coordonatori: Daponte P., Paladi F.; 238 p., vol. 63 of NATO Science for Peace and Security Series - D: Information and Communication Security). Amsterdam: IOS Press, 2023, pp. 101-113. ISBN 978-1-64368-376-8.
4. LANDAU, L.D., LIFSHITZ, E.M. *Fluid Mechanics*. Vol. 6 of the Course of Theoretical Physics, 2nd edn. Butterworth-Heinemann, 1987, 560 p. ISBN 978-0-75062-767-2.

5. GELFAND, I.M., FOMIN, S.V. *Calculus of Variations*. Dover Books on Mathematics edn., Dover Publications, 2000, 256 p. ISBN 978-0-48641-448-5.
6. MLADENOVA, C.D., MLADENOV, I.M. Parameterizations of Delaunay surfaces from scratch. În: *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 10, 1570, 16 p. ISSN 2227-7390.
7. BARSUK, A.A., PALADI, F. On parametric representation of the Newton's aerodynamic problem. În: *Heliyon*. 2023, vol. 9, no. 6, e16721, 8 p. ISSN 2405-8440.

Autorii menționează proiectul de cercetare PHYSTECH cu cifrul 011210 (subprogram) finanțat de către Ministerul Educației și Cercetării.

CZU: 538.975:546.56:537.31:538.91 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.17**

INFLUENȚA GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI DE CuO OBȚINUTE PRIN METODA SPRAY-PIROLIZĂ ASUPRA PROPRIETĂȚILOR ELECTRO-FIZICE

THE INFLUENCE OF THE THICKNESS OF CuO THIN FILMS OBTAINED BY THE SPRAY PYROLYSIS METHOD ON THE ELECTRO-PHYSICAL PROPERTIES

Lidia GHIMPU[1] e-mail: lidia.ghimpu@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0002-5268-9407
Elena MONAICO[2] e-mail: elena.monaico@cnstm.utm.md ORCID ID: 0000-0002-9486-2589
Victor SUMAN[3] e-mail: victor.suman@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3309-9476
Vadim MORARI[4] e-mail: vadim.morari@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3625-251X
Emil V.RUSU[5] e-mail: emil.rusu@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0001-9010-4927

[1,3,4,5]IIEN „D. Ghițu", Universitatea Tehnică a Moldovei
[2]Centrul de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: *Thin copper oxide (CuO) films were obtained by the spray pyrolysis technique, with the deposition time varied between 5 and 15 minutes. The effect of thickness on the morphological, wettability, and electrical properties was investigated using atomic force microscopy (AFM), contact angle measurements, current–voltage (I–V) characteristics, resistivity, and X-ray diffraction (XRD). The results indicated an increase in roughness from 10 nm to 16 nm and in contact angle from 108° to 118° as the deposition time increased, reflecting an improvement in hydrophobicity. At the same time, an increase in electrical current and a decrease in resistivity from 3.5×10^{6} Ω·cm to 5×10^{5} Ω·cm were observed. XRD analysis confirmed the formation of the monoclinic CuO crystalline phase, demonstrating the structural stability of the films. These results indicate that deposition parameters can be adjusted to control the functional properties of the films, making them promising for electronic and optoelectronic applications.*
Keywords: *AFM, I–V characteristics, CuO, thin films, spray pyrolysis.*

1. INTRODUCERE

Oxidul de cupru (CuO) este un semiconductor de tip p, cu o bandă interzisă directă de aproximativ 1.2–1.9 eV, ceea ce îl face un material promițător pentru aplicații în domeniile senzorilor chimici și gazoși, celulelor solare, dispozitivelor fotoconductoare, memoriilor de tip resistiv și catalizei fotochimice [1–3]. Datorită costului redus, abundenței și compatibilității ecologice, CuO atrage un interes tot mai mare în cercetările privind materialele funcționale oxidice [4]. Proprietățile optoelectronice, morfologice și electrice ale filmelor de CuO depind semnificativ de metoda de obținere, de parametrii tehnologici, precum temperatura substratului, concentrația soluției precursoare și timpul de depunere [5–7]. Printre tehnicile de depunere, metoda spray-piroliză se remarcă prin simplitate, posibilitatea controlului precis al grosimii și omogenității filmului, precum și prin costuri reduse de implementare, fiind compatibilă cu substraturi de mari dimensiuni [8,9]. Mai mult, această metodă permite formarea de filme cu structuri nanocristaline uniforme, cu rugozitate redusă și proprietăți electrice și optice tunabile, în funcție de parametrii de depunere [10].

În această lucrare, se investighează influența grosimii stratului de CuO, determinată de timpul de depunere, asupra proprietăților morfologice, de umectabilitate și electrice ale filmelor obținute prin spray-piroliză. Rezultatele vor contribui la înțelegerea relației dintre parametrii de proces și

performanța filmelor subțiri, oferind informații relevante pentru aplicații în dispozitive electronice și senzoriale [11, 12].

2. MATERIALE ȘI METODE

Filmele subțiri de CuO au fost obținute prin metoda spray-piroliză pe substraturi de siliciu (100), variind timpul de depunere între 5 și 15 minute. Soluția precursoare a fost preparată utilizând nitratul de cupru trihidrat ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$) dizolvat într-un amestec de metanol și apă în raport 13:7, având o concentrație de 0.2 mol/L. Astfel, soluția obținută a fost pulverizată uniform pe substratul încălzit, permițând formarea filmului subțire prin piroliza termică a precursorului în condiții controlate.

Morfologia și topologia suprafeței filmelor depuse au fost investigate prin microscopie cu forță atomică (AFM), folosind imagini tridimensionale obținute pe o suprafață de 10×10 μm². Măsurătorile au fost efectuate cu ajutorul unui echipament S.I.S. Surface Imaging NanoStation II (Aachen, Germania), operat în mod noncontact, utilizând un cantilever din siliciu. Analiza și prelucrarea imaginilor AFM, precum și determinarea parametrilor de rugozitate, au fost realizate cu software-ul Gwyddion 2.56 (Czech Metrology Institute, Brno, Republica Cehă). Pentru fiecare eșantion a fost calculată rugozitatea medie RMS. Proprietățile hidrofobe sau hidrofile ale filmelor subțiri de CuO au fost evaluate prin măsurători ale unghiului de contact. Determinările au fost efectuate utilizând un echipament de tipul KRUSS DSA25 (KRÜSS GmbH, Hamburg, Germania), echipat cu o cameră de înaltă rezoluție. Procedura a constat în depunerea unei picături de apă pe suprafața filmului și înregistrarea imaginii acesteia, unghiul de contact fiind definit ca unghiul format între suprafața probei și tangenta la conturul picăturii în punctul de contact. Proprietățile electrice ale filmelor au fost determinate prin măsurători curent–tensiune (I–V), pe baza cărora a fost calculată rezistența specifică în funcție de timpul de depunere.

3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

Imaginile AFM (Figura 1) au prezentat o creștere lentă a rugozității RMS de la 10.3 nm (pentru filmele depuse 5 min) la 15.3 nm (pentru 15 min). Creșterea rugozității indică o dezvoltare granulară mai accentuată a filmului odată cu timpul de depunere, ceea ce sugerează o aglomerare a particulelor de CuO și formarea unei suprafețe mai texturate.

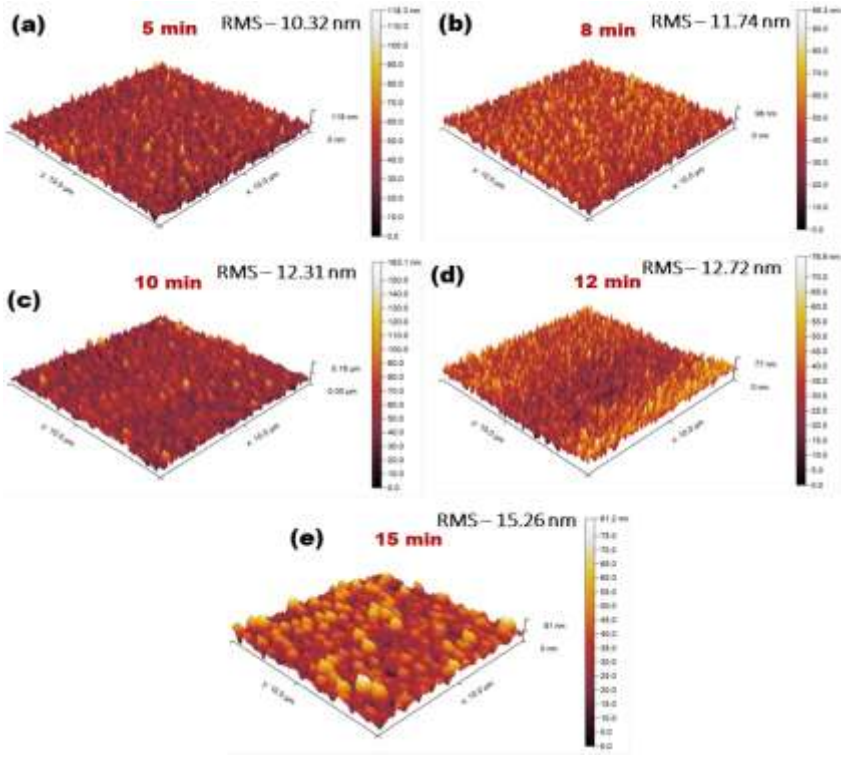


Figura 1. Imagini AFM (10 x 10 µm) a filmelor de CuO obținute la diferite intervale de timp: a) 5 min; b) 8 min; c) 10 min; d) 12 min și e) 15 min.

Unghiul de contact (Figura 2) a crescut de la 108° la 118° odată cu creșterea timpului de depunere, indicând o îmbunătățire a hidrofobicității. Această tendință este corelată cu rugozitatea crescută, conform modelului Wenzel, care explică dependența unghiului de contact de microstructura suprafeței.

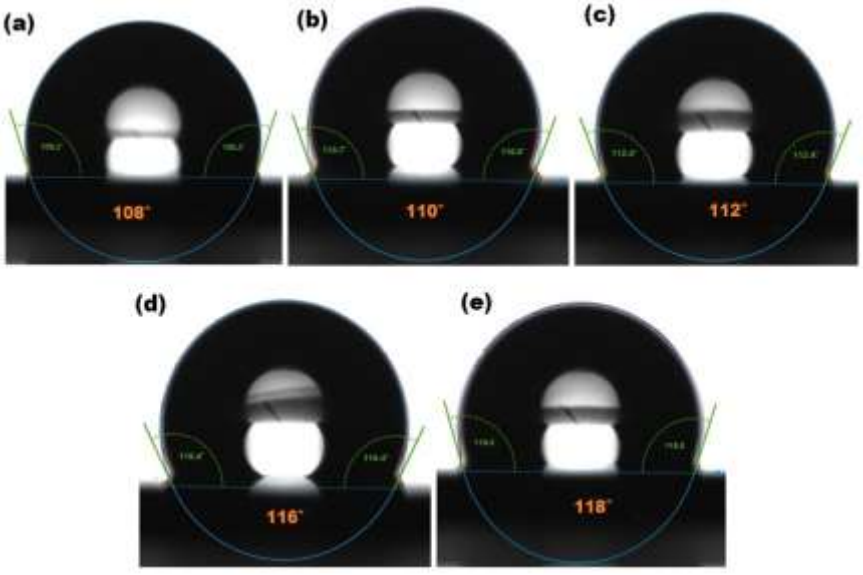


Figura 2. Umectabilitatea filmelor de CuO obținute la diferite intervale de timp: a) 5 min; b) 8 min; c) 10 min; d) 12 min și e) 15 min.

Măsurătorile curent–tensiune (Figura 3) au evidențiat o creștere a curentului odată cu grosimea filmului, precum și apariția unei bariere de potențial între filmul de CuO și substratul de siliciu. Această barieră sugerează existența unei interacțiuni semnificative la interfața film–substrat, care poate influența transportul de sarcină. De asemenea, creșterea grosimii filmului conduce la o continuitate mai bună a stratului, reducând numărul de goluri și defecte structurale. Rezistența specifică (Figura 4) a scăzut semnificativ (cu un ordin) de la 3.5×10^{6} Ω·cm la 5×10^{5} Ω·cm, ceea ce confirmă o îmbunătățire a conductivității materialului pe măsură ce filmul devine mai gros și mai compact. Această variație a proprietăților electrice poate fi atribuită conglomerării particulelor și reducerii defectelor structurale odată cu creșterea timpului de depunere. De asemenea, o mai bună continuitate a stratului conduce la o mobilitate sporită a purtătorilor de sarcină. Rezultatele obținute sunt în concordanță cu datele raportate în literatură pentru filme subțiri de CuO depuse prin tehnici similare.

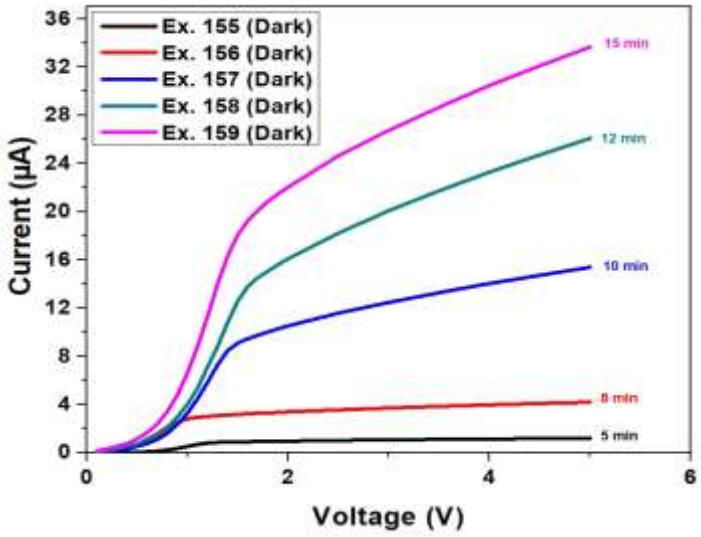


Figura 3. Caracteristica I-V a filmelor de CuO obținute la diferite intervale de timp: a) 5 min; b) 8 min; c) 10 min; d) 12 min și e) 15 min.

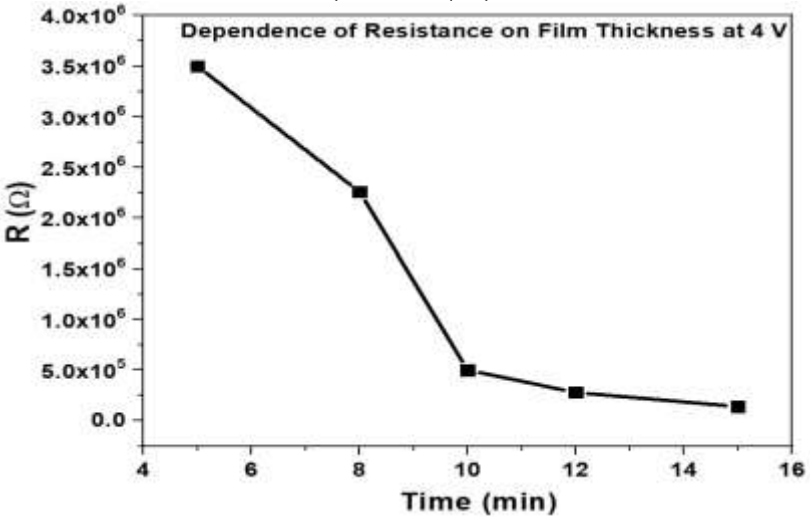


Figura 4. Determinarea rezistenței specifice a filmelor de CuO obținute la diferite intervale de timp: a) 5 min; b) 8 min; c) 10 min; d) 12 min și e) 15 min.

4. CONCLUZII

Metoda spray-piroliză s-a dovedit eficientă pentru obținerea filmelor subțiri de CuO cu proprietăți morfologice și electrice controlabile. Creșterea timpului de depunere a determinat o creștere a rugozității și a hidrofobicității, o scădere a rezistenței specifice și o îmbunătățire a conductivității, precum și formarea unei structuri cristaline stabile confirmate prin XRD. Aceste rezultate demonstrează potențialul filmelor de CuO pentru aplicații în senzori, straturi de protecție și dispozitive optoelectronice.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE:

1. DIACHENKO, O., KOVÁČ, JR., J., DOBROZHAN, O., NOVÁK, P., KOVÁČ, J., SKRINIAROVA, J., OPANASYUK, A. Structural and Optical Properties of CuO Thin Films Synthesized Using Spray Pyrolysis Method. În: *Coatings* 2021, 11, 11, 1392. https://doi.org/10.3390/coatings11111392.
2. KURYSHCHUK, S., ORLETSKII, I., SHYROKOV, O., MYRONIUK, D., SOLOVAN, M. Optical and Electrical Properties of CuO Thin Films by Spray Pyrolysis Method. În: *Acta Physica Polonica A* 2022, 142, 5, p. 625. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.142.625.
3. BOUDJEMA, B., DAIRA, R., KABIR, A., DJEBIEN, R. Physico-Chemical Properties of CuO Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis. În: *Materials Science Forum* 2017, 895, pp. 33-36. https://-doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.895.33.
4. BARI, R.H., PATIL, S.B., BARI, A.R. Spray-pyrolized nanostructured CuO thin films for H_2S gas sensor. În: *Int Nano Lett* 2013, 3, 12. https://doi.org/10.1186/2228-5326-3-12.
5. DAIRA, R., BOUDJEMA, B., BOUOUDINA, M., AIDA, M.S., CONSTANTINESCU, C.D. Influence of Al Doping on the Physical Properties of CuO Thin Films. În: *Appl. Sci.* 2023, 13, 8193. https://doi.org/10.3390/app13148193.
6. ABED, Z. A., AL DULAIMI, A. H., SHATTI, W. A., JASIM, A. N., KHODAIR, Z. T., KHALEEL, S. Y. Structural and optical characterization of nanostructured undoped CuO and cobalt—doped CuO thin films. În: *Journal of Ovonic Research* 2021, 17, pp. 581-587. https://doi.org/10.15-251/JOR.2021.176.581.
7. BELLAL, Y., ANTAR BOUHANK, SERRAR, H., TUNÇ TÜKEN, GÖKMEN SIĞIRCIK. A Copper Oxide (CuO) Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis Method. În: *MATEC Web of Conferences* 2019, 253, 03002. https://doi.org/10.1051/matecconf/201925303002.
8. FARAJ, M. G., KAKA, A. K., OMAR, H. D. Electrical and Structural properties of Copper Oxide (CuO) Thin Films on Plastic Substrate Deposited by Spray Pyrolysis Technique. În: *ARO - The Scientific Journal of Koya University* 2019, 7, 2. https://doi.org/10.14500/aro.10558.
9. GHARBI, B., TAABOUCHE, A., BRELLA, M., CHELGHAM, F., MAMANOU, A. Synthesis and Characterization of ZnO-CuO Nanocomposites Thin Film for Optoelectronics Applications. În: *Journal of Electrical Systems* 2024, 20, 3. https://doi.org/10.52783/jes.3370.
10. GNANASEKAR, T., VALANARASU, S., ADE, R., VIMALA JULIET, A., GANESH, V., AL. ABDULAAL, T. H., BITLA, Y. Improvement in photo-device properties of CuO thin films for opto—electronic applications: effects of (Ni, Co) co-doping. În: *Physica Scripta* 2022, 97, 12, 125802. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac9868.

11. CHAFI, F. Z., BAHMAD, L., HASSANAIN, N., FARES, B., LAANAB, L., MZERD, A. Characterization techniques of Fe-doped CuO thin films deposited by the Spray Pyrolysis method. În: *Condensed Matter > Materials Science* 2018. https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.09697.
12. MOUMEN, A., HARTITI, B., THEVENIN, P. *et al.* Synthesis and characterization of CuO thin films grown by chemical spray pyrolysis. În: *Opt Quant Electron* 2017, 49, 70. https://doi.org/10.-1007/s11082-017-0910-1.

MULȚUMIRI. Această lucrare a fost susținută financiar de Ministerul Educației și Cercetării din Republica Moldova, prin proiectele: #02.02.01 „Nanostructuri și materiale avansate pentru aplicații în spintronică, termoelectricitate și optoelectronică” și Stimularea Excelenței în Cercetare 2024–2025: #25.80012.5007.88SE – Celule solare tandem în baza heterojoncțiunilor Cu_2O.

CZU: 538.975:546.56 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.18**

CARACTERIZAREA PROPRIETĂȚILOR FIZICE ȘI MORFOLOGICE ALE FILMELOR DE Cu_2O OBȚINUTE PRIN PULVERIZARE MAGNETRON

CHARACTERIZATION OF THE PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF Cu_2O FILMS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING

Victor SUMAN[1] e-mail: victor.suman@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3309-9476
Vadim MORARI[2] e-mail: vadim.morari@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3625-251X
Lidia GHIMPU[3] e-mail: lidia.ghimpu@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0002-5268-9407
Emil V. RUSU[4] e-mail: emil.rusu@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0001-9010-4927

[1,2,3,4]IIEN „D. Ghițu", Universitatea Tehnică a Moldovei

Summary. *Nanometric Cu_2O films were fabricated by reactive magnetron RF sputtering and presented as promising materials for use as electron- and hole-transport layers in various solar cell architectures. This study investigates the films' optical and topographical properties, their wetting behavior, as well as the effects of post-deposition thermal treatment. AFM analysis showed an increase in roughness with increasing film thickness from 100–340 nm, while contact angle measurements demonstrated enhanced hydrophobicity, with values rising from 102° to 120°. Thermal treatment at 400 °C for 60 minutes in high vacuum (~10^{-4} Torr) further intensified the hydrophobic character. Raman spectra revealed phonon modes characteristic of the Cu_2O phase at 218 cm^{-1}, 416 cm^{-1}, and 637 cm^{-1}, confirming the structural composition also identified by X-ray diffraction. Optimizing thickness and structural properties may lead to improvements in the electrical and optoelectronic performance of the films.*
Keywords: *AFM, Cu_2O, thin films, hydrophobicity, RF magnetron sputtering.*

1. INTRODUCERE

Oxidul cupru (Cu_2O) este un semiconductor cu banda interzisă directă (~2.17 eV) [1], utilizat intens în cercetarea materialelor pentru celule solare [2], senzori [3], dispozitive optoelectronice și cataliză [4]. Interesul ridicat pentru Cu_2O derivă din mai multe avantaje strategice: abundența și non-toxicitatea cuprului [5], stabilitatea termică [6], costul redus [7] și potențialul său pentru integrarea în dispozitive pe bază de heterojoncțiuni. În fotovoltaică, Cu_2O este explorat ca strat de transport al golurilor sau electronilor, precum și în joncțiuni tandem [8], datorită mobilității bune a purtătorilor [9] și a coeficientului ridicat de absorbție în domeniul vizibil. Performanțele filmelor depind puternic de proprietățile lor fizico-chimice: faza structurală, granularitatea, morfologia, rugozitatea suprafeței, compoziția chimică și energia de suprafață. Controlul acestor parametri se poate obține prin optimizarea tehnicilor de depunere și a tratamentelor post-depunere. Pulverizarea magnetron RF reprezintă una dintre cele mai versatile metode de obținere a filmelor subțiri. Datorită controlului fin oferit asupra ratei de depunere, stoichiometriei și microstructurii, această tehnică permite fabricarea de filme de Cu_2O cu proprietăți reproductibile și adaptabile cerințelor dispozitivului dorit.

Lucrarea de față investighează filmele de Cu_2O obținute prin pulverizare magnetron în condiții specifice de procesare, analizând influența grosimii și a tratamentului termic asupra proprietăților

structurale și morfologice. Structura cristalină a filmelor este analizată prin XRD și Raman, iar morfologia prin AFM și unghiul de contact. Scopul final este de a identifica direcțiile de optimizare a filmelor pentru aplicații în celule solare și optoelectronică.

2. MATERIALE ȘI METODE

2.1 Depunerea filmelor subțiri

Filmele de Cu_2O au fost depuse pe substraturi de Si (100) prin pulverizare reactivă magnetron RF, utilizând o țintă de cupru de înaltă puritate. Procesul s-a desfășurat într-o atmosferă reactivă de oxigen și argon controlată, asigurând formarea oxidului de cupru prin reacții la suprafața substratului. Depunerea s-a realizat la temperaturi ambientale, evitând astfel stresul termic asupra substratului.

Grosimea filmelor depuse a variat între 100–340 nm, obținută prin reglarea duratei de pulverizare. Controlul grosimii este esențial deoarece afectează structura granulară, distribuția suprafeței, hidrofobicitatea și proprietățile optice ale filmelor.

2.2 Tratamentul termic post-depunere

Pentru a studia efectul tratamentului termic asupra structurii și morfologiei filmelor, probele au fost tratate termic la 400°C timp de 60 de minute în vid (~10^{-4} Torr). Acest tratament permite: recristalizarea filmelor, reducerea defectelor, reorganizarea suprafeței, o posibilă creștere a granularității, modificarea energiei de suprafață. Prin aceste efecte, tratamentul termic poate îmbunătăți calitatea filmelor pentru aplicații electronice.

2.3 Analiza AFM, umectabilitatea, RAMAN, XRD

Microscopia cu forță atomică (AFM) a fost utilizată pentru analiza topografiei suprafeței. Imaginile realizate pe zone de 5×5 μm au oferit informații despre: rugozitatea suprafeței, densitatea și dimensiunea granulelor, uniformitatea stratului și efectele tratamentului termic. Unghiul de contact dintre o picătură de apă și suprafața filmului a fost măsurat pentru evaluarea energiei de suprafață. Probele au fost studiate înainte și după tratamentul termic. O creștere a unghiului de contact este asociată cu un comportament hidrofob, benefic în dispozitive unde adsorbția umidității poate afecta performanța electrică. Difracția de raze X (XRD) a fost utilizată pentru determinarea fazei cristaline. Spectroscopia Raman a fost utilizată complementar pentru identificarea fazei Cu_2O prin modurile caracteristice ale vibrațiilor fononice.

3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

3.1 Morfologia filmelor

Imaginile AFM (Figura 1) au evidențiat o variație sistematică a morfologiei odată cu creșterea grosimii filmelor. Filmele subțiri (100–200 nm) au prezentat o structură granulară mai puțin uniformă, cu cristalite bine individualizate. Pe măsură ce grosimea crește (200-340 nm), filmele devin vizibil mai compacte, iar suprafața capătă o textură uniformă, ceea ce sugerează o densificare progresivă a filmului. Acest comportament este frecvent asociat cu creșterea energiei cinetice a particulelor depuse și cu formarea unor nuclee multiple, care se extind lateral până la conglomerare. Creșterea în densitate

a cristalitelor are implicații pozitive pentru aplicațiile fotovoltaice deoarece reduce numărul de defecte superficiale care pot acționa ca centre de recombinare.

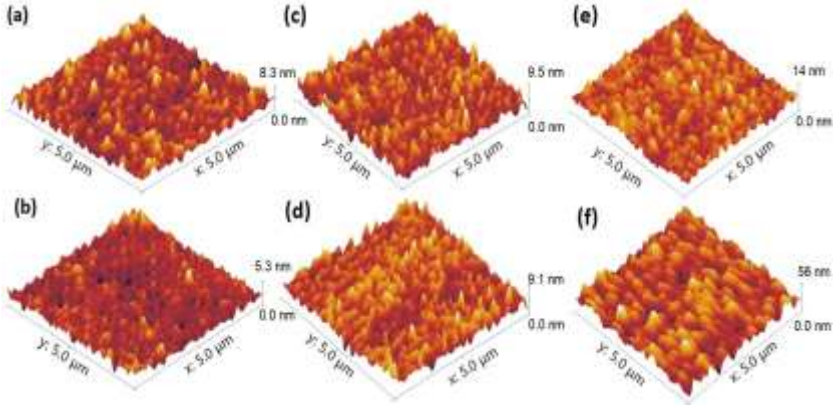


Figura 1. Imagini AFM 3D (5x5 μm) ale filmelor de Cu_2O obținute prin pulverizare magnetron RF (a, c, e) și tratate termic la temperatura de 400°C (b, d, f).

Tratamentul termic a condus la o reorganizare a suprafeței filmelor. AFM indică o reducere moderată a rugozității pentru filmele tratate, sugerând o recristalizare a granulelor și o uniformizare a reliefului. Efectul variază în funcție de grosime, fiind mai pronunțat pentru filmele groase.

Măsurătorile unghiului de contact (Figura 2) au demonstrat că filmele mai groase (>300 nm) prezintă valori ridicate ale unghiului de contact, atingând 125°, ceea ce indică un caracter hidrofob pronunțat. Filmele mai subțiri sunt moderate hidrofobe, cu unghiuri în jurul valorii de 102°. Tranziția către hidrofobicitate poate fi explicată prin creșterea granularității, reducerea energiei de suprafață sau orientarea diferită a planurilor cristaline după tratamentul termic. Pentru dispozitivele optoelectronice, hidrofobicitatea oferă stabilitate îmbunătățită în condiții de umiditate, reducând degradarea asociată interacțiunii cu apa.

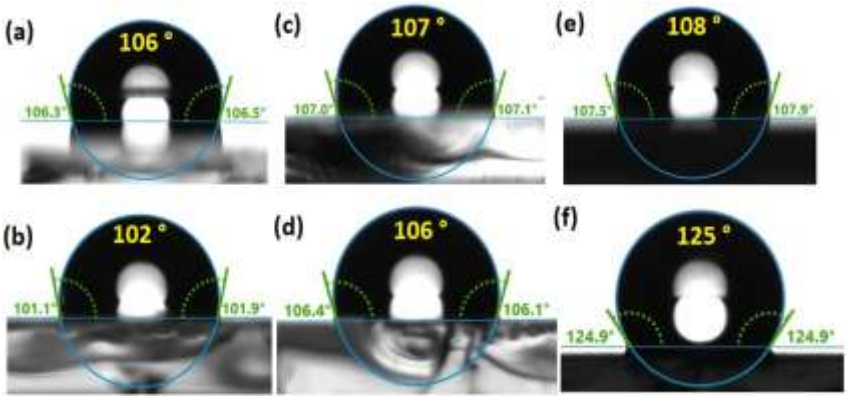


Figura 2. Măsurători ale unghiului de contact între o picătură de apă și suprafața filmelor de Cu_2O.

Spectrele Raman (Figura 3) au prezentat modurile fononice caracteristice Cu_2O la 218, 416 și 637 cm^{-1}, confirmând formarea fazei dorite. Difractograma XRD (Figura 4) a indicat o structură policristalină cu orientări preferențiale ale planurilor caracteristice Cu_2O.

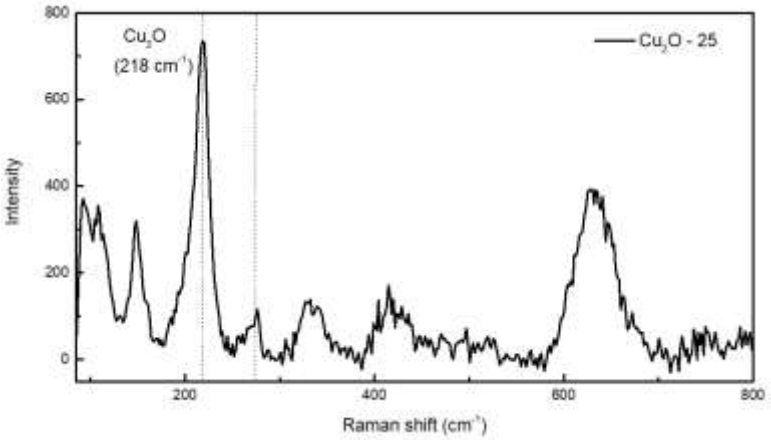


Figura 3. Spectrul raman al stratutului de Cu_2O.

Concordanța între rezultatele Raman și XRD confirmă formarea uniformă a fazei Cu_2O, fără faze secundare semnificative precum CuO sau Cu metalic. Acest lucru sugerează că raportul O_2/Ar în timpul depunerii a fost optim, iar tratamentul termic nu a condus la oxidări suplimentare nedorite.

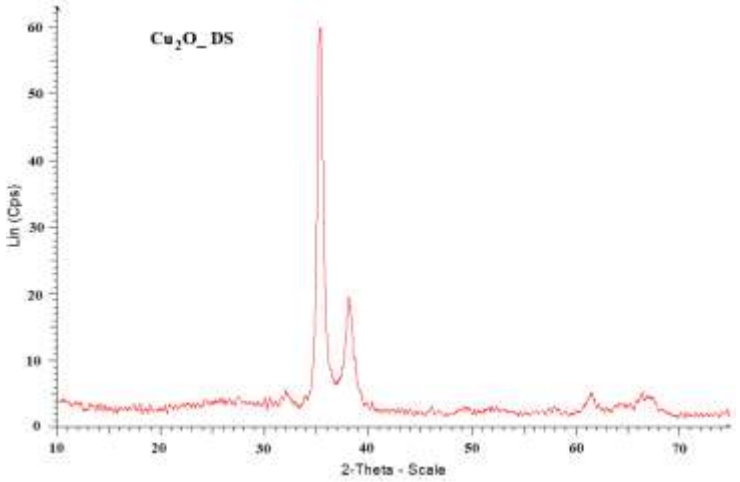


Figura 4. Difractograma staratului de Cu_2O extras la incidenta razanta

4. CONCLUZII

Studiul a demonstrat că filmele subțiri de Cu_2O obținute prin pulverizare magnetron RF prezintă proprietăți structurale și morfologice adecvate pentru aplicații optoelectronice. Creșterea grosimii conduce la un film mai compact, în timp ce tratamentul termic sporește caracterul hidrofob al acestuia. Spectroscopia Raman și analiza XRD confirmă formarea fazei pure Cu_2O, fără impurități semnificative. Optimizarea grosimii și a tratamentelor termice poate contribui la creșterea

performanțelor electrice ale filmelor, făcându-le potrivite pentru utilizarea în celule solare și dispozitive fotonice avansate.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE:

1. MARKUS, H., BIANCA, E., CHRISTIAN, H. Band structure and phase stability of the copper oxides Cu_2O, CuO, and Cu_4O_3. În: *Physical Review B* 2013, 87, 115111. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.115111.
2. BINGHAO, W., ZHIQIANG, C., FENG, Z. Cu_2O Heterojunction Solar Cell with Photovoltaic Properties Enhanced by a Ti Buffer Layer. În: *Sustainability* 2023, 15, 14, 10876. https://doi.org/-10.3390/su151410876.
3. STEINHAUER, S. Gas Sensors Based on Copper Oxide Nanomaterials: A Review. În: *Chemosensors* 2021, 9, 3, 51. https://doi.org/10.3390/chemosensors9030051.
4. Qian, S., Cheng, Z., Meifang, L., Xishi, T. A Review on Cu_2O-Based Composites in Photocatalysis: Synthesis, Modification, and Applications. În: *Molecules* 2023, 28, 14, 5576. https://doi.org/10.3390/molecules28145576.
5. YONGWOO, K., ALOYSIUS, S., HAKSOO, H., HYUNJOO, L. Shape effects of cuprous oxide particles on stability in water and photocatalytic water splitting. În: *Journal of Materials Chemistry A* 2015, 3. https://doi.org/10.1039/C4TA04863F.
6. JEONG, Y. P., SIWOO, L., YANGDO, K., YOUNG, B.R. Antimicrobial Activity of Morphology-Controlled Cu_2O Nanoparticles: Oxidation Stability under Humid and Thermal Conditions. În: *Materials* 2024, 17, 1, 261. https://doi.org/10.3390/ma17010261.
7. LUIS, AB D., VELIZ-SILVA, F., et al. Improved ammonia production using Cu_2O@poly-carbazole electrocatalysts in the electrochemical reduction of molecular nitrogen. În: *Journal of Materials Chemistry A* 2024, 12, 25011. https://doi.org/10.1039/D4TA02904F.
8. FARA, L., et al. On Numerical Modelling and an Experimental Approach to Heterojunction Tandem Solar Cells Based on Si and Cu_2O/ZnO—Results and Perspectives. În: *Coatings* 2024, 14, 3, 244. https://doi.org/10.3390/coatings14030244.
9. LINFENG, Pan., et al. High carrier mobility along the [111] orientation in Cu_2O photoelectrodes. În: *Nature* 2024. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07273-8.

MULȚUMIRI. Această lucrare a fost susținută financiar de Ministerul Educației și Cercetării din Republica Moldova, prin proiectul de cercetare și inovare „Stimularea Excelenței în Cercetare 2024–2025”: #25.80012.5007.88SE – Celule solare tandem în baza heterojoncțiunilor Cu_2O.

CZU: 546.47:544.723:546.55 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.19**

PROPRIETĂȚI FOTOFIZICE ȘI FOTOCHIMICE A FTALOCIANINEI DE Zn CONJUGATE CU NANOPARTICULE DE METAL NOBIL (AuNPs ȘI AgNPs)

PHOTOPHYSICAL AND PHOTOCHEMICAL PROPERTIES OF Zn PHTHALOCYANINE CONJUGATED WITH NOBLE METAL NANOPARTICLES (AuNPs AND AgNPs)

Victor SUMAN[1] e-mail: victor.suman@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3309-9476
Vadim MORARI[2] e-mail: vadim.morari@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3625-251X
Ion LUNGU[3] e-mail: ionlungu.usm@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-7117-672X
Tamara POTLOG[4] e-mail: tpotlog@gmail.com ORCID ID: 0000-0003-1243-9371
Lidia GHIMPU[5] e-mail: lidia.ghimpu@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0002-5268-9407
Anton AIRINEI[6] e-mail: airineia@icmpp.ro ORCID ID: 0000-0001-5000-6513

[1,2,5]IIEN „D. Ghițu”, Universitatea Tehnică a Moldovei
[3,4]Laboratorul de Materiale Organice/Inorganice pentru Optoelectronică, Universitatea de Stat din Moldova
[6]Institutul de Chimie Macromoleculară „Petru Poni”, Iași, România, Laboratorul de Chimie Fizică a Polimerilor

Summary. *In this study, zinc phthalocyanines (ZnPcs) substituted with tetracarboxy groups were synthesized and characterized using UV–VIS spectroscopy, fluorescence spectroscopy, NMR, and mass spectrometry. The photophysical properties depend on the peripheral substituents and the presence of noble metal nanoparticles. The UV–VIS spectra of ZnPcs 15–19 showed Soret bands at 348–352 nm and Q bands at 615–683 nm, typical of nanostructured phthalocyanines. The emission spectra, upon excitation at 616 nm, displayed two main bands at 688–692 nm and 757–759 nm, assigned to the Q(x)(0–0) and Q(x)(0–1) transitions. The fluorescence quantum yields (ΦF) varied significantly: ZnPc 16 exhibited the highest ΦF, while ZnPc 19 showed reduced values in the increased presence of AgNPs. Samples 16–18 presented higher yields than the reference sample. Fluorescence lifetimes indicated energy transfer to the triplet state for some compounds. The solvent effect study revealed a decrease in fluorescence intensity with increasing water content in DMSO, suggesting aggregation and quenching. The results demonstrate the influence of peripheral substitution and the surrounding medium on the photophysical behavior of zinc phthalocyanines.*
Keywords: *Fluorescence, absorption spectra, emission spectra, ZnPc.*

1. INTRODUCERE

Ftalocianinele (Pcs) sunt fotosensibilizatori bine consacrați în terapia fotodinamică (PDT), apreciați pentru absorbția puternică a luminii în domeniul vizibil a spectrului, cu un mare potențial pentru scopuri biologice datorită generării ridicate de oxigen singlet și fotosensibilității înalte.

Pentru acest obiectiv, este important să se garanteze o solubilitate a Pc, iar utilizarea unor substituenți adecvați pe structura lor poate fi o strategie bună pentru utilizarea fotosensibilizatorilor eficienți în terapia fotodinamică împotriva celulelor canceroase. Progresele recente s-au concentrat pe conjugarea covalentă a Pc-urilor, în special a ZnPcs, cu o gamă largă de molecule bioactive mici pentru a îmbunătăți selectivitatea, eficacitatea și multifuncționalitatea. Aceste conjugate combină producția de specii reactive de oxigen activate de lumină (ROS) cu administrare țintită și eliberare controlată, oferind o precizie sporită a tratamentului și o toxicitate redusă în afara țintei. Dincolo de oncologie. Conjugatele ZnPc cu antibiotice, medicamente antiinflamatoare, antiparazitare și antidepresive extind domeniul de aplicare al terapiei fotodinamice la terapii antimicrobiene și specifice locului.

Conjugatele cu coloranți fluorescenți și porfinoizi îmbogățesc și mai mult aceste sisteme, permițând terapia ghidată prin imagistică, transferul eficient de energie și acțiunea în mod dual prin linkeri sensibili la PH sau enzime. În ciuda acestor strategii promițătoare, rămân provocări cheie, inclusiv stingerea indusă de agregare, solubilitatea apoasă slabă, complexitatea sintetică și interferența cu generarea ROS. În această lucrare, exemplele de conjugare pe bază de ZnPc au fost descrise punându-se un interes deosebit asupra procedurilor sintetice și proprietăților optice ale compușilor vizași.

Imunoterapia și alte terapii împotriva cancerului au fost explorate cu un succes relativ, crescând supraviețuirea pacienților cu boala melanom malign. Cu toate acestea, răspunsul la unii pacienți nu este eficient din cauza dezvoltării rezistenței melanomului după tratament [1]. Într-adevăr pentru a combate această rezistență intrinsecă la metodologiile existente de tratament, terapia fotodinamică (PDT) este o alternativă terapeutică care, poate fi utilizată ca o abordare clinică încurajatoare [2]. Procesul PDT implică administrarea biologică a unui medicament fotosensibilizator (PS) care este activat la lumini adecvate vizibile sau în infraroșu apropiat, care în prezența oxigenului molecular celular generează specii reactive de oxigen (ROS) foarte citotoxice, inclusiv oxigenul singlet ($^{(1)}O_2$) [3]. Aceste ROS sunt responsabile pentru reducerea sau stingerea celulelor canceroase vizate sau a țesuturilor tumorale [4].

Derivații de ftalocianină (Pc) sunt compuși fotoactivi (în mod ideal absorb lumina în spectrul Uv-VIS), în special în regiunile roșu și infraroșu apropiat, care permit o penetrare mai mare a țesuturilor și, în consecință, un răspuns PDT mai bun [5]. Cu toate acestea, macrociclurile Pc au o solubilitatea slabă în diferiți solvenți organici sau în medii apoase și, prin urmarea, pentru a minimiza acest dezavantaj, este esențial să se incorporeze motive „bio”, cum ar fi grupuri biologice sau încărcate, inclusiv unități catonice pe structura lor pentru a le îmbunătăți antifilicitatea [6]. Diferiți substituenți periferici (poziția α- și/ sau -β) și numărul acestora dau, de obicei, rezultate fotofizice, fotochimice și PDT distincte [7]. Recent, Valli și colaboratorii [8] au descris căile de semnalizare apotropică și autotagică induse de stresul oxidativ utilizând coloranții ZnPc pentru PDT a celulelor melanomului, procesul de inducerea răspunsului apotropic și o autotagic de protecție declanșatoare.Aceiași autori au raportat, de asemenea, stresul oxidativ cauzat de iradierea cu lumină a ZnPc inducând un dublu răspuns apotropic și necrotic în celulele melanomului. În cele din urmaă, integrarea Pc-urilor cu nanoparticule le-a îmbunătățit aplicațiile biomedicale, în special prin mecanismul precum efectul de permeabolitate și retenție îmbunătățite [9].

2. MATERIALE ȘI METODE

Toți reactivii chimici achiziționați (Merck) au avut cea mai mare puritate disponibilă comercial și au fost utilizați fără purificare probabilă. S-a utilizat un spectrometru Burker FTIR pentru a furniza informații despre compoziția chimică. Spectrele H-RMN au fost înregistrate în soluția de DMSO deuterat pe un spectrometru de rezonanță magnetică nucleară (RMN) Bruker Advance III model 400MHz. Deplasările chimice sunt raportate în 8 ppm, iar constantele de cuplare (J) sunt exprimate în Hz. Spectrele UV-VIS ale soluțiilor au fost măsurate utilizând un spectrometru UV-VIS (Lambda 25, Perkin Elemer Inc., Shelton, CT, SUA) de la 200 nm la 1200 nm, cuve de cuarț de 10 nm. Spectroscopia de fluorescență în stare staționară a fost efectuată utilizând un spectrometru (LS 55 Perkin Elmer, Inc., Shelton, CT, SUA) echipat cu monocromator cu excitație și emisie cu rețea dublă. Numărarea fotonilor singulari corelați în timp a fost utilizată pentru a determina durata de viață a fluorescenței . Spectrele de fluorescență rezolvate în timp au fost înregistrate cu un spectrometru (Edinburgh FLS980, Jiringston EH 54DQ, Oxford, Marea Britanie.) Toate măsurătorile au fost efectuate la temperatura camerei.

3. REZULTATE ȘI DICUȚII

Proprietățile fotofizice ale ftalocianinelor tetracorboxi ZnPcs

Proprietățile fotofizice depind de natura și numărul substituenților periferici și, în acest caz, de prezența (absența) atomilor de Au și Ag în structura Pc.

Pe spectrele UV-VIS ale ZnPcs 15-19 au arătat benzi Soret de absorbție la 348, 350, 351, 352 nm și maxime ale benzii Q de la 615, 616, 617 la 681, 682, 683 nm în soluții de DMSO (Figura 1, Tabelul 1), care sunt atribuite tranzițiilor S_0-S_2 și S_0-S_1 -repectiv, caracteristice ftalocianinelor în formă nanometrică. Pentru spectrele de emisie (Figura 2) ale ZnPcs (15-19), obținute după excitare la 616 nm, s-a observat că benzile tipice centrate la 688, 690 nm pentru ZnPcs 18 și 16 și 691, 692 nm pentru ZnPcs16, 19, 15 se repetă la tranzițiile S_0-S_1. Pentru toate ZnPcs 15-19 s-au observat benzi suplimentare la 757, 758 și 759 nm, asociate cel mai probabil cu tranzițiile în stare vibrațională.

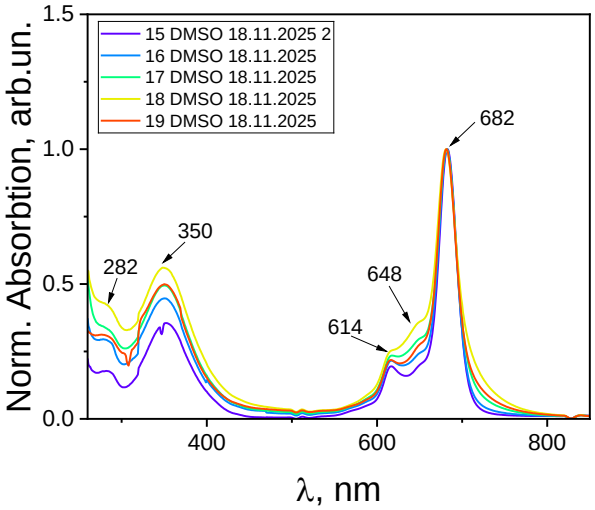


Figura 1. Spectrele de absorbție a ZnPcs în DMSO în proporții: 15) 0.25:2.75; 16) 0.2:2.8; 17) 0.1:2.9; 18) 0.1:2.9; 19) 0.15:2.85.

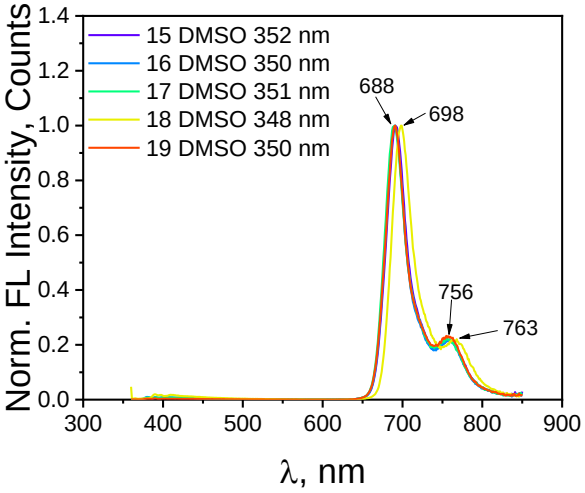


Figura 2. Spectrele de emisie a ZnPcs conjugate cu nanoparticulele de argint (AgNPs).

Sinteza coloranților ftalocianinici ZnPc

A fost realizată sinteza și caracterizarea ftalocianinelor ZnPcs care conțin substituenți tetracarboxi. Compușii au fost complet caracterizați prin RMN, absorbție UV-VIS, și spectroscopie de emisie precum și spectroscopia de masă, așa cum a fost descris anterior în literatura de specialitate [10]. Din compușii preparați este important să subliniem faptul că moleculele periferice au influențat nu numai proprietățile fotochimice și fotofizice ci și fotosensibilitatea, producția de oxigen singlet (Tabelul 1).

Tabelul 1. Proprietățile fotofizice ale compușilor ZnPcs în soluții DMSO.

ZnPcs	Banda Soret, λ_{max}, nm	Absorbția în banda Q, λ_{max}, nm	Emisie, λ_{max}, nm	$\Delta\Phi_F$, %	$\tau_{s,}$ ns
15	352	617/689	692/759	35.9	3.151
16	350	617/682	691/758	60.15	3.234
17	351	615/682	690/759		
18	348	615/681	688/757		
19	350	616/682	691/757	11.85	3.85

Este de remarcat faptul ca compusul ZnPcs 16 a fost cel care a prezentat un randament cuantic de fluorescență mai mare Φ_F = ... urmat de ZnPcs cu datele 15, 17, 18, 19 (a se vedea tabelul 1). Comparând valorile $\tau_{s,}$ ale ZnPcs cu numerele 15, 17,18, 19 reducerea valorii τ_s poate fi explicată parțial prin creșterea ratei de dezintegrare radiativă (Figura 1). Spectrele de emisie de fluorescență ale ZnPcs 19-19, după excitarea lor la 616 nm, au demonstrat în esență două benzi centrate la 618-692 nm și 757-759 nm.

În toate cazurile primul mod convențional de fluorescență este mai vizibil decât cel de al doilea (tabelul 1, figura 2). Aceste benzi de emisie pot fi atribuite tranzițiilor $Q_{(x)}(0\text{-}0)$ și $Q_{(x)}(0\text{-}1)$. Randamentul cuantic de fluorescență Φ_F a fost determinat prin metoda de referință internă (Tabelul1). Randamentul cuantic de fluorescență obținut pentru proba 19 este semnificativ mai mic în comparație cu proba de referință 15 cu o concentrație de ZnPc: AgNPs – 1:1 mg corespunzător față de proba 19 cu o concentrație de ZnPc:AgNPs – 1:5 mg. Cu toate acestea probele 16-18 au prezentat un randament cuantic de fluorescență de 1,5 și 2 ori mai mare decât cel prezentat de referință. S-a observat o fluorescență între randamentele cuantice de emisie și timpii de viață pentru probele 15-19 cu o singură componentă. Reducerea duratei de viață pentru probele 15-16 rezultă din transferul de energie din starea singlet necompetitiv cu trecere intersistemică în starea triplet (Figura 2). Studiul influenței solventului (DMSO) și a apei asupra spectrului fluorescenței a ftalocianinei a scos în evidență faptul că cu creșterea apei în ftalocianină dizolvată în DMSO intensitatea fluorescenței descrește gradual, iar la o proporționalitate egală dintre DMSO și apă intensitatea fluorescenței descrește semnificativ (Figura 3).

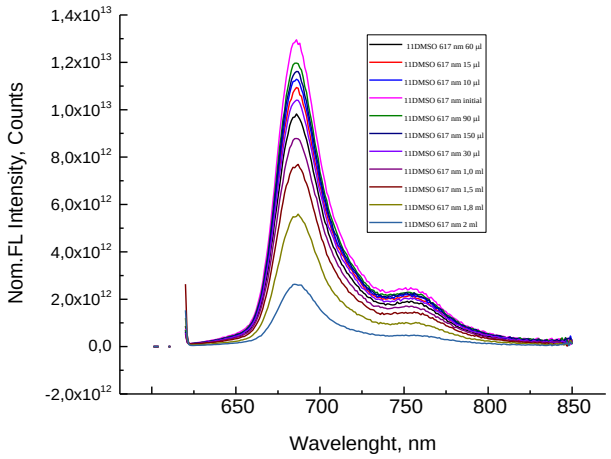


Figura 3. Spectrele de emisie a fluorescenței a ZnPcs DMSO:H_2O.

4. CONCLUZII

Conjugarea de bază a ftalocianinei au devenit instrumente extrem de versatile pentru avansarea PDT combinând generarea de specii reactive de oxigen activate de lumină cu administrarea țintită a medicamentelor și activarea controlată. Prin legarea controlată a ftlocianinei de zinc cu agenții chimiotrapeutici sau creat sisteme cu acțiune dublă care valorifică absorbția țintită către receptori, linkeri scindabili enzimatici și citotoxicitate sinergică, minimizând în același timp efectele în afara țintei. Aceste metode includ nanoparticule sensibile la pH (precum AuNPs și AgNPs) și sisteme multilegand capabile să depășească prezența multiplă la medicamente, demonstrând o sensibilitate tumorală îmbunătățită și o toxicitate sistemică redusă. Sistemele hivride care combină ZnPc – poli- L-lizină cu nanoparticule metalice precum aurul și argintul sporesc și mai mult efectele antibacteriene prin mecanisme sinergice.

În ciuda cestor progrese rămân provocări critice. Agregarea datorită stivuirrii π-π reduce solubilitatea și generarea de ROS în timp ce solubilitatea apoasă slabă limitează implimentarea clinică. Complexitatea sintetică inclusiv randamentele scăzute, formarea de produse secundare și degradarea în timpul funcționalizării complică și mai mult dezvoltarea. Linkerii flexibili pot reduce eficiența transferului de energie și fototoxicitatea, în timp ce linkerii scindabili trebuie reglați cu precizie pentru activare în micromediile tumorale. Conjugatele de biomolecule pot interfera, de asemenea, în producția de ROS prin căi concurente de transfer de energie, în special, atunci când încorporează alte componente fotoactive. Încapsularea în nano purtători poate proteja fotosensibilizatorii de lumină sau oxigen, necesitând o proiectare atentă a sistemelor de eliberare controlată a medicamentului. În cele din urmă, conjugarea adesea stinge fluorescența Pc, ceea ce pune în dificultate aplicațiile de imagistică.

Abordarea acestor probleme printr-un design molecular optimizat, utilizând linkerii hidrofili sau rigizi, grupuri protectoare, catalizatori îmbunătățiți și sisteme intelegente de administrare va fi esențială pentru realizarea întregului potențial clinic al conjugatelor Pc- biomoleculă ca agenți PDT precișI, multifuncționali și eficienți. Per total, conjugarea ftalocianină – biomoleculă reprezintă o direcție promițătoare pentru dezvoltarea unor fotosensibilizatori multifuncționali, extrem de selectivi pentru terapia fotodinamică.

REFERINȚE:

1. CZARNECKA, A.M., BARTNIK, E., FIEDOROWICZ, M., RUTKOWSKI, P. Targeted Therapy in Melanoma and Mechanisms of Resistance. În: *International Journal of Molecular Sciences* 2020, 21, 4576. https://doi.org/10.3390/ijms21134576.
2. VALLI, F., GARCÍA, VIOR, M.C., ROGUIN, L.P., *et al.* Oxidative stress generated by irradiation of a zinc (II) phthalocyanine induces a dual apoptotic and necrotic response in melanoma cells. În: *Apoptosis* 2019, 24, 119–134. https://doi.org/10.1007/s10495-018-01512-w.
3. KELLY, A.D.F., CASTRO, LOYANNE, R., MESQUITA, M., BIAZZOTTO, J. C., *et al.* Comparison of the Photodynamic Action of Porphyrin, Chlorin, and Isobacteriochlorin. În: *J. Applied Bio Materials*., 2021, 4, 6. https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00218.
4. FERREIRA, J.T., PINA, J., RIBEIRO, C.A.F., *et. al.* Highly Efficient Singlet Oxygen Generators Based on Ruthenium Phthalocyanines: Synthesis, Characterization and in vitro Evaluation for Photodynamic Therapy. În: *J. Chemistry-A European* 2019, 26, 8, 1789-1799. https://doi.org/10.1002/chem.201903546
5. TUNCEL, S., TRIVELLA, A., ATILLA, D., BENNIS, K., SAVOIE, H., ALBRIEUX, F., DELORT, L., BILLARD, H., DUBOIS, V., AHSEN, V., *et al.* Assessing the Dual Activity of a Chalcone-Ph-

thalocyanine Conjugate: Design, Synthesis, and Antivascular and Photodynamic Properties. În: *Mol. Pharm.* 2013, 10, 3706–3716. https://doi.org/10.1021/mp400207v.
6. CHORNOVOLENKO, K., KOCZOROWSKI, T. Phthalocyanines Conjugated with Small Biologically Active Compounds for the Advanced Photodynamic Therapy: A Review. În: *Journal Molecules* 2025, 30, 3297. https://doi.org/10.3390/molecules30153297
7. KELLY, A. D. F., CASTRO, J. A., PRANDINI, J. C. B., *et al.* Surprisingly Positive Effect of Zinc-Phthalocyanines with High Photodynamic Therapy Efficacy of Melanoma Cancer. În: *Frontiers in Chemistry* 2022, 10. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.825716
8. MOREIRA, L.M., DOS SANTOS, F.V., LYON, J.P., MAFTOUM-COSTA, M., PACHECO-SOARES, C. Soares Da Silva, N. Photodynamic Therapy: Porphyrins and Phthalocyanines as Photosensitizers. În: *Aust. J. Chem.*, 2008, 61, 741–754. https://doi.org/10.1071/CH08145.
9. GALSTYAN, A. Turning Photons into Drugs: Phthalocyanine-Based Photosensitizers as Efficient Photoantimicrobials. În: *Chem.—A Eur. J.*, 2021, 27, 1903–1920. https://doi.org/10.1002/chem.2020-02703.
10. GUTU, I., SUMAN, V., BARBA, A., POTLOG, T. The Water-Soluble Zinc Phthalocyanine Substituted with Sulfur-Containing Groups. În: *Springer Book Chapter* 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42775-6_29.

MULȚUMIRI. Această lucrare a fost susținută de Ministerul Educației și Cercetării al Republicii Moldova, prin subprogramul instituțional cu cifrul #02.02.01 „Nanostructuri și materiale avansate pentru aplicații în spintronică, termoelectricitate și optoelectronică” și proiectul PN-IV-P8-8.3-ROMD-2023-0048 (DSUPRAMED), în cadrul PNCDI IV.

CZU: 538.975:546.47 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.20**

SPRAY PYROLYSIS GROWTH OF ZnSnO THIN FILMS: STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS

CREȘTEREA FILMELOR SUBȚIRI DE ZnSnO PRIN SPRAY PIROLIZĂ: ANALIZA STRUCTURALĂ ȘI MORFOLOGICĂ

Vadim MORARI[1] e-mail: vadim.morari@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3625-251X

Emil V. RUSU[2] e-mail: emil.rusu@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0001-9010-492

[1,2]IIEN „D. Ghițu”, Technical University of Moldova

Abstract: *Zinc tin oxide (ZnSnO) thin films were synthesized at different deposition times via spray pyrolysis to investigate the effect of film thickness on structural and morphological properties. SEM surface and cross-sectional measurements showed that with increasing deposition time the film thickness increased from 80 nm (3 min) to 320 nm (10 min). At the same time, the surface morphology evolved from uniform, compact layers with smaller crystallites to denser structures with larger grains. This transition was attributed to the competition between nucleation and growth during film formation. XRD analysis confirmed the coexistence of Zn_2SnO_4 and SnO_2 phases in all samples. With increasing thickness, the relative intensity of Zn_2SnO_4 peaks increased while SnO_2 peaks decreased, indicating preferential stabilization of Zn_2SnO_4 in thicker films. In particular, the (110) peak of SnO_2 diminished, whereas the (220) peak of Zn_2SnO_4 became more pronounced, evidencing progressive phase transformation. These results indicate a clear correlation between deposition time, film thickness, crystallite size, and phase composition, while the optical transparency decreases from 84% to 72% as the thickness increases from 80 nm to 320 nm.*

Keywords: *Films thickness, SEM, Transmittance, XRD pattern, ZnSnO.*

1. INTRODUCTION

Oxide thin films represent a wide class of functional materials with remarkable optical, electrical, and catalytic properties. They are widely applied in optoelectronic devices, solar cells [1], sensors [2], and protective coatings [3], due to their stability and tunable characteristics. The ability to engineer band gap [4], conductivity [5], and surface morphology [6] makes oxide films highly adaptable for next-generation technologies. Recent studies highlight their role in transparent electronics [7], UV detectors [8], and flexible devices [9]. Therefore, the development of oxide-based thin films remains a key research direction in modern materials science. Among these materials, ZnSnO (zinc–tin–oxide) has emerged as a promising candidate due to its favorable semiconductor [10] behavior and environmental stability.

The presence of both Zn and Sn cations allows tailoring of electronic structure and crystallinity, enabling applications in transparent conducting oxides and thin-film transistors. ZnSnO thin films also exhibit high optical transmittance in the visible range combined with controllable electrical conductivity [11]. Such properties make them suitable for integration into energy conversion devices [12], gas sensors [13], and optoelectronic systems [14]. As a result, ZnSnO continues to attract growing attention as a versatile oxide material with technological potential. There are many deposition techniques for fabricating ZnSnO thin films, such as pulsed laser deposition [15], molecular beam epitaxy [16], and magnetron sputtering [17], which usually require sophisticated equipment and high cost.

In contrast, spray pyrolysis is a simple, low-cost, and scalable method that enables the growth of uniform thin films with controllable composition and morphology [18]. In this work ZnSnO thin films were deposited using the spray pyrolysis technique for different durations to investigate the influence of deposition time on their morphology, thickness, and structural properties.

2. MATERIALS AND METHODS

ZnSnO thin films were deposited via the spray pyrolysis technique. A precursor solution was prepared by dissolving 0.25 M zinc nitrate [$Zn(NO_3)_2$] and 0.25 M tin chloride [$SnCl_4$] in ethanol [C_2H_5OH]. The solutions were mixed in a Zn2:1Sn molar ratio using an ultrasonic bath for 30 minutes at 50 - 60 °C prior to deposition. The resulting solution was sprayed onto n-Si (100) substrates, using oxygen gas (O_2) as the carrier with an outlet pressure of 0.05 Bar. During deposition, the substrate temperature was maintained between at 480 °C, while the spray nozzle-to-substrate distance was fixed at 4 cm to ensure uniform droplet distribution. Film thickness was controlled by the precursor injection rate (0.5 ml/min) and the deposition time, which varied between 3 and 10 minutes. Prior to deposition, the Si substrates were cleaned sequentially with acetone, ethanol, and deionized water, followed by drying in nitrogen gas. After deposition, the films were annealed in air at 500 °C for 1 hour to improve crystallinity and eliminate residual organic species. The structural and morphological properties of the films were subsequently characterized using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

ZnSnO thin films were prepared by spray pyrolysis technique at different deposition times (3, 5, 7 and 10 min) to examine their morphological and structural variations. Surface SEM images were analyzed to correlate structural evolution with the growth process. SEM images of the films grown at different deposition times are shown in Figure 1. At a deposition time of 3 minutes (Figure 1 a), the film exhibited a smooth and relatively uniform morphology with clearly distinguishable crystallites.

The average thickness measured in cross-section was about 80 nm, indicating the formation of a thin and compact initial layer. When the deposition time increased to 5 minutes (Figure 1 b), the thickness reached 150 nm and the surface became slightly more textured, showing the development of grain boundaries. For the sample deposited for 7 minutes (Figure 1c), the film thickness increased to 250 nm, accompanied by a visible increase in crystallite size. The SEM micrographs revealed a denser and more ordered structure, suggesting that the accelerated growth rate promotes the coalescence of larger grains. At a deposition time of 10 minutes (Figure 1d), the ZnSnO layer reached 320 nm, and the surface morphology became even clearer. The crystallites appeared larger, and the film showed a more ordered structure compared to shorter deposition times. This trend indicates that longer deposition not only favors thickness growth but also stimulates an increase in crystallite size. The increase in crystallite size with increasing thickness can be attributed to the competition between nucleation and growth processes. At short deposition times, crystallites have more space to grow laterally, forming smaller grains. As deposition continues, the film becomes denser, limiting the lateral expansion of grains and resulting in larger crystallite sizes.

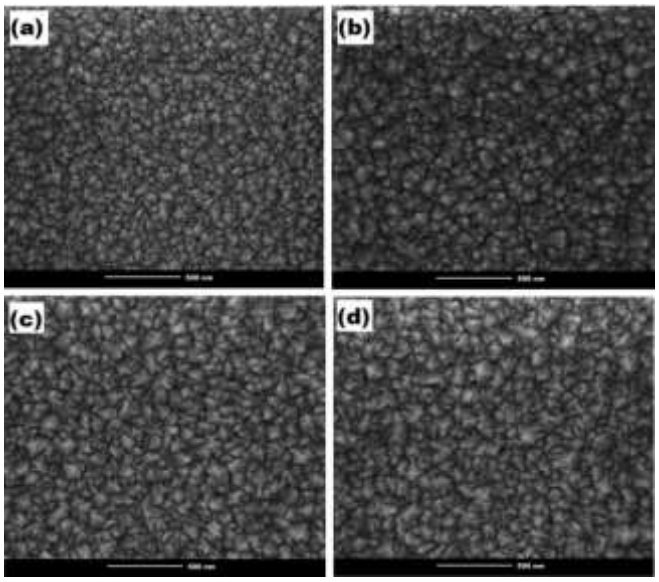


Figure 1. SEM images of ZnSnO thin films deposited by spray pyrolysis method for different times: a) 3 min, b) 5 min, c) 7 min, and d) 10 min.

This structural evolution plays a crucial role in determining the optical and electrical properties of ZnSnO films. Therefore, achieving an optimal balance between film thickness and crystal ordering is crucial for the practical implementation of these films and the enhancement of device performance. Overall, SEM analysis demonstrates that thin ZnSnO films evolve from ordered layers with low thickness to ordered nanostructures with high thickness and larger crystallites. These findings highlight the strong dependence of microstructural properties on deposition time, which must be carefully controlled for targeted applications. The XRD patterns (Figure 2) reveal the coexistence of two crystalline phases, Zn_2SnO_4 and SnO_2, for all deposition times. With increasing deposition time, and consequently increasing film thickness, the diffraction peaks corresponding to Zn_2SnO_4 become more intense, indicating an enhancement of its crystallinity and preferential growth. In contrast, the relative intensity of the SnO_2 peaks decreases, suggesting that the prolonged deposition favors the formation and stabilization of the Zn_2SnO_4 phase at the expense of SnO_2. This structural evolution highlights a phase transformation tendency driven by film thickness and growth dynamics.

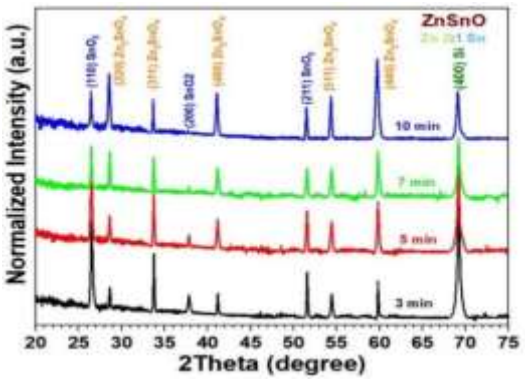


Figure 2. XRD patterns of ZnSnO thin films deposited by spray pyrolysis method at different times: a) 3 min, b) 5 min, c) 7 min, and d) 10 min.

Figure 3 displays the (110) and (220) diffraction peaks, where it can be clearly seen that, as the film thickness increases, the intensity of the (110) peak associated with the SnO_2 phase decreases, whereas the intensity of the (220) peak corresponding to the Zn_2SnO_4 phase increases. With increasing thickness, the diffusion and intermixing of Zn and Sn atoms become more pronounced, which promotes the stabilization of the ternary Zn_2SnO_4 phase. At the same time, the reduction of SnO_2 peak intensity suggests that excess Sn is gradually incorporated into the spinel lattice, leading to improved phase homogeneity in thicker films. This behavior indicates a progressive suppression of the SnO_2 phase and a preferential crystallization of Zn_2SnO_4 in thicker films.

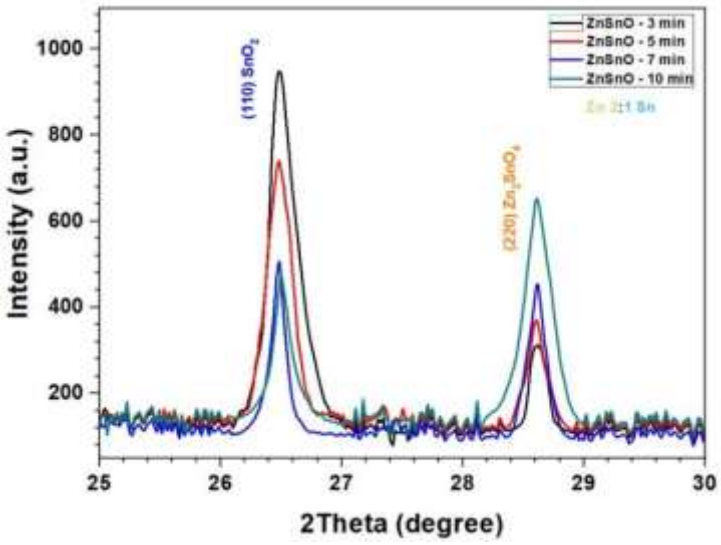


Figure 3. Magnified XRD patterns highlighting the (110) and (220) diffraction peaks of ZnSnO thin films by spray pyrolysis method at different deposition times.

To highlight the optical transparency of these films, given the previously discussed variations in thickness, figure 4 presents the optical transmittance spectra as a function of photon energy (eV) for thin ZnSnO films deposited at different times (3, 5, and 10 minutes). All samples exhibit a high level of transparency in the visible region, with average transmittance values of approximately 84%, 75%, and 72%, respectively. As the deposition time increases, a slight decrease in transmittance is observed, which can be attributed to the increased film thickness leading to enhanced light scattering and absorption processes within the material. The transmittance spectra display a similar shape for all samples, with a sharp absorption edge appearing around 3.7–3.8 eV. The position of this edge remains essentially unchanged regardless of deposition time, indicating that the optical band gap of the ZnSnO films is not significantly affected by thickness variations. This stability in the absorption edge suggests good compositional uniformity and consistent film quality across the investigated samples. Overall, the high transmittance and stable optical behavior confirm the suitability of ZnSnO films for use in optoelectronic and photovoltaic applications, such as transparent electrodes or window layers in solar cells.

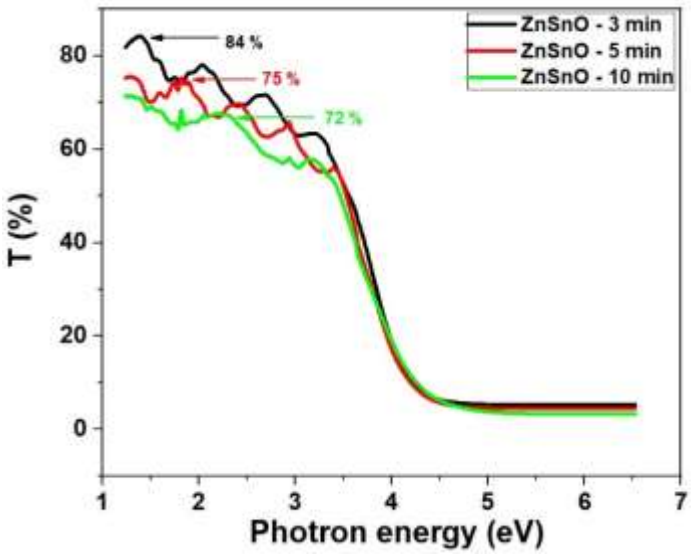


Figure 4. Transmittance spectra of ZnSnO thin films deposited by spray pyrolysis method obtained at different times: 3 min, 5 min, 10 min.

4. CONCLUSIONS

ZnSnO thin films deposited at different times exhibited a clear dependence of their structural and morphological properties on film thickness. SEM observations showed that as the deposition time increased, the films grew from 80 nm to 320 nm, while their surface morphology evolved from relatively uniform layers with larger crystallites to denser but more disordered structures with smaller grains. This microstructural change was attributed to the competition between nucleation and growth processes during film formation. XRD analysis revealed the coexistence of Zn_2SnO_4 and SnO_2 phases in all samples, with a noticeable shift in phase balance as the thickness increased. The intensity of Zn_2SnO_4 diffraction peaks became stronger, while the peaks of SnO_2 gradually diminished, indicating a preferential stabilization of the Zn_2SnO_4 phase in thicker films. This transformation suggests that prolonged deposition enhances the interdiffusion of Zn and Sn atoms, resulting in improved phase homogeneity. A clear correlation is observed between deposition time, film thickness, crystallite size, and phase composition, with optical transparency decreasing from 84% to 72% as the thickness increases from 80 nm to 320 nm. Overall, the study demonstrates that deposition time is a critical parameter for controlling the microstructure and phase composition of ZnSnO thin films, providing valuable guidance for their optimization in optoelectronic applications.

REFERENCES:

1. RABISANKAR, D., MAHENDER, P., KUMAR, S., ANKUR, S. Preparation of ZnO layer for solar cell application. In: *Materials Today: Proceedings* 2021, Vol. 41, Part 2, pp. 161-164. https://doi.org/-10.1016/j.matpr.2020.08.448.
2. KUMAR, R., MAMTA, K. R., SINGH, V.N. SnO_2-Based NO_2 Gas Sensor with Outstanding Sensing Performance at Room Temperature. In: *Micromachines* 2023, 14, 728. https://doi.org/10.3390/mi140-40728.

3. WORSLEY, M., SMULDERS, V., MEI, B. Controlled Synthesis of Chromium-Oxide-Based Protective Layers on Pt: Influence of Layer Thickness on Selectivity. In: *Catalysts* 2022, 12, 1077. https://-doi.org/10.3390/catal12101077.
4. MORARI, V., RUSU, E. V., URSAKI, V. V., NIELSCH, K., TIGINYANU I. M. Aerosol spray deposited wurtzite ZnMgO alloy films with MgO nanocrystalline inclusions. In: *IFMBE Proceedings – Springer Nature Switzerland AG* 2022, Vol. 87, p. 32-39. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_5.
5. WANG, Y., ZHANG, H., ZHANG, X., ZHOU, Z., WANG, L. Tuning Electrical and Optical Properties of SnO_2 Thin Films by Dual-Doping Al and Sb. In: *Coatings* 2025, 15, 669. https://doi.org/10.3390/-coatings15060669.
6. IZYDORCZYK, W., IZYDORCZYK, J. Structure, Surface Morphology, Chemical Composition, and Sensing Properties of SnO_2 Thin Films in an Oxidizing Atmosphere. In: *Sensors* 2021, 21, 5741. https://doi.org/10.3390/s21175741
7. PATEL, J., SHARME, R. K., QUIJADA, M. A., RANA, M. M. A Review of Transparent Conducting Films (TCFs): Prospective ITO and AZO Deposition Methods and Applications. In: *Nanomaterials* 2024, 14, 2013. https://doi.org/10.3390/nano14242013
8. MORARI, V., URSAKI, V. V., RUSU, E V., ZALAMAI, V. V., COLPO, P., TIGINYANU, I. M. Spin-Coating and Aerosol Spray Pyrolysis Processed $Zn_{1-x}Mg_xO$ Films for UV Detector Applications. In: *Nanomaterials* 2022, Vol. 12, Issue 18, 3209. https://doi.org/10.3390/nano12183209.
9. SHUANGYUAN, L., XIAOFEI, X., JIE, J. Flexible transparent ITO thin film with high conductivity and high-temperature resistance. In: *Ceramics International* 2024, Vol. 50, Issue 22, Part C, p. 47649-47654. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.110.
10. Pan, W., Zhang, G., Liu, X., Song, K., Ning, L., Li, S., Chen, L., Zhang, X., Huang, T., Yang, H., et al. Achieving High Performance of ZnSnO Thin-Film Transistor via Homojunction Strategy. In: *Micromachines* 2023, 14, 2144. https://doi.org/10.3390/mi14122144
11. DRIDI, R., MRABET, C., LABIDI, A., MAHDHI, N., AMLOUK, A., AMLOUK, M. Electrical conductivity of Zn_2SnO_4 thin films along with wettability and EtOH-sensing. In: *Journal of Alloys and Compounds* 2017, Vol 708, p. 769-779. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.055.
12. JAE, Y. C., et all. Atomic-layer-deposited ZnSnO buffer layers for kesterite solar cells: Impact of Zn/(Zn+Sn) ratio on device performance. In: *Journal of Alloys and Compounds* 2022, Vol. 895, Part 2, 162651. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162651.
13. JIAXIN, D., WEIMIN, S., QUANBI, Z., GANG, Z., XINZHEN, W. Facile synthesis of nano-porous $ZnSnO_3$ cubes for excellent gas sensing properties toward n-butanol. In: *Ceramics International* 2025. ISSN 0272-8842. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.274.
14. GUO, L., WANG, Q., WANG, C., CHU, X., HAO, Y., CHI, Y., YANG, X. Effect of Ga Doping on the Stability and Optoelectronic Properties of ZnSnO Thin Film Transistor. In: *Micromachines* 2024, 15, 1445. https://doi.org/10.3390/mi15121445.
15. HONGYAN, Z., BIAO, Z., RONGRONG, C., XINYU, H., et all. High-performance solar-blind photodetectors based on Ta-doped $ZnSnO_3$ single crystal thin films. In: *Journal of Alloys and Compounds* 2024, Vol. 997, 174854. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174854.

16. HIROYA, M., KOHEI, F., ATSUSHI, T. High-mobility field-effect transistor based on crystalline $ZnSnO_3$ thin films. In: *AIP Advances* 2018, Vol. 8, 5, 055327. https://doi.org/10.1063/1.5034403
17. SHIQIAN, D., TAO, W., RAN, L., et all. Preparation and electrical properties of N-doped ZnSnO thin film transistors. In: *Journal of Alloys and Compounds* 2018, Vol. 745, p. 256-261. https://doi.-org/10.1016/j.jallcom.2018.02.198.
18. MORARI, V., MONAICO, E. I., MONAICO, E. V., RUSU, E V., URSAKI, V. V. Interrelationships Between Topology and Wettability of Nanostructured Composite Wide Bandgap Metal Oxide Films Prepared by Spray Pyrolysis. In: *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, 5, 2381. https://doi.org/10.3390/ap-p15052381.

ACKNOWLEDGMENT. This research was funded by MER from the Republic of Moldova, institutional subprogram #02.02.01 "Nanostructures and advanced materials for applications in spintronics, thermoelectricity and optoelectronics", and the Young Researchers 2025-2026 Project #25.80012.5007.31TC.

CZU: 621.383.51:537.312.62 + 621.315.592 https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.21

HETEROSTRUCTURILE ITO/$Zn_{1-x}Mg_xO$:Al/Si CU DIFERITE CONFIGURAȚII PENTRU APLICAȚII ÎN CELULE SOLARE

VARIOUS DESIGN OF ITO/$Zn_{1-x}Mg_xO$:Al/Si HETEROSTRUCTURES FOR SOLAR CELLS APPLICATIONS

Vadim MORARI[1] e-mail: vadim.morari@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3625-251X
Victor SUMAN[2] e-mail: victor.suman@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0003-3309-9476
Emil V. RUSU[3] e-mail: emil.rusu@iien.utm.md ORCID ID: 0000-0001-9010-4927
Veaceslav URSAKI[4] e-mail: vursaki@gmail.com ORCID ID: 0000-0003-4488-850X

[1,2,3]Technical University of Moldova, IIEN „D. Ghițu''
[4]Academy of Sciences of Moldova

Rezumat. *Acest studiu prezintă fabricarea și optimizarea heterostructurilor n-ITO/n-$Zn_{0.9}Mg_{0.1}O$/p-Si pentru aplicații fotovoltaice. Filmele de $Zn_{0.9}Mg_{0.1}O$ și n-ITO au fost depuse prin piroliză prin pulverizare, variindu-se sistematic grosimea stratului de ITO pentru a investiga compromisurile dintre transparență și conductivitate. Caracterizarea electrică și optică a arătat că creșterea grosimii stratului de ITO îmbunătățește conductivitatea și reduce rezistența serie, menținând în același timp o transparență acceptabilă. Celulele solare cu o configurație în două contacte au prezentat o eficiență maximă (η) de 0,31%, un factor de umplere (FF) de 32% și o putere maximă (P_{max}) de 6,12 μW. Introducerea electrozilor de tip grilă a îmbunătățit η la 1,15%, FF la 36,7% și P_{max} la 91 μW, demonstrând o colectare superioară a purtătorilor de sarcină și o calitate mai bună a joncțiunii. Proprietățile optice, inclusiv indicele de refracție și banda interzisă, au depins puternic de grosimea filmelor, subliniind rolul parametrilor structurali în performanța dispozitivului. Aceste rezultate indică faptul că heterostructurile ITO/ZnMgO/Si reprezintă o platformă promițătoare pentru celule solare transparente și conductive.*
Cuvinte-cheie: *Bandă interzisă, Caracteristici I-V, Parametri fotovoltaici, Indice de refracție, Transparență.*

1. INTRODUCTION

The global demand for sustainable energy has accelerated the development of solar cell technologies, making photovoltaics one of the most promising alternatives to fossil fuels. Traditional silicon-based solar cells continue to dominate the market, offering high efficiencies of 15–24% for monocrystalline and 15–18% for polycrystalline devices, while maintaining long-term stability and relatively low production costs [1]. In parallel, emerging technologies such as perovskite solar cells have shown laboratory efficiencies above 25% and rapid improvement rates, although stability issues under environmental stress remain a major challenge [2]. Thin-film technologies, including cadmium telluride (CdTe) and copper indium gallium selenide (CIGS), also provide efficiencies of 15–23% and present advantages such as lightweight flexibility and reduced material usage for large-scale deployment [3,4]. At the cutting edge, multi-junction and tandem cells have surpassed 40% efficiency in laboratory settings by employing bandgap engineering to capture a broader solar spectrum, though their high costs and complex fabrication limit widespread terrestrial applications. To further improve device performance, researchers are focusing on advanced transparent conductive oxides (TCOs), which play a crucial role in balancing optical transparency and electrical conductivity in solar cells. Among these, zinc magnesium oxide ($Zn_{1-x}Mg_xO$) has gained significant attention due to its tunable band gap (3.3–7.8 eV) and potential use as a customizable window layer in photovoltaic devices [5, 6].

Since pure ZnMgO suffers from poor conductivity, aluminum doping has been widely employed to introduce donor states that improve carrier concentration and mobility while preserving high optical transparency [7,8]. Related studies have also demonstrated the effectiveness of aluminum-doped zinc oxide (AZO) [9] and aluminum-doped tin oxide (ATO) [10] as cost-effective alternatives to conventional indium tin oxide (ITO) [11]. Building on these advances, this study focuses on the synthesis of Al-doped ZnMgO films and ITO as a transparent conductive layer and the achievement of heterostructures with different configurations, whose performance will be evaluated through current-voltage characterization.

2. MATERIALS AND METHODS

Oxide thin films were deposited on commercial p-type silicon (Si) substrates with a resistivity of 10^6 Ω·cm and crystallographic orientation [100], which were cut into 1.5 cm² pieces to ensure uniform deposition. Prior to film growth, the wafers underwent a rigorous cleaning process involving immersion in an $NH_4OH/H_2O_2/H_2O$ (1:1:8) solution, rinsing with distilled water, drying by centrifugation, and heat treatment at 120 °C for 10 minutes to remove residual moisture. Al-doped zinc magnesium oxide ($Zn_{1-x}Mg_xO$:Al) thin films were synthesized on the cleaned Si substrates by spray pyrolysis, a scalable method for producing uniform oxide layers. The precursor solution was prepared using zinc acetate dihydrate, magnesium acetate tetrahydrate, and aluminum chloride hexahydrate dissolved in a methanol + water + acetic acid mixture, adjusted to 0.25 M concentration, stirred for 60 minutes in an ultrasonic bath at 50 °C, and aged for 24 hours. $Zn_{1-x}Mg_xO$ thin films with magnesium concentrations of $x = 0.05$ to 0.15 were initially synthesized, after which $Zn_{0.90}Mg_{0.10}O$ films were selected as the base material for (Al) aluminum doping at concentrations of 0.0025, 0.01, 0.03, and 0.05. Deposition was performed at 500 °C with a spray rate of 1.2 mL/min, a nozzle-to-substrate distance of 4 cm, and oxygen as the carrier gas at 1 Bar, resulting in films 200 – 850 nm thick depending on spray duration. After deposition, the films were cooled to room temperature and stabilized on a hot plate for subsequent processing. To form the transparent conductive electrode, indium tin oxide (ITO - 90 wt.% In_2O_3 and 10 wt.% SnO_2) was deposited via spray pyrolysis using $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ and $InCl_3$ precursors in an alcohol-based solvent, stirred under similar conditions as $Zn_{1-x}Mg_xO$:Al, with a spray rate of 1.5 mL/min and oxygen flow at 1 Bar. The ITO layer, approximately 200 nm thick, was optimized to provide a sheet resistance of ~70 Ω while maintaining ~95% optical transparency. Finally, silver (Ag) contacts were deposited on the ITO surface by high-vacuum thermal evaporation (1.5×10^{-4} Torr) using two electrode configurations: two-point contacts and grid-type metallic contacts (see Figure 1).

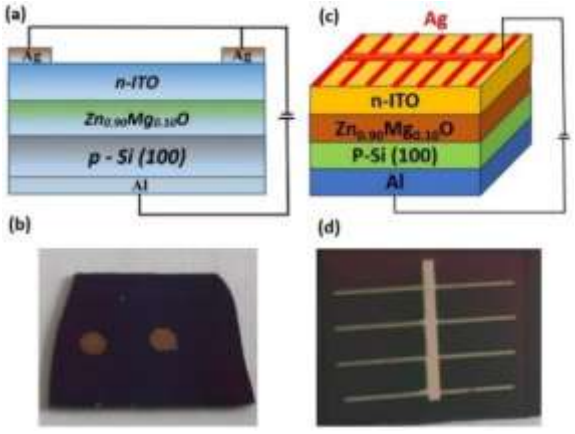


Figure 1. Design configurations of Ag/n-ITO/n-$Zn_{1-x}Mg_xO$:Al/p-Si/Al heterostructures: two-point configuration (a,b) and grid-type metal contacts (c,d).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Following the optimization of the technological parameters for obtaining n-ITO films through aerosol deposition, special attention was given to achieving a balance between conductivity, transparency, and antireflection properties. The deposited films exhibited a clear dependence of their optoelectronic behavior on thickness. Films with an average thickness of approximately 200 nm demonstrated about 95% transparency and a sheet resistance of 70 Ω, while thicker layers (≈850 nm) showed reduced transparency (89%) but significantly improved conductivity (12 Ω). This correlation highlights the critical influence of deposition parameters on the microstructural and electronic properties of the ITO films. Figure 2 demonstrates the reflectance and transmittance of n-ITO films at different thicknesses. The optical analysis, based on reflection spectra, revealed a linear increase in the refractive index (see Figure 3a) from 1.7 to 2.05 across the 1.0 – 4.0 eV photon energy range, with thicker films exhibiting higher values. This behavior is attributed to enhanced interband electronic transitions as the photon energy increases, as well as to structural factors such as carrier concentration, microstructure, and crystallinity influenced by the spray pyrolysis deposition at 500 °C. Furthermore, the optical bandgap (Eg) of the ITO films was found to vary slightly with thickness, ranging between 3.37 eV and 3.41 eV (see Figure 3b). This smooth change in bandgap energy with increasing thickness indicates that structural and electronic modifications within the films play a critical role in determining their optical properties.

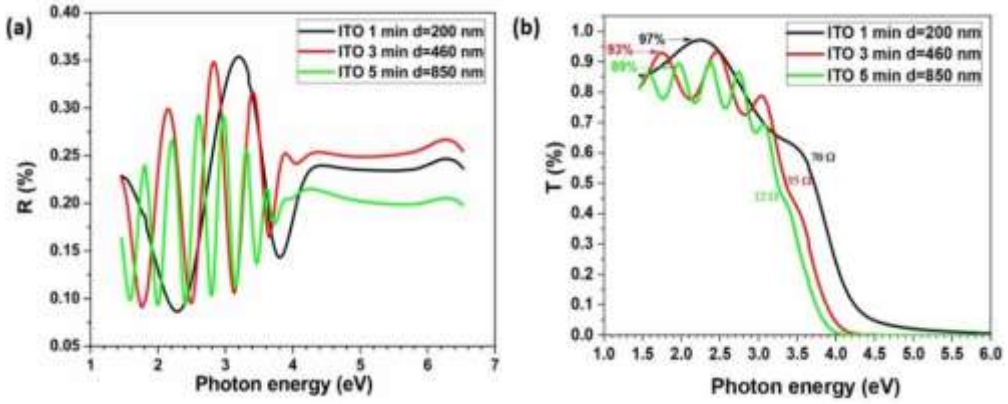


Figure 2. The reflectance (a) and transmittance (b) of the n-ITO films obtained by aerosol deposition method.

Such behavior is typical for transparent conducting oxides, where small changes in microstructure or carrier density significantly influence the bandgap energy.

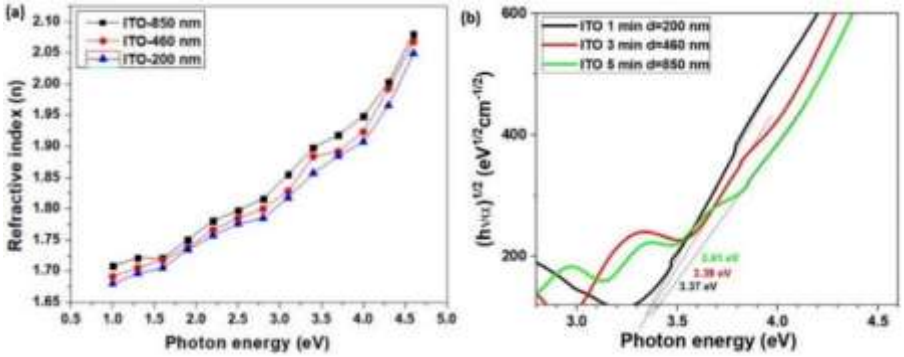


Figure 3. The refractive index (n) (a) and bandgap (b) at different thickness of the n-ITO films obtained by aerosol deposition method.

For the fabrication of n-ITO/n-$Zn_{1-x}Mg_xO$:Al/p-Si heterostructures, $Zn_{0.9}Mg_{0.1}O$ layers doped with 1% Al were deposited for 3 minutes, followed by ITO coatings with varied deposition times. The aim was to explore the correlation between ITO layer thickness and the resulting electrical and photovoltaic performance of the heterostructures. Two representative samples with different contact configuration, Ex.115 (ITO – 460 nm) and Ex.118 (ITO – 460 nm), were analyzed through current-voltage (I–V) measurements and extracted the photovoltaic parameters.

The electrical characterization of sample Ex.115 with two-point configuration (Figure 4a) revealed features essential for solar cell operation. The short-circuit current (Isc) reached 71 μA, while the open-circuit voltage (Uoc) was 0.27 V. The maximum output power was 6.12 μW, corresponding to a power conversion efficiency (η) of 0.31%. The series resistance remained relatively low (2.7 kΩ), ensuring efficient charge transport, while the parallel resistance (4.8 kΩ) indicated some internal recombination or leakage effects. The fill factor (FF) was approximately 32%, suggesting a reasonably good diode quality and stable junction behavior.

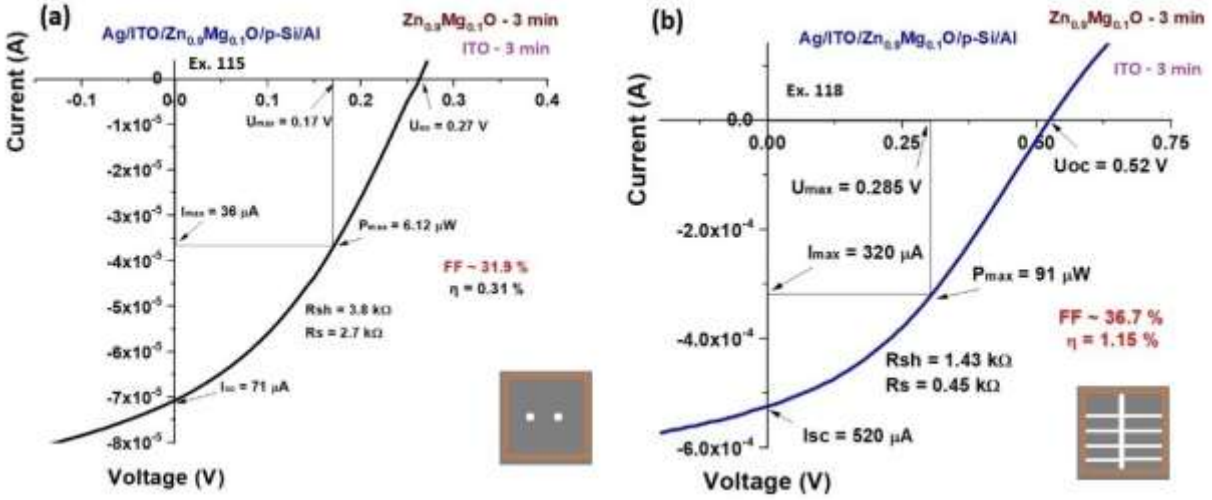


Figure 4. Load characteristic of the Ag/n-ITO/n-$Zn_{1-x}Mg_xO$:Al/p-Si/Al heterostructures (Ex. 115) with two-point configuration (a) and grid-type metal (Ag) contacts (Ex. 118) (b).

To further enhance device performance, the ZnMgO layer was more effectively doped with aluminum to increase conductivity, and grid-type contacts were implemented to improve charge carrier collection over a larger surface area. These optimizations were integrated into sample Ex.118, which exhibited the most efficient photovoltaic behavior in the series (Figure 4b). For this sample, the short-circuit current (Isc) increased significantly to 520 μA, and the open-circuit voltage (Uoc) reached 0.52 V. The maximum output power rose to 91 μW, while the efficiency (η) improved to 1.15%, representing a more than sevenfold increase compared to Ex.115. The series resistance decreased further to 0.45 kΩ, indicating excellent charge transport, whereas the parallel resistance decreased to 1.43 kΩ, suggesting an increase in internal leakage or recombination phenomena. Despite this, the overall performance clearly confirms the positive impact of optimized doping and electrode architecture on the photovoltaic response.

The comparative analysis of Ex.115 and Ex.118 reveals a substantial enhancement in electrical and photovoltaic characteristics driven by structural and compositional optimization. The evolution of the optical bandgap with film thickness, combined with improved carrier mobility and interface engineering,

demonstrates that both material structure and device architecture play crucial roles in determining the efficiency of n-ITO/n-$Zn_{1-x}Mg_xO$:Al/p-Si heterojunction solar cells. All photovoltaic (PV) parameters investigated and mentioned in the text are represented in Table 1.

Table 1. All photovoltaic (PV) parameters investigated.

Samples	I_{sc}, µA	U_{oc}, V	I_{max}, µA (at P_{max})	U_{max}, V (at P_{max})	P_{max}, µW	Rs, KΩ	Rsh, KΩ	FF, %	η, %
Ex.115	71	0.27	36	0.17	6.12	2.7	4.8	31.9	0.31
Ex.118	520	0.52	320	0.285	91	0.45	1.43	36.7	1.15

4. CONCLUSIONS

The optimization of n-ITO films via spray pyrolysis demonstrates a clear trade-off between transparency and conductivity, with thicker films improving conductivity but slightly reducing transparency. Increasing ITO thickness reduces series resistance and improves short-circuit current, as evidenced by the superior performance of sample Ex.115. Implementing grid-type contacts further boosted the solar cell efficiency sevenfold, achieving 1.15% while maintaining low series resistance. The heterostructures exhibit good rectifying behavior, indicating high junction quality and suitability for photovoltaic applications. Optical measurements reveal that the refractive index and bandgap are strongly influenced by film thickness, reflecting the material's structural and electronic properties. The results highlight the critical role of precise control over layer thickness and interface quality in optimizing device performance. Overall, the combination of ITO, ZnMgO, and silicon provides a promising approach for transparent and conductive solar devices.

REFERENCES:

1. LASEINDE, O.T., RAMERE, M. D. Efficiency Improvement in polycrystalline solar panel using thermal control water spraying cooling. In: *Procedia Computer Science* 2021, Vol. 180, p. 239–248. https://doi:10.1016/j.procs.2021.01.161.
2. SIDRA, K., SATISH, K. Y., VISHWADEEP, C. et. All. Perovskite solar cell's efficiency, stability and scalability: A review. In: *Materials Science for Energy Technologies* 2023, Vol. 6, pp. 437-459. https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.04.007
3. NOWSHAD, A. Chapter 3 - Introduction of inorganic solar cells. Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells. In: *Fundamental Concepts to Fabrication Methods Solar Cell Engineering* 2022, p. 57-63. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85529-7.00005-0.
4. JEYAKUMAR, R., UDAI, P. S. Copper indium gallium selenide based solar cells – a review. In: *Energy & Environmental Science* 2017, Vol. 10, p. 1306-1319. https://doi.org/10.1039/C7EE00826K.
5. TSAI, D.C., CHEN, F.K., CHANG, Z.C. *et. al.* Effect of Al_2O_3-doping on the structure and optoelectronic characteristics of MgZnO thin film prepared by RF magnetron sputtering. In: *Appl. Phys. A* 2021, 127, 571. https://doi.org/10.1007/s00339-021-04723-2.
6. BERJALI, W., HAMADY, S., BOULET, P., COLAS, V., GRIES, T., HORWAT, D., PIERSON, J. ZnMgO Thin Films by Ultrasonic Spray Pyrolysis: Modulation of Optical and Electrical Properties by Post-annealing and Magnesium Composition. In: *Physica status solidi (a)* 2024. https://doi.org/-10.1002/pssa.202400015.
7. COHEN, D., RUTHE, K., BARNETT, S. Transparent conducting $Zn_{1-x}Mg_xO$:(Al,In) thin films. In: *Journal of Applied Physics* 2004, Vol. 96, p. 459-467. https://doi.org/10.1063/1.1760239.
8. MATSUBARA, K., TAMPO, H., SHIBATA, H., YAMADA, A., FONS, P., IWATA, K., NIKI, S. Band-gap modified Al-doped $Zn_{1-x}Mg_xO$ transparent conducting films deposited by pulsed laser

deposition. In: *Applied Physics Letters* 2004, Vol. 85, p. 1374-1376. https://doi.org/10.1063/1.17845-44.
9. MURDOCH, G., HINDS, S., SARGENT, E., TSANG, S., MORDOUKHOVSKI, L., LU, Z. Aluminum doped zinc oxide for organic photovoltaics. In: *Applied Physics Letters* 2009, 94, 213301. https://doi.org/10.1063/1.3142423.
10. PATEL, J., SHARME, R.K., QUIJADA, M.A., RANA, M.M. A Review of Transparent Conducting Films (TCFs): Prospective ITO and AZO Deposition Methods and Applications. In: *Nanomaterials* 2024, 14, 2013. https://doi.org/10.3390/nano14242013
11. LI, Y.; LI, Y.; ZHANG, Y., *et al.* A study on electrical characterization and band offset of ITO/n-Si (111) heterojunction by pulsed laser deposition. In: *J. Mater. Sci: Mater Electron* 2017, 28, p. 13053–13057. https://doi.org/10.1007/s10854-017-7137-6.

ACKNOWLEDGMENT. This research was funded by MER from the Republic of Moldova, Institutional subprogram #02.02.01 "Nanostructures and advanced materials for applications in spintronics, thermoelectricity and optoelectronics". V. M. thanks to the National Scholarship Programme of the World Federation of Scientists (2024-2025).

CZU: 623.746-519:070 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.22**

ADOPTAREA DRONELOR LA REALIZAREA PRODUSELOR MEDIATICE. ASPECTE ETICE, JURIDICE ȘI TEHNOLOGICE

THE USE OF DRONES IN MEDIA PRODUCTION. ETHICAL, LEGAL, AND TECHNOLOGICAL ASPECTS

Vitalie GUȚU[1] email: vitalie.gutu@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-8398-7909

[1]Universitatea de Stat din Moldova

Abstract: *Digital transformations have led to a profound reconfiguration of the media system, marking the transition from the traditional broadcasting model to a hybrid, participatory, and multidirectional ecosystem. In this context, drone journalism is an emerging technological paradigm that systematically integrates unmanned aerial vehicles (UAVs) into the entire journalistic workflow: collection, capture, analysis, and dissemination. Due to their ability to generate high-resolution aerial images from previously inaccessible angles, drones offer a spatial and contextual representation superior to traditional terrestrial shots, while also being more economical and quickly deployable in breaking news situations. This study analyzes this technological integration, highlighting both the creative and operational advantages (Gynnild, 2014; Nyre et al., 2019) and the major legal and ethical challenges. The use of drones in journalism leaves room for interpretation between the principle of freedom of expression and the imperatives of security, confidentiality, and personal data protection, requiring a responsible balance between innovation and potential risks.*
Keywords: *drone journalism, UAV integration, aerial imagery, media innovation legal challenges, ethical issues*.

INTRODUCERE

Transformările digitale reprezintă un fenomen structural cu implicații complexe în varii domenii de activitate. În aceste condiții, sistemul mass-media este integrat organic în aceste procese de metamorfoză tehnologică și impune o reconfigurare continuă a practicilor și instrumentelor mediatice care stau la baza construcției reprezentărilor contemporane ale realității zilei. Contextual, cadrul mediatic traversează o nouă etapă evolutivă caracterizată prin trecerea de la modelul tradițional broadcasting către un ecosistem hibrid, multidirecțional și unul participativ. Această tranziție structurală conferă jurnaliștilor un grad sporit de flexibilitate operațională, atât în ceea ce privește formatele și genurile jurnalistice utilizate, cât și în modalitățile de producție, distribuție și adaptare a conținutului la practicile de consum ale diverselor segmente de public. Prezentul demers științific își propune să analizeze procesul evolutiv al jurnalismului contemporan: integrarea sistematică a vehiculelor aeriene fără pilot (UAV-uri, cunoscute generic drept „drone”) în practicile de producție a conținutului mediatic. Utilizarea dronelor constituie o inovație tehnologică care reformatează procesele de captare și reprezentare vizuală a realității. Prin capacitatea lor de a genera imagini aeriene de înaltă rezoluție, cu unghiuri și altitudini anterior inaccesibile, dronele oferă jurnaliștilor și producătorilor de conținut posibilitatea de a documenta evenimente la scară largă, dezvăluind dimensiuni spațiale, contextuale și relaționale care rămân invizibile în cadrele terestre tradiționale. Comparativ cu alte metode și instrumente de filmare, dronele sunt o opțiune mult mai economică pentru realizarea imaginilor aeriene. În aceeași ordine de idei, trebuie să remarcăm faptul că, dronele pot fi mobilizate rapid, permițând jurnaliștilor/creatorilor de conținut să transmită primele imagini de la fața locului.

CONTEXT

Jurnalismul asistat de drone sau, în formularea în literatura de specialitate, *drone journalism* reprezintă integrarea sistematică a vehiculelor aeriene fără pilot (*Unmanned Aerial Vehicles – UAV*) în fluxul complet al activității jurnalistice – de la colectarea datelor și captarea imaginilor până la analiza contextuală și diseminarea publică a informației. Această paradigmă tehnologică emergentă permite accesul la zone spațiale anterior greu de pătruns sau imposibil de documentat prin metode convenționale, generând astfel un cadru vizual și senzorial de impact. Cercetătorul Astrid Gynnild consideră că dronele în spațiul jurnalistic sunt echipate cu camere de înaltă rezoluție și senzori care au rolul de a realiza fotografii aeriene și videoclipuri ale unor zone, persoane și acțiuni din unghiuri necunoscute până acum, fiind pilotate de la distanță de către persoane aflate la sol [1, p. 337]. În aceste condiții, trebuie să remarcăm faptul că în producerea materialelor jurnalistice, creatorii de conținut apelează tot mai des la utilizarea dronelor ca instrument de valorificare a spațiului și timpului. Grupul de autori Lars Nyre, Frode Guribye și Astrid Gynnild în lucrarea *Taking risks with drones. Responsible innovation pedagogy for media education* accentuează importanța momentului istoriei mass-media „a devenit evident că jurnalismul și noile tehnologii sunt strâns legate și că profesia de jurnalist beneficiază în mod creativ de instrumentele disruptive care sunt introduse” [2, p. 71]. Un lucru important care ar trebui luat în considerație, atunci când vorbim despre practicarea jurnalismului asistat de drone, se referă la aspectele legale și etice. Or, principiile de bază ale exercitării profesiei de reporter este libertatea de exprimare și accesul la informații publice, așa cum sunt acestea consacrate în documente internaționale precum Declarația Universală a Drepturilor Omului, prin articolul 19, dar și în codurile deontologice și etice ale organizațiilor profesionale, cum ar fi cele ale International Federation of Journalists (IFJ) sau Society of Professional Journalists (SPJ). Totuși, integrarea tehnologiilor aeriene autonome, precum dronele, în procesul jurnalistic introduce o serie de provocări interd iplinare, care necesită o examinare echilibrată între beneficiile inovatoare și riscurile potențiale.Din optică legală, utilizarea dronelor în procesul mediatic implică respectarea unui cadru normativ complex, care variază în funcție de jurisdicție. Spre exemplu, în Uniunea Europeană există o serie de regulamente care asigură cadru juridic pentru funcționarea acestor drone. Putem identifica aici, spre exemplu, Regulamentul UE din 2019/945[1] și Regulamentul UE din 2019/947[2]. Aeronavele fără pilot la bord, indiferent de masa lor, pot opera în același spațiu aerian al cerului unic european ca aeronavele cu pilot la bord, fie ele avioane sau elicoptere.

Astfel, actele normative eruopene indică faptul că regulile și procedurile aplicabile operațiunilor UAS ar trebui să fie proporționale cu natura și riscul operațiunii sau activității respective și ar trebui să fie adaptate la caracteristicile operaționale ale aeronavei fără pilot la bord în cauză și la caracteristicile zonei de operare, de exemplu densitatea populației, caracteristicile terenului și prezența edificiilor [3]. De asemenea, normele internaționale prevăd că, operațiunile cu sisteme de aeronave fără pilot la bord (UAS) impun cerințe stricte privind certificarea operatorilor, limitările de altitudine și zonele interzise de

[1] Regulamentul delegat (UE) 2019/945 AL COMISIEI din 12 martie 2019 privind sistemele de aeronave fără pilot la bord și operatorii de sisteme de aeronave fără pilot la bord din țări terțe. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/PDF/?uri=-CELEX:32019R0945&from=EN.

[2] Regulamentul de punere în aplicare (UE) 2019/947 al Comisiei din 24 mai 2019 privind normele și procedurile de operare a aeronavelor fără pilot la bord. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX:32019R0947

zbor, cu scopul de a preveni interferențele cu spațiul aerian comercial sau militar. În Republica Moldova, în baza hotărârii nr. HG949/2022 din 28.12.2022 cu privire la aprobarea normelor de operare a aeronavelor fără pilot la bord funcționează un regulament privind normele și procedurile de operare a aeronavelor fără pilot la bord care transpune regulamentul de punere în aplicare (UE) 2019/947 al Comisiei din 24 mai 2019 privind normele și procedurile de operare a aeronavelor fără pilot la bord. În baza acestui act, sunt stabilite cerințele detaliate pentru operarea sistemelor de aeronave fără pilot la bord, precum și pentru personalul, inclusiv pentru piloții la distanță, și pentru organizațiile implicate în respectivele operațiuni [4]. Utilizatorii dronelor sau aparatelor UAV urmează să le întrebuințeze în cunoștință de cauză și să respecte în totalitate normele legale de manevrare acestor tipuri de vehicule de zbor. „În ultimii ani, aeronavele fără pilot (*dronele*) au migrat din sfera militară în industrială și circuitul civil, ca urmare a apariției noilor tipuri de senzori accesibili și a soluțiilor software de tip Open Source (cu cod deschis)" [5]. În acest context, este pertinent să observăm că popularitatea și eficiența vehiculelor aeriene fără pilot (UAV), cunoscute sub denumirea de drone, au înregistrat o creștere semnificativă, facilitând astfel integrarea lor ca instrumente precise și eficiente în diverse domenii de activitate. Specialiștii din aceste sectoare le utilizează pentru activități de cercetare, documentare, analiză, evaluare și generare de rezultate concrete, adaptate specificului fiecărei arii. De asemenea, merită subliniat faptul că, în prezent, dronele își găsesc aplicații extinse dincolo de domeniile militar și agricol, incluzând medicina, transportul de mărfuri, arheologia, monitorizarea și inspecția infrastructurilor, jurnalismul, divertismentul și alte sectoare conexe.

Una dintre primele instituţii media care au folosit dronele în cadrul reportajelor a fost ziarul digital The Daily, care a obţinut cu ajutorul acestora imagini video de impact în care se putea observa efectul devastator al unei tornade ce a lovit Alabama. Dronele au fost adoptate şi de către paparazzi, care au descoperit că pot obţine cu ajutorul lor imagini la care altfel nu ar avea acces. Pe Coasta de Azur, unde îşi petrec vara numeroase celebrităţi, dronele sunt deja un instrument esenţial în arsenalul fotografilor [6]. Din analiza arealului mediatic autohton, observăm că redacțiile din Republica Moldova, la fel, au adoptat în activitatea lor dronele. Astfel, impactul vizual al conținutului jurnalistic livrat fie telesepctatorilor sau utilizatorilor de pe online este unul considerabil. Problema intervine în aspectele etico-legale: dacă fiecare redacție din Moldova care are în arsenalul de echipamente drone deține toate permisiunile necesare pentru a putea opera cu aceste instrument în vederea captării imaginilor din aer.

Lucrarea de față vine să puncteze un aspect esențial al cadrului normativ care reglementează operarea vehiculelor aeriene fără pilot (UAV) în Republica Moldova și îl constituie principiul autorizării prealabile, aplicabil în mod uniform, independent de scopul utilizării (științific, comercial, recreativ etc.), de dimensiunea aparatului sau de modelul acestuia. Astfel, potrivit legislației aeronautice naționale în vigoare, orice zbor al unei aeronave fără pilot pe teritoriul Republicii Moldova este condiționat de obținerea unui permis emis de Autoritatea Aeronautică Civilă a Republicii Moldova (AAC). Acest permis reprezintă autorizația principală de operare și este obligatoriu pentru toate categoriile de UAV, inclusiv pentru cele utilizate în scopuri de cercetare academică sau aplicativă.

De asemenea, o cerință suplimentară, cu un grad ridicat de restrictivitate, intervine în cazul dronelor echipate cu sisteme tehnice de captare, stocare sau transmisie a imaginilor video și/sau fotografice (indiferent dacă acestea sunt utilizate efectiv în misiune sau doar prezente la bordul aparatului).

Pentru astfel de aeronave, pe lângă permisul standard emis de AAC, operatorul este obligat să obțină și să prezinte următoarele avize suplimentare:

1. Avizul Ministerului Apărării al Republicii Moldova – docuement necesar pentru evaluarea riscurilor asupra securității naționale și a spațiului aerian controlat;

2. Avizul Serviciului de Informații și Securitate al Republicii Moldova – menit să certifice absența unor riscuri de intelligence sau de utilizare abuzivă a datelor captate;

3. Avizul Ministerului Afacerilor Externe și Integrării Europene – solicitat exclusiv în cazul aeronavelor fără pilot care sunt înregistrate în registrul unei alte țări, pentru a asigura conformitatea cu acordurile internaționale și cu regimul circulației transfrontaliere a echipamentelor sensibile.

Acest ansamblu de criterii și cerințe reflectă o abordare prudentă a autorităților statului responsabile față de potențialele implicații de securitate națională și de protecție a datelor personale asociate utilizării dronelor cu capacități de imagistică. În Republica Moldova, orice activitate jurnalistică care implică utilizarea unei drone echipate cu cameră (indiferent dacă este un DJI Mini 4 Pro, Mavic 3, Autel, FPV sau orice alt model capabil să înregistreze imagini video/foto) este supusă cerințelor legale din întreg spațiul european. Practic, nu există excepție sau regim simplificat pentru presă – regulile sunt identice cu cele aplicate cercetării științifice sau operatorilor comerciali. Astfel, echipa redacțională care intenționează să realizeze filmări cu ajutorul dronelor, urmează să depună o cerere oficială la AAC cu descrierea exactă a misiunii jurnalistice, zonele de zbor, altitudinea, durata.

Deoarece aproape toate dronele utilizate în prodcuția multimedia au cameră integrată, jurnaliștii sau operatorii de dronă trebuie să obțină suplimentar avize și de la alte entități de stat, cum ar fi:

- avizul Ministerului Apărării, care se poate obține prin completearea unei cereri scrise, atașând fișa tehnică a dronei și indicând harta zonelor de zbor. Termen de răspuns ar fi de la 15 la 30 de zile.
- avizul din partea Serviciului de Informații și Securitate (SIS) – act ce poate fi solicitat printr-o cerere însoțită de declarație pe proprie răspundere privind scopul exclusiv jurnalistic și angajamentul de a nu transmite imagini către terțe părți străine. De regulă, termenul de obținerea a unui aviz din partea SIS este de la 20 de zile până la două luni.
- Aviz din partea Ministerului Afacerilor Externe – acest document se obține în cazul în care drona este înregistrată în altă țară.

În urma obținerii tuturor avizelor respective, redacțiile/echipe de filmare sunt obligate să le depună la AAC împreună cu permisul inițial. Ulterior, entitatea aeronautică civilă emite permisul final de zbor (valabil de obicei 6–12 luni, dar cu misiuni strict nominalizate). Potrivit inspectorului pentru aeronave fără pilot din cadrul Autorității Aeronautice Civile, Anton Danici, „în cazul depistării unui cetățean care pilotează o dronă fără autorizație, este prevăzută o amendă de până la 20 de unități convenționale, conform Codului Contravențional. Dacă vorbim despre obiective mai sensibile, în funcție de gravitatea încălcării, consecințele pot ajunge chiar și la Codul Penal” [7].

CONCLUZII

În concluzie, analiza prevederilor legale privind utilizarea dronelor în domeniul jurnalistic relevă o interdependență complexă între normele locale din Republica Moldova și influența cadrului european, configurând un sistem reglementat fiind menit să asigure siguranța operațiunilor și respectarea drepturilor fundamentale ale omului. Astfel utilizarea dronelor în scopuri jurnalistice se configurează fiind ca o practică inovatoare, dar strictă de aderare a unui sistem normativ integrat, care ne modelează semnificativ atât accesul la tehnologie cât și impactul său asupra producției media. Redacțiile care doresc să folosească în mod regulat imagini aeriene sunt obligate să își creeze parteneriate pe termen lung cu operatori deja

autorizați sau să includă în bugetul proiectelor costurile și timpul necesar pentru obținerea tuturor avizelor de securitate națională. Orice tentativă de a zbura fără autorizațiile complete expune jurnalistul și instituția media la riscuri majore: confiscarea echipamentului, amenzi și chiar dosare penale pentru încălcarea regimului spațiului aerian.

REFERINȚE:

1. GYNNILD, Astrid. The robot eye witness: Extending visual journalism through drone surveillance. *Digital journalism*, 2014, 2.3: 334-343. ISSN: 2167-0811. doi.org/10.1080/21670811.-2014.883184.
2. NYRE, Lars; GURIBYE, Frode; GYNNILD, Astrid. Taking risks with drones: Responsible innovation pedagogy for media education. In: *Responsible Drone Journalism*. Routledge, 2018. p. 71-84.
3. Regulamentul de punere în aplicare (UE) 2019/947 al Comisiei din 24 mai 2019 privind normele și procedurile de operare a aeronavelor fără pilot la bord. Disponibil: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX:32019R0947. Accesat [27.11.2025].
4. Hotărârea nr. HG949/2022 din 28.12.2022 cu privire la aprobarea normelor de operare a aeronavelor fără pilot la bord. Publicat: 03-03-2023 în Monitorul Oficial Nr. 71-74 art. 145. Disponibil: https://-www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=140050&lang=ro. Accesat [28.11.2025].
5. Informații utile pentru utilizatorii de drone, în scop personal de filmare și fotografiere în zona de frontieră. Disponibil: https://www.border.gov.md/informatii-utile-pentru-utilizatorii-de-drone-scop-personal-de-filmare-si-fotografiere-zona-de. Accesat [28.11.2025].
6. Drona – „ochiul din cer" care vede tot. Disponibil: https://www.descopera.ro/stiinta/9249085-drona-ochiul-din-cer-care-vede-tot. Accesat [28.11.2025].
7. Pilotarea dronelor fără autorizație poate atrage amenzi și chiar sancțiuni penale. Disponibil: https://-radiomoldova.md/p/61781/inspector-aac-la-radio-moldova-pilotarea-dronelor-fara-autorizatie-poate-atrage-amenzi-si-chiar-sanctiuni-penale. Accesat [28.11.2025].

CZU: 378.147:623.746-519 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.23**

MODERNIZAREA PREDĂRII CURSULUI „ARHITECTURA ŞI AVIONICA DRONELOR": PROPUNERI PENTRU CREŞTEREA RELEVANȚEI ŞI INTERACTIVITĂȚII ÎN PREDARE

MODERNIZING THE TEACHING OF THE COURSE "DRONE ARCHITECTURE AND AVIONICS": PROPOSALS FOR INCREASING RELEVANCE AND INTERACTIVITY IN TEACHING

Alisa MOŞNEAGA[1] e-mail: alisa.mosneaga@usm.md ORCID ID: 0009-0009-2459-3596
Sergiu PASCARI[2] e-mail: sergheipascari@gmail.com ORCID ID: 0009-0003-2951-2405
Anton DANICI[3] e-mail: adanici@gmail.com ORCID ID: 0000-0003-2791-7612
Mariana SAVVA[4] e-mail: marianna.savva@usm.md ORCID ID: 0000-0003-0618-5360

[1,2,3,4]Universitatea de Stat din Moldova

Abstract. *This paper evaluates the course "Drone Architecture and Avionics" at the Moldova State University, examining its current structure and comparing it with similar programs offered by leading European universities. While the course provides a solid foundation in drone architecture, avionics, navigation systems, and aeronautical regulations, the analysis reveals several gaps regarding emerging technologies and practical training. Unlike European reference programs, the current curriculum lacks modules on artificial intelligence, machine learning, computer vision, and advanced sensing technologies such as LiDAR and multispectral imaging. Additionally, the limited number of practical hours reduces opportunities for hands-on experience and industry engagement.*
Keywords: *course "Drone Architecture and Avionics", programs, European universities.*

Introducere

În contextul dezvoltării accelerate a tehnologiilor autonome și al creșterii cererii de specialiști în domeniul dronelor, adaptarea programelor universitare la cerințele actuale ale pieței devine o necesitate. Cursul „Arhitectura și Avionica Dronelor", parte a programului inginerесc de la Universitatea de Stat din Moldova, are un rol important în formarea competențelor tehnice și aplicative ale studenților. Pentru a evalua în ce măsură acest curs răspunde standardelor internaționale și pentru a identifica direcții de îmbunătățire, a fost realizată o analiză detaliată a structurii și conținutului actual, urmată de o comparație cu programe similare oferite de universități de prestigiu din Europa. Această abordare permite evidențierea punctelor forte ale cursului, dar și a aspectelor care pot fi modernizate, în vederea alinierii la tendințele educaționale și tehnologice actuale.

Analiza cursului actual

Cursul „Arhitectura și Avionica Dronelor" (3 credite ECTS, 90 ore) reprezintă una dintre componentele esențiale ale programului de formare inginerească la Universitatea de Stat din Moldova [1]. În structura actuală, cursul include 15 ore de prelegeri, 10 ore de seminare și laboratoare, precum și 65 de ore de activitate individuală. Conținutul său abordează principalele teme legate de construcția, arhitectura și funcționarea dronelor, incluzând aspecte de siguranță, reglementare și etică.

Între punctele forte se remarcă echilibrul general între teorie și aplicație, integrarea noțiunilor de legislație aeronautică, precum și accentul pus pe aplicațiile multiple ale dronelor în domenii precum cartografierea sau monitorizarea mediului.

Cu toate acestea, analiza comparativă cu programe similare din universități europene a relevat faptul că, deși baza este solidă, conținutul poate fi îmbunătățit pentru a reflecta mai fidel tendințele actuale în domeniul sistemelor autonome și al tehnologiilor emergente.

Analiza cursurilor europene de referință

Pentru a contura direcții concrete de modernizare a cursului „Arhitectura și Avionica Dronelor", a fost realizată o analiză comparativă între conținutul și metodologia de predare utilizate la Universitatea de Stat din Moldova (USM) și cele din cadrul unor programe universitare similare din Europa. Printre instituțiile de referință analizate se numără Universitatea Swansea (Regatul Unit) [9][6], Universitatea Vizja (Polonia) [3], Universitatea din Stuttgart (Germania) [4], Universitatea Norvegiană de Știință și Tehnologie – (NTNU, Norvegia) [5], Universitatea Ansbach – Academia Bavareză de Drone (Germania) [7], Institutul Regal de Tehnologie KTH (Suedia) [8] și altele.

La **Universitatea Swansea**, programele *Environmental Drone Remote Sensing* și *Drone Accreditation and Remote Sensing* constituie exemple relevante de integrare a dronelor în cercetarea aplicată. Acestea pun un accent puternic pe teledetecție, prelucrarea datelor geospațiale și utilizarea sistemelor GIS [9],[6]. Studenții beneficiază de instruire practică intensivă cu drone reale și pot obține certificări profesionale (de exemplu, GVC), facilitând astfel tranziția rapidă către piața muncii.

În cadrul **Universității Vizja**, specializarea *Drone Engineering* adoptă o abordare interdisciplinară, care îmbină automatizarea, mecatronica și procesarea imaginilor [3]. Programul se remarcă prin proiecte de echipă, stagii în industrie și acces la laboratoare dotate cu echipamente de ultimă generație. Acest model susține formarea unor competențe aplicative și inovative, elemente care necesită consolidare în cadrul cursului actual de la USM.

La **Universitatea din Stuttgart** [4], procesul didactic este strâns corelat cu activitatea de cercetare. Proiecte precum *eMission* și *AMI-PGS* implică studenții în colaborări directe cu mediul industrial, abordând teme precum sustenabilitatea și mobilitatea urbană inteligentă. Acest model ar putea fi replicat gradual la USM prin inițierea unor proiecte experimentale locale, de exemplu în domeniul agriculturii de precizie sau al monitorizării mediului.

La **NTNU** (Universitatea Norvegiană de Știință și Tehnologie) din Norvegia, studenții au acces la un laborator specializat – *UAV-Lab* – unde dezvoltă sisteme autonome și algoritmi avansați de control pentru drone [5]. O abordare comparabilă este implementată și la **Academia de Drone din Bavaria** (Universitatea Ansbach), care promovează formarea practică și colaborarea interdisciplinară [7].

În mod similar, la **Institutul Regal de Tehnologie KTH** din Suedia [8], dronele sunt integrate în programe axate pe ingineria mediului și infrastructuri sustenabile. Se pune accent pe analiza datelor obținute prin teledetecție, utilizarea GIS-ului și evaluarea impactului ecologic.

Toate aceste programe europene prezintă trăsături comune care pot ghida modernizarea cursului de la USM:

- accentul puternic pe activități practice (30–40% din volumul total de ore);
- integrarea tehnologiilor emergente, precum inteligența artificială, rețelele 5G, senzori multispectrali și algoritmi de procesare avansată;

- colaborarea activă cu industria, prin stagii, proiecte comune și certificări;
- mecanisme moderne de evaluare a competențelor, axate pe aplicabilitate și inovație.

Aceste bune practici pot servi drept punct de plecare pentru adaptarea și modernizarea conținutului cursului, astfel încât să răspundă mai bine cerințelor actuale ale pieței și să stimuleze implicarea activă a studenților în procesul de învățare.

Lacune identificate

În urma analizei comparative cu programele universitare europene de referință, cursul „Arhitectura și Avionica Dronelor" de la Universitatea de Stat din Moldova (USM) prezintă o serie de limitări atât la nivel structural, cât și metodologic.

Din perspectiva conținutului, se constată absența unei abordări actualizate a tehnologiilor emergente. Lipsesc subiecte esențiale precum:

- inteligența artificială aplicată dronelor;
- algoritmii de învățare automată (machine learning) pentru navigație autonomă;
- tehnici de computer vision;
- utilizarea senzorilor avansați (LiDAR, multispectrali) [9], [3], [5].

Totodată, cursul nu include module dedicate aplicațiilor specializate, care sunt frecvent abordate în instituțiile europene de profil, cum ar fi:

- agricultura de precizie,
- monitorizarea schimbărilor climatice,
- aplicații urbane și logistice [9], [4], [8].

La nivel metodologic, una dintre cele mai semnificative carențe este componenta practică insuficient dezvoltată. În forma actuală, cursul prevede aproximativ 10 ore de activități practice, în contrast cu cele 25 – 35 de ore regăsite în programele similare din Europa [9], [3].

Printre alte deficiențe notabile se numără:

- absența proiectelor hands-on cu drone reale;
- inexistența lectorilor invitați din industrie;
- evaluarea bazată exclusiv pe probe teoretice, cu accent pe testarea cunoștințelor, nu pe dezvoltarea și validarea competențelor practice.

Aceste lacune reduc ușor relevanța cursului în raport cu cerințele actuale ale pieței muncii și limitează oportunitățile studenților de a dobândi experiență aplicativă și de a se integra în ecosistemele de inovare din domeniul tehnologiilor UAV.

Recomandări pentru îmbunătățirea cursului

Pornind de la aceste observații, se recomandă restructurarea parțială a conținutului, păstrând volumul total de 3 credite ECTS, dar redistribuind orele astfel încât partea practică să crească la cel puțin 25% din total. În noua structură, temele tradiționale (arhitectura hardware, sistemele de navigație și reglementările) ar trebui completate cu module dedicate inteligenței artificiale pentru drone, procesării datelor avansate, teledetecției și GIS-ului aplicat [3], [5], [7].

O secțiune nouă ar putea fi dedicată comunicațiilor moderne (rețele 5G, comunicații satelitare, Internet of Drones) și securității cibernetice, domeniu tot mai important în contextul sistemelor autonome [10]. Aplicațiile practice ar putea include proiecte de monitorizare agricolă, analize de vegetație prin indicii NDVI, studii de poluare atmosferică sau inspecția infrastructurii.

Din punct de vedere metodologic, se recomandă implementarea învățării bazate pe proiecte, folosirea simulatoarelor open-source (Gazebo, AirSim), software-urilor de analiză (QGIS, Python), și a platformelor interactive pentru învățarea AI (Google Colab, Jupyter) [5][7]. De asemenea, ar fi benefică implicarea specialiștilor din companii locale și internaționale prin prelegeri, demonstrații sau mentorat [3], [4], [7]. Metodele de evaluare ar trebui modernizate pentru a include evaluarea continuă a activității practice (mini-proiecte, peer-review, prezentări de proiecte) și un proiect semestrial integrator, completat de o demonstrație practică. Această abordare ar asigura o evaluare mai realistă a competențelor tehnice, a creativității și a capacității de colaborare. Pentru a susține aceste direcții de modernizare, este utilă o privire comparativă asupra programelor europene de referință, alături de propuneri concrete de îmbunătățire adaptate cursului „Arhitectura și Avionica Dronelor" expuse în tabelul de mai jos:

Tabel Programe europene și propuneri de îmbunătățire pentru cursul „Arhitectura și Avionica Dronelor"

Țara / Universitatea	**Elemente curriculare cheie**	**Inovații și bune practici**	**Propuneri pentru cursul USM**
Austria – Universitatea de Științe Aplicate Kufstein Tirol	Ingineria Dronelor (Licență, 6 semestre, interdisciplinar: aeronautică + IT + analiză de date; *U-Space/UTM;* proiecte și laboratoare).	Internship integrat (~500h); module avansate (Programare de roiuri, Simulare a sistemelor aeriene fără pilot (UAS) - orientare spre sustenabilitate și mobilitate inteligentă.	Introducerea unei unități despre U-Space/UTM; proiecte de simulare UAS; conectarea cu un stagiu aplicativ scurt.
Belgia – Universitatea de Științe Aplicate VIVES	Specializare UAS în cadrul Ingineriei Aeronautice; *DroneLab* cu infrastructură dedicată; instruire practică intensă.	Certificare pilot A2 (EU); proiecte cu parteneri industriali; aplicații concrete (agricultură de precizie, inspecții, SAR).	Crearea unui mini-DroneLab educațional; integrarea certificării (modul EASA & practici); proiecte cu parteneri locali.
Estonia – Universitatea din Tartu și Universitatea Estoniană de Științe ale Vieții	Master în guvernanță de mediu și adaptare la schimbări climatice; interdisciplinar cu remote sensing.	Integrarea dronelor în politici de mediu; aplicații GIS pentru monitorizare ecologică; legături cu *European Green Deal*.	Introducerea unui submodul de aplicații de mediu (monitorizare ecosisteme, indicii vegetație) corelat cu GIS.
Franța – Institutul Politehnic de Științe Avansate – IPSA	Master în Inginerie Aeronautică (120 ECTS); opțiuni Avionica/Sisteme de proiectare; stagii obligatorii.	AI, siguranță de zbor, mecatronică, embedded; formare bilingvă; proiecte industriale.	Introducerea unui submodul de AI aplicată (computer vision pentru UAV) și elemente de siguranță cibernetică.
Germania – Universitatea din Stuttgart (IFB) & Universitatea Ansbach (BDAN)	Programe axate pe cercetare aplicată UAS; centre dedicate (BDAN) și proiecte cu industrie.	*eVTOL*, propulsie electrică, testare experimentală; certificări și formare recunoscută; colaborări extinse.	Mini-proiecte de cercetare aplicată (ex.: profil aerodinamic, eficiență energetică); sesiuni cu lectori din industrie.

Italia – Universitatea din Roma „Tor Vergata”	Master PARS – Sisteme de aeronave pilotate de la distanță; colaborare cu ENAC; formare teorie + laborator + practică.	Accent pe reglementări și certificare; proiectare, operare și siguranță aeronautică conform EASA.	Modul dedicat reglementărilor EASA și siguranței operaționale + exerciții de conformitate (studiu caz).
Lituania – Universitatea Tehnică Vilnius Gediminas – VILNIUS TECH	Mecanică aeronautică (licență) și Inginerie aerospațială (master); UAV și embedded integrate în formarea inginerească.	Prototipare, proiecte de cercetare aplicată, control autonom; laboratoare aeronautice.	Consolidarea părții de embedded & senzori; laborator demonstrativ cu platforme *Arduino/Raspberry.*
Norvegia – Universitatea Norvegiană de Știință și Tehnologie – NTNU (UAV-Lab)	Laborator UAV pentru sisteme autonome, guidance & control; infrastructuri de testare.	Învățare bazată pe cercetare; testare în poligoane dedicate; proiecte pe control tolerant la defecte.	Simulări de control autonom (Gazebo/AirSim) + proiect integrator cu accent pe robusteză și siguranță.
Polonia – Universitatea Vizja (Ingineria Dronelor)	Specializare multidisciplinară: informatică, mecatronică, procesarea semnalelor & imaginilor, robotică.	Proiecte de echipă; laboratoare moderne; stagii integrate.	Submodul AI/ML pentru navigație și computer vision; proiect de echipă cu rezultate măsurabile.
Portugalia – Universitatea din Porto (Master în teledetecție)	Teledetecție și analiză geospațială; drone + senzori aerieni; aplicații multi-domeniu.	Curriculum flexibil; integrare GIS; proiecte aplicate (agricultură, oceanografie, meteorologie).	Modul de teledetecție aplicată; set de laboratoare cu QGIS + imagini aeriene/NDVI.
Spania – Universitatea din Santiago de Compostela și Universitatea Politehnică din Valencia	Mastere UAS cu operare, reglementări, proiectare; cooperare interuniversitară.	Pregătire pentru licențiere profesională; proiecte interdisciplinare; disertații aplicate.	Integrarea unui modul de licențiere/operare + atelier de proiectare de misiuni multi-senzor.
Suedia – Universitatea din Stockholm și Institutul Regal de Tehnologie KTH	GIS, teledetecție, infrastructuri durabile; AI + analiză spațială pentru mediu.	Proiecte pe monitorizare ecologică și planificare urbană; colaborări cu centre de cercetare.	Submodul „Dronă pentru mediu”: workflow complet (colectare, georeferențiere, analiză, raportare).
Regatul Unit – Universitatea Swansea	Integrare strânsă drone–GIS–mediu; instruire practică; certificare GVC (CAA).	Lucru de teren extins; standarde profesionale de operare; portofolii de proiecte.	Introducerea unei componente de certificare practică; portofolii și rubrici de evaluare practică.

Impactul și beneficiile implementării

Prin modernizarea cursului conform acestor recomandări, USM ar aduce disciplina la un nivel comparabil cu universitățile europene, asigurând o formare actualizată și competitivă. Studenții ar dobândi competențe în domenii cu cerere crescută: operarea dronelor, procesarea imaginilor aeriene, inteligență artificială aplicată, analiza geospațială și înțelegerea reglementărilor europene (EASA) [10]. Pe termen scurt, beneficiile directe ar fi creșterea atractivității programului, consolidarea colaborărilor

internaționale și integrarea studenților în proiecte interdisciplinare. Pe termen lung, modernizarea cursului ar contribui la dezvoltarea unui nucleu de competențe tehnice și științifice capabil să sprijine inovația în agricultură, protecția mediului și infrastructura inteligentă din Republica Moldova [2], [8], [1]. Astfel, cursul „Arhitectura și Avionica Dronelor" ar putea deveni un exemplu regional de bună practică academică, formând specialiști care să contribuie la dezvoltarea tehnologică durabilă și la procesul de integrare europeană.

Referințe:

1. Universitatea de Stat din Moldova, Facultatea de Fizică și Inginerie. (2023). *Curriculum la disciplina „Arhitectura și Avionica Dronelor".* Chișinău: USM.
2. Nedeoglo N., Rotaru C., Danici A., Seinic V., Sprincean V., Vozian C., Cazan V., Corcimari I., Cebotaru E. *Educație pentru drone (Suport de curs)*, Chișinău, 2019.
3. Universitatea Vizja. (2025). *Drone Engineering Specialization - Computer Science Bachelor Program.* Disponibil la: https://vizja.pl/en/specjalizacja/inzynieria-dronow/ [accesat la 13 octombrie 2025].
4. University of Stuttgart, Institute of Aircraft Design (IFB). (2025). *eMission Project – Energy Reduction through Mission-Adaptive Distributed Propulsion and Recuperation Approaches.* Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK, Germania).
5. Norwegian University of Science and Technology (NTNU). *Unmanned Aerial Vehicles Laboratory (UAV-Lab), Department of Engineering Cybernetics.* Disponibil la: https://www.ntnu.edu/itk/uav-lab [accesat la 13 octombrie 2025].
6. Swansea University. (Marea Britanie). *Drone Accreditation and Remote Sensing (GEGM03).* Disponibil la: https://intranet.swan.ac.uk/catalogue/default.asp?type=moddetail&mod=GEGM03 [accesat la 13 octombrie 2025].
7. Hochschule Ansbach. *Bavarian Drone Academy (BDAN) – A centre of excellence for training and applied research in the civilian field of aerial robotics.* Disponibil la: https://www.hs-ansbach.de/en/-research/kompetenzzentren/bavarian-drone-academy [accesat la 13 octombrie 2025].
8. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Suedia. *Master's Programme in Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure.* Disponibil la: https://www.kth.se/en/studies/master/environmental-engineering-sustainable-infrastructure/ [accesat la 13 octombrie 2025].
9. Swansea University. (Marea Britanie). *MSc Environmental Drone Remote Sensing.* Disponibil la: https://www.swansea.ac.uk/postgraduate/taught/biosciences-geography-physics/geography/msc-environmental-drone-remote-sensing/ [accesat la 13 octombrie 2025].
10. European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2025). *Regulations for Unmanned Aircraft Systems.* Disponibil la: https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones [accesat la 19 octombrie 2025].

Acest articol este elaborat în cadrul proiectului pentru tineri cercetători pe anii 2025-2026, cifrul 25.80012.0807.25TC „Mediu sustenabil prin educația pentru drone''.

CZU: 528.8:502.1:623.746-519(478) **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.24**

GENERAREA ȘI EVALUAREA MODELULUI DIGITAL AL TERENULUI ȘI CORONAMENTULUI ARBORILOR ÎN GRĂDINA BOTANICĂ NAȚIONALĂ PRIN TEHNOLOGIA LiDAR MONTATĂ PE UAV

GENERATION AND EVALUATION OF THE DIGITAL MODEL OF THE TERRAIN AND TREE CANOPY IN THE NATIONAL BOTANICAL GARDEN USING UAV-MOUNTED LiDAR TECHNOLOGY

Sergiu PASCARI[1] e-mail: pascariserghei@gmail.com ORCID ID: 0009-0003-2951-2405
Natalia ONICA[2] e-mail: onica.natalia@gb.usm.md ORCID ID: 0009-0006-0509-2153
Ion ROSCA[3] e-mail: ion.rosca@sti.usm.md ORCID ID: 0000-0002-1304-8033
Veaceslav SPRINCEAN[4] e-mail: veaceslav.sprincean@usm.md ORCID ID: 0000-0001-6719-7387

[1,4]Universitatea de Stat din Moldova
[2,3]Gradina Botanica Națională (Institut) Alexandru Ciubotaru, Universitatea de Stat din Moldova

Abstract. *This article provides a detailed presentation of the entire process of generating, processing, and evaluating the Digital Terrain Model (DTM) and the Canopy Height Model (CHM) within the National Botanical Garden "Alexandru Ciubotaru," using a high-performance LiDAR system mounted on a UAV platform. The investigation includes the stages of aerial data acquisition, automatic filtering and classification of the point cloud, vegetation removal to extract the real topographic surface, and the derivation of tree-canopy height through differentiation between the generated digital models. The dense and highly accurate LiDAR data enable advanced analyses of vegetation vertical structure, spatial distribution of trees, and biometric characteristics associated with individual specimens or forest stands. The obtained results ensure a reliable digital reconstruction of both terrain and vegetation bodies, supporting ecological and dendrometric studies as well as the development of modern tools for the monitoring, conservation, and intelligent management of natural ecosystems.*
Keywords*: UAV, LiDAR, digital terrain model (DTM), canopy height model (CHM), NDVI, National Botanical Garden (Institute).*

INTRODUCERE

Tehnologiile de teledetecție montate pe platforme aeriene fără pilot (UAV) au cunoscut în ultimul deceniu o dezvoltare accelerată, oferind rezoluții spațiale și temporale imposibil de obținut prin mijloace tradiționale. Printre acestea, sistemele LiDAR (Light Detection and Ranging) montate pe UAV s-au impus ca instrumente de referință pentru cartografierea 3D de înaltă precizie a terenului și vegetației, permițând generarea unor modele digitale detaliate și analiza structurală pe verticală a coronamentului arborilor [1, 2]. Grădina Botanică Națională (Institut) „Alexandru Ciubotaru" reprezintă unul dintre cele mai importante spații verzi ale municipiului Chișinău, având o structură complexă, cu colecții dendrologice, lacuri, terenuri horticole experimentale și zone de tranziție către frontul construit urban. Dinamica dezvoltărilor imobiliare în vecinătate, precum și presiunile antropice și climatice asupra ecosistemelor urbane justifică necesitatea unei monitorizări detaliate a stării vegetației și a modificărilor de microrelief [3]. În acest context, utilizarea unei platforme UAV dotate cu senzor LiDAR oferă posibilitatea obținerii unor modele digitale actualizate ale terenului și coronamentului, utile atât cercetării științifice, cât și planificării spațiale, amenajării peisagistice și educației pentru mediu. Scopul principal al studiului este de a demonstra modul în care datele LiDAR pot fi integrate cu produse fotogrammetrice și multispectrale pentru a caracteriza structural și funcțional vegetația din Grădina Botanică Națională (Institut) [4].

MATERIALE ȘI METODĂ

Zona de studiu cuprinde integral suprafața Grădinii Botanice Naționale (Institut) „Alexandru Ciubotaru”, precum și frontul construit situat în proximitatea nordică și vestică a acesteia, reprezentând una dintre cele mai importante interfețe ecologice dintre spațiul verde urban și dezvoltările rezidențiale recente din municipiul Chișinău. Din punct de vedere geomorfologic, perimetrul este caracterizat de un relief slab fragmentat, cu variații altitudinale moderate, dar cu microforme și structuri morfologice relevante pentru dinamica peisajului: versanți domoli ce delimitează ușoare interfluvii, taluzuri și zone de tranziție, lunci aluvionare, precum și depresiuni locale asociate sistemului de lacuri artificiale.

Aceste particularități topografice influențează distribuția vegetației și microclimatele interne, generând un mozaic ecologic bine definit. Vegetația prezintă un coronament eterogen, rezultat al coexistenței mai multor tipuri de acoperire: plantații dendrologice organizate pe colecții tematice, perdele forestiere de protecție, arbori izolați cu dezvoltare liberă, precum și zone ocupate de arbuști, vegetație palustră și întinse suprafețe ierboase. Variabilitatea structurală a coronamentului, în combinație cu gradul ridicat de diversitate floristică, face ca acest sit să fie deosebit de potrivit pentru analize complexe de teledetecție, estimarea parametrilor dendrometrici și monitorizarea evoluției ecosistemelor urbane.

Măsurătorile aeriene a fost realizată utilizând o platformă UAV de tip multirotor, optimizată pentru transportul unui senzor LiDAR de înaltă precizie, echipat cu receptor GNSS în modul RTK/PPK și unitate inerțială (IMU) de clasă profesională. Acest tip de configurație este larg utilizat în cercetările moderne, întrucât permite obținerea unor date tridimensionale de acuratețe centimetrica, chiar în condiții de teren complex sau în medii cu vegetație densă [1]. Sistemul LiDAR aeropurtat funcționează prin emiterea unui număr foarte mare de impulsuri laser pe secundă și înregistrarea timpului de întoarcere a fiecărui fascicul reflectat, generând un nor de puncte 3D de densitate ridicată. Ulterior, punctele sunt îmbogățite cu informații spectrale obținute din imaginile de suprapunere, proces care facilitează integrarea atributelor radiometrice cu structura geometrică a scenei [4]. Parametrii operaționali ai zborului au fost stabiliți în conformitate cu bunele practici din literatura de specialitate, pentru a asigura o rezoluție spațială adecvată și o calitate superioară a modelării terenului și coronamentului.

În consecință, altitudinea de zbor a variat între 80 și 120 m față de nivelul solului, în timp ce suprapunerile longitudinale și transversale au fost menținute la valori ridicate pentru a garanta acoperire completă, minimizarea umbrelor de vegetație și creșterea redundanței datelor. Viteza UAV a fost ajustată astfel încât densitatea finală a norului de puncte să atingă câteva sute de puncte pe metru pătrat în zonele de interes, densitate considerată optimă pentru cartografierea detaliată a structurii vegetației și a microreliefului [5]. Datele brute generate de sistemul LiDAR au fost supuse unui proces riguros de corecție și georeferențiere. Poziționarea exactă a fiecărui impuls laser a fost realizată prin aplicarea soluțiilor diferențiale GNSS în modul post-procesat (PPK), care permit reducerea erorilor induse de semnal, atmosferă sau pierderile temporare ale legăturii RTK. Coordonatele finale au fost transformate în sistemul național de referință, asigurând compatibilitate cu datele cartografice existente și facilitând integrarea analizelor ulterioare. Norii de puncte rezultați din achiziția LiDAR au fost importați și procesați în platforma CloudCompare, un software larg utilizat în cercetarea geospațială pentru analiza avansată a datelor 3D [6]. În etapa inițială, s-au aplicat filtre de reducere a zgomotului pentru a elimina punctele izolate sau artefactele provenite din reflexii atipice ale fasciculului laser, procedură necesară pentru obținerea unui nor de puncte uniform și lipsit de interferențe care ar putea afecta etapele ulterioare ale procesării [7]. Procesarea a continuat cu segmentarea norului de puncte, realizată prin algoritmi de detecție a structurilor locale și de separare spațială a obiectelor. Această segmentare a permis identificarea clusterelor naturale din date: suprafața solului, vegetația joasă, medie și înaltă, precum și structuri antropice precum cărări, clădiri sau elemente de infrastructură. Clasificarea punctelor a fost efectuată

folosind atât criterii geometrice – altitudine relativă, densitatea vecinătății, rugozitate – cât și tehnici statistice validate în literatura de specialitate, care permit diferențierea robustă a categoriilor tematice [8].

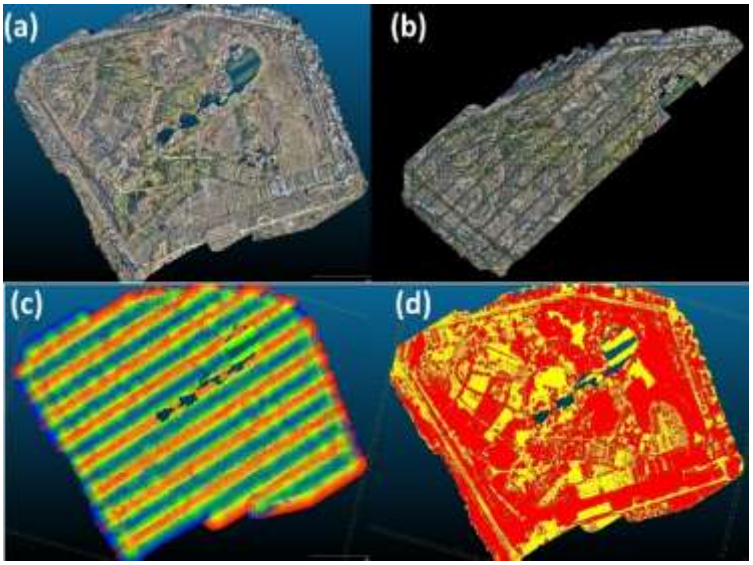
Identificarea punctelor de sol a reprezentat una dintre cele mai importante etape. Pentru aceasta, au fost utilizați algoritmi dedicați, precum Progressive TIN Densification sau filtrele de tip Cloth Simulation Filter (CSF), care modelează suprafața terenului prin adaptarea unui „covor" virtual peste norul de puncte și sunt recunoscuți pentru performanțele lor în zone cu vegetație densă sau relief variat [9]. Punctele de sol astfel extrase au constituit baza pentru interpolarea Modelului Digital al Terenului (DTM), utilizând atât suprafețe triangulate (TIN), cât și rasterizare la rezoluție uniformă, metodologii standardizate în cartografierea reliefului pe bază de LiDAR [10].

Punctele corespunzătoare vegetației au fost utilizate pentru derivarea Modelului Coronamentului Arborilor (CHM). CHM a fost generat prin calcularea diferenței dintre Modelul Digital al Suprafeței (DSM), care reprezintă altitudinile maxime ale obiectelor interceptate de laser (arbori, clădiri, structuri), și DTM-ul obținut anterior. Această abordare este considerată în literatura de teledetecție drept metoda standard pentru caracterizarea verticală a vegetației, pentru estimarea înălțimii arborilor, delimitarea coronamentelor și evaluarea structurii forestiere [5]. Rezultatul final constă în obținerea unui model tridimensional detaliat al terenului și al coronamentului vegetal, adecvat pentru analize ecologice, identificarea coroanelor individuale, estimarea biomasei și monitorizarea evoluției ecosistemelor urbane și naturale. Pentru obținerea unei reprezentări vizuale realiste și a unui suport cartografic de înaltă fidelitate, a fost generat un model 3D fotogrammetric utilizând imagini RGB de înaltă rezoluție, achiziționate în paralel cu datele LiDAR. Prelucrarea imaginilor a fost efectuată în software-ul Pix4Dmapper, care folosește algoritmi avansați de reconstrucție bazată pe Structure-from-Motion (SfM) și densificare multi-view pentru a produce modele tridimensionale detaliate și ortofotoplanuri georeferențiate [11]. Ortofotoplanul obținut a servit atât ca bază cartografică pentru analizele spațiale, cât și ca sursă de texturi realiste pentru modelul 3D derivat din datele LiDAR și fotogrammetrie, contribuind la o percepție vizuală coerentă a morfologiei terenului și a structurii vegetației.

Pe lângă imaginile RGB, au fost colectate și date multispectrale, incluzând canalul NIR (Near-Infrared), esențial pentru evaluarea sănătății vegetației. Utilizarea imaginilor multispectrale permite calcularea indicelui NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), un indicator consacrat pentru cuantificarea vigorii vegetației, a nivelului de stres și a activității fotosintetice [12]. Hărțile NDVI obținute au fost analizate în corelație cu parametrii de structură vegetală derivați din Modelul Coronamentului Arborilor (CHM). Această integrare a informației spectrale cu informația structurală 3D a făcut posibilă identificarea relațiilor spațiale dintre înălțimea coronamentului și starea fiziologică a vegetației, metodologie confirmată ca eficientă în studii recente privind monitorizarea ecosistemelor forestiere și urbane [5]. Prin combinarea produselor fotogrammetrice (ortofotoplan, model 3D texturat) cu datele LiDAR (DTM, DSM, CHM) și indicii spectrali (NDVI), a fost realizată o analiză integrată capabilă să descrie simultan geometria, fenologia și starea de sănătate a vegetației din zona de studiu. Această abordare multi-senzor reprezintă una dintre cele mai robuste metode actuale de caracterizare complexă a vegetației, în special în zone cu coronament eterogen și relief variat.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Datele LiDAR și fotogrammetrice au fost colectate cu ajutorul platformei UAV DJI Matrice 350 RTK echipată cu senzorul Zenmuse L2 care au permis generarea unui set complex de modele spațiale tridimensionale. Aceste modele au fost analizate în CloudCompare și Pix4Dmapper, oferind informații asupra structurii reliefului, distribuției vegetației, caracteristicilor coronamentului și organizării spațiale a infrastructurii din perimetrul Grădinii Botanice Naționale (Institut) "Alexandru Ciubotaru".



Figură 1. Produsele generate în DJI Terra pe baza datelor colectate cu DJI Matrice 350 RTK și senzorul LiDAR Zenmuse L2: (a) ortofotoplanul RGB de înaltă rezoluție obținut prin fotogrammetrie; (b) traseele misiunii UAV, care ilustrează suprapunerile de zbor; (c) modelul altimetric LiDAR colorat pe înălțime, evidențiind microrelieful și uniformitatea acoperirii; (d) clasificarea tematică a norului de puncte (sol, vegetație, apă), utilizată pentru derivarea DTM și CHM.

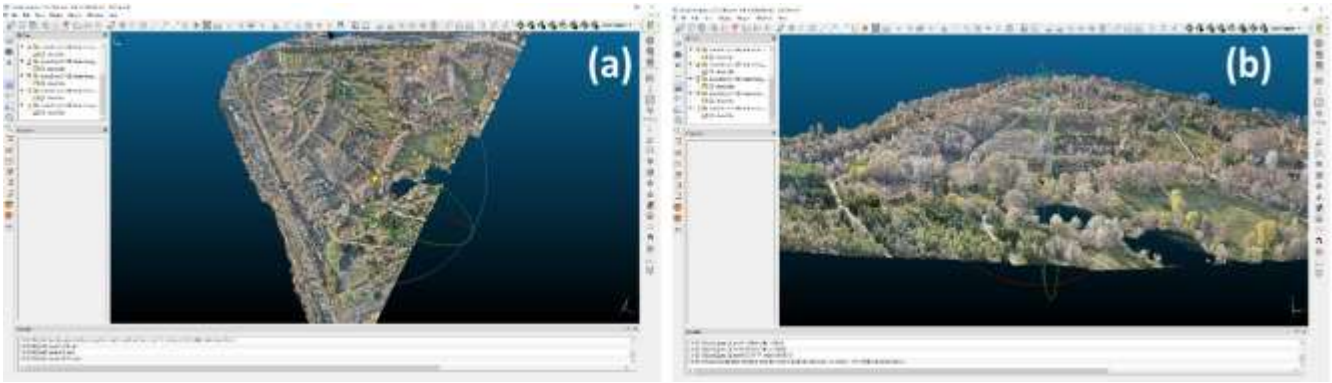
Cele patru imagini din Figură 1 reprezintă principalele produse generate în software-ul **DJI Terra** în urma misiunii UAV realizate cu DJI Matrice 350 RTK echipat cu senzorul LiDAR **Zenmuse L2**. Fiecare figură reflectă un nivel diferit de procesare și interpretare a datelor: generarea ortofotoplanului și vizualizarea traseelor de zbor clasificarea norului de puncte, modelarea altimetrică. Aceste produse sunt esențiale pentru reconstrucția 3D a terenului, a vegetației și a structurii spațiale a sitului studiat, fiind utilizate în numeroase cercetări moderne de teledetecție [13, 14]. Figură 1 (a) reprezintă ortofotoplanul RGB generat prin fotogrammetrie în DJI Terra, deci este o imagine ortorectificată cu rezoluție înaltă, obținută prin prelucrarea imaginilor suprapuse colectate în timpul misiunii UAV, oferind o vedere planimetrică completă a sitului. Ortofotoplanul redă fidel structura peisajului: zonele dendrologice, traseele pietonale, parcelele experimentale, vegetația forestieră și lacurile. Acest produs este esențial pentru validarea modelelor LiDAR, pentru delimitarea exactă a suprafețelor și pentru analize cartografice și peisagistice. Generarea ortofotoplanului pe baza imaginilor RGB este o etapă standard în teledetecție și fotogrammetrie [11, 15], iar DJI Terra urmează aceleași principii de reconstrucție prin matching automat al punctelor cheie. Figură 1(b) ilustrează distribuția benzilor de zbor care au asigurat acoperirea completă a suprafeței Grădinii Botanice Naționale. Traseele oblice contribuie la minimizarea umbrelor vegetale și la obținerea unei densități uniforme a norului de puncte. Conform recomandărilor lui Turner [16], o acoperire optimă este esențială pentru eliminarea golurilor în coronament și pentru obținerea unei reconstrucții 3D robuste. Planificarea zborului este un element-cheie pentru calitatea finală a DTM/DSM/CHM și reflectă precizia cu care DJI Terra gestionează parametrii RTK, altitudinea și suprapunerile. În Figură 1 (c) se văd bine benzile paralele colorate, care sunt dovada suprapunerii corecte a benzilor de zbor LiDAR și reprezintă modul în care fasciculul laser a acoperit uniform situl.

Zonele înalte (portocaliu–roșu) corespund marginii de nord a Grădinii Botanice și zonelor ridicate de pe laturile vestice, în timp ce zonele albastre-verzi reflectă depresiuni locale, luncile și complexul

lacustru. Astfel de modele altimetrice sunt indispensabile pentru analiza geomorfologică și pentru validarea calibrării GNSS/IMU a misiunii UAV. Conform lucrărilor [10, 17], precizia reconstrucției verticale este determinantă pentru calitatea finală a CHM și DSM.

Clasificarea norului de puncte reprezintă unul dintre pașii fundamentali în procesarea datelor LiDAR, permițând separarea suprafeței terenului de elementele suprapuse (vegetatie, clădiri, arbori). În Figură 1 (d), zonele de vegetație înaltă apar dominate de culoarea roșie, indicând densitatea ridicată a coronamentului, în timp ce suprafețele deschise (galben) corespund potecilor, terenurilor agricole, spațiilor experimentale și marginilor infrastructurii. Identificarea precisă a claselor tematice este crucială pentru generarea unui Model Digital al Terenului (DTM) precis, conform recomandărilor internaționale din literatura de specialitate [7, 8]. Totodată, clasificarea permite analiza structurală a vegetației și estimarea înălțimii arborilor prin derivarea CHM (Canopy Height Model).

Aceste patru imagini procesate în DJI Terra demonstrează calitatea ridicată a datelor obținute cu DJI Matrice 350 RTK și senzorul LiDAR Zenmuse L2. Clasificarea norului de puncte, modelele altimetrice, ortofotoplanul și analiza traseelor de zbor constituie împreună fundamentul pentru generarea unui set complet de produse geospațiale utilizate în modelarea terenului, studiul vegetației și evaluarea structurală a coronamentului.



Figură 2. Norul de puncte LiDAR colectat cu DJI Matrice 350 RTK și Zenmuse L2, vizualizat în CloudCompare din perspectivă zenitală (a) și oblică (b).

În Figură 2 (a) este prezentată o vizualizare zenitală (top-down) a norului de puncte LiDAR achiziționat cu Zenmuse L2, colorat cu texturi RGB provenite din imaginile de suprapunere ale senzorului optic integrat. În această reprezentare, CloudCompare afișează distribuția tridimensională a punctelor într-un mod fotorealist, permițând identificarea clară a principalelor componente ale peisajului din Grădina Botanică Națională (Institut) „Alexandru Ciubotaru”. Din această imagine putem distinge foarte bine rețeaua de alei și căi de acces, sub formă de suprafețe liniare deschise, zonele dendrologice și parcelele experimentale, având texturi variabile, coronamentul arborilor, reprezentat dens și omogen în partea centrală și nordică, lacurile din zona central-estică, redate prin zone cu absență de puncte LiDAR (absorbanța totală a fasciculului laser). Densitatea ridicată a punctelor (specifică L2, >200 p/m²) asigură o reprezentare continuă a vegetației și infrastructurii. Vizualizarea zenitală este utilizată în mod obișnuit în analiza stratificării terenului și pentru validarea suprapunerii benzilor LiDAR [18].

Pe când în Figură 2 (b) se oferă o perspectivă oblică, evidențiind structura tridimensională a vegetației și topografia zonei. În această vizualizare, modelul LiDAR colorat RGB permite observarea

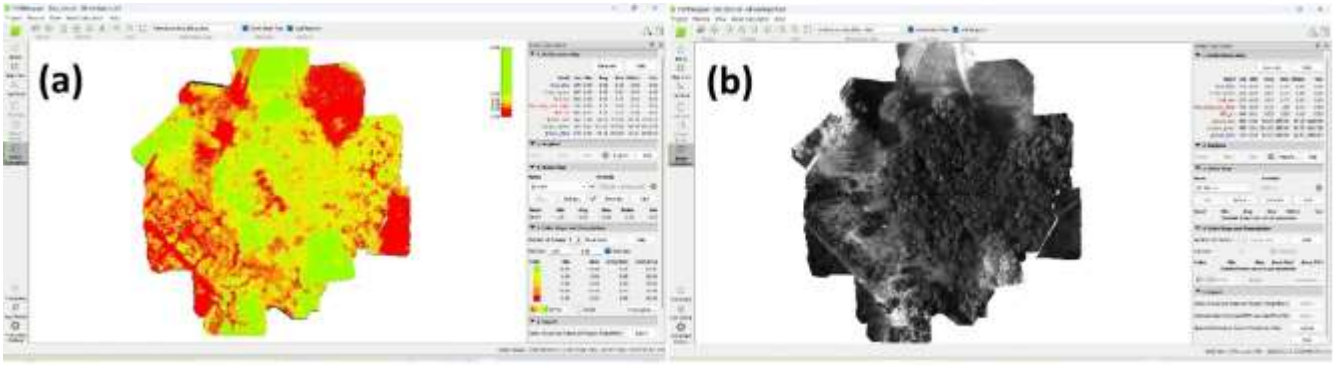
înălțimii arborilor cu diferențe evidente între grupurile de arbori maturi și vegetația tânără, continuității coronamentului prezintă o distribuție densă în centrul sitului și una mai fragmentată spre margini, structura reliefului este cu zone de luncă joasă în jurul lacurilor și terenuri mai ridicate spre periferie, aliniamentele vegetale și aleile sunt vizibile datorită absenței punctelor înspre sol în respectivele zone, iar precizia reconstrucției 3D este demonstrată de contururile clare ale clădirilor și suprafețelor deschise.

Deci putem spune că această vizualizare este esențială pentru analiza volumetrică a vegetației, în special pentru generarea Modelului Înălțimii Coronamentului (CHM) și pentru evaluarea continuității verticale a ecosistemului [1, 13].

Tabel 1. Analiză comparativă între cele două imagini.

Aspect	**Vizualizare zenitală (Fig. 2 (a))**	**Vizualizare zenitală (Fig. 2 (b))**
Scop	Analiză planimetrică, distribuție pe orizontală	Analiză volumetrică, structură verticală
Vizibilitate arbori	Formă în plan, distribuție coronament	Înălțime, volum, stratificare
Relief	Vizibil doar prin variația texturilor	Evidențiat clar prin variația punctelor 3D
Utilitate	DTM, DSM, cartografie	CHM, analiză structurală, modelare 3D

O analiză comparativă detaliată a caracteristicilor vizuale și structurale surprinse în imaginile prezentate în Figură 2 este sintetizată în Tabel 1, unde sunt evidențiate diferențele privind distribuția punctelor LiDAR, reprezentarea topografică și modul de redare a volumetriei vegetației.



Figură 3 Analiza multispectrală realizată în Pix4Dmapper pe baza datelor colectate cu drona DJI Phantom 4 Multispectral: (a) harta NDVI, evidențiind variația vigorii vegetației, (b) reflectanța în banda NIR, utilizată pentru evaluarea densității și sănătății structurale a vegetației.

Pentru analiza vegetativă a unei porțiuni ai Grădinii Botanice Naționale (Institut) „Alexandru Ciubotaru" am efectuat un studiu Figură 3 (a), care reprezintă harta NDVI, generată în Pix4Dmapper prin utilizarea canalelor Red și NIR [19]. Colormap-ul utilizat (RdYlGn) evidențiază variația vigorii vegetației la nivelul zonei analizate din Grădina Botanică Națională (Institut). Aici zonele în roșu indică stare vegetativă slabă, suprafață uscată sau sol expus, zonele în galben sugerează vegetație moderată, corespunzând frecvent vegetației aflate în stres hidric sau în perioadă de tranziție fenologică, iar zonele în verde indică vegetație sănătoasă, cu densitate mare a biomasei și activitate fotosintetică intensă.

Distribuția acestor valori reflectă variabilitatea structurii vegetale, diferențele dintre zonele arborescente, arbustive și ierboase, precum și efectele microclimatice locale.

În Figură 3 (b) este reprezentată reflectanța în infraroșu apropiat, unde vegetația reflectă puternic radiația NIR datorită structurii interne a frunzelor. În această vizualizare, zonele luminoase (alb-gri deschis) indică vegetation densă și sănătoasă, care reflectă eficient radiația NIR, iar zonele întunecate (gri închis–negru) corespund zonelor cu vegetation slabă, sol umed, suprafețe fără vegetație sau umbre.

Imaginea NIR oferă o perspectivă brută asupra capacității vegetației de a reflecta radiația, constituind baza pentru calculul indicilor spectrali precum NDVI, GNDVI sau NDRE.

Tabel 2. Analiză comparativă NDVI vs. NIR

Caracteristică	**NDVI**	**Banda NIR**
Tip informație	Index derivat, normalizat	Reflectanță brută
Sensibilitate	Sensibil la stresul vegetației	Sensibil la densitatea frunzișului
Detectează	Vigor vegetație, stres, degradare	Biomasa, sănătatea structurală
Avantaje	Ușor de interpretat; standard global	Precizie ridicată; date neprocesate
Limitări	Depinde de iluminare și calibrare	Necesită preprocesare suplimentară

În Tabel 2 avem o interpretare clară a celor două imagini, prin care putem spune că zonele cu reflectanță NIR ridicată coincid cu valori NDVI mari, confirmând prezența vegetației sănătoase [20]. Zonele cu reflectanță scăzută sunt asociate cu NDVI redus, corespunzând zonelor afectate de uscăciune, sol expus sau vegetație rară. NDVI amplifică diferențele dintre vegetația sănătoasă și cea degradată, în timp ce NIR arată distribuția brută a reflectanței, utilă pentru analize spectrale suplimentare.

Pe zona studiată, se observă nucleu forestier cu vegetație sănătoasă (valori NDVI ridicate și NIR intens), corespunzând arborilor maturi, iar imagini și fâșii de tranziție cu NDVI redus, sugerează vegetație tânără, rară sau afectată de sezon. Zone cu sol expus și pajiști degradate reprezentate predominant în roșu în NDVI. Aceste informații sunt esențiale pentru monitorizarea stării fitosanitare, detecția stresului hidric, evaluarea biomasei și a acoperirii vegetale, planificarea intervențiilor silvice și ecologice. Analiza DTM-ului derivat din datele LiDAR a evidențiat variații moderate ale altitudinii, cu diferențe de nivel accentuate în special în apropierea taluzurilor și în zona lacurilor. Aceste informații sunt esențiale pentru evaluarea scurgerii de suprafață, a potențialului de eroziune și pentru proiectarea infrastructurii verzi-albastre. Modelul coronamentului (CHM) a permis calculul înălțimii maxime, medii și al distribuției statistice a arborilor pe sectoare. Zonele cu înălțimi maxime corespund plantațiilor dendrologice mature, confirmând importanța acestora pentru stabilitatea ecologică și peisagistică a grădinii. În același timp, sectoarele caracterizate prin înălțimi mici și valori NDVI reduse pot fi identificate ca prioritare pentru lucrări de reîmpădurire, regenerare sau completare a coronamentului.

Integrarea informațiilor LiDAR cu datele fotogrammetrice și multispectrale demonstrează coerența dintre parametrii structurali (înălțime, densitate, volum) și cei funcționali (stare de vegetație, activitate fotosintetică), oferind o imagine holistică asupra ecosistemului urban reprezentat de Grădina Botanică Națională (Institut) ”Alexandru Ciubotaru” [21].

CONCLUZII

Studiul a demonstrat că tehnologia LiDAR montată pe UAV reprezintă un instrument extrem de eficient pentru generarea și evaluarea modelului digital al terenului și al coronamentului arborilor în contexte urbane complexe, precum Grădina Botanică Națională (Institut) ”Alexandru Ciubotaru”.

Norii de puncte de înaltă densitate au permis separarea precisă a solului de vegetație și construcții, precum și derivarea unor produse derivate (DTM, CHM) cu acuratețe ridicată. Rezultatele au evidențiat

zonele cu coronament dezvoltat, asociate valorilor maxime de înălțime și NDVI, dar și sectoarele vulnerabile, unde vegetația este rară sau într-o stare mai puțin favorabilă. Integrarea datelor LiDAR cu modelele fotogrammetrice și cu hărțile NDVI oferă un cadru robust pentru monitorizarea pe termen lung a dinamicii vegetației și a relației dintre frontul urban construit și spațiul verde. Din perspectivă aplicativă, metodologia propusă poate fi transferată către alte parcuri și spații verzi urbane, sprijinind procesele de planificare și management durabil al infrastructurii verzi. În plus, abordarea are un potențial educațional semnificativ, permițând includerea datelor UAV–LiDAR în activități didactice, proiecte de cercetare studențești și programe de formare în domeniul tehnologiilor geospațiale.

REFERINȚE:

1. WALLACE, L., et al. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. In: Forests, 2016, vol. 7, no. 3, p. 62.
2. WHITE, J.C., et al. The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. In: Forests, 2013, vol. 4, no. 3, pp. 518-536.
3. IONIȚA, O. et al. Contribuții la studiul speciilor genului hypochoeris l.(asteraceae) în flora republicii moldova. In: CHIŞINĂU 2021, vol. no. p. 74.
4. BORK, E.W, SU Jason G. Integrating LIDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: A meta analysis. In: Remote Sensing of Environment, 2007, vol. 111, no. 1, pp. 11-24.
5. MANZONI, Marco, MONTI-GUARNIERI, Andrea, MOLINARI, Monia Elisa. Joint exploitation of spaceborne SAR images and GIS techniques for urban coherent change detection. In: Remote Sensing of Environment, 2021, vol. 253, no. p. 112152.
6. Team Development. CloudCompare Development Team, 2023. In: CloudCompare (Version 2.13), 2023, vol. GPL software, no. p.
7. SITHOLE, G., VOSSELMAN, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. In: ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2004, vol. 59, no. 1-2, pp. 85-101.
8. MENG, X., CURRIT, N., ZHAO, K. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. In: Remote Sensing, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 833-860.
9. ZHANG, W, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. In: Remote sensing, 2016, vol. 8, no. 6, p. 501.
10. HYYPPÄ, J., et al. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. in Workshop on 3D remote sensing in forestry, Vienna, Austria. 2006.
11. Pix4D. Pix4Dmapper Technical Documentation.
12. ROUSE, Jr JW, et al. Paper a 20. in Third earth resources technology satellite-1 symposium: The proceedings of a symposium held by Goddard space flight center at Washington, DC on. 1973.
13. HYYPPÄ, J., et al. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. In: International Journal of Remote Sensing, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 1339-1366.
14. VOSSELMan, G., MAAS, Hans-Gerd. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles publishing, 2010.
15. WESTOBY, M. J., et al. 'Structure-from-Motion'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: Geomorphology, 2012, vol. 179, no. pp. 300-314.

16. TURNER, D., LUCIEER, A., WATSON, CH. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. In: Remote sensing, 2012, vol. 4, no. 5, pp. 1392-1410.
17. KRAUS, K. Photogrammetry: geometry from images and laser scans. Walter de Gruyter, 2011.
18. COOPS, N.C., et al. Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends. In: Remote Sensing of Environment, 2021, vol. 260, no. p. 112477.
19. TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. In: Remote sensing of Environment, 1979, vol. 8, no. 2, pp. 127-150.
20. MERCHANT, J.W. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. In: Cartography and Geographic Information Science, 2000, vol. 27, no. 4, pp. 311-311.
21. BERJÓN, A.J., et al. Retrieval of biophysical vegetation parameters using simultaneous inversion of high resolution remote sensing imagery constrained by a vegetation index. In: Precision Agriculture, 2013, vol. 14, no. 5, pp. 541-557.

Finanțare: Această cercetare a fost finanțată de Ministerul Educației și Cercetării al Republicii Moldova în cadrul subprogramului nr. 011210, „Metode fizice avansate și tehnologii bazate pe UAV pentru monitorizare complexă, evaluare și modelare” și Proiectul Voucher inovațional 3DTur 2024-2025.

CZU: 004.42:681.2 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.25**

PLATFORMĂ HARDWARE–SOFTWARE PENTRU CONTROLUL INSTRUMENTELOR DIN SERIA KEITHLEY 2400

HARDWARE–SOFTWARE PLATFORM FOR CONTROLLING KEITHLEY 2400 SERIES INSTRUMENTS

Cătălin CRECIUNEL[1] e-mail: catalin.creciunel@cnstm.utm.md ORCID ID: 0009-0008-4898-2556
Cătălin CECHIN[2] e-mail: catalin.cechin@mib.utm.md ORCID ID: 0009-0000-8897-6582
Daniel ȚÎRCHE[3] e-mail: daniel.tirche@mib.utm.md ORCID ID: 0009-0002-0975-766X
Vladimir CIOBANU[4] e-mail: vladimir.ciobanu@cnstm.utm.md ORCID ID: 0000-0002-4588-2866

[1,2,3,4]Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldova

Abstract. *This paper presents the development of a hardware–software platform designed for controlling and monitoring devices from the Keithley 2400 SourceMeter series. The system uses a laboratory-designed hardware adapter based on the ATmega328P microcontroller for serial–parallel conversion and an ESP32-C3 module for managing network communication and transmitting commands according to the GPIB (IEEE-488) protocol. The software platform includes a web interface accessible both locally and remotely through Wi-Fi connectivity and a centralized server. The system implements two access levels—administrator and standard user—allowing configuration of internal parameters, sending GPIB commands, executing tests, and viewing system logs. For secure access, the application employs unique authentication tokens, packet integrity verification, and automatic restriction of unauthorized IP addresses. The application enables measurement reading in multimeter mode, automatic saving to CSV files, real-time graph generation, and communication error diagnostics. Additionally, the system can operate as a programmable source, supporting both potentiostatic and galvanostatic modes, making it suitable for electrochemical applications, automated testing, and remotely controlled experiments. The results confirm the stability of the GPIB communication, the expandability of the platform, and its integration potential within modern laboratory infrastructures.*
Keywords: *ESP32, software interface, GPIB-USB converter, Keithley 2400*

Introducere

Comunicarea cu echipamentele de măsurare de tip SourceMeter, precum seria Keithley 2400, rămâne esențială în numeroase domenii experimentale și industriale. Deși aceste instrumente oferă o precizie ridicată și un grad înalt de flexibilitate, accesul la funcționalitățile lor avansate depinde adesea de utilizarea unor interfețe de comunicație tradiționale, cum ar fi magistrala GPIB. În multe laboratoare, conectarea acestor dispozitive la un calculator se realizează încă prin plăci PCI–GPIB dedicate, o soluție robustă, dar costisitoare, dificil de integrat pe sisteme moderne și incompatibilă cu echipamente mobile.

Pentru a depăși aceste limitări, au fost dezvoltate în timp diverse adaptoare comerciale USB–GPIB, însă acestea rămân în mare parte soluții proprietare, dependente de drivere specifice și de software închis, ceea ce reduce portabilitatea și flexibilitatea utilizatorilor. În plus, mecanismele de control sunt adesea fragmentate între mai multe aplicații sau platforme, îngreunând automatizarea și integrarea cu sisteme personalizate. În acest context, lucrarea de față propune o platformă hardware–software accesibilă pentru controlul instrumentelor Keithley 2400 [1], proiectată astfel încât să permită operarea directă de pe un PC, tabletă sau smartphone, fără necesitatea instalării unor module hardware suplimentare costisitoare.

Prin înlocuirea plăcii PCI–GPIB [2] cu un adaptor USB–GPIB compatibil și prin dezvoltarea unei interfețe web intuitive, soluția oferă o experiență unificată de control și monitorizare, crescând mobilitatea și reducând semnificativ costurile de operare [3]. Aplicațiile unei astfel de platforme sunt variate și se extind de la testarea proprietăților electrice/fotoelectrice ale materialelor, până la procese experimentale ce necesită surse programabile de tensiune sau curent. În unele contexte, cum este și cazul instalațiilor de anodizare sau depunere electrochimică, instrumentele Keithley sunt utilizate pentru generarea și citirea exactă a tensiunilor și curenților necesari proceselor [4 - 7].

Componente hardware-software

Dezvoltarea aplicației a început cu identificarea componentelor electronice, a modului de transmitere a datelor și definirea protocolului de comunicare. Acesta respectă standardul GPIB, permițând compatibilitatea cu mai multe instrumente de laborator. În figura 1 este ilustrată schema conceptuală a sistemului de comunicare. Interfața web este accesibilă prin conexiunea Wi-Fi integrată pe placheta ESP32-C3 (format „super mini", 18,0 × 22,5 mm) [8]. Aceasta asigură și alimentarea întregului ansamblu prin conectorul USB, care furnizează 5,0 V, în timp ce circuitul ME611 generează tensiunea de 3,3 V, necesară modulelor logice. Microcontrolerul ATmega328P funcționează ca convertor serial–paralel, realizând transferul datelor între interfața UART și magistrala GPIB, compusă din liniile de date D1–D8 și liniile de control EOI, SRQ, ATN, REN, IFC, DAV, NRFD, NDAC [9].



Figura 1. Schema de transfer a datelor între microcontrolere și interfața GPIB.

Aplicația web a fost concepută pentru a fi compatibilă cu diverse dispozitive (telefon, tabletă, laptop, PC) [10]. Pagina de control a dispozitivului (figura 2a) permite trimiterea de comenzi către Keithley, testarea răspunsurilor și monitorizarea în timp real a stării conexiunii. În figura 2b este prezentat raportul salvat în format text ce conține ordinea activităților și setările experimentului practic pentru a putea reproduce procesul.



Figura 2. Interfața grafică a aplicației web (UI) pentru controlul și monitorizarea instrumentului Keithley 2400.

Rezultate și Discuții

Pentru elaborarea adaptorului GPIB, a fost realizată o placă cu cablaj imprimat (PCB) dedicată, care integrează microcontrolerele ATmega328P și ESP32-C3, precum și circuitele de conversie de nivel logic (figura 3). Circuitul a fost elaborat în softul Kicad (vers. 9.0) [11]. Acesta a fost proiectat pe două straturi cu trasee de 0,3 mm și Via de 0,6 mm, cu găuri de 0,4 mm. Pe partea verso a fost plasat microcontroler-ul ATmega328 și circuitul de nivel de tensiune. Placheta ESP32 este deja proiectată corespunzător pentru a fi sudată fără găuri, ce permite amplasarea componentelor pe partea verso fără dificultăți.

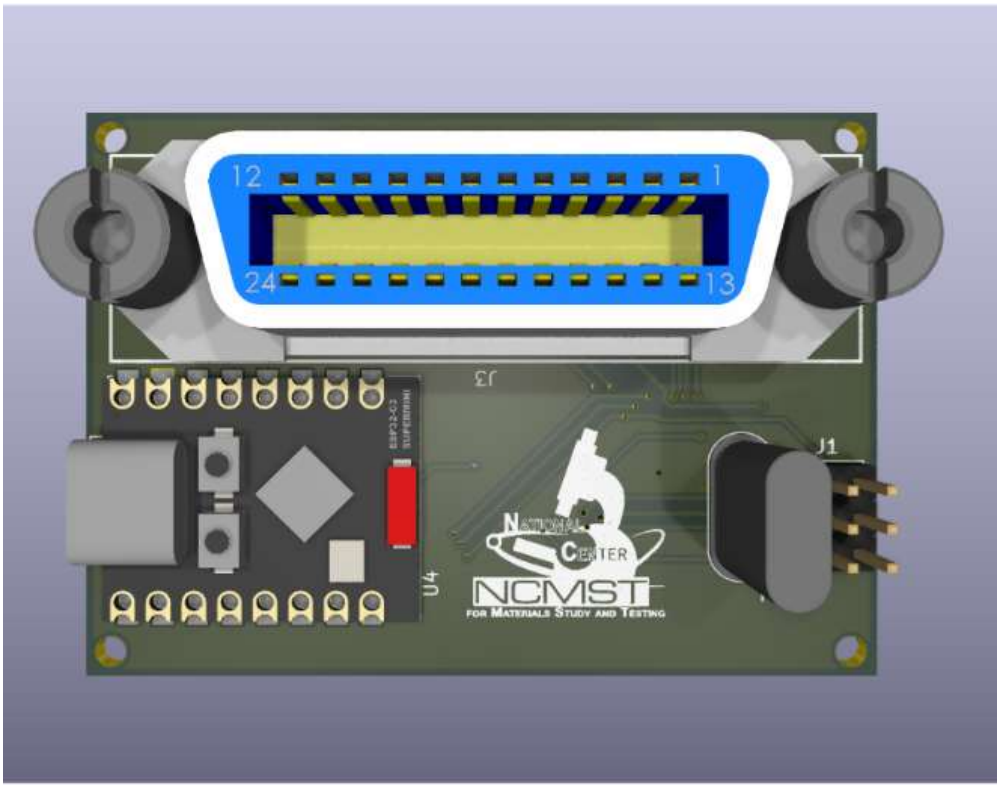


Figura 3. Imaginea circuitului PCB proiectat.

Funcționalitățile sistemului proiectat hardware-software include astfel:

- transmiterea de comenzi standard (setarea limitei de curent, tensiune etc.);
- vizualizarea jurnalului de comunicație și identificarea erorilor;
- salvarea automată a datelor măsurate în format CSV;
- generarea graficelor în timp real;
- Posibilitatea analizei sub formă grafică a datelor deja salvate in format CSV.

Datele sunt reprezentate grafic sub forma unor serii independente, actualizate continuu pe axa timpului (figura 4). Interfața oferă și funcții interactive specifice mediilor web moderne, precum tooltip-uri dinamice care afișează valorile exacte la fiecare punct de măsurare, legenda și posibilitatea de a șterge sau reinițializa graficul. Această reprezentare demonstrează modul în care o consolă web poate fi utilizată ca instrument de monitorizare în timp real, facilitând vizualizarea și analiza rapidă a datelor primite de la Keithley 2400.



Figura 4. Afișarea în timp real a evoluției parametrilor selectați.

Testele experimentale au confirmat funcționalitatea completă a sistemului: conectarea automată la server, trimiterea și recepționarea comenzilor GPIB, înregistrarea datelor și vizualizarea lor grafică.

Soluția propusă a demonstrat stabilitate ridicată în transmisia datelor și o latență medie sub 50 ms, fiind potrivită pentru aplicații de măsurare și control la distanță.

Concluzii

A fost dezvoltată o platformă hardware–software complet funcțională pentru controlul și monitorizarea instrumentelor din seria Keithley 2400.

Platforma propusă permite:

- control local și la distanță prin Wi-Fi;
- comunicare bidirecțională prin protocol MQTT și GPIB;
- salvarea și analiza automată a datelor experimentale.

Prin integrarea microcontrolerelor ATmega328P și ESP32-C3, sistemul oferă o alternativă modernă și economică la interfețele comerciale GPIB, contribuind la modernizarea echipamentelor existente în laboratoarele de cercetare. Ca direcții viitoare, platforma va fi extinsă pentru integrarea și controlul și altor dispozitive de laborator precum cele de la Keithley sau Scientific Instruments, ce permit de asemenea controlul temperaturii în criostat în intervalul 10 – 400 K, cu posibilitatea de a investiga proprietățile electrice sau fotoelectrice a materialelor semiconductoare în special cele nanostructurate. Integrarea acestor funcționalități va transforma platforma într-o soluție completă pentru automatizarea experimentelor complexe, crescând semnificativ flexibilitatea și eficiența cercetărilor.

Referințe:

1. JA'AFARU, S., DOGARA, M.D., ISAAC, H.D., GYUK, P. M., IYEN, C. Comparison between a constructed arduino based system and Keithley SourceMeter 2400 on some electronics devices. In: *Science World Journal*, vol. 13, no. 2, 2018, pp. 55–57, Aug.
2. ISLAM, H., HOSSAIN, F., PAUL, S., FARDOUSI, M. Implimentation of Computer-controlled Electrodeposition methodology for Depositing Metal Oxide Thin Films, 2013.
3. CRECIUNEL, C., CECHIN, C., CIOBANU, V., MONAICO, E. V. Upgrading GPIB Instruments with IoT: A Microcontroller Solution for Local Network Control of the Laboratory Devices. In: *2025 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, June 2025, pp. 1–4. doi: 10.1109/BlackSeaCom65655.2025.11193898.

4. CRECIUNEL, C. Obținerea și studiul straturilor de oxid de zinc prin corodarea electrochimică a foliilor de zinc, presented at the Conferința "Conferinţa tehnico-ştiinţifică a studenţilor, masteranzilor şi doctoranzilor," Chișinău, Moldova, Apr. 2023, pp. 279-283.
5. CIOBANU, V., ENACHI, M., POSTOLACHE,V., TIGINYANU, I. Fabrication of TiO2 nanotubular membranes opened from both ends by electrochemical anodization technique,"*Fizică şi tehnică: procese, modele, experimente*, no. 2, pp. 26–29, 2014, Accessed: Nov. 21, 2025.
6. ENACHI, M. *et al.* Light-Induced Motion of Microengines Based on Microarrays of TiO2 Nanotubes. In: *Small*, vol. 12, no. 39, pp. 5497–5505, 2016, doi: 10.1002/smll.201601680.
7. CIOBANU, V., PLEŞCO, J.I. TiO2 Nanotubes for photocatalytic degradation of methylene blue. In: *Journal of Engineering Sciences*, no. 1, pp. 23–30, 2021.
8. SAURABH, K., TRIPATHI, M.M., MAHAPATRA, S. Low-powered IoT device for monitoring dementia patients using A9G module and ESP32 C3 MCU in cloud environment. In: *International Journal of Grid and Utility Computing*, vol. 16, no. 5–6, pp. 493–504, Jan. 2025, doi: 10.1504/IJGUC.2025.148536.
9. TAHA, L.Y., ABDULLA, W.H. Data acquisition system using the IEEE 488 interface bus. In: *Microprocessors and Microsystems*, vol. 11, no. 9, pp. 493–498, Nov. 1987, doi: 10.1016/0141-9331-(87)90012-3.
10. CRECIUNEL, C., CIOBANU, V., MONAICO, E.V. Remote-controlled temperature setup designed for ZnO nanostructures fabrication. In: *International Colloquium "Physics of Materials" – PM 8*, p. 29, 2024.
11. DANDL, K., TÓTH, K., BITZENBAUER, P. From simulation to experiment: Using KiCad to design electric circuits in the physics classroom. In: *EURASIA J Math Sci Tech Ed*, vol. 20, no. 10, p. em2510, Oct. 2024, doi: 10.29333/ejmste/15176.

Mulțumiri

Această lucrare a fost susținută de subprogramul instituțional nr. 02.04.02 „Dezvoltarea tehnologiilor și investigarea proprietăților compușilor semiconductori stratificați, nanostructurilor hibride și surselor laser" și de proiectul „Tineri cercetători" nr. 24.80012.5007.12TC.

CZU: 628.4(478) **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.26**

IMPACTUL PROCESULUI DE ARMONIZARE EUROPEANĂ ASUPRA SUSTENABILITĂȚII INFRASTRUCTURII DE COLECTARE, TRANSPORT ȘI VALORIFICARE A DEȘEURILOR SOLIDE ÎN REPUBLICA MOLDOVA

THE IMPACT OF THE EU HARMONIZATION PROCESS ON THE SUSTAINABILITY OF THE INFRASTRUCTURE FOR SOLID WASTE COLLECTION, TRANSPORT AND RECOVERY IN THE REPUBLIC OF MOLDOVA

Vitalie TOMA[1] e-mail: vitalie.toma@gmail.com ORCID ID: 0009-0008-6765-3491
Boris COREȚCHI[2] e-mail: boris.cotetchi@usm.md ORCID ID: 0000-0001-8841-4838

[1,2]Moldova State University

Abstract. *This paper analyzes the impact of the European harmonization process on the sustainability of waste collection, transportation, and recovery infrastructure in the Republic of Moldova. The research seeks to evaluate how the transposition of EU directives and the adoption of circular economy principles contribute to the modernization, efficiency, and environmental performance of the national waste management system. The study applies a multidisciplinary approach combining policy analysis, comparative assessment of EU environmental directives (including the Waste Framework Directive and the Circular Economy Package), and evaluation of national implementation indicators such as waste recycling rate, energy recovery potential, and landfill reduction targets. Qualitative data from national strategies and institutional reforms are complemented by quantitative environmental performance metrics. Findings indicate that the European integration process acts as a key driver of sustainable transformation in Moldova's waste management sector. Progress in regulatory alignment, infrastructure development, and public-private partnerships has improved operational efficiency and reduced ecological impact. However, achieving full compliance with EU standards requires stronger institutional capacity, investments in waste-to-energy technologies, and enhanced community awareness. The article provides an integrated sustainability framework for assessing the effects of EU harmonization on waste management systems in transition economies. It highlights how governance reforms, technological modernization, and circular economy mechanisms jointly enhance environmental resilience and socio-economic sustainability.*
Keywords: *sustainable waste management; European harmonization; circular economy; waste infrastructure; environmental policy.*

INTRODUCERE

Gestionarea deșeurilor solide reprezintă o provocare majoră de mediu și sănătate publică pentru Republica Moldova, în contextul în care dezvoltarea urbană, industrială și creșterea nivelului de trai duc la creșterea constantă a cantității și diversității deșeurilor produse. Sistemul tradițional de salubrizare din Moldova s-a bazat în mare parte pe depozitarea la gropi de gunoi neconforme, ceea ce a condus la apariția unui număr foarte mare de depozite neautorizate. Ignoranța de zeci de ani în acest domeniu a făcut ca în prezent numărul gunoiștilor din țară să fie de circa două ori mai mare decât numărul localităților, multe dintre aceste depozite afectând grav mediul prin amplasarea lor în vecinătatea pădurilor sau a apelor de suprafață. În anul 2020, la nivel național doar aproximativ 52,9% din populație era conectată la servicii autorizate de salubrizare, restul deșeurilor fiind gestionate informal (ardere, îngropare, abandon). Această situație precară subliniază necesitatea modernizării infrastructurii de colectare și transport al deșeurilor, precum și implementarea unor soluții sustenabile de valorificare (reciclare, compostare, recuperare energetică) în linie cu bunele practici europene.

Procesul de armonizare europeană, în special angajamentele asumate de Republica Moldova prin Acordul de Asociere cu Uniunea Europeană reprezintă un motor esențial al reformelor din domeniul gestionării deșeurilor. Moldova și-a asumat transpunerea în legislația națională a directivelor UE relevante în materie de mediu, inclusiv cele privind deșeurile, și implementarea principiilor economiei circulare. Directiva-cadru a UE privind deșeurile (2008/98/CE) stabilește ierarhia deșeurilor (prevenire – reutilizare – reciclare – alte forme de valorificare – eliminare) și impune obiective ambițioase de reciclare, de exemplu cel puțin 50% din deșeurile municipale să fie reciclate până în anul 2020. Pachetul legislativ european privind Economia Circulară (2018) a ridicat și mai mult ștacheta, Comisia Europeană propunând ținte de reciclare de 65% până în 2030 pentru deșeurile municipale și limitarea depozitării acestora la maximum 10% din total până în 2030. Aceste obiective evidențiază direcția în care trebuie să se îndrepte și Moldova pentru a atinge standardele UE: trecerea de la un model liniar de "colectare–depozitare" la un model circular, în care deșeurile sunt reduse la sursă și transformate în resurse reutilizabile, contribuind astfel la protecția mediului și a sănătății populației [3].

Scopul cercetării este de a analiza în profunzime impactul procesului de armonizare europeană asupra sustenabilității infrastructurii de colectare, transport și valorificare a deșeurilor solide din Republica Moldova. Se urmărește evaluarea modului în care transpunerea directivelor UE și adoptarea principiilor economiei circulare contribuie la modernizarea, eficientizarea și îmbunătățirea performanțelor de mediu ale sistemului național de gestionare a deșeurilor. Vom examina evoluția cadrului legislativ și strategic în domeniu, progresele și lacunele în implementare, tendințele cantitative privind generarea și tratarea deșeurilor, investițiile în infrastructură (inclusiv proiectele susținute de partenerii europeni), precum și gradul de conștientizare și implicare a populației, reflectat printr-un sondaj recent de opinie. Ipoteza centrală este că integrarea europeană acționează ca un catalizator al transformării sustenabile a managementului deșeurilor în Moldova, însă atingerea deplină a standardelor UE necesită eforturi susținute, investiții majore și consolidarea capacităților instituționale la nivel național și local.

MATERIALE ȘI METODE

Pentru desfășurarea studiului au fost utilizate atât materiale legislative, cât și date statistice și sociologice, care au permis o analiză integrată a modului în care armonizarea europeană influențează infrastructura de gestionare a deșeurilor în Republica Moldova. În primul rând, au fost examinate directivele europene relevante și legislația națională aferentă, precum Legea nr. 209/2016 și programele naționale în domeniul deșeurilor, pentru a evalua gradul de transpunere și coerența politicilor.

Datele cantitative au provenit din rapoartele Agenției de Mediu și din Sistemul Informațional „Managementul Deșeurilor", completate cu informațiile statistice ale Biroului Național de Statistică. Acestea au fost utilizate pentru analiza indicatorilor-cheie: rate de colectare, cantități generate, nivelul de reciclare și investițiile în infrastructură. Informațiile au fost procesate prin metode descriptive și comparative, fiind reprezentate grafic pentru evidențierea evoluțiilor. Dimensiunea socială a fost integrată pe baza unui sondaj național realizat în 2025, care a oferit date privind satisfacția populației față de serviciile de salubrizare și disponibilitatea de a sprijini financiar îmbunătățirea sistemului. În final, interpretarea rezultatelor a combinat analiza calitativă a politicilor cu evaluarea datelor empirice,

pentru a obține o imagine coerentă și fundamentată asupra impactului procesului de armonizare europeană.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Conceptul de sustenabilitate reprezintă nucleul actualelor politici europene în domeniul mediului și constituie fundamentul reformei infrastructurii de colectare, transport și valorificare a deșeurilor solide în Republica Moldova. În accepțiunea UE și a literaturii de specialitate, sustenabilitatea presupune integrarea simultană a trei dimensiuni interdependente:

- dimensiunea de mediu – reducerea poluării, limitarea depozitării la sol, prevenirea riscurilor pentru sănătate și conservarea resurselor naturale;
- dimensiunea economică – utilizarea eficientă a resurselor, reducerea costurilor pe termen lung prin reciclare și valorificare, crearea de locuri de muncă verzi și stimularea pieței materialelor secundare;
- dimensiunea socială – acces echitabil la servicii de salubrizare, participarea comunității, educație ecologică și responsabilizare civică.

În literatura internațională, managementul durabil al deșeurilor este definit ca ansamblul politicilor și tehnologiilor care minimizează impactul asupra mediului, societății și economiei pe tot ciclul de viață al deșeurilor, de la prevenție și generare, la colectare, sortare, reciclare și eliminare finală. Modelul de referință promovat de UE este ierarhia deșeurilor: prevenire → reutilizare → reciclare → alte forme de valorificare → eliminare [2]. Armonizarea europeană ghidează Moldova de la un model liniar de consum („produce–folosește–aruncă”) către economia circulară, în care materialele rămân cât mai mult timp în circuitul economic. Obiectivele impuse de UE, creșterea reciclării la 55–60%, reducerea depozitării la maximum 10% până în 2030, introducerea instrumentelor economice (taxe de depozitare, responsabilitate extinsă a producătorului, sistem depozit-returnare), transformă infrastructura de deșeuri într-un element esențial al tranziției către o economie cu emisii reduse de carbon și utilizare eficientă a resurselor.

De asemenea, sustenabilitatea infrastructurii se aliniază cu Obiectivul de Dezvoltare Durabilă nr. 12 (ODD 12 – Consum și Producție Responsabile), care solicită statelor să reducă semnificativ generarea de deșeuri prin prevenire, reciclare și reutilizare, precum și să modernizeze infrastructura de valorificare. În cazul Republicii Moldova, transpunerea legislației UE (Legea 209/2016, HG 248/2013, HG 972/2023), dezvoltarea infrastructurii regionale, consolidarea schemelor REP și implementarea viitorului sistem de depozit-returnare reprezintă mecanismele prin care sustenabilitatea este operaționalizată la nivel național. Prin urmare, evaluarea impactului armonizării europene asupra sectorului deșeurilor trebuie interpretată ca o analiză integrată a modului în care infrastructura, politicile publice și comportamentele sociale converg către un model durabil, compatibil cu standardele UE și Agenda 2030. Sustenabilitatea nu este un rezultat punctual, ci un proces continuu de transformare tehnologică, instituțională și culturală.

Sustenabilitatea sistemului de gestionare a deșeurilor depinde nu doar de infrastructură, ci și de modul în care sunt colectate și analizate informațiile despre fluxurile de deșeuri. Prin implementarea SIA „Managementul Deșeurilor”, Republica Moldova a introdus un mecanism de raportare modern, aliniat cerințelor europene, care permite o urmărire reală a progresului către economia circulară.

Datele raportate anual devin esențiale pentru protecția mediului, deoarece arată cât se reciclează, cât se depozitează și unde persistă problemele. Raportarea contribuie și la sustenabilitatea economică: autoritățile pot fundamenta investițiile, pot planifica corect capacitățile regionale și pot ajusta tarifele într-un mod echitabil. În același timp, publicarea acestor informații susține sustenabilitatea socială, oferind transparență și consolidând încrederea cetățenilor în modul în care sunt gestionate resursele. Astfel, raportarea nu este doar o obligație administrativă, ci o condiție a dezvoltării durabile, prin care sistemul de deșeuri devine mai eficient, mai transparent și mai apropiat de standardele europene.

Procesul de armonizare europeană a condus la o modernizare semnificativă a cadrului normativ al Republicii Moldova în domeniul deșeurilor. Legea nr. 209/2016 privind deșeurile este actul-cadru prin care prevederile Directivei-cadru 2008/98/CE au fost încorporate în legislația națională, instituind principiile europene precum ierarhia deșeurilor, responsabilitatea extinsă a producătorului (REP) și principiul "poluatorul plătește". În anii ce au urmat, Moldova a continuat să își alinieze legislația specifică: au fost adoptate reglementări privind ambalajele și deșeurile de ambalaje, deșeurile electrice și electronice (DEEE), bateriile și acumulatorii uzați, deșeurile periculoase etc., conform obligațiilor din Anexa XI (Capitolul Mediu) a Acordului de Asociere. [1].Un progres notabil a fost consolidarea cadrului pentru reciclarea ambalajelor și introducerea unui sistem de garanție-returnare pentru ambalaje (cunoscut ca sistem de depozit pentru sticle/PET etc.). Amendamentele recente la Legea deșeurilor au stabilit implementarea sistemului depozit pentru ambalaje de băuturi, crearea de scheme organizate de colectare separată, dezvoltarea pieței pentru materiale secundare și ținte mărite de reciclare [10].

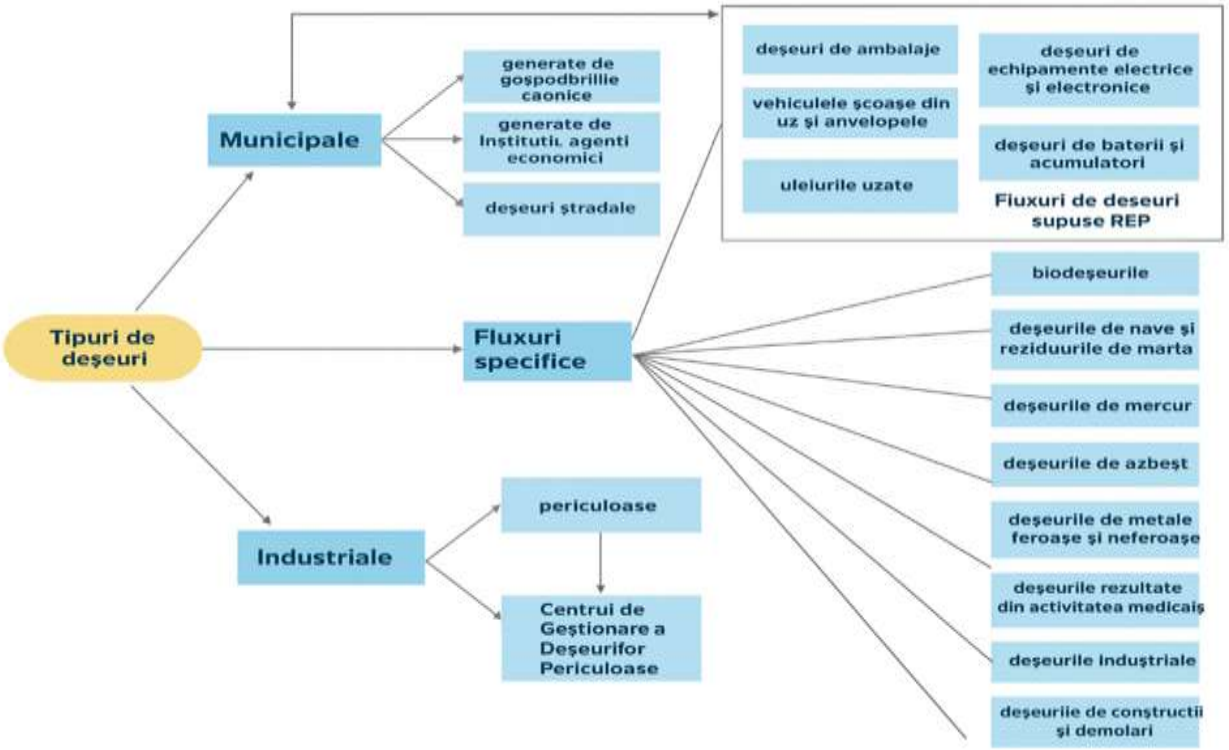


Figura 1. Structura tipurilor de deșeuri și fluxurilor specifice, inclusiv fluxurile REP.
Sursa: elaborată de autori în baza sursei [1,13,14].

Noua politică națională, reflectată în Programul 2023–2027, are obiective ambițioase aliniate cu cele europene. Până în 2027 se prevede: dezvoltarea unui sistem durabil de gestionare a deșeurilor care

să asigure un mediu sănătos pentru cetățeni; creșterea ratei de valorificare și reciclare cu până la 60% (în special pentru fluxurile vizate de REP); crearea a 4 stații de transfer regionale conforme și tratarea corespunzătoare a 25% din deșeurile generate (prin reciclare și eliminare sigură) [10]. Programul include peste 50 de acțiuni prioritare ce vizează principalele fluxuri de deșeuri – deșeuri municipale, biodeșeuri, ambalaje, DEEE, vehicule scoase din uz, anvelope, uleiuri uzate, deșeuri periculoase, deșeuri din construcții și are un buget estimat de ~4,4 miliarde lei pentru implementare. Acest efort financiar considerabil subliniază angajamentul autorităților de a mobiliza resurse (inclusiv asistență externă) pentru modernizarea infrastructurii de deșeuri.

Totuși, reforma instituțională și întărirea capacităților administrative rămân provocări. Strategia de mediu evidențiа că anumite prevederi legislative nu și-au găsit încă suport instituțional: spre exemplu, legea deșeurilor cere crearea unui Centru pentru gestionarea deșeurilor periculoase, care însă nu a fost încă înființat [13]. La nivel local, Legea nr. 209/2016 deleagă autorităților publice locale responsabilitatea organizării gestionării deșeurilor, inclusiv asigurarea colectării separate și a depozitelor conforme pentru fiecare localitate [12]. Implementarea acestor obligații depinde însă de disponibilitatea resurselor financiare și de capacitatea administrativă a primăriilor. În mediul rural în special, lipsa serviciilor publice de salubrizare este o problemă acută, generând practici neconforme (gunoiști improvizate, arderea deșeurilor) care contravin principiilor europene de mediu. În ansamblu, deși cadrul legal este în mare parte armonizat cu acquis-ul UE, conformarea efectivă necesită consolidarea instituțiilor de mediu, integrarea deplină a cerințelor de mediu în politicile sectoriale și creșterea transparenței și participării publice în procesul decizional de mediu [13].

Integrarea aspectelor de mediu în alte sectoare precum transport, energie, agricultură și stimularea parteneriatelor public-privat în domeniul deșeurilor sunt direcții esențiale subliniate atât de politicile UE, cât și de strategiile naționale actuale, pentru a asigura o dezvoltare durabilă.

Tabelul 1. Proiecția cantităților de deșeuri specifice, 2023-2030, tone

Fluxul specific de deșeu	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Deșeuri de ambalaje (sticlă, plastic, hîrtie, lemn, metal) mii tone	181,1	177,9	170,3	168,7	167,2	158,5	157,0	155,7
Deșeuri de baterii și acumulatori	7,55	7,48	7,40	7,33	7,27	7,20	7,14	7,08
Deșeuri de echipamente electrice și electronice	18,11	20,93	20,73	20,54	20,35	23,05	22,84	22,64
Deșeuri de textile	12,07	11,96	11,84	11,74	11,63	11,52	11,42	11,32
Deșeuri alimentare	241,48	224,25	222,09	220,05	218,05	201,68	199,88	198,11
Deșeuri vegetale	129,80	128,57	127,33	126,16	125,01	123,89	122,78	121,69
Uleiuri uzate	4,53	4,49	4,44	4,40	4,36	4,32	4,28	4,25
Vehicule scoase din uz	18,11	17,94	20,73	20,54	20,35	20,17	22,84	22,64
Deșeuri medicale infecțioase	1004,81	995,32	985,73	976,66	967,78	959,06	950,50	942,08

Sursa: elaborată de autori în baza sursei [1,13,].

În vederea reducerii poluării mediului cu deșeuri din materiale plastice Ministerul Mediului a promovat mai multe reglementări în legislația din domeniul gestionării ambalajelor și a deșeurilor de ambalaje, în special prin stabilirea obiectivelor de valorificare și reciclare a deșeurilor de ambalaje. În acest sens a fost instituită obligația pentru toți operatorii economici care introduc pe piață produse ambalate de a asigura, începând cu anul 2023, reciclarea a cel puțin 15% din totalul ambalajelor utilizate, procentaj ce trebuie să crească până la 35% în anul 2027. Concomitent, urmează a fi atins obiectivul de valorificare a cel puțin 17% din greutatea deșeurilor de ambalaje în anul 2023, 32% până în 2026 și 50% până în anul 2029. Cantitatea de generare a deșeurilor de ambalaj, corespunde unui indicator de generare de 60 kg de deșeuri de ambalaj/locuitor/an.

Estimarea cantității de deșeuri de ambalaje generate în perioada 2023-2030 a fost realizată în baza ratei de generare a diferitor fracții de deșeuri de ambalaje pe cap de locuitor și, respectiv, a proiecției demografice. În scopul dezvoltării sistemelor integrate de management al deşeurilor municipale Republica Moldova a fost divizată în opt regiuni de management al deşeurilor pornind de la criteriile de bază pentru planificarea regională precum: aşezarea geografică, dezvoltarea economică, existența drumurilor de acces, condițiile pedologice şi hidrogeologice, numărul populației etc.

Modernizarea infrastructurii de colectare și tratare a deșeurilor solide în Republica Moldova a beneficiat direct de sprijinul financiar și tehnic al Uniunii Europene și al instituțiilor financiare internaționale. Un exemplu de referință îl constituie Proiectul de Management al Deșeurilor Solide co-finanțat de Banca Europeană pentru Reconstrucție și Dezvoltare (BERD), Banca Europeană de Investiții (BEI) și Fondul E5P la care UE este cel mai mare contribuitor.

Lansat în 2023, acest proiect reprezintă prima inițiativă de anvergură menită să creeze un sistem regionalizat de gestionare a deșeurilor în Moldova, conform obiectivelor Strategiei naționale a deșeurilor. BERD a acordat un împrumut suveran de 25 milioane EUR, la care s-au adăugat încă 25 milioane EUR de la BEI, plus un grant de 5,6 milioane EUR din Fondul Parteneriatului pentru Eficiență Energetică și Mediu pentru Europa de Est (E5P) [8]. Aceste fonduri sunt destinate extinderii și modernizării sistemului de management al deșeurilor în trei zone de gestionare (din totalul de 8 planificate la nivel național). Se vor finanța achiziții de echipamente de colectare (containere, vehicule specializate), precum și construcția de infrastructură de eliminare și valorificare: platforme de depozitare regionale conforme standardelor UE, stații de transfer, stații de sortare și instalații de tratare (inclusiv pentru deșeuri organice și reciclabile). Prima zonă beneficiară (Zona 5: raioanele Ungheni, Nisporeni, Călărași) va dispune de o investiție de circa 19,5 milioane EUR pentru un depozit nou și rețeaua logistică aferentă, finanțată din tranșa inițială a împrumuturilor BERD/BEI și grantul E5P. Proiectul are rolul de proiect-pilot ce va servi ca model pentru extinderea sistemelor regionale de gestionare a deșeurilor în întreaga țară, facilitând închiderea miilor de gropi neconforme și integrarea localităților rurale într-un serviciu public modern de salubrizare.

Beneficiile așteptate ale acestor investiții sunt semnificative: construcția unei rețele de depozite ecologice va reduce considerabil poluarea solului și a apelor cauzată de depozitările ilegale, iar dezvoltarea capacităților de sortare și compostare va permite creșterea ratelor de reciclare și valorificare. În plus, un sistem integrat și eficient va reduce emisiile de gaze cu efect de seră (CO_2 și metan) asociate depozitării necontrolate, contribuind la obiectivele de decarbonizare asumate de Moldova conform Acordului de la Paris [8]. De asemenea, extinderea serviciilor către mediul rural unde în prezent acoperirea este deficitară va îmbunătăți calitatea vieții și igiena publică în comunitățile locale. Conform datelor sondajului național, doar 72% dintre gospodăriile din Republica Moldova beneficiază în prezent de servicii regulate de colectare a deșeurilor, restul de 28% fiind nevoite să își administreze deșeurile pe cont propriu prin ardere sau depozitare necontrolată. Disparitatea urban-rural este mare: aproximativ 91% dintre locuitorii din mediul urban au acces la salubrizare, față de doar 61% în mediul rural [6]. Aceasta evidențiază necesitatea direcționării investițiilor și către zonele rurale, aspect prevăzut de altfel în proiectele susținute de UE (care vizează acoperirea întregii populații din zonele deservite). Implementarea proiectelor de infrastructură întâmpină însă și provocări logistice și de guvernanță. Procesul de regionalizare presupune cooperarea inter-municipală (asociații de primării) pentru administrarea noilor sisteme integrate, un concept relativ nou care necesită mecanisme clare de coordonare și sustenabilitate financiară. Totodată, închiderea depozitelor neconforme va necesita eforturi de remediere a siturilor poluate și măsuri de prevenire a apariției altor depozitări ilegale pe viitor. În acest sens, politica "poluatorul plătește" trebuie aplicată riguros, combinată cu campanii de conștientizare și cu alternative viabile puse la dispoziția populației pentru depozitarea deșeurilor voluminoase, periculoase sau din construcții.

Autoritățile au recunoscut că numărul foarte mare de gunoiști neautorizate estimat la peste 3000, reprezintă un risc major de poluare și au subliniat că eliminarea treptată a acestora este o prioritate de bază [5]. În paralel, se fac pași pentru implementarea unor soluții de valorificare energetică a deșeurilor nereciclabile (waste-to-energy), deși acestea sunt încă la nivel de concept în Republica Moldova. Strategia Energetică și Planul de acțiune pe economie circulară prevăd evaluarea potențialului de incinerare cu recuperare de energie pentru deșeurile cu putere calorică ridicată, ca alternativă la depozitare, însă realizarea unor astfel de instalații va fi posibilă doar pe termen mediu și cu investiții considerabile, probabil tot cu sprijin extern.

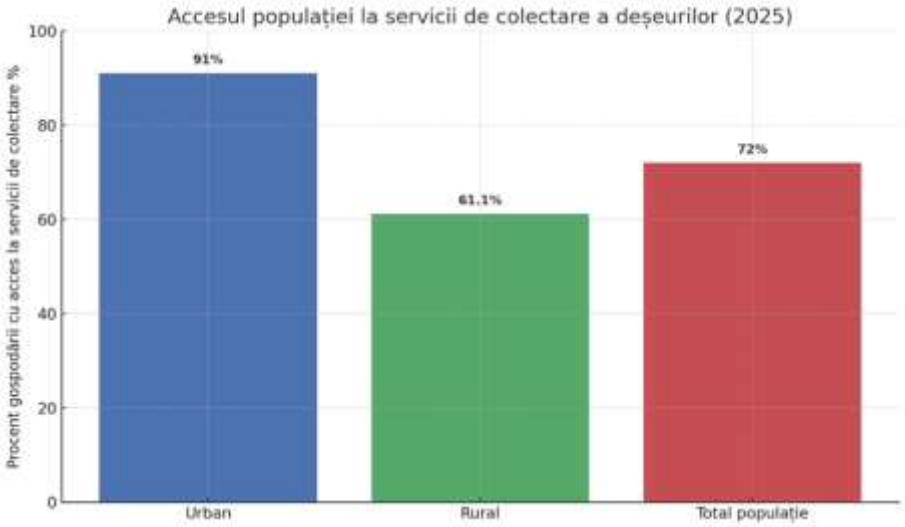


Figura 2. Gradul de acoperire a serviciilor de colectare a deșeurilor pe medii de rezidență (2025)

Sursa: elaborată de autori în baza sursei [4,6,11,13].

Pentru a evalua sustenabilitatea infrastructurii de gestionare a deșeurilor, este esențial să analizăm tendințele cantitative din ultimii ani în Republica Moldova, în special în contextul armonizării cu standardele UE. După implementarea SIA „Managementul Deșeurilor" (raportare online unificată) în 2019, datele statistice privind deșeurile au devenit mai precise și mai detaliate.

Conform Agenției de Mediu, generarea totală de deșeuri raportată de agenții economici a fost de 627,2 mii tone în 2019, crescând ulterior (372,4 mii tone în 2023 doar din sectoarele economice monitorizate, excluzând unele categorii). O parte semnificativă a acestor cantități provine din deșeuri industriale și agricole (ex. reziduuri din industria zahărului, băuturi alcoolice, agricultură), însă deșeurile municipale (menajere și asimilabile) reprezintă cca 84% din totalul deșeurilor generate în 2019 [11]. Cantitatea de deșeuri menajere crește de la an la an, reflectând atât consumul în creștere, cât și lipsa unor eforturi sistematice de prevenire. Un indicator-cheie al sustenabilității infrastructurii de deșeuri este rata de colectare separată și reciclare. Punctul de plecare era foarte scăzut – în 2019 doar 7,2% din deșeurile municipale erau colectate separat la sursă, restul de peste 90% fiind deșeuri amestecate destinate depozitării. În 2020 situația era similară: doar 4,7% din deșeurile municipale colectate au fost raportate ca fiind colectate separat. Aceste valori palează în comparație cu ținta UE de 50% reciclare municipală în 2020. Totuși, odată cu întărirea schemelor REP și extinderea infrastructurii, s-au înregistrat progrese vizibile în 2022–2023 la colectarea separată a materialelor reciclabile. De exemplu, cantitatea de deșeuri de sticlă colectate separat a crescut de la 42,1 mii tone (2022) la 45,5 mii tone (2023), de hârtie și carton de la 27,7 la 32,7 mii tone, iar plasticul aproape s-a dublat de la 3,8 la 6,8 mii tone.

Chiar și deșeurile din lemn (palete, deșeuri vegetale lemnoase) au crescut semnificativ la colectare, de la 1,3 la 2,8 mii tone în același interval [12]. Această evoluție pozitivă indică faptul că noile obligații impuse producătorilor și autorităților locale (puncte de colectare selective, campanii de colectare a hârtiei, plasticului etc.) încep să dea roade.

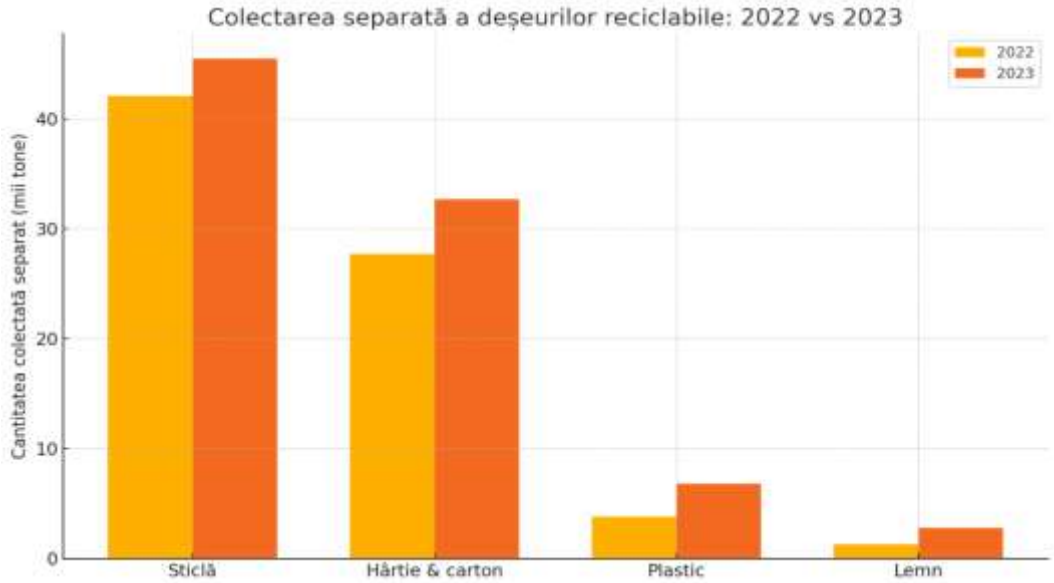


Figura 3. Evoluția cantităților colectate separat pe principalele fracții reciclabile
Sursa: elaborată de autori în baza sursei [4,6,12].

Cu toate acestea, ponderea deșeurilor reciclate efectiv rămâne redusă raportat la cantitatea totală generată. Majoritatea deșeurilor colectate în continuare ajung la depozite. În 2019, 100% din deșeurile municipale colectate au fost transportate spre depozitare finală (groapa de gunoi), practic fără niciun tratament de recuperare. Abia în ultimii ani începe să se contureze un flux semnificativ de valorificare: potrivit datelor oficiale, în 2022 s-au valorificat (reciclat sau recuperat energetic) circa 172,2 mii tone de deșeuri, iar în 2023 volumul a urcat la 191,9 mii tone [5]. Rata de valorificare a deșeurilor reprezintă indicatorul central utilizat pentru evaluarea performanței infrastructurii de colectare, transport și tratare, fiind calculată conform formulei matematice standard acceptate în Uniunea Europeană:

$$R_{val} = \frac{Q_{val}}{Q_{tot}} X\ 100$$

Tabelul 2. Evoluția ratei de valorificare a deșeurilor în Republica Moldova (2019–2023)

An	Cantitate totală deșeuri colectate Q_{tot} (mii tone)	Deșeuri valorificate Q_{val} (mii tone)	Rata de valorificare R_{val} (%)	Observații
2019	627,2	40,9	6,5	Practic toate deșeurile municipale au fost depozitate
2023	834,0	191,9	23	Creștere majoră datorită armonizării cu UE.

Sursa: elaborată de autori în baza sursei [2,6,11,12].

Creșterea este remarcabilă față de anul 2019, când doar ~40,9 mii tone au fost raportate ca valorificate, nivelul de atunci reflectând practic activitatea câtorva reciclatori de ambalaje și colectori de fier vechi. Cea mai mare parte a deșeurilor valorificate în 2023 provine din fluxurile agricole și industria alimentară (de ex. nămoluri de epurare folosite ca fertilizator pe terenuri agricole, tăiței de

zahăr folosiți în agricultură). De asemenea, datorită existenței în țară a unor capacități de prelucrare a sticlei (fabrici de ambalaje din sticlă), s-a reușit reciclarea a 45,1 mii tone de deșeuri de sticlă în 2023, comparativ cu 31,1 mii tone în 2022. În industria hârtiei și cartonului, însă, cantitatea valorificată a scăzut ușor la 36,2 mii tone (2023) față de anul anterior, posibil din cauza fluctuațiilor pieței. La deșeurile din plastic, deși volumul absolut valorificat (4,4 mii tone în 2023) este încă mic, trendul este de creștere (de la 3,9 mii tone în 2022), pe măsură ce apar companii care reciclează plastic (prin transformarea în fulgi PET, granule etc. pentru reutilizare în producție) [12].

În pofida progreselor, rata de reciclare națională rămâne sub obiectivele UE. Dacă raportăm ~192 mii tone deșeuri valorificate în 2023 la cele ~834 mii tone colectate total, rezultă o rată generală de valorificare de 23%. Limitând calculul la deșeurile municipale (circa 538 mii tone din cele colectate în 2023, excluzând metalele și alte categorii), rata de reciclare a deșeurilor municipale ar fi chiar mai mică. Aceste cifre subliniază că, deși trendul este ascendent, Moldova se află încă departe de țintele UE pe care aspiră să le atingă (de exemplu 55% reciclare municipală până în 2025, conform pachetului Economie Circulară). Este de așteptat însă ca investițiile în infrastructura de sortare și compostare (inclusiv cele finanțate prin proiectele BERD/BEI) să conducă la creșteri semnificative ale ratei de valorificare în anii următori, pe măsură ce noile facilități devin operaționale.

Un alt aspect important este compoziția deșeurilor municipale, care influențează opțiunile de valorificare. Studiile relevă că în gospodăriile din Moldova, cele mai mari fracții din deșeurile menajere sunt hârtia și cartonul, ambalajele din plastic și metal, precum și deșeurile alimentare biodegradabile, acestea cumulând ~67% din total. Restul de ~33% include sticlă, textile, lemn, și alte deșeuri. Această structură a deșeurilor este similară cu cea din alte țări, sugerând un potențial considerabil de reciclare (pentru hârtie, carton, metale, sticlă) și compostare (pentru biodeșeuri). Biodeșeurile în special reprezintă o oportunitate: în 2023 s-au colectat separat 12,0 mii tone de deșeuri biodegradabile, o parte fiind compostate cum este cazul deșeurilor verzi colectate de serviciul spații verzi în Chișinău.

Extinderea programelor de compostare la scară largă ar putea reduce semnificativ volumul deșeurilor care ajung la groapă (deșeurile organice constituind ~40-50% din deșeurile menajere în mediul rural, unde arderea sau îngroparea lor este o practică răspândită. Programul național 2023-2027 include ținte de dezvoltare a infrastructurii de compostare regională pentru a valorifica această fracție, în paralel cu inițiative de colectare separată a biodeșeurilor la sursă în zonele urbane. Succesul oricărei reforme de mediu depinde într-o mare măsură și de acceptarea și participarea publicului. În cazul gestionării deșeurilor, conștientizarea populației și modificarea comportamentelor (colectare separată, reducerea risipei, plățile pentru serviciu) sunt esențiale pentru sustenabilitate. Din acest motiv, Ministerul Mediului, cu sprijinul societății civile, a realizat recent un studiu sociologic pentru a evalua modul în care cetățenii percep situația deșeurilor și măsurile propuse de autorități [6]. Rezultatele acestui sondaj național (2025) oferă perspective valoroase:

- Atitudinea față de colectarea separată: Peste 94% dintre respondenți se declară în favoarea colectării separate a deșeurilor reciclabile și ar dori localități mai curate. Principalele motive invocate pentru susținerea reciclării sunt protejarea mediului și existența facilităților de colectare în apropiere (respondentii din orașe menționează că acolo unde există containere pentru sortare, le folosesc într-o proporție ridicată). Cu toate acestea, jumătate dintre cetățeni afirmă că în localitatea lor nu există încă posibilitatea reală de colectare separată (lipsesc pubelele dedicate sau serviciul de ridicare selectivă).

Această constatare evidențiază necesitatea accelerării investițiilor în infrastructură la nivel local, dar și a comunicării cu publicul despre noile sisteme introduse.

- Disponibilitatea de a plăti: Un aspect crucial pentru sustenabilitate economică este dacă populația este dispusă să suporte costurile mai mari asociate unui serviciu modern de salubrizare. Sondajul arată că cetățenii moldoveni sunt în principiu dispuși să plătească mai mult pentru un sistem îmbunătățit de colectare separată – în medie, până la 100 lei pe lună pentru gunoi, față de tarifele actuale medii de 58 lei în urban și 83 lei în rural [7]. Această creștere a disponibilității de plată indică faptul că oamenii înțeleg beneficiile unui serviciu mai performant (localități mai curate, mai puține poluări) și ar accepta un cost sporit dacă ar vedea rezultate concrete. Totodată, diferența între tariful urban și rural reflectă situația actuală paradoxală: în mediul rural, deși veniturile sunt mai mici, tariful de salubrizare este adesea mai mare per gospodărie (din cauza densității reduse și costurilor logistice mai ridicate)[7]. Investițiile ce cresc eficiența (precum regionalizarea) ar putea contribui la uniformizarea costurilor și la menținerea lor la un nivel accesibil.
- Gradul de informare și satisfacție: Sondajul a măsurat și nivelul de satisfacție față de serviciile actuale de colectare. Rezultatele relevă un nivel moderat spre scăzut de satisfacție, mulți cetățeni fiind nemulțumiți de frecvența colectării, de curățenia platformelor de gunoi sau de modul de gestionare a gropilor de gunoi existente. În același timp, nivelul de cunoaștere a mecanismelor de reciclare este limitat: o parte semnificativă a populației nu știe exact ce tipuri de deșeuri pot fi reciclate sau cum trebuie pregătite (de exemplu, dacă trebuie spălate ambalajele, unde pot duce bateriile uzate etc.). Receptivitatea față de sistemul de depozit pentru ambalaje (SDA) este însă ridicată, mulți respondenți văd pozitiv ideea de a primi un mic stimulent financiar pentru returnarea ambalajelor de băuturi. Introducerea SDA (preconizată de autorități până în 2027) ar putea astfel avea succes, mai ales dacă este însoțită de campanii de informare.
- Diferențe urban-rural în practici: S-a confirmat existența unui contrast puternic între mediul urban și rural în modul de gestionare a deșeurilor. În zonele rurale, oamenii apelează frecvent la improvizații: ard hârtia și cartonul în gospodărie, compostează individual resturile vegetale și depozitează restul deșeurilor în gropi improvizate sau la marginea satului. În mediul urban, unde există servicii municipale, predomină depunerea deșeurilor în tomberoane și, acolo unde sunt disponibile, folosirea containerelor de colectare separată. Diferența de acces și mentalitate impune adoptarea unor strategii distincte de intervenție: în rural, pe lângă extinderea serviciilor, va fi necesară o educație ecologică insistentă pentru a descuraja practicile tradiționale poluante (arderea, aruncarea în natură).
- Probleme percepute și priorități: Întrebați care sunt principalele probleme cauzate de gestionarea deficitară a deșeurilor, cetățenii au indicat, în mod surprinzător, și aspecte precum proliferarea câinilor vagabonzi și a rozătoarelor, legate de prezența gunoiului neridicat. Mirosul neplăcut și poluarea vizuală a localităților sunt de asemenea menționate. Aceste preocupări arată că publicul resimte direct impactul negativ al unui sistem ineficient și, implicit, ar putea susține măsurile de îmbunătățire [6]. Percepțiile populației reflectă atât așteptări ridicate, cât și provocări în schimbarea comportamentelor. Armonizarea europeană nu se referă doar la legi și tehnologie, ci și la adoptarea unei culturi a gestionării durabile a deșeurilor. Este încurajator că majoritatea covârșitoare a cetățenilor susțin eforturile de reciclare și ar accepta un sistem modern chiar cu costuri suplimentare, însă acest capital de încredere trebuie consolidat prin rezultate tangibile: localități mai curate, facilități la

îndemână,containere, centre de colectare, transparență în modul cum sunt utilizați banii publici pentru mediu, și implicarea continuă a publicului în decizii,consultări privind amplasarea facilităților, campanii în școli, etc.. Doar așa, reformele inspirate de modelele UE vor prinde rădăcini solide în societatea moldovenească.

CONCLUZII

Analiza întreprinsă evidențiază faptul că procesul de armonizare europeană acționează ca un factor catalizator pentru transformarea sustenabilă a infrastructurii de gestionare a deșeurilor solide în Republica Moldova. Adopția acquis-ului comunitar de mediu de la norme legislative la ținte de performanță a impus standarde mai înalte și a orientat politicile naționale spre principiile economiei circulare. Ca urmare a acestui proces, în ultimul deceniu s-au înregistrat progrese notabile: cadrul juridic a fost modernizat (Legea deșeurilor 209/2016 și acte subsecvente transpun integral directivele UE), instituindu-se mecanisme precum responsabilitatea extinsă a producătorului și sistemul depozit, menite să stimuleze reciclarea și reducerea poluării. De asemenea, sprijinul financiar al UE și al partenerilor internaționali a facilitat demararea investițiilor strategice în infrastructură, primele platforme regionale de management integrat al deșeurilor, dotarea localităților cu containere și vehicule moderne, închiderea graduală a depozitelor neconforme, iar toate acestea contribuind la îmbunătățirea eficienței operaționale și reducerea impactului ecologic al deșeurilor. Datele analizate confirmă un trend pozitiv: volumul de deșeuri reciclate/valorificate a crescut de peste patru ori comparativ cu acum câțiva ani, iar gradul de acoperire cu servicii de salubrizare este în creștere (atât datorită extinderii serviciilor, cât și mobilizării cetățenilor să participe la sistemul formal).

Cu toate acestea, Republica Moldova nu a atins încă sustenabilitatea deplină în gestionarea deșeurilor, existând în continuare un decalaj considerabil față de obiectivele și practicile medii din UE. Rata de reciclare națională rămâne modestă (sub 20% din deșeurile municipale), majoritatea deșeurilor ajungând încă la gropi de gunoi. Infrastructura, deși în curs de dezvoltare, nu este încă suficientă: sunt necesare mai multe stații de sortare, instalații de compostare și cel puțin 8 depozite regionale conforme pentru a acoperi întreg teritoriul (față de zero existente în prezent). Totodată, capacitatea instituțională trebuie consolidată de la nivel central (agenții specializate pentru deșeuri periculoase, laboratoare de monitorizare, personal suficient pentru inspecții de mediu) până la nivel local (competențe și resurse la primării pentru organizarea serviciilor, aplicarea normelor de colectare separată etc.). Aspectul financiar este și el crucial: tarifele de salubrizare vor trebui ajustate treptat pentru a acoperi costurile unui serviciu modern (depozite ecologice, reciclare), însă într-un mod echitabil și acceptabil social, protejând totodată categoriile vulnerabile.

Un element esențial evidențiat de acest studiu este importanța componentei sociale și educaționale**.** Chiar dacă infrastructura fizică ar fi la standarde europene, sustenabilitatea pe termen lung depinde de comportamentul fiecărui cetățean și agent economic. Sondajul de percepție a arătat că publicul moldovean este receptiv la mesajul european privind un mediu curat, marea majoritate susține colectarea separată și ar agrea noi politici precum sistemul de depozit pentru ambalaje. Această atitudine pozitivă constituie un atu, însă trebuie întreținută prin informare continuă, transparență și implicare. Campaniile de educație ecologică, programele în școli, consultarea comunităților la implementarea proiectelor (de exemplu, la alegerea amplasamentelor pentru noile facilități) vor crește

încrederea publicului și cooperarea acestuia cu autoritățile. Numai cu sprijinul comunității se poate ajunge la schimbări de durată cum ar fi reducerea generării de deșeuri la sursă, participarea la reciclare, raportarea depozitărilor ilegale etc., fără de care sustenabilitatea ar fi dificil de atins.

Integrarea europeană a imprimat sectorului deșeurilor din Republica Moldova o direcție corectă și necesară**,** orientată spre sustenabilitate și responsabilitate. S-au pus bazele legislative și strategice, s-au inițiat proiecte majore de infrastructură și s-a început schimbarea mentalităților în rândul populației. Provocarea următoare constă în implementarea efectivă și accelerată a acestor reforme, astfel încât beneficiile să devină vizibile și cuantificabile: orașe și sate mai curate, un mediu protejat, resurse economisite prin reciclare și noi oportunități de afaceri verzi. Realizarea pe deplin a obiectivelor europene, precum atingerea unui nivel de reciclare de 50-60%, reducerea numărului de gropi poluante la zero și valorificarea majorității deșeurilor va necesita un efort concertat și de durată. Totuși, având în vedere progresele de până acum și sprijinul continuu al UE, există motive întemeiate de optimism că Republica Moldova poate în anii următori să își transforme sistemul de gestionare a deșeurilor într-un model de bună practică pentru regiune**,** demonstrând că armonizarea europeană și dezvoltarea durabilă merg mână în mână.

BIBLIOGRAFIE:

1. LEGEA privind deșeurile, *nr. 209 din 29.07.2016, Monitorul Oficial al RM nr. 459–471/2016.* Chișinău: Parlamentul RM. [Accesat: 10.11.2025]. Disponibil: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=105806&lang=ro.
2. TOMA, V., CORETCHI, B. *Deșeurile ca resurse energetice: provocări și oportunități în economia circulară a Republicii Moldova.* În: Conferința științifică internațională „Promovarea valorilor social-economice în contextul integrării europene", Ediția a 7-a, 6 decembrie 2024, pp. 26–34. Chișinău: Universitatea de Stat din Moldova.
3. IORDACHI, V., POPA, A. Conexiunea Republicii Moldova la politicile UE de mediu în domeniul managementului deșeurilor. *Annals of Spiru Haret University – Economic Series*, nr. 1, 2022. București: Editura Fundației Spiru Haret.
4. BIROUL NAȚIONAL DE STATISTICĂ (BNS) Comerțul internațional cu mărfuri al Republicii Moldova în anul 2023. Comunicat oficial, 16.02.2024. Chișinău: BNS. [Accesat: 18.11.2025]. Disponibil: https://statistica.gov.md/ro/comertul-international-cu-marfuri-al-republicii-moldova-in-luna-9539_60951.html.
5. AGENȚIA DE MEDIU - *Gestionarea deșeurilor în Republica Moldova în anul 2019. Notă analitică, 2020*. Chișinău: Agenția de Mediu. [Accesat: 14.11.2025]. Disponibil: https://am.gov.md/ro/content/gestionarea-deșeurilor-în-republica-moldova-în-anul-2019.
6. MINISTERUL MEDIULUI — *Studiul sociologic privind gestionarea deșeurilor Comunicat de presă,* 06.11.2025. Chișinău: Ministerul Mediului. [Accesat: 18.11.2025]. Disponibil: https://mediu.gov.md/ro/content/5521.
7. RADIO CHIȘINĂU / IPN — *Studiu privind colectarea separată Știre, 06.11.2025. Chișinău: Radio Chișinău.* [Accesat: 23.11.2025]. Disponibil:https://radiochisinau.md/cetatenii-din-moldova-sunt-dispusi-sa-plateasca-mai-mult-pentru-colectarea-separata-deșeurilor---189153.html.

8. EBRD — Better solid waste infrastructure for Moldova Comunicat, 04.01.2023. Londra: EBRD. [Accesat: 23.11.2025]. Disponibil: https://www.ebrd.com/news/2023/better-solid-waste-infrastructure-for-moldova.html.
9. EU4ENVIRONMENT — *Sustainable waste management system Știre,* 18.12.2023. Bruxelles: EU4Environment. [Accesat: 12.11.2025]. Disponibil: https://eu4environment.org/news/development-of-the-sustainable-waste-management-system-in-the-republic-of-moldova.
10. COMISIA EUROPEANĂ — *Raport RM 2024 (Mediu, Deșeuri) Bruxelles:* Comisia Europeană, 2024. [Accesat: 23.11.2025]. Disponibil: https://enlargement.ec.europa.eu/document/download/8587-17b3-f8ef-4514-89fe-54a6aa15ef69_en?filename=Moldova%20Report%202024.pdf.
11. AGENȚIA DE MEDIU — *Gestionarea deșeurilor în Republica Moldova 2019 (SIA MD) Chișinău, 2021*. [Accesat: 23.11.2025]. Disponibil: https://am.gov.md/ro/content/gestionarea-de%C8%99eurilor-%C3%AEn-republica-moldova-%C3%AEn-anul-2019.
12. AGENȚIA DE MEDIU — *Gestionarea deșeurilor în Republica Moldova 2023 Chișinău, 2024.* [Accesat:23.11.2025].Disponibil:https://am.gov.md/sites/default/files/document/attachments/GESTIONAREA%20DE%C8%98EURILOR%20%C3%8EN%20REPUBLICA%20MOLDOVA%20%C3%8EN%20ANUL%202023.pdf.
13. HOTĂRÂREA GUVERNULUI. (2024). *Hotărârea Guvernului nr. 409 din 12 iunie 2024 pentru aprobarea Strategiei de mediu pentru anii 2024-2030*. Monitorul Oficial al Republicii Moldova nr. 325-328, art. 650. Disponibil la https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=144295&lang=ro.
14. MINISTERUL MEDIULUI al Republicii Moldova. (2024). *Ghid metodologic de elaborare a Programelor locale de gestionare a deşeurilor (PLGD)*. Chișinău: Ministerul Mediului. [Accesat: 20.11.2025]. Disponibil la: https://mediu.gov.md/sites/default/files/Documente%20atasate%20Advance%20Pagines/Ghid%20elaborare%20PLGD.pdf.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 101179323.

Disclaimer: Views and opinions expressed are, however, those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the Research Executive Agency (REA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

CZU: 623.746-519:502.1 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.27**

INOVAȚIE PENTRU UN VIITOR VERDE: TEHNOLOGIA UAV MIJLOC DE ÎNVĂȚARE ȘI PROTECȚIE A MEDIULUI

INNOVATION FOR A GREEN FUTURE: UAV TECHNOLOGY AS A TOOL FOR LEARNING AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Serghei PASCARI[1] e-mail: serghei.pascari@usm.md ORCID ID: 0009-0003-2951-2405

[1]Universitatea de Stat din Moldova

Abstract. *This paper presents an extended conceptual, methodological and applied framework for the integration of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) technologies in environmental education. The study explains drone avionics, GNSS principles, real-time data collection, multi-layer UAV communication networks and their contribution to ecological monitoring. A pedagogical model for a demonstrative lesson is proposed, integrating theory, virtual simulations, environmental missions and practical data analysis. The developed methodology enhances students' scientific literacy, sustainable thinking and technological responsibility. The results show that UAV-based educational activities improve understanding of environmental processes and support the formation of a modern STEM-oriented learning culture.*
Keywords: *UAV, avionics, GNSS, sustainability, environmental monitoring.*

Introducere

Tehnologiile UAV au evoluat rapid în ultimul deceniu, devenind instrumente esențiale în cercetare, educație, monitorizarea mediului și dezvoltarea infrastructurilor inteligente. Această tranziție este surprinsă simbolic în Figura 1, unde evoluția de la zmeu (2009) la dronă (2019) reflectă schimbarea paradigmei tehnologice și apariția unei noi culture digitale în rândul tinerilor. Datorită accesibilității sporite a dronelor și funcțiilor avansate – camere multispectrale, LIDAR, GNSS RTK – acestea devin un mijloc eficient de a introduce elevii în domenii interdisciplinare STEM și de a crea conexiuni între tehnologie și responsabilitatea față de mediu [1].



Figura 1. Evoluția aparatelor de zbor ghidate.

Avionica dronelor include ansamblul sistemelor electronice care asigură zborul stabil, navigația și colectarea datelor. Componentele centrale sunt: unitatea de control al zborului, GNSS multi-constelație, senzorii inerțiali IMU, telemetria, camerele optice și multispectrale, precum și sistemele LIDAR montate pe UAV-uri industriale [2, 3].

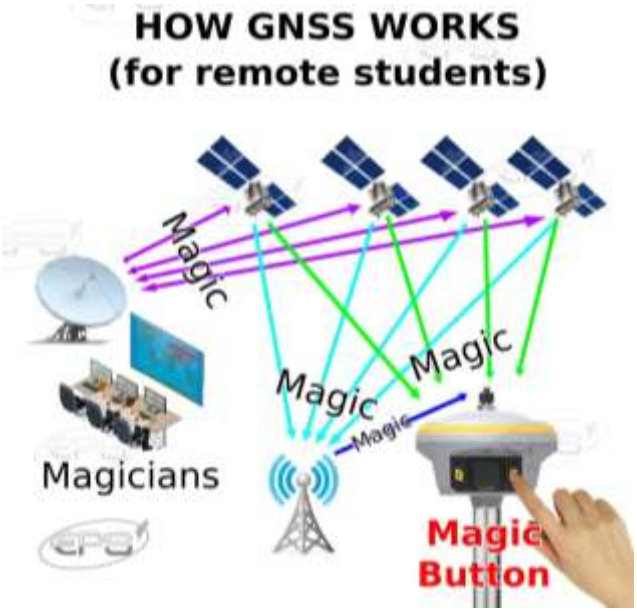


Figura 2. Funcționalitatea GNNS.

Figura 2 prezintă o reprezentare educațională simplificată a funcționării sistemelor GNSS, construită astfel încât să faciliteze înțelegerea conceptelor esențiale de navigație satelitară de către elevi și studenți aflați la început de drum. Ilustrația utilizează analogii intuitive – precum „magicienii" care procesează semnalele sau „butonul magic" al receptorului – pentru a transforma un proces tehnic complex într-un scenariu accesibil și memorabil. Prin această abordare vizuală, elevii pot înțelege ușor că poziționarea GNSS nu este rezultatul unei comenzi directe, ci al măsurării timpilor de propagare a semnalelor transmise simultan de mai mulți sateliți [4, 5]. Astfel, modelul didactic din Figură permite introducerea treptată a noțiunilor fundamentale de trilaterare, explicând cum distanțele față de minimum patru sateliți sunt utilizate pentru determinarea poziției tridimensionale a receptorului. De asemenea, reprezintă un punct de plecare ideal pentru explicarea conceptului de corecții diferențiale (DGPS), evidențiind rolul stațiilor de bază în reducerea erorilor cauzate de ionosferă, multipath sau ceasul sateliților. Aceeași schemă permite o tranziție naturală spre înțelegerea sistemelor RTK (Real-Time Kinematic), unde elevii descoperă modul în care corecțiile transmise în timp real conduc la o acuratețe centimetrică, esențială în cartografiere, topografie și aplicații UAV avansate [6]. Prin urmare, Figura 2 nu servește doar ca ilustrație, ci ca instrument pedagogic care conectează vizual conceptele tehnice cu mecanismele reale ale poziționării satelitare, transformând o temă abstractă într-un proces logic și intuitiv.

MATERIALE ȘI METODĂ

Utilizarea dronelor pentru monitorizarea mediului a devenit esențială în evaluarea ecosistemelor, detectarea anomaliilor ecologice și gestionarea resurselor naturale. Dronele pot colecta date privind calitatea aerului, starea vegetatiei, distribuiția termică a solului și pot detecta focare de incendiu în zone greu accesibile.

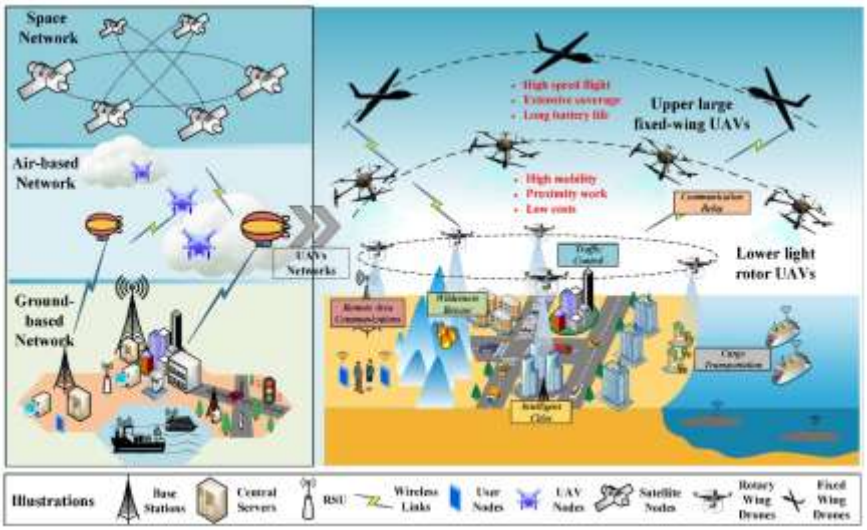


Figura 3. Dronele în rețele multi-strat.

În Figura 3 este prezentat integrarea dronelor în rețele multi-strat (spațiale, aeriene, terestre), relevând rolul lor în infrastructura „intelligent cities", comunicații de urgență și managementul riscurilor.

Astfel de aplicații permit elevilor să înțeleagă legătura directă dintre tehnologie și protejarea mediului, favorizând formarea unei gândiri orientate spre durabilitate, conform obiectivelor educației verzi [7].

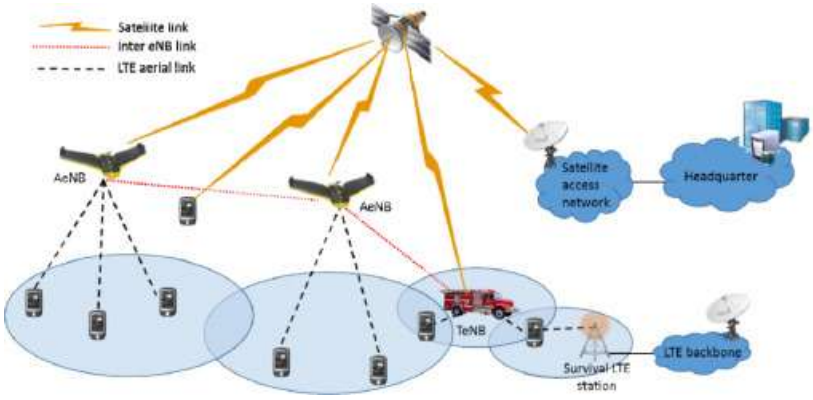


Figura 4. Integrarea UAV-urilor în nodurilor aeriene în rețelele terestre, macrocelule și backhaul satelitar.

Rețelele moderne UAV, prezentate în Figura 4, se bazează pe integrarea nodurilor aeriene în rețelele terestre, macrocelule și backhaul satelitar. Dronele pot funcționa ca stații de bază temporare în zone calamitate, extinzând acoperirea GSM sau stabilind comunicații de urgență. Acest model este relevant în contextul educațional, permițând elevilor să înțeleagă rolul dronelor în telecomunicații, tehnologii 5G/6G și scenarii de intervenție în caz de dezastre naturale [8, 9].

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Modelul educațional propus a fost aplicat în cadrul activităților demonstrative și a generat o serie de rezultate relevante privind formarea competențelor tehnice și ecologice ale elevilor.

Cele patru etape majore ale programului – prezentarea dronei, simulările de zbor, planificarea misiunilor și analiza datelor – au contribuit complementar la dezvoltarea unei înțelegeri interdisciplinare, integrând concepte de inginerie, științele mediului și responsabilitate socială.



Figura 5. Prezentarea dronei și a componentelor avionice.

Prima etapă a vizat familiarizarea elevilor cu structura și funcționalitatea unei dronelor (Figura 5). Participanții au identificat componentele avionice principale – modulul GNSS, unitatea IMU, sistemele de telemetrie, camerele multispectrale și mecanismele de stabilizare. Activitatea a condus la creșterea semnificativă a înțelegerii modului în care aceste elemente interacționează pentru a asigura un zbor stabil și o colectare eficientă a datelor. Observațiile elevilor au arătat că explicarea pe modele reale, însoțită de demonstrații și analogii intuitive, facilitează asimilarea noțiunilor complexe de navigație și control [9].

În a doua etapă, elevii au utilizat simulatoare specializate pentru a reproduce zboruri în medii virtuale, eliminând riscurile asociate operării reale a dronelor (Figura 6). Simulările au permis exersarea manevrelor de bază, înțelegerea conceptelor de altitudine, viteză, direcție și orientare spațială, precum și familiarizarea cu setarea waypoint-urilor. Această abordare a contribuit la dezvoltarea abilităților motrice, dar și la consolidarea reflexelor de siguranță, întrucât elevii au putut analiza scenarii de pierdere a semnalului, interferență GNSS sau erori de pilotare. Rezultatele au arătat că simularea reprezintă o etapă esențială în procesul formativ, crescând încrederea și competența operatorilor începători [10, 11].



Figura 6. Simulări de zbor și dezvoltarea orientării spațiale și planificarea misiunilor ecologice.

A treia etapă a constat în proiectarea unei misiuni reale de monitorizare a mediului (Figura 6). Elevii au definit parametri precum: altitudinea optimă de zbor, traseul, rezoluția spațială dorită și tipul senzorilor necesari (RGB, infraroșu apropiat, camere multispectrale pentru NDVI). Procesul a stimulat gândirea critică și capacitatea de luare a deciziilor fundamentate pe obiective științifice [12]. De asemenea, elevii au înțeles importanța respectării reglementărilor aeriene, inclusiv distanțele minime față de zone locuite, responsabilitatea privind protejarea faunei și gestionarea riscurilor. Această activitate a demonstrat aplicabilitatea directă a tehnologiei UAV în evaluarea vegetației, detectarea stresului hidric sau identificarea zonelor afectate de degradare [13]. Ultima etapă a avut un rol central în procesul educațional, deoarece elevii au analizat datele obținute în urma misiunilor simulate sau reale. Prelucrarea imaginilor NDVI, compararea canalelor RGB–IR și interpretarea hărților tematice au permis identificarea zonelor cu stres hidric, a diferențelor de densitate a vegetației sau a anomaliilor termice. Elevii au învățat să utilizeze software-uri de analiză fotogrammetrică și GIS, dobândind competențe practice de interpretare a datelor geospațiale. Această etapă a consolidat în mod direct responsabilitatea ecologică, evidențiind modul în care tehnologia poate contribui la luarea deciziilor informate privind protecția mediului [14, 15]. Aplicarea modelului educațional a demonstrat că integrarea dronelor în procesul de predare crește semnificativ implicarea și motivația elevilor. Observațiile și feedback-ul obținut au evidențiat faptul că activitățile practice, susținute de resurse vizuale și scenarii reale, contribuie la formarea unei gândiri interdisciplinare moderne. Elevii au perceput dronele nu doar ca instrumente tehnologice, ci ca elemente utile în evaluarea și protejarea mediului, ceea ce confirmă potențialul educației pentru drone în promovarea dezvoltării durabile.

CONCLUZII

Rezultatele obținute în cadrul acestui studiu demonstrează că integrarea tehnologiei UAV în procesul educațional reprezintă o abordare inovatoare și eficientă pentru formarea competențelor interdisciplinare ale elevilor. Prin îmbinarea elementelor de avionică, navigație satelitară, planificare de misiuni și analiză geospațială, modelul pedagogic propus contribuie la dezvoltarea unei înțelegeri profunde a relației dintre tehnologie și mediul înconjurător. Activitățile practice desfășurate – de la prezentarea componentelor dronei până la interpretarea imaginilor multispectrale – au evidențiat capacitatea UAV-urilor de a transforma noțiunile teoretice în experiențe de învățare reale, intuitive și memorabile. Elevii au demonstrat o creștere vizibilă a motivației, implicării și responsabilității față de mediul natural, confirmând impactul pozitiv al educației orientate spre sustenabilitate. De asemenea, rezultatele arată că utilizarea dronelor facilitează formarea abilităților specifice domeniilor STEM, precum gândirea critică, rezolvarea problemelor, analiza datelor și luarea deciziilor informate. Prin expunerea la tehnologii de ultimă generație – GNSS, LIDAR, camere multispectrale, software de fotogrammetrie – elevii își dezvoltă o perspectivă modernă asupra rolului tehnologiei în societate și sunt încurajați să exploreze cariere în știință, inginerie și protecția mediului. În ansamblu, studiul confirmă că educația pentru drone poate servi drept catalizator în formarea unei generații conștiente, responsabile și capabile să contribuie activ la dezvoltarea durabilă. Implementarea continuă a acestor activități în școli și centre de instruire va consolida atât cultura tehnologică, cât și capacitatea tinerilor de a răspunde provocărilor ecologice ale viitorului.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE:

1. AUSTIN, Reg. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. John Wiley & Sons, 2011.
2. COLOMINA, I., M., Pere. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. In: ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 2014, vol. 92, no., pp. 79-97.
3. NEX, F., REMONDINO, F. UAV for 3D mapping applications: a review. In: Applied geomatics, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 1-15.
4. GYAGENDA, Nasser, et. al. A review of GNSS-independent UAV navigation techniques. In: Robotics and Autonomous Systems, 2022, vol. 152, no. p. 104069.
5. TURNER, D., LUCIEER, Ar., WATSON, Chr. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. In: Remote sensing, 2012, vol. 4, no. 5, pp. 1392-1410.
6. CZYŻA, S., et. al. Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (uav) pose estimation with the real-time kinematic (rtk) method on the example of dji matrice 300 rtk. In: Sensors, 2023, vol. 23, no. 4, p. 2092.
7. LEE, D., LA WOONG, G., KIM, H. Drone detection and identification system using artificial intelligence. In: 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2018. IEEE.
8. ZHOU, Y., RAO, B., WANG, W. UAV swarm intelligence: Recent advances and future trends. In: Ieee Access, 2020, vol. 8, no. pp. 183856-183878.
9. RÁBAGO, Jordi, PORTUGUEZ-CASTRO, May. Use of drone photogrammetry as an innovative, competency-based architecture teaching process. In: Drones, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 187.
10. BAI, Ou, et. al. Drones in education: A critical review. In: Turkish Journal of Computer and Mathematics Education, 2021, vol. 12, no. 11, pp. 1722-1727.
11. PERGANTIS, P., DRIGAS, A. The effect of drones in the educational Process: A systematic review. In: Education Sciences, 2024, vol. 14, no. 6, p. 665.
12. NAEEM, Wasif, et. al. The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2008, vol. 222, no. 2, pp. 67-79.
13. WIERSMA, G. Bruce. Environmental monitoring. CRC press, 2004.
14. BÎRSAN, A., SPRINCEAN, V., GANEA, I. Oportunități de utilizare în practică a tehnologiilor inteligente în evaluarea unor variabile biologice. In: Studia Universitatis Moldaviae (Seria Ştiinţe Reale şi ale Naturii), 2023, vol. 171, no. 1, pp. 53-64.
15. BÎRSAN, A., SPRINCEAN, V. Utilizarea tehnologiilor avansate bazate pe aplicarea dronelor în evaluarea agrocenozelor. În: Integrare prin cercetare și inovare. 2023.

ACKNOWLEDGMENT

Acest articol este elaborat în cadrul proiectului pentru tineri cercetători pe anii 2025-2026, cifrul 25.80012.0807.25TC „Mediu sustenabil prin educația pentru drone''.

CZU: 629.735.45:004.94:37:504 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.28**

MODELARE ȘI EDUCAȚIE PENTRU UN MEDIU SUSTENABIL PRIN TEHNOLOGIA UAV

MODELING AND EDUCATION FOR A SUSTAINABLE ENVIRONMENT THROUGH UAV TECHNOLOGY

Anton DANICI[1] e-mail: adanici@gmail.com ORCID ID:0000-0003-2791-7612

[1]Universitatea de Stat din Moldova

Abstract*. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become fundamental elements in building a digital and sustainable future. This article explores both analytical models and software tools used for the design and numerical simulation of UAV systems, highlighting how these technologies can be integrated into educational processes to support sustainable development. By combining skills in mathematical modeling, systems engineering, and automatic control with a responsible approach to resource use, the application of UAVs in education offers the opportunity to cultivate a technology-oriented mindset focused on sustainability, while also promoting analytical, interdisciplinary skills and ecological awareness.*
Keywords: *UAV, analytical modeling, numerical simulation, STEM education, sustainability, green technology.*

Introducere

Vehiculele aeriene fără pilot (UAV – *Unmanned Aerial Vehicles*) s-au consolidat în ultimul deceniu ca tehnologii-cheie în multiple domenii, incluzând cercetarea științifică, monitorizarea mediului, agricultura de precizie, inspecțiile industriale și managementul dezastrelor naturale [1]. Aceste platforme oferă avantaje semnificative, precum colectarea rapidă de date în timp real, flexibilitate operațională și reducerea costurilor față de metodele tradiționale de observare și analiză. În paralel, nevoia tot mai mare de educație orientată spre sustenabilitate și formarea competențelor digitale a determinat integrarea tehnologiilor emergente în curricula școlară și universitară (UNESCO, 2020). Tehnologia UAV se află la intersecția dintre inovație, educație și protecția mediului, reprezentând o punte între teoria academică și aplicațiile practice. Prin utilizarea dronelor în activități educaționale, studenții și elevii pot dobândi competențe tehnice complexe, inclusiv modelare matematică, simulare numerică, control automat și analiză a datelor, concomitent cu dezvoltarea conștientizării ecologice și a responsabilității tehnologice. Această abordare permite crearea unor programe interdisciplinare care integrează ingineria, știința mediului și educația digitală, contribuind la formarea unei gândiri sistemice orientate spre sustenabilitate. Prezentul articol își propune să analizeze relația dintre modelele analitice ale sistemelor UAV, simulările numerice și aplicabilitatea acestora în educație, cu accent pe formarea competențelor pentru un viitor durabil. Printr-o abordare combinată, care include teoria modelării, simularea și aplicarea practică în proiecte educaționale, se urmărește evidențierea modului în care UAV-urile pot deveni instrumente esențiale în pregătirea unei noi generații de specialiști capabili să implementeze tehnologii inovatoare în mod responsabil și sustenabil. În plus, articolul examinează provocările asociate implementării UAV-urilor în educație, precum infrastructura tehnică, reglementările de siguranță și adaptarea curriculumului, oferind recomandări pentru integrarea eficientă a acestor tehnologii în programele de învățare.

Modele analitice și simularea numerică pentru educație și sustenabilitate în UAV

Modelarea analitică reprezintă fundamentul înțelegerii și proiectării sistemelor UAV. Aceasta se bazează pe ecuațiile mișcării unui corp rigid în spațiul tridimensional, care descriu interacțiunile dintre forțele aerodinamice, momentele de rotație și mecanismele de control [2]. Modelul cinematic stabilește relația dintre poziție, orientare și viteză, în timp ce modelul dinamic evidențiază influența forțelor externe, a momentelor aerodinamice și a sistemelor de propulsie asupra comportamentului UAV. Controlul automat, implementat prin algoritmi precum PID, LQR sau MPC, asigură stabilitatea și precizia traiectoriei. Linearizarea ecuațiilor în jurul punctelor de echilibru permite analiza stabilității și proiectarea unor legi de control eficiente, adaptabile la diverse misiuni și condiții de zbor. Simularea numerică completează modelarea analitică, oferind un mediu sigur pentru testarea și optimizarea performanțelor UAV-urilor înainte de implementarea fizică. Platformele software, precum MATLAB/Simulink, Gazebo sau ROS, permit analizarea comportamentului UAV-urilor în scenarii complexe, inclusiv interacțiunea cu medii variabile și gestionarea sarcinilor dinamice. Simulările numerice sprijină evaluarea energiei consumate, a eficienței propulsiei și a impactului ecologic, facilitând astfel proiectarea sistemelor UAV sustenabile. Din perspectiva educațională, integrarea modelelor analitice și a simulărilor numerice în curriculum oferă studenților și elevilor oportunitatea de a dezvolta competențe STEM, gândire critică și abilități de rezolvare a problemelor. Activitățile practice, care combină simulările cu zborul efectiv al dronelor, permit înțelegerea principiilor aerodinamicii, controlului automat și prelucrării datelor. În plus, includerea UAV-urilor în proiecte de monitorizare a mediului, cartografiere a terenurilor sau agricultură de precizie ajută la conștientizarea impactului tehnologiilor asupra mediului și la formarea unei mentalități sustenabile. Astfel, UAV-urile devin instrumente multifuncționale: nu doar pentru proiectarea și testarea sistemelor tehnologice, ci și pentru educație interdisciplinară și promovarea sustenabilității. Modelele analitice și simulările numerice permit predarea interactivă, contribuind la formarea unei noi generații de specialiști capabili să implementeze tehnologii UAV eficiente, sigure și prietenoase cu mediul.

Simularea numerică, instrumentele software și aplicațiile ecologice ale UAV-urilor

Simularea numerică constituie un instrument esențial pentru proiectarea, testarea și optimizarea sistemelor UAV, permițând evaluarea performanțelor înainte de implementarea fizică. Printre cele mai utilizate platforme software se numără:

- **MATLAB/Simulink**, pentru modelarea completă a sistemelor dinamice și implementarea algoritmilor de control [4];
- **Gazebo** și **ROS (Robot Operating System)**, platforme open-source pentru simulare 3D și control în timp real [5];
- **X-Plane** și **FlightGear**, simulatoare de zbor profesionale pentru validarea modelelor aerodinamice;
- **ANSYS Fluent** și **OpenFOAM**, utilizate pentru analiza fluxurilor și optimizarea formelor aerodinamice.

Un exemplu concret de aplicare este simularea unui UAV quadcopter destinat monitorizării calității aerului. Prin integrarea senzorilor virtuali și a algoritmilor de control, se pot analiza traiectorii eficiente energetic și se poate evalua impactul asupra mediului, contribuind astfel la dezvoltarea unor sisteme UAV sustenabile. Din perspectivă educațională și ecologică, UAV-urile pot fi utilizate în proiecte

interdisciplinare care combină tehnologia, știința datelor și protecția mediului. Un model de proiect ecologic ar putea include următoarele etape:

1. **Definirea obiectivelor** – de exemplu, monitorizarea calității aerului, identificarea zonelor cu vegetație degradată sau detectarea poluanților în corpuri de apă.
2. **Modelarea și simularea UAV-ului** – folosind MATLAB/Simulink sau Gazebo pentru a stabili traiectorii eficiente și a integra senzorii virtuali.
3. **Implementarea algoritmilor de control** – PID, LQR sau MPC pentru menținerea stabilității și optimizarea zborului.
4. **Colectarea și analiza datelor** – datele simulate sau reale sunt procesate cu instrumente de analiză (Python, R, GIS) pentru interpretarea impactului ecologic [7].
5. **Evaluarea sustenabilității** – compararea diferitelor strategii de zbor pentru minimizarea consumului energetic și a impactului asupra mediului [8].
6. **Integrarea în educație** – studenții și elevii pot învăța atât conceptele teoretice de aerodinamică și control, cât și aplicarea practică în protecția mediului. Prin combinarea simulării numerice, modelelor analitice și proiectelor ecologice, UAV-urile devin instrumente educaționale puternice. Ele permit dezvoltarea competențelor STEM, gândirii critice și responsabilității ecologice, transformând activitățile practice într-o punte între tehnologie și sustenabilitate [9, 10].

Educație și sustenabilitate prin tehnologia UAV

Vehiculele aeriene fără pilot (UAV) reprezintă tehnologii emergente cu impact major asupra educației orientate spre sustenabilitate. Integrarea UAV-urilor în curricula școlară și universitară sprijină dezvoltarea competențelor STEM (știință, tehnologie, inginerie și matematică) și, simultan, conștientizarea problemelor de mediu [3]. Studiile recente indică faptul că implicarea elevilor și studenților în activități practice cu drone îmbunătățește vizualizarea spațială, gândirea computațională și abilitățile de rezolvare a problemelor, prin combinarea zborului UAV, programării, analizei de date și geometriei aplicate [4]. Revizuirile sistematice arată că învățarea prin UAV este motivantă și implicativă, facilitând înțelegerea aprofundată a conceptelor STEM, cooperarea și dezvoltarea gândirii critice [Ibidem]. Workshop-urile bazate pe UAV au demonstrat că elevii și studenții înțeleg mai bine conținutul teoretic și pot aplica conceptele în contexte practice, existând o corelație semnificativă între utilizarea platformelor tehnologice și învățarea semnificativă [Ibidem]. Din perspectiva sustenabilității, UAV-urile permit implicarea directă a elevilor în activități precum monitorizarea mediului, cartografierea, colectarea datelor asupra ecosistemelor sau agricultura de precizie, transformând dronele în instrumente educaționale și ecologice. Programe precum „Smart and Sustainable Aviation” combină educația UAV cu obiective de dezvoltare durabilă, prin colaborări între mediul academic și industrie în domenii precum logistică, agricultură, silvicultură și securitate [5]. Implementarea UAV-urilor în educație presupune însă provocări, inclusiv formarea cadrelor didactice, asigurarea infrastructurii tehnice, respectarea reglementărilor de siguranță și integrarea activităților în curriculum astfel încât să fie relevante și accesibile tuturor nivelurilor de studiu. Bolick et al. (2022) arată că modulele online despre UAV și teledetecție sporesc familiaritatea studenților cu subiectele, dar accesul la hardware-ul fizic rămâne o barieră [6]. Astfel UAV-urile reprezintă instrumente valoroase pentru educație, facilitând dezvoltarea competențelor STEM, gândirii critice și conștiinței ecologice.

Proiectele educaționale pot include monitorizarea parametrilor de mediu, planificarea zborurilor autonome și analiza datelor colectate prin inteligență artificială, consolidând UAV-urile ca punți între tehnologie, educație și protecția mediului.

Concluzii

Modelarea și simularea numerică a sistemelor UAV constituie instrumente esențiale pentru proiectarea și optimizarea tehnologiilor aeriene moderne, cu un accent clar pe eficiență energetică și sustenabilitate. Prin dezvoltarea de modele matematice riguroase și implementarea simulărilor numerice, se pot analiza și anticipa comportamentele dinamice ale dronelor, permițând optimizarea parametrilor de zbor și reducerea impactului asupra mediului. Integrarea acestor metode în cadrul procesului educațional facilitează achiziția de competențe tehnice avansate, precum controlul automat, modelarea aerodinamică și analiza sistemelor complexe, concomitent cu cultivarea unei conștiințe ecologice și a unei abordări sustenabile în inginerie. Utilizarea dronelor ca resurse didactice permite dezvoltarea de programe interdisciplinare care combină ingineria, știința datelor și educația ecologică, contribuind astfel la formarea unei noi generații de specialiști capabili să dezvolte soluții inovatoare și responsabile din punct de vedere tehnologic și ecologic. Prin aceste abordări, tehnologia UAV nu servește doar cercetării și industriei, ci devine un vector educațional și științific pentru promovarea sustenabilității și a inovării în societatea contemporană.

Referințe:

1. ANDERSON, J.D. *Introduction to flight* (9th ed.). McGraw-Hill Education, 2020.
2. BOUABDALLAH, S. *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying* [Doctoral dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne]. EPFL Press, 2007.
3. European Commission. *Education for sustainable development goals: Learning objectives.* UNESCO Publishing, 2020.
4. MATHEWS, J., SMITH, R. *Numerical methods using MATLAB* (5th ed.). Prentice Hall, 2021.
5. ROS Documentation. *Robot operating system tutorials.* Retrieved from https://www.ros.org/, 2024.
6. BOLICK, M. M., MIKHAILOVA, E. A., POST, C. J. Teaching innovation in STEM education using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Education Sciences*, 12(3), 2022. 224 p. https://doi.org/10.3390/-educsci12030224 (MDPI)
7. SHADIEV, R., YI, S. A systematic review of UAV applications to education. *Interactive Learning Environments*. Advance online publication, 2022. https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2028858 (OUCI).
8. YEUNG, R. C. Y., SUN, D., YEUNG, C. H. Integrating drone technology in STEM education: Curriculum, pedagogy and learning outcomes. *Education and Information Technologies*, 30, 2025, pp.14237-14272. https://doi.org/10.1007/s10639-025-13368-0 (SpringerLink).
9. MARZUKI, O. F., TEO, E. Y. L., ABDULLAH, W. N. Z. Z., KHAIRUDDIN, N., INAI, N. H., SAAD, J. M., AZIZ, M. H. A., ASMAWI, N. N. M. Drone STEM education: Revolutionizing learning for the future. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 14(1), 2025, pp. 1416-1433. https://doi.org/10.6007/IJARPED/v14-i1/24763 (hrmars.com).
10. ABD RAHMAN, M. J. B., HASHIM, H. B. N., ENSIMAU, N. K., ABD MAJID, M. Z. Application of drone technology in learning process strategies. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 14(8), 2023. https://doi.org/10.6007/IJARBSS/v14-i8/22447 (hrmars.-com).

ACKNOWLEDGMENT

Acest articol este elaborat în cadrul proiectului pentru tineri cercetători pe anii 2025-2026, cifrul 25.80012.0807.25TC ,,Mediu sustenabil prin educația pentru drone''.

CZU: 528.8:631.147:004.6 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.29**

COMPARAREA SENZORILOR MULTISPECTRALI (MICASENSE, PARROT SEQUOIA, SENTERA) ȘI ELABORAREA UNEI BAZE CALIBRATE DE IMAGINI

COMPARISON OF MULTISPECTRAL SENSORS (MICASENSE, PARROT SEQUOIA, SENTERA) AND DEVELOPMENT OF A CALIBRATED IMAGE DATABASE

Valentina TÎRȘU[1] email: valentina.tirsu@tse.utm.md ORCID ID: 0000-0002-1726-792X
Alisa MAȘNIC[2] email: alisa.masnic@tlc.utm.md ORCID ID: 0000-0001-9202-7144
Nelea MANIN[3] email: nelea.manin@tse.utm.md ORCID ID: 0009-0009-7651-8475

[1,2,3]Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract. *In precision agriculture, multispectral images collected by drones represent an essential source of information for assessing plant health, chlorophyll content, water stress, and crop productivity. However, the quality and comparability of these data largely depend on the characteristics of the sensors used, such as spectral sensitivity, radiometric calibration, spatial resolution, and stability under variable lighting conditions. The aim of the project is the comparative evaluation of the performance of multispectral sensors (MicaSense, Parrot Sequoia, Sentera) in collecting data over the same agricultural areas and the development of a calibrated database containing radiometrically and spectrally standardized images.*
Keywords: *Multispectral images; multispectral sensors; vegetation indices; pseudo-image; histogram.*

Introducere

Originile agriculturii de precizie pot fi urmărite începând cu anii 1980, perioadă în care au fost introduse primele aplicații bazate pe senzori pentru evaluarea proprietăților fizice ale solului și ale biomasei. Ulterior, aceste tehnici au cunoscut o diversificare semnificativă, incluzând în prezent imagini satelitare, imagini aeriene obținute cu avioane sau drone, precum și echipamente terestre specializate pentru determinarea poziționării [1]. Pentru valorificarea optimă a informațiilor provenite din domeniul multispectral, a fost dezvoltat un set extins de indici de vegetație [2], care permit evaluarea stării vegetative a culturilor agricole. Acești indici contribuie la identificarea timpurie a stresului biotic și abiotic, facilitând luarea unor decizii informate privind intervențiile agricole. În plus, integrarea lor în sistemele moderne de monitorizare contribuie la îmbunătățirea eficienței gestionării resurselor și la creșterea sustenabilității producției agricole. Indicele de Diferență a Vegetației (DVI) este unul dintre cei mai simpli indici de vegetație, fiind bazat pe diferența dintre reflectanța în banda infraroșu apropiat și cea în banda roșie. Vegetația sănătoasă reflectă mai mult în infraroșu și mai puțin în roșu, ceea ce conduce la valori ridicate ale indicelui. DVI este util pentru a distinge zonele acoperite de vegetație de cele lipsite de vegetație. Raportul Simplu (SR) reprezintă raportul dintre reflectanța în infraroșu apropiat și reflectanța în banda roșie. Acest indice evidențiază vegetația prin valori ridicate și reduce influențele umbrei și ale împrăștierii atmosferice. SR este frecvent utilizat pentru a evalua densitatea și dezvoltarea vegetației dintr-o anumită zonă. Indicele Normalizat de Diferență a Vegetației (NDVI) este unul dintre cei mai răspândiți indici de vegetație, datorită modului său de calcul care normalizează diferențele de reflectanță și minimizează efectele condițiilor de iluminare. NDVI oferă informații clare despre starea și vigoarea vegetației, fiind un instrument esențial în monitorizarea culturilor și a ecosistemelor [10].



Figura 1. Parcelă agricolă și pseudo-imaginea NDVI corespunzătoare.

Valorile indicelui NDVI se situează în intervalul -1 până la 1. Acest indice oferă informații relevante privind densitatea și vigoarea vegetației și contribuie la reducerea influențelor topografice asupra interpretării datelor. Totodată, NDVI permite separarea clară între suprafețele vegetale și cele lipsite de vegetație, precum solul sau alte substraturi. Valori apropiate de 1 indică prezența unei vegetații sănătoase și bine dezvoltate, în timp ce solul expus prezintă, în mod tipic, valori cuprinse între 0,1 și 0,2. Valorile negative sau apropiate de -1 sunt specifice bazinelor acvatice. Calculul indicelui normalizat de diferență a vegetației este relativ simplu și urmează scala ilustrată în figura 1. Utilizarea NDVI reprezintă o metodă eficientă pentru cuantificarea vegetației verzi și pentru evaluarea stării acesteia, întrucât se bazează pe diferențele de reflectanță ale plantelor la anumite lungimi de undă ale radiației electromagnetice. Domeniul de variație al NDVI rămâne același, între -1 și 1. Valorile negative indică prezența apei, cele apropiate de zero (aproximativ -0,1 până la 0,1) caracterizează suprafețe precum roca, nisipul sau zăpada, iar valorile pozitive reduse sunt asociate vegetației rare, precum arbuștii și pajiștile (0,2–0,4). Valorile ridicate, apropiate de 1, sunt caracteristice formațiunilor forestiere dense, precum pădurile.

Crearea bazei de imagini calibrate

Procesul de construire a unei baze multispectrale standardizate presupune parcurgerea mai multor etape esențiale: captarea imaginilor în condiții controlate, calibrarea radiometrică și geometrică, generarea indicilor de vegetație și organizarea metadatelor într-un sistem coerent. Importanța acestor etape este prezentată pe larg în literatura de specialitate, în special în lucrările axate pe teledetecție agricolă și prelucrarea imaginii multispectrale [1], [3], [6]. În practică, întregul flux începe chiar din teren, în momentul în care drona se ridică și surprinde primele cadre ale culturilor. Orice diferență de lumină, un unghi nepotrivit sau o setare greșită poate afecta precizia rezultatelor finale, motiv pentru care fiecare captură este tratată cu grijă [4], [7]. În etapa de calibrare, imaginile trec printr-un proces atent de corectare, unde valorile brute sunt transformate în informații reale despre modul în care plantele reflectă lumina. Este un pas tehnic, dar esențial, pentru că doar astfel imaginea capătă un sens dincolo de ceea ce se vede la suprafață [3], [6]. Ulterior, datele sunt ordonate și structurate, astfel încât fiecare imagine să își găsească locul potrivit în sistem. Indicii de vegetație sunt generați și adăugați în baza de date, iar metadatele—coordonate GPS, momentul capturii, senzorul folosit—sunt asociate fiecărui fișier, asemenea unei cărți de identitate care spune povestea imaginii [5], [9]. Pe măsură ce toate aceste elemente sunt reunite, baza de date capătă formă.

Dincolo de aspectul tehnic, ea devine o hartă inteligentă a terenului, un tablou digital în care fiecare pixel are un rol și fiecare valoare reflectă starea reală a culturilor. Astfel, procesul nu este doar o succesiune de pași tehnici, ci o reconstrucție fidelă a realității din câmp, transpusă în date care pot fi analizate, comparate și interpretate cu precizie [1], [9].

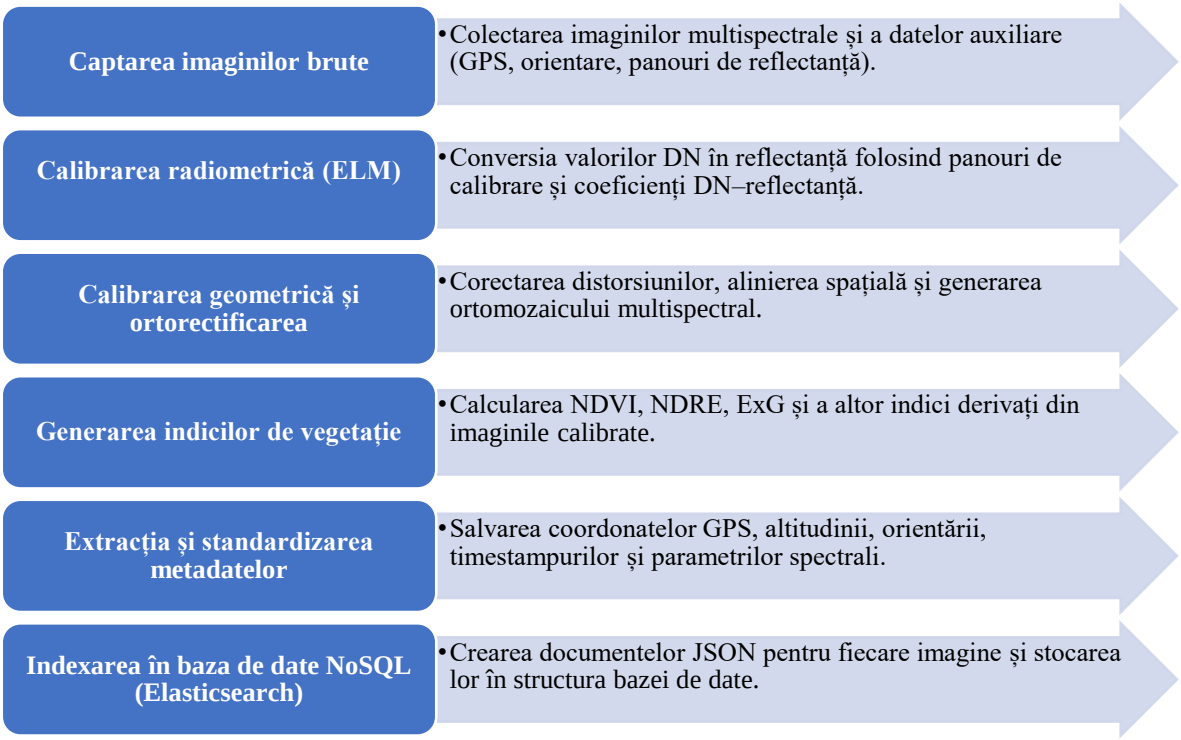


Figura 2. Fluxul de pregătire a imaginilor pentru baza de date.
Sursa: elaborată de autori

Figura prezintă lanțul complet de procesare prin care o imagine multispectrală trece înainte de a ajunge în baza de date. Procesul începe cu achiziția imaginilor brute împreună cu toate informațiile auxiliare necesare. Aceste date sunt apoi corectate radiometric și geometric pentru a obține o reprezentare fidelă a realității din teren. După calibrare, din imaginile procesate sunt generați indicii de vegetație care dezvăluie starea culturilor. În paralel, toate metadatele sunt extrase, standardizate și pregătite pentru stocare. Fluxul se încheie prin indexarea fiecărui element — imagini, indici și metadate — în baza de date Elasticsearch, unde devin ușor de căutat, analizat și vizualizat.

Calibrarea radiometrică este etapa prin care valorile brute înregistrate de senzor (DN) sunt convertite în reflectanță spectrală, pentru a permite compararea imaginilor obținute în condiții diferite de iluminare sau cu senzori diferiți — un principiu documentat în mod detaliat în literatura recentă. În acest studiu a fost utilizată metoda **Empirical Line Method (ELM)**, care stabilește o relație directă DN–reflectanță pe baza panourilor de calibrare fotografiate înainte și după zbor [3], [4], [6], [7].

Procesul include trei pași principali: (1) captarea panourilor de reflectanță cu valori spectrale cunoscute; (2) determinarea funcției de regresie DN–reflectanță pentru fiecare bandă spectrală; (3) aplicarea coeficienților obținuți tuturor pixelilor pentru generarea imaginilor calibrate în format TIFF. Rezultatul este un set de imagini standardizate, compatibile între senzori și sesiuni de zbor diferite, pregătite pentru calculul indicilor de vegetație și pentru integrarea în baza de date Elasticsearch.

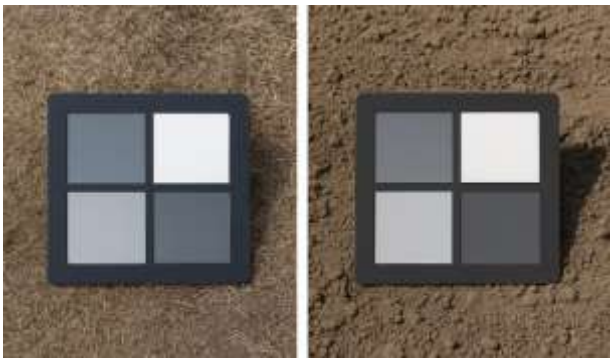


Figura 3. Panourile de reflectanță utilizate în calibrare.

Figura prezintă panourile de calibrare în nuanțe alb, gri și negru utilizate în procesul de corecție radiometrică. Aceste panouri sunt fotografiate în aceleași condiții de iluminare ca imaginile din teren, oferind referințe stabile pentru calcularea coeficienților de conversie DN–reflectanță.

Calibrarea geometrică este etapa în care imaginile multispectrale sunt corectate din punct de vedere spațial, astfel încât fiecare pixel să corespundă exact poziției sale reale din teren, un proces bine documentat în studiile privind fotogrammetria multispectrală UAV [6]. Deoarece imaginile brute pot prezenta distorsiuni cauzate de lentilă, mișcarea dronei, altitudine variabilă sau unghiuri de captare diferite, această prelucrare este esențială pentru a obține produse cartografice fiabile.

Pentru realizarea corecțiilor au fost utilizate trei aplicații specializate: PIX4Dfields, PIX4Dmapper și ArcGIS Pro. În PIX4D, imaginile sunt procesate pentru:

- corectarea distorsiunilor optice ale camerei,
- ajustarea poziției imaginii folosind datele GPS din metadate,
- compensarea variațiilor de altitudine și orientare,
- reconstruirea suprafeței terenului prin puncte-cheie și nori de puncte,
- generarea unui ortomozaic multispectral georeferențiat.

Ortomozaicul rezultat este un strat spațial uniform, în care distorsiunile au fost eliminate, iar fiecare pixel este aliniat la coordonatele sale reale, lucru esențial pentru suprapunerea cu alte date GIS sau cu imagini satelitare precum Sentinel-2.



Figura 4. Ortomozaic multispectral.

Cele două imagini arată aceeași parcelă agricolă, surprinsă din dronă. În fotografia din stânga, rândurile de cultură sunt clare și bine aliniate, culorile sunt uniforme, iar scena pare mai ordonată — semn că imaginea a fost deja procesată. În schimb, imaginea din dreapta păstrează aspectul „brut": este mai contrastată, unele rânduri par ușor deformate, iar iluminarea nu este uniformă. Privite împreună, fotografiile arată foarte bine diferența dintre o captură inițială și versiunea corectată geometric.

După finalizarea calibrării radiometrice și geometrice, imaginile multispectrale sunt procesate pentru a **extrage indici de vegetație** relevanți pentru analiza sănătății culturilor. Acești indici se bazează pe raporturi între diferite benzi spectrale și permit evidențierea variațiilor fiziologice ale plantelor mult mai bine decât imaginile RGB tradiționale.

În acest studiu au fost generați următorii indici:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – cel mai utilizat indice pentru evaluarea vigorii vegetației și diferențierea zonelor sănătoase de cele afectate. Unul dintre cei mai vechi și importanți indici, introdus și analizat extensiv în lucrări clasice [2], respectiv revizuit în analize recente [8].
- NDRE (Normalized Difference Red Edge) – sensibil la variațiile de clorofilă și eficient în etapele târzii de creștere, când NDVI se poate satura [1], [9].
- GNDVI (Green NDVI) – util pentru evaluarea nivelului de azot și a densității coronamentului [1], [9].
- Excess Green (ExG) – folosit de senzorii Sentera pentru detecția buruienilor și a vegetației neuniforme [9].
- VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) – rezistent la variațiile de iluminare, ideal pentru scene captate în condiții atmosferice schimbătoare, aspect confirmat în literatura tehnică [4], [7].

Figura 5 prezintă trei dintre cei mai relevanți indici rezultați în urma procesării multispectrale. Harta NDVI evidențiază diferențele de vigoare între rândurile de cultură; NDRE scoate în evidență variațiile subtile ale conținutului de clorofilă; iar ExG separă vizual vegetația de sol, accentuând zonele cu densitate slabă sau infestări cu buruieni. Împreună, aceste hărți oferă o imagine completă asupra sănătății culturilor.

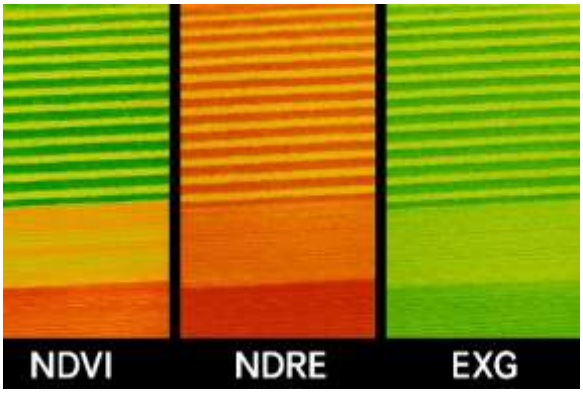


Figura 5. Hărți generate: NDVI, NDRE și ExG.

Structura bazei de imagini

Figura 6 prezintă, într-o formă simplă și clară, modul în care este organizată baza de imagini calibrate. În centru se află folderul principal, care adună la un loc toate datele utilizate în proiect.

Aici sunt păstrate imaginile brute provenite de la cei trei senzori — MicaSense, Parrot Sequoia și Sentera — alături de imaginile calibrate și transformate în valori de reflectanță pentru fiecare bandă spectrală. Tot în această structură sunt incluse hărțile indicilor de vegetație, cum ar fi NDVI și NDRE, precum și metadatele salvate în format JSON, care conțin informații esențiale despre poziția, momentul și condițiile fiecărei capturi. Fișierele GeoJSON completează baza, permițând reprezentarea spațială a datelor în aplicații GIS.

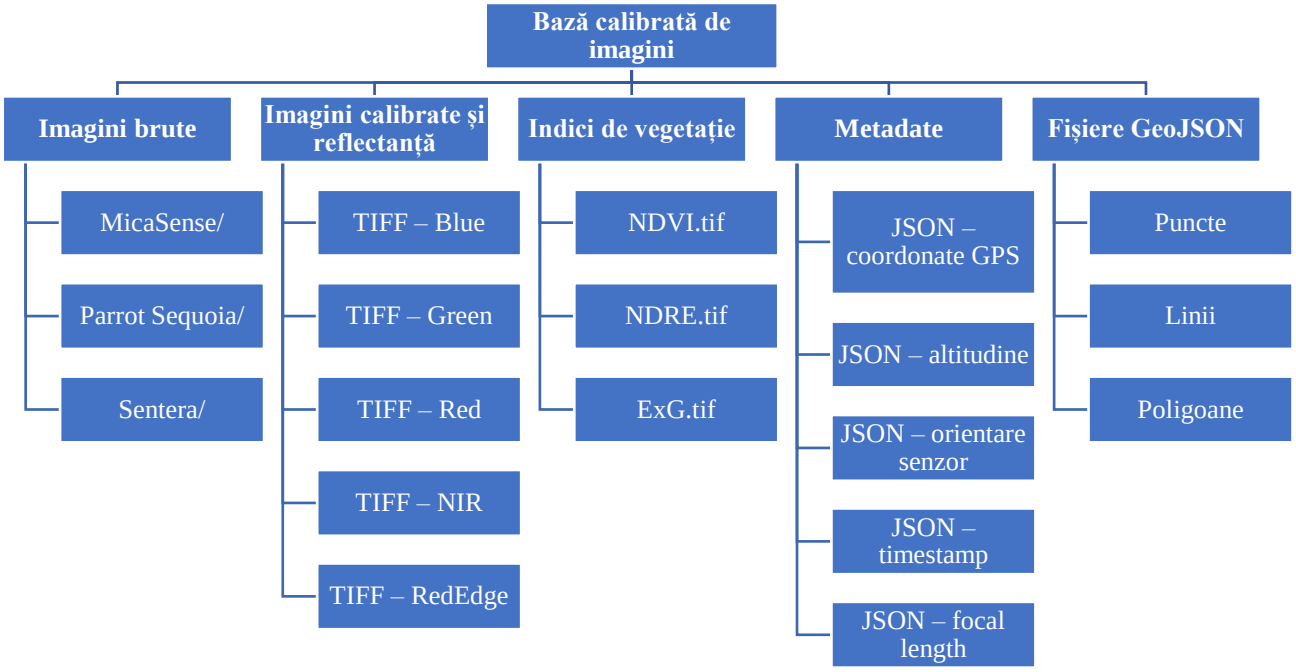


Figura 6. Structura logică a bazei NoSQL (Elasticsearch).
Sursa: elaborată de autori în baza documentației Elasticsearch Documentation

În partea de jos, figura oferă un exemplu de document JSON utilizat în Elasticsearch, unde fiecare imagine este descrisă prin senzori, benzi, coordonate și indici calculați. În ansamblu, figura arată cum toate aceste elemente se leagă între ele pentru a forma o bază de date coerentă, ușor de explorat și optimizată pentru analiză.

Validarea bazei de imagini este momentul în care ne asigurăm că tot ceea ce am colectat și prelucrat chiar reprezintă realitatea din teren. Practic, este pasul în care verificăm dacă imaginile multispectrale obținute cu drona „spun adevărul” și dacă pot fi folosite cu încredere în analiză. Pentru aceasta, am comparat semnăturile spectrale din imaginile UAV cu cele din imaginile satelitare Sentinel-2, un sistem recunoscut pentru acuratețea și stabilitatea sa. Dacă profilul spectral al culturilor arată la fel în ambele surse, înseamnă că toate calibrările făcute — radiometrică, geometrică și de aliniere — au funcționat corect [6], [7]. Pe scurt, validarea este o verificare finală care ne spune: *„da, datele sunt coerente, precise și poți construi analize pe ele fără griji”*. După acest pas, baza de imagini poate fi folosită în siguranță pentru hărți NDVI, monitorizarea culturilor sau orice altă analiză agricolă sau GIS.

O bază multispectrală calibrată face analiza culturilor mult mai sigură și mai ușor de interpretat. Pentru că toate imaginile sunt aduse la același nivel de reflectanță, putem compara sincer datele provenite de la senzori diferiți, fără influența luminii sau a setărilor camerei.

În plus, experimentul poate fi repetat oricând, iar rezultatele rămân comparabile în timp, ceea ce ajută enorm la urmărirea evoluției culturilor. Datele astfel pregătite se integrează ușor în sisteme Big Data și pot alimenta algoritmi de inteligență artificială, care învață mai precis să recunoască semnele de stres vegetal. În final, baza calibrată devine o resursă solidă, pe care te poți baza pentru orice analiză sau decizie agricolă.

Concluzii

Calibrarea riguroasă a imaginilor multispectrale transformă datele brute în informații coerente și comparabile, oferind o imagine fidelă a stării reale a culturilor. Integrarea indicilor de vegetație și organizarea metadatelor într-o bază unitară sprijină analize precise și permite monitorizarea evoluției culturilor în timp. Validarea prin comparație cu date Sentinel-2 confirmă acuratețea întregului flux, consolidând utilitatea practică a bazei multispectrale calibrate atât în cercetare, cât și în aplicațiile agricole. Monitorizarea continuă a stării culturilor la nivel regional este esențială pentru investitorii privați care urmăresc creșterea productivității agricole. Imaginile multispectrale și indicii de vegetație permit identificarea timpurie a stresului hidric și a altor factori care afectează plantele, susținând adoptarea tehnologiilor moderne în agricultură pentru a răspunde provocărilor actuale.

Rezultatele cercetării pot fi valorificate în mod direct:

- în laboratoarele universitare, pentru instruirea studenților în teledetecție aplicată;
- de fermieri și companii agricole, pentru alegerea senzorului optim în funcție de cultură și buget;
- de centrele de cercetare, pentru dezvoltarea unor baze de date calibrate la nivel regional.

Bibliografie:

1. MULLA, D. J., Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems engineering, 114(4):358-371, 2013.
2. JACKSON, R. D., HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. Preventive veterinary medicine, 11 (3-4):185-200, 1991.
3. HOLMAN, F. H., et al. "Radiometric Calibration of 'Commercial Off the Shelf' UAV Imagery." *Remote Sensing*, vol. 11, no. 14, 2019. Disponibil: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/14/1657 MDPI.
4. SWAMINATHAN, V., et al. "Radiometric calibration of UAV multispectral images under variable illumination conditions." *Plant Pathology Journal* (sau alt jurnal relevant), 2024. Disponibil:https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppj2.70005acsess.onlinelibrary.wiley.com.
5. DI GENNARO, S. F., et al. "Spectral Comparison of UAV-Based Hyper and Multispectral Cameras for Precision Viticulture." 2022. Disponibil: https://iris.cnr.it/retrieve/3cc23df4-4dc9-434c-abad-41-7850d08381/prod_463485-doc_181632.pdf iris.cnr.it.
6. ZHU, H., et al. "Assessing radiometric calibration methods for multispectral UAV-based remote sensing for precision agriculture: a comparison between different cameras." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024. Disponibil: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/-pii/S0168169924002126 ScienceDirect.
7. WANG, Y., Kootstra, G., Yang, Z., et al. "UAV multispectral remote sensing for agriculture: A comparative study of radiometric correction methods under varying illumination conditions." *Biosystems Engineering*, vol. 248, November 2024. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.11.005. Disponibil:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751102400240X.
8. HUANG, S. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI). *Journal of Forestry Research*, 2020. Disponibil: https://journal.hep.com.cn/jfr/EN/10.1007/s11676-020-01155-1 journal.hep.com.cn
9. LUO, S., et al. "Multispectral remote sensing for accurate acquisition of rice phenotypes." *Frontiers in Plant Science*, 2022. Disponibil: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.33-89/fpls.2022.958106/full Frontiers.
10. MAȘNIC, A., et al. Vegetation and water body inspection and monitoring using multispectral drone imagery, 13th International Conference on ELECTRONICS, Communications and Computing, October, 2024, ISBN 978-9975-64-480-8. Disponibil: Vegetation and water body inspection and using multispectral drone imagery.

Finanțare: Această lucrare a fost finanțată prin proiectul Ministerului Educației și Cercetării din Republica Moldova, intitulat „Sisteme satelitare și platformă pentru monitorizarea plantațiilor și a suprafețelor acvatice utilizând tehnologii spațiale și drone", cod 020401.

CZU: 621.315.592:622.785:535.37:539.2 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.30**

PROPRIETĂȚILE OPTICE ȘI STRUCTURALE ALE NANOSTRUCTURILOR DIN SNS ȘI SNS_2 OBȚINUTE PRIN METODA CVT

OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF SNS AND SNS_2 NANOSTRUCTURES OBTAINED BY THE CVT METHOD

Andrei TIRON[1], e-mail: andrei.tiron@cnstm.utm.md ORCID ID: 0000-0003-2077-4014
Vladimir CIOBANU[1], ORCID ID: 0000-0002-4588-2866
Alin MAMOICO[1],
Cătălin CRECIUNEL[1], ORCID ID: 0009-0008-4898-2556
Emil RUSU[2]

[1]Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldovei
[2]Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu", Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: *This study presents a comprehensive investigation of the structural and optical properties of SnS and SnS_2 compounds, integrating techniques such as powder X-ray diffraction, electron microscopy, and optical spectroscopy. The X-ray diffraction analysis confirms the identification of phases and lattice parameters, revealing the effects of synthesis conditions on crystalline quality and crystallite size. Electron microscopy illustrates the layered growth of the materials, with dimensions around 5 nm, bonded through Van der Waals forces. Optical characterization highlights absorption edges corresponding to band-gap energies of approximately 1.25 eV for SnS and about 2.0 eV for SnS_2, with absorption coefficients reaching up to 10^5 cm^{-1} in nanostructured forms. Applications in photovoltaics, photocatalysis, and photodetection are discussed, emphasizing the materials' capability for energy harvesting.*
Keywords: *SnS, SnS_2, layered materials, photocatalysis.*

Introducere

Numeroase studii au fost dedicate investigării proprietăților dicalcogenurilor de staniu (semiconductori din grupa IV-VI) și posibilităților de aplicare a acestora pentru dezvoltarea de dispozitive electronice și optoelectronice [1-2]. Nanomaterialele dicalcogenurilor multistrat bidimensionale (2D) stârnesc interes datorită proprietăților lor atractive și posibilei aplicații în optică, optoelectronică și conversia energiei solare [3-5]. Acestea au o structură stratificată de tip X-M-X (S-Sn-S) cu legături slabe Van der Waals între straturi și legături chimice puternice în interiorul straturilor. Spre deosebire de grafenă, cu o bandă interzisă zero, structurile calcogenurilor stratificate 2D au o bandă interzisă în intervalul de energie Eg > 1 eV și dicalcogenurile în intervalul Eg > 2 eV. Acestea demonstrează o interacțiune puternică cu lumina în spectrul vizibil, ceea ce este promițător pentru optoelectronică și conversia energiei solare [3-6]. Conform datelor din literatură, atomii de Sn și S pot cristaliza în diferite forme: faza cubică a SnS (grupurile spațiale $F_{m\text{-}3m}$ și $F_{\text{-}43m}$) [7, 8], faza ortorombică α-SnS (grupul spațial al P_{bnm}) și faza β-SnS (grupul spațial C_{mcm}) [8, 9], fazele hexagonale ale SnS_2 (grupul spațial P_{3m1} și $P_{63/mmc}$) [10] și faza ortorombică Sn_2S_3 (grupul spațial P_{nma}) [10]. În rețeaua cristalină ortorombică se formează o fază α- la temperaturi joase (T < 870 °C) și o fază β- de temperaturi înalte (T > 870 °C). Datele experimentale disponibile privind parametrii SnS_2 sunt foarte contradictorii: intervalele de bandă variază între 1,82 și 2,41 eV, iar coeficientul de absorbție este de ordinul a 10^4 - 10^5 cm^{-1} [10]. Informațiile despre tipul și natura tranzițiilor electronice responsabile pentru minimul intervalului de bandă sunt, de asemenea, contradictorii [10].

Materiale și Metode

Cristalele de SnS și SnS_2 au fost crescute prin metoda transportului chimic din faza de vapori în fiole vacuumate. În procesul de creștere, Sn și S au fost folosite ca materiale sursă, iar I_2 a fost folosit drept agent de transport. Puritatea materialelor sursă a fost de 99,999%. Ampola din quartz vacuumată a fost pusă în cuptorului orizontal cu două zone de temperatură unde sunt plasate materialul sursă de evaporare (760 °C) și zona unde are loc depunerea (710 °C). Transportul chimic a avut loc ca urmare a diferenței de temperaturi.

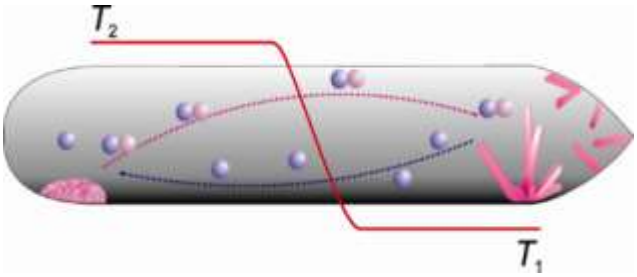


Figura 1. Reprezentarea schematică a procesului de creștere a cristalelor de SnS și SnS_2 [11].

Morfologia cristalelor a fost efectuată cu ajutorul microscopului electronic Raith e_Line la tensiunea de accelerare de 10 kV. Paternele de difracție XRD au fost colectate cu ajutorul sistemului Bruker D8 Discover la tensiunea de 40 kV și curentul de 40 mA în regim 2theta. Spectrele de reflexie și transmisie au fost măsurate cu ajutorul spectrometrului MDR - 2 cu luminozitatea de 1:2 și dispersia liniară de 7 Å/mm. În timpul măsurătorilor, fantele spectrometrelor nu depășesc 30 μm, adică cu rezoluție de aproximativ 0,5 meV. Toate sistemele optice de pe baza spectrometrelor (MDR-2, DFS-32 și SDL-1) sunt complet automatizate și computerizate.

Rezultate și Discuții

Imaginile SEM din figura 1 ilustrează morfologia cristalelor obținute. Ambele tipuri de cristale reprezintă structuri stratificate, cu grosimea straturilor de circa 5 nm.

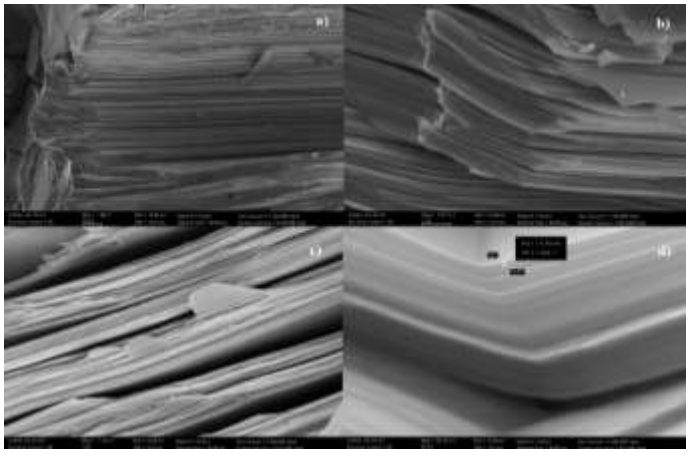


Figura 2. Imagini SEM a cristalelor de SnS (a, b) și SnS_2 (c, d).

Difracția de raze X (XRD) rămâne una dintre cele mai informative metode pentru investigarea caracteristicilor structurale ale SnS și SnS_2, în special atunci când se încearcă corelarea condițiilor de sinteză cu formarea fazelor și cristalinitatea. Utilizarea sursa de radiație CuKα = 1,541 Å se poate

determina precis unghiul Bragg și, prin urmare, calcularea exactă a spațiilor interplanare. Prin aplicarea legii lui Bragg,

$$2d\sin\theta = n\lambda,$$

unde θ este ordinul de difracție și reprezintă spațierea dintre planurile rețelei, se pot atribui sistematic vârfurile observate indicilor Miller specifici, asociați cu fazele SnS/SnS_2. Atunci când sunt rafinate printr-o ajustare detaliată a vârfurilor, aceste atribuiri ajută la distingerea între SnS ortorombic (figura 3b) și SnS_2 hexagonal sau trigonal (figura 3a), chiar și în cazurile în care suprapunerea vârfurilor prezintă provocări. Dimensiunile cristalitelor au fost determinate prin tehnica Scherrer și au valori în jur de 22 nm în cazul cristalelor din SnS_2 și circa 20 nm în cazul cristalelor din SnS.

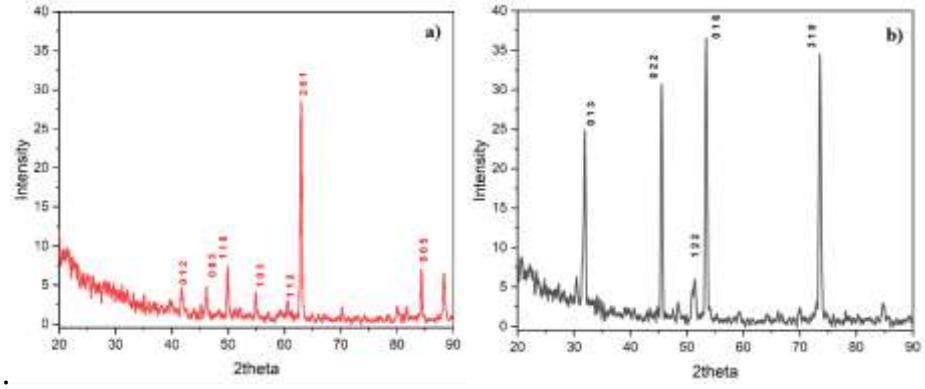


Figura 3. Spectrul XRD a materialului inițial de SnS_2 (a) și SnS (b).

În figura 4 sunt prezentate spectrele de absorbție a nanostructurilor din SnS și SnS_2 măsurate la temperatura camerei. Coeficientul de absorbție pentru materialele studiate se modifică în valori de ordinul 10^4-10^5. Valoarea benzii interzise pentru SnS constituie circa 1,25 eV și este format de tranziții indirecte din banda de valență în banda de conducție, pe când banda interzisă a nanostructurilor din SnS_2 este de circa 2,0 eV, de asemenea formată de tranziții indirecte.

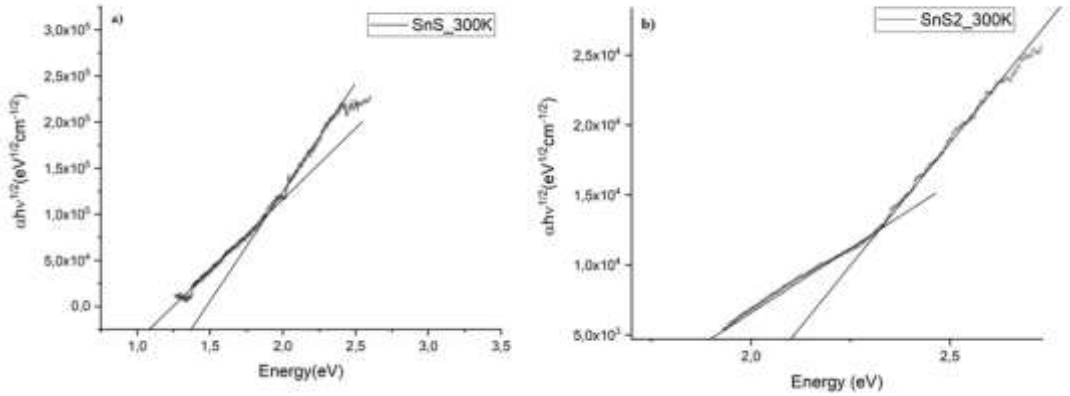


Figura 4. Spectrele de absorbție a nanostructurilor din SnS (a), și SnS_2 (b).

Concluzii

În această lucrare a fost demonstrat obținerea cristalelor de SnS și SnS_2 prin metoda CVT, materiale stratificate, cu o grosime de circa 5 nm care sunt legate prin forțe Van der Waals.

Studiul XRD a arătat ca SnS are structuură ortorombică. SnS_2 este prezent în structura trigonală și cea hexogonală. Au fost măsurate spectrele de transmisie și reflexie a nanostructurilor de SnS și SnS_2 de unde a fost determinată valoarea benzii energetice interzise pentru SnS fiind de circa $E_g \sim 1{,}25$ eV și SnS_2 $E_g \sim 2{,}0$ eV. În SnS și SnS_2 au fost identificate tranzițiile ce formează banda interzisă, ca fiind indirecte. SnS și SnS_2 sunt materiale promițătoare pentru fotocataliză, datorită benzilor energetice mici și coeficientul de absorbție în valoare de 10^4-10^5. Materialele studiate pot fi utilizate ca fotodetectoare și alte dispozitive optoelectronice.

Referințe:

1. YU, J., XU, CY., LI, Y. *et al.* Ternary $SnS_{2-x}Se_x$ Alloys Nanosheets and Nanosheet Assemblies with Tunable Chemical Compositions and Band Gaps for Photodetector Applications. Sci Rep 5, 17109 (2015). https://doi.org/10.1038/srep17109.
2. BURTON, L. E., WHITTLES, T. J., HESP, D., LINHART, W.M., SKELTON, J.M., HOU, B., WEBSTER, R.F., G. O'DOWD, G., REECE, C., CHERNS, D., FERMIN, D.F., VEAL, T.D., DHANAK, V.R., WALSH, A. Electronic and optical properties of single crystal SnS2: an earth-abundant disulfide photocatalyst, J. Mater. Chem. A 4 (2016) 1312-1318.
3. VIDAL, J., LANY, S., MAYEUL D'AVEZAC, ZUNGER, A., ZAKUTAYEV, A., FRANCIS, J., TATE, J. Band-structure, optical properties, and defect physics of the photovoltaic semiconductor SnS. *Appl. Phys. Lett.* 16 January 2012; 100 (3): 032104. https://doi.org/10.1063/1.3675880.
4. RAMAKRISHNA, REDDY, N. KOTESWARA, REDDY, R.W. MILES, Photovoltaic properties of SnS based solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 90, Issues 18–19, 2006, Pages 3041-3046, ISSN 0927-0248, https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.012.
5. STEINMANN, V., JARAMILLO, R., HARTMAN, K., CHAKRABORTY, R., BRANDT, R. E., POINDEXTER, J. R., LEE, Y. S., SUN, L., POLIZZOTTI, A., PARK, H.H., GORDON, R.G., BUONASSISI, T. 3.88% Efficient Tin Sulfide Solar Cells Using Congruent Thermal Evaporation. Adv. Mater. 2014, 26 (44), pp. 7488−7492.
6. SINSERMSUKSAKUL, P., SUN, L., LEE, S.W., PARK, H.H., KIM, S.B.,YANG, C., GORDON, R. G. Overcoming Efficiency Limitations of SnS-Based Solar Cells. *Adv. Energy Mater.*, 4: 1400496, 2014. doi: 10.1002/aenm.201400496.
7. David Avellaneda, M. T. S. Nair and P. K. Nair Polymorphic Tin Sulfide Thin Films of Zinc Blende and Orthorhombic Structures by Chemical Deposition Journal of The Electrochemical Society, Volume 155, Number 7, 2008, D517.
8. AMALRAJ, L., SANJEEVIRAJA, C., JAYACHANDRAN, M. Spray pyrolysised tin disulphide thin film and characte-risation, Journal of Crystal Growth, Volume 234, Issue 4, 2002, pp. 683-689, ISSN 0022-0248, https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)01756-0.
9. RAMONI LASISI, A., OLAYINKA. A. BABALOLA, B., TALEATU, A., ADEREMI, B., ALABI, EZEKIEL OMOTOSO, et al. (2016). Synthesis and Characterization of Electrodeposited Tin Disulphide (SnS_2) Thin Films for Photovoltaic Application. International Journal of Materials Science and Applications, 5(5), pp.188-193. https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20160505.12
10. BURTON, L.A., COLOMBARA, D., ABELLON, R.D., GROZEMA, F.C., PETER, L.M., SAVENIJE, T.J., DENNLER, G., WALSH, A. Synthesis, Characterization, and Electronic Structure of

Single-Crystal SnS, Sn_2S_3, and SnS_2 Chemistry of Materials 2013 25 (24), pp. 4908-4916 DOI: 10.1021/cm403046m.
11. SCHMIDT, P., BINNEWIES, M., GLAUM R., SCHMIDT, M. Chemical Vapor Transport Reactions - Methods, Materials, Modelling, 2013, DOI:10.5772/55547.

Mulțumiri

Această lucrare a fost susținută financiar din cadrul proiectului Tineri Cercetători „Cercetarea proprietăților fotocatalitice a nanomaterialelor 2D calcogenide” cu cifrul 25.80012.5007.38TC.

CZU: [37 + 001.891]:623.746-519 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.31**

DE LA EDUCAȚIE LA CERCETARE: COMPETENȚELE ȘTIINȚIFICE DEZVOLTATE PRIN UTILIZAREA DRONELOR

FROM EDUCATION TO RESEARCH: SCIENTIFIC COMPETENCIES DEVELOPED THROUGH THE USE OF DRONES

Alisa MOŞNEAGA[1] e-mail: alisa.mosneaga@usm.md ORCID ID: 0009-0009-2459-3596

Mariana SAVVA[2] e-mail: marianna.savva@usm.md ORCID ID: 0000-0003-0618-5360

[1,2]Universitatea de Stat din Moldova

Abstract. *The integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into education represents a significant opportunity to bridge the gap between learning and scientific research, particularly within STEM and environmental education. This study analyzes the educational potential of drone-based learning in fostering scientific, digital, and sustainability-oriented competencies. Grounded in contemporary pedagogical models such as inquiry-based learning, experiential learning, and research-based learning, the article examines how UAV technologies support authentic learning experiences that replicate key stages of the scientific method, including hypothesis formulation, data collection, analysis, and interpretation. Drawing on recent international literature and European policy frameworks, including the Digital Education Action Plan (2021–2027) and the GreenComp framework, the study highlights the role of drones as mediating tools that facilitate the transition from theoretical education to applied research. The findings indicate that the use of UAVs in educational contexts contributes to the development of STEM, geospatial, digital, research, and transversal competencies, while also enhancing learner motivation and engagement. The article argues that the systematic integration of drone-based activities into curricula can support educational innovation, strengthen the education–research nexus, and better align academic programs with contemporary societal and environmental challenges.*

Keywords: *scientific competences, drones, STEM, education, research, UAV, GreenComp.*

INTRODUCERE

Transformarea digitală a educației constituie o prioritate strategică la nivel european și internațional, având ca scop alinierea proceselor educaționale la cerințele unei societăți bazate pe cunoaștere, inovare și tehnologii avansate [1]. Integrarea tehnologiilor digitale emergente în educație depășește funcția de simplă facilitare a accesului la informație și vizează, în mod esențial, dezvoltarea competențelor necesare cercetării științifice, gândirii critice și adaptabilității profesionale. În acest context, Planul de Acțiune pentru Educația Digitală (2021–2027) al Comisiei Europene subliniază necesitatea creării unor medii de învățare autentice, interactive și orientate spre competențe, capabile să reflecte realitățile profesionale și științifice contemporane [2].

În acord cu aceste orientări, educația este redefinită ca un proces activ, centrat pe cursant, care promovează învățarea prin investigație, rezolvarea de probleme reale și aplicarea cunoștințelor în contexte interdisciplinare [2]. Modelele pedagogice tradiționale sunt astfel completate de abordări didactice inovatoare, care valorifică tehnologia ca instrument de susținere a gândirii științifice și a competențelor digitale avansate. În acest cadru, dronele (Unmanned Aerial Vehicles – UAV) se afirmă ca tehnologii cu un potențial educațional semnificativ, fiind deja larg utilizate în cercetarea științifică aplicată. Domenii precum teledetecția, cartografia digitală, monitorizarea mediului, managementul

riscurilor naturale și agricultura de precizie beneficiază de capacitatea UAV-urilor de a furniza date spațiale de înaltă rezoluție, cu eficiență și acuratețe ridicate [3].

Caracterul interdisciplinar al acestor tehnologii implică integrarea cunoștințelor din fizică, informatică, geografie, ecologie și statistică, ceea ce le recomandă ca instrumente relevante pentru educația STEM. Transferul tehnologiilor UAV din sfera cercetării către mediul educațional creează premisele unei relații funcționale între educație și cercetare, conferind procesului de învățare un caracter investigativ și aplicativ. Prin utilizarea dronelor în activitățile didactice, cursanții pot fi implicați în etapele fundamentale ale demersului științific, incluzând formularea ipotezelor, colectarea și analiza datelor, precum și interpretarea și comunicarea rezultatelor. Astfel, procesul educațional este orientat spre construirea activă a cunoașterii și dezvoltarea competențelor științifice transferabile.

Literatura de specialitate confirmă rolul dronelor ca tehnologie pedagogică eficientă în educația STEM. Studiile recente evidențiază impactul pozitiv al utilizării UAV-urilor asupra motivației cursanților, dezvoltării competențelor digitale și spațiale și consolidării gândirii analitice și a capacității de rezolvare a problemelor complexe [4,5]. În acest sens, integrarea dronelor în educație poate fi considerată nu doar o inovație tehnologică, ci o schimbare de paradigmă pedagogică, care susține convergența dintre formare, cercetare și inovare.

În acest context, prezentul articol își propune să analizeze potențialul utilizării dronelor ca instrument educațional pentru dezvoltarea competențelor științifice și digitale, evidențiind rolul acestora în facilitarea tranziției de la educație la cercetare. Analiza este plasată în contextul politicilor educaționale europene și al tendințelor actuale din educația STEM, oferind repere teoretice și aplicative relevante pentru modernizarea curriculumului și a practicilor didactice.

CADRUL TEORETIC ȘI CONCEPTUAL

Transformarea digitală a educației este analizată în literatura de specialitate ca un proces sistemic, care presupune nu doar integrarea tehnologiilor digitale, ci și reconfigurarea paradigmelor pedagogice, a curriculumului și a mecanismelor de formare a competențelor. La nivel european, acest proces este fundamentat pe documente strategice care promovează învățarea orientată spre competențe și utilizarea tehnologiilor emergente în contexte autentice de învățare [1, 2]. În această perspectivă, educația digitală este concepută ca un catalizator al dezvoltării gândirii critice, al competențelor digitale avansate și al capacității de adaptare la cerințele unei economii bazate pe cunoaștere.

Abordările teoretice privind învățarea bazată pe competențe susțin ideea că formarea eficientă presupune integrarea coerentă a cunoștințelor, abilităților și atitudinilor necesare aplicării acestora în situații reale. Modele consacrate, precum *Teaching for Quality Learning at University* [6] sau *Understanding by Design* [7] evidențiază importanța alinierii dintre obiectivele de învățare, activitățile didactice și evaluare. Aceste principii sunt reluate și în contextul educației digitale, unde tehnologia este utilizată ca instrument pentru susținerea învățării active și reflexive.

Un fundament teoretic esențial pentru integrarea dronelor în educație îl constituie teoria învățării experiențiale, conform căreia cunoașterea este construită prin interacțiune directă cu mediul și prin reflecție asupra experienței [8]. În educația STEM, această abordare este completată de modelele de învățare bazată pe investigație și pe probleme (*inquiry-based learning* și *problem-based learning*), care încurajează explorarea fenomenelor, formularea ipotezelor și analiza datelor empirice [9, 10].

Integrarea UAV-urilor oferă un suport tehnologic adecvat pentru aplicarea acestor modele, facilitând investigarea problemelor reale prin colectarea și analiza datelor din teren. Dronele (Unmanned Aerial Vehicles – UAV) sunt definite în literatura de specialitate ca instrumente tehnologice versatile, utilizate pe scară largă în cercetarea aplicată din domenii precum teledetecția, cartografia digitală și monitorizarea mediului. Colomina și Molina [3] subliniază rolul UAV-urilor în furnizarea de date spațiale de înaltă rezoluție, care permit analiza detaliată a fenomenelor naturale și antropice. Caracterul interdisciplinar al acestor tehnologii implică integrarea competențelor din fizică, informatică, geografie, ecologie și statistică, ceea ce le conferă un potențial educațional ridicat în cadrul disciplinelor STEM. Studiile recente confirmă eficiența dronelor ca tehnologie pedagogică. Yepes et al. [4] evidențiază faptul că utilizarea UAV-urilor în educație contribuie la dezvoltarea competențelor digitale și spațiale, precum și la creșterea motivației și implicării cursanților în procesul de învățare.

De asemenea, revizuirile sistematice realizate de Pergantis și Drigas [5] arată că integrarea dronelor sprijină învățarea experiențială și bazată pe investigație, facilitând înțelegerea conceptelor abstracte prin aplicarea lor în contexte reale. Din perspectiva alfabetizării geospațiale, utilizarea dronelor în educație contribuie la dezvoltarea capacității de analiză și interpretare a datelor spațiale, competență esențială în societatea digitală contemporană. Goodchild [10] și DiBiase et al. [11] subliniază importanța formării competențelor geospațiale pentru noile profesii din domeniul mediului și al managementului teritorial, competențe care pot fi eficient dezvoltate prin utilizarea tehnologiilor UAV în activități educaționale aplicative. În contextul Republicii Moldova, transformarea digitală a educației este susținută de documente strategice naționale și de inițiative academice recente [13, 14]. Studiul realizat de Andronic [15] evidențiază provocările și oportunitățile digitalizării sistemului educațional din Republica Moldova, subliniind necesitatea alinierii curriculumului la competențele digitale cerute de piața muncii.

Totodată, Strategiei de dezvoltare „Educația 2030” accentuează rolul educației în formarea competențelor digitale și tehnologice avansate, inclusiv în domenii emergente [13]. În ceea ce privește utilizarea dronelor, inițiativele dezvoltate în cadrul Universității de Stat din Moldova, precum proiectul Erasmus+ *eDrone* și crearea unui laborator educațional interuniversitar în domeniul UAV, reprezintă exemple relevante de transfer al tehnologiilor din cercetare în educație.

Aceste inițiative contribuie la dezvoltarea competențelor tehnice și aplicative ale studenților și creează premisele unei integrări sistematice a dronelor în programele de studii tehnice și științifice [16, 17]. Din punct de vedere conceptual, prezentul studiu adoptă o abordare care consideră dronele drept instrumente educaționale mediatoare, facilitând convergența dintre educație și cercetare. Utilizarea UAV-urilor în activitățile didactice este analizată ca un factor care susține tranziția de la învățarea teoretică la învățarea investigativă, prin implicarea cursanților în etapele specifice demersului științific. Această perspectivă este în concordanță cu modelele educației orientate spre sustenabilitate și inovare, promovate la nivel european și național.

CONEXIUNEA DINTRE EDUCAȚIE ȘI CERCETARE PRIN UTILIZAREA DRONELOR

Utilizarea dronelor în educație facilitează o conexiune directă și funcțională cu cercetarea științifică, întrucât activitățile didactice bazate pe UAV reproduc, într-o manieră autentică, etapele fundamentale ale metodei științifice. În cadrul activităților educaționale, elevii și studenții sunt implicați în identificarea problemelor reale din mediul înconjurător, formularea ipotezelor de cercetare, planificarea și proiectarea misiunilor de zbor, colectarea sistematică a datelor și analiza și interpretarea rezultatelor

obținute. Acest parcurs reflectă fidel demersul științific utilizat în cercetarea aplicată și este caracteristic modelelor de învățare bazată pe investigație și pe cercetare, contribuind la dezvoltarea competențelor de investigare, analiză și gândire critică [8, 9]. Un element esențial al acestei conexiuni îl constituie autenticitatea și calitatea datelor generate prin utilizarea dronelor. Datele colectate cu ajutorul UAV-urilor, precum imaginile aeriene, modelele digitale ale terenului sau informațiile multispectrale, sunt utilizabile atât în scop educațional, cât și în activități de cercetare propriu-zisă, asigurând o continuitate metodologică între cele două domenii. Colomina și Molina [3] subliniază faptul că UAV-urile oferă date spațiale de înaltă rezoluție, comparabile cu cele utilizate în proiecte de cercetare avansată din teledetecție și cartografie digitală. În mod similar, Goodchild [18] evidențiază valoarea datelor geospațiale colectate prin tehnologii moderne pentru analiza fenomenelor complexe, argumentând că acestea pot susține atât cercetarea științifică, cât și procesele educaționale orientate spre rezolvarea problemelor reale.

Literatura recentă evidențiază rolul dronelor ca instrumente de convergență între educație și cercetare, în special în domeniile care presupun analiza spațială, evaluarea mediului și studiul interacțiunilor socio-ecologice. În studiul realizat de Hall și Wahab [19] se arată că utilizarea UAV-urilor în științele spațiale și sociale extinde semnificativ posibilitățile de analiză interdisciplinară, oferind date relevante pentru înțelegerea relațiilor dintre mediul natural și activitățile umane. În același timp, studiile privind utilizarea dronelor ca tehnologie pedagogică indică faptul că integrarea acestora în educație facilitează transferul metodelor și instrumentelor de cercetare către mediul didactic, reducând decalajul dintre formare și practica științifică [4, 5].

Mai mult, integrarea dronelor în activitățile educaționale contribuie la dezvoltarea culturii cercetării încă din etapele timpurii ale formării. Implicarea directă a cursanților în colectarea, procesarea și interpretarea datelor reale favorizează asumarea rolului de „student-cercetător”, specific modelelor de *research-based learning* și *student as researcher* [20]. În acest context, cursanții dobândesc competențe esențiale pentru cercetare, precum formularea întrebărilor de cercetare, validarea ipotezelor, evaluarea critică a rezultatelor și comunicarea concluziilor, competențe considerate fundamentale pentru formarea viitorilor specialiști în domenii STEM și de mediu [10, 12].

Prin urmare, utilizarea dronelor în educație nu doar facilitează transferul de tehnologii din cercetare către mediul didactic, ci creează un cadru integrat în care activitățile educaționale pot genera rezultate cu relevanță științifică. Această convergență între educație și cercetare susține dezvoltarea competențelor științifice și digitale, stimulează inovarea pedagogică și contribuie la formarea unei noi generații de specialiști capabili să utilizeze metode moderne de cercetare pentru a răspunde provocărilor complexe ale societății contemporane. În rezultatul analizei literaturii de specialitate, se poate observa că utilizarea dronelor în educație susține dezvoltarea unui set complex de competențe științifice, digitale și transversale. Pentru o prezentare sintetică a acestor competențe și a activităților educaționale asociate, Tabelul 1 oferă o structurare a principalelor categorii de competențe dezvoltate prin utilizarea UAV-urilor, în corelație cu literatura de specialitate.

Tabelul 1. Competențe dezvoltate prin utilizarea dronelor (UAV) în educație

Categoria de competențe	Descriere	Activități educaționale bazate pe UAV	Repere din literatura de specialitate
Competențe STEM	Aplicarea integrată a cunoștințelor din fizică, matematică, informatică și științele mediului în contexte reale	Planificarea zborului; calculul parametrilor de zbor; interpretarea imaginilor aeriene; modelare și măsurători	Yepes et al. (2022); Yeung et al. (2025)[4,21]
Competențe de cercetare	Dezvoltarea abilităților de investigare științifică: formularea ipotezelor, proiectarea metodologiei, analiza și interpretarea datelor	Definirea problemei de cercetare; colectarea datelor prin UAV; analiza rezultatelor; formularea concluziilor	Healey & Jenkins (2009); Hodgson & Johnston (2018); Yeung et al. (2025) [20, 21]
Competențe digitale avansate	Utilizarea tehnologiilor și instrumentelor digitale specifice cercetării contemporane	Utilizarea GIS; fotogrammetrie; analiză multispectrală; vizualizare și prelucrare date	Goodchild (2019); DiBiase et al. (2010) [11, 12]
Competențe geospațiale	Analiza și interpretarea datelor spațiale și a relațiilor dintre fenomene	Cartografiere; analiză spațială; evaluarea schimbărilor teritoriale	Colomina & Molina (2014); Goodchild (2007) [3]
Competențe transversale	Dezvoltarea gândirii critice, colaborării, comunicării și responsabilității	Lucru în echipă; managementul proiectelor UAV; prezentarea rezultatelor	Pergantis & Drigas (2024); Prince & Felder (2006) [5,9]
Competențe pentru sustenabilitate (GreenComp)	Conștientizarea impactului tehnologiei asupra mediului și societății; luarea deciziilor responsabile	Monitorizarea mediului; evaluarea impactului antropic; propuneri de soluții sustenabile	European Commission (2020); UNESCO (2020) [2, 22]

Analiza sintetică prezentată în Tabelul 1 evidențiază caracterul multidimensional al competențelor dezvoltate prin utilizarea dronelor în educație. Se observă că UAV-urile nu contribuie exclusiv la formarea competențelor STEM, ci facilitează dezvoltarea concomitentă a competențelor de cercetare, digitale, geospațiale și transversale, susținând o abordare integrată a procesului educațional. Această convergență competențială reflectă specificul activităților educaționale bazate pe investigație și proiect, în care tehnologia funcționează ca mediator între cunoașterea teoretică și aplicarea practică, apropiind procesul de învățare de practicile autentice ale cercetării științifice.

CONCLUZII

Analiza realizată în acest studiu confirmă faptul că utilizarea dronelor (UAV) în educație reprezintă un instrument cu valoare formativă ridicată pentru dezvoltarea competențelor științifice, digitale și de sustenabilitate. Integrarea tehnologiilor UAV în activitățile didactice permite crearea unor contexte autentice de învățare, în care cursanții pot aplica cunoștințele teoretice în situații reale, consolidând astfel înțelegerea proceselor științifice și a relației dintre date, analiză și interpretare.

Rezultatele sintezei teoretice indică faptul că dronele facilitează depășirea fragmentării disciplinare, susținând o abordare interdisciplinară specifică educației STEM și domeniilor conexe științelor mediului. Prin utilizarea UAV-urilor, procesul educațional devine orientat spre investigare și

rezolvare de probleme, contribuind la formarea competențelor de cercetare și la dezvoltarea gândirii analitice și critice, competențe esențiale pentru participarea activă la societatea bazată pe cunoaștere.

Totodată, utilizarea dronelor în educație sprijină alinierea curriculumului la cadrele europene de competențe, în special GreenComp și inițiativele privind educația digitală. Activitățile educaționale bazate pe UAV oferă oportunități concrete pentru integrarea educației pentru sustenabilitate, prin analiza impactului activităților umane asupra mediului și prin dezvoltarea capacității de a formula soluții responsabile și fundamentate științific.

În acest context, studiul susține necesitatea unei integrări planificate și sistematice a dronelor în programele de studii, nu ca element extracurricular izolat, ci ca parte a unui demers curricular coerent, orientat spre competențe și inovare pedagogică. O astfel de abordare poate contribui la consolidarea relației dintre educație și cercetare, la creșterea relevanței formării academice și la pregătirea viitorilor specialiști capabili să utilizeze tehnologii avansate pentru a răspunde provocărilor complexe ale dezvoltării durabile.

Referinţe:

1. ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. DIGITAL EDUCATION OUTLOOK 2023*: Towards an effective digital education ecosystem*. OECD, 2023 Publishing. https://doi.org/10.1787/c74f03de-en.
2. COMISIA EUROPEANĂ, Comunicare a Comisiei către Parlamentul European, Consiliu, Comitetul Economic și Social European și Comitetul Regiunilor *Planul de acțiune pentru educația digitală 20-21-2027 Resetarea educației și formării pentru era digitală*, 2020, disponibil online la adresa: https://-eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0625
3. COLOMINA, I., & MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, *92*, 2024, 79-97. doi.org/10.1016/j.-isprsjprs.2014.02.013
4. YEPES, Igor; BARONE, Dante Augusto Couto; PORCIUNCULA, Cleber Mateus Duarte. Use of drones as pedagogical technology in STEM disciplines. *Informatics in Education*, 2022, 21.1: 201-233. doi.org/10.15388/infedu.2022.08
5. PERGANTIS, Pantelis; DRIGAS, Athanasios. The effect of drones in the educational Process: A systematic review. *Education Sciences*, 2024, 14.6: 665. doi.org/10.3390/educsci14060665
6. BIGGS, J.B. & TANG, C. Teaching for Quality Learning at University. (4th Ed.). Maidenhead: McGraw Hill Education & Open University Press, 2011.ISBN : 0335242766
7. WIGGINS, Grant P.; MCTIGHE, Jay. *Understanding by design*. Ascd, 2005. 382 p., ISBN 1-4166-0035-3.
8. KOLB, David A. *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT press, 2014, 390 p., ISBN 10: 0-13-389240-9.
9. PRINCE, Michael J.; FELDER, Richard M. Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases. *Journal of engineering education*, 2006, 95.2: 123-138. doi.org/10.-1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x
10. HMELO-SILVER, C. E., DUNCAN, R. G., & CHINN, C. A. Scaffolding and Achievement in Problem-Based and Inquiry Learning: A Response to Kirschner, Sweller, and Clark (2006). Educational Psychologist, 42(2), 2007, p. 99–107. https://doi.org/10.1080/00461520701263368
11. GOODCHILD, Michael F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 2007, 69.4: 211-221, doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y
12. DIBIASE, David, et al. The new geospatial technology competency model: Bringing workforce needs into focus. *Urisa Journal*, 2010, 22.2: 55.

13. HOTĂRÂRE Nr. 114 din 07-03-2023 cu privire la aprobarea Strategiei de dezvoltare „Educația 2030” și a Programului de implementare a acesteia pentru anii 2023-2025. https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=136600&lang=ro
14. MINISTERUL EDUCAŢIEI ŞI CERCETĂRII, CONCEPTUL Programului de implementare a Strategiei de Dezvoltare „Educația-2030” pentru anii 2026-2030 https://mec.gov.md/ro/content/elaborarea-programului-de-implementare-strategiei-de-dezvoltare-educatia-2030-pentru-anii
15. ANDRONIC, Adrian. Digital transformation in education: a comparative analysis of Moldova and Estonia and recommendations for sustainable financing. Eastern European Journal for Regional Studies (EEJRS), 2023, 9.2: 96-107. doi.org/10.53486/2537-6179.9-2.07
16. https://www.erasmusplus.md/primul-laborator-educational-interuniversitar-domeniul-dronelor-din-republica-moldova-deschis-cu https://international.usm.md/?page_id=290&lang=en
17. GOODCHILD, M. F. Reimagining the history of GIS. *Annals of GIS*, *24*(1), 2018, 1–8. https://-doi.org/10.1080/19475683.2018.1424737
18. HALL, O., WAHAB, I. The use of drones in the spatial social sciences. *Drones*, 2021, 5.4: 112.-doi.org/10.3390/drones5040112.
19. HEALEY, M., JENKINS, A. Developing undergraduate research and inquiry. 2009.
20. YEUNG, R.C.Y., SUN, D., YEUNG, C.H. Integrating drone technology in STEM education: Curriculum, pedagogy and learning outcomes. Educ Inf Technol 30, pp. 14237–14272 (2025). https://doi.org/10.1007/s10639-025-13368-0
21. UNESCO. Education for sustainable development: A roadmap. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development A/RES/70/1, available online at*, 2020.

ACKNOWLEDGMENT

Acest articol este elaborat în cadrul proiectului pentru tineri cercetători pe anii 2025-2026, cifrul 25.80012.0807.25TC „Mediu sustenabil prin educația pentru drone’’.

CZU: 712.252:72(478):623.746-519 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.32**

MODERNIZAREA METODELOR TEORETICO-PRACTICE, UTILIZATE ÎN STUDIEREA PROBLEMELOR ESTETICE ALE PEISAJELOR CU AJUTORUL TEHNOLOGIILOR AVANSATE

THE MODERNIZATION OF THEORETICAL AND PRACTICAL METHODS USED IN THE STUDY OF AESTHETIC PROBLEMS OF LANDSCAPES THROUGH ADVANCED TECHNOLOGIES

Alexandru COCIN[1] e-mail: alexandru.cocin@usm.md ORCID ID: 0009-0003-7271-4731
Ana BÎRSAN[2] e-mail: ana.birsan@usm.md ORCID ID: 0000-0003-1696-080X

[1,2]Universitatea de Stat din Moldova

Abstract. *The concept of national landscape valorization is closely related to the issue of assessing landscape diversity and monitoring them for the purpose of protecting and managing natural and culturalheritage. The holistic approach to this concept involves capitalizing on technical and scientific achievements for the perception of space, recognizing landscape elements that give aesthetic value to the landscape, but also identifying socio-historical connections and trends in landscape evolution, as an essential component of the living environment for the population. In this sense, anchored in classical methodology, modern methodology in the field of landscape science effectively integrates advanced technologies, opening up new opportunities for identifying and valorizing landscapes at the national level. Classical methods maintain their relevance today, but require modification and updating. Modern methods come to the aid of classical ones, substantially increasing the possibilities of environmental research. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are effective for studying the landscape of the territory of the Republic of Moldova.*
Keywords: *landscape, aesthetic value, methods.*

Această lucrare continuă ciclul de cercetări științifice în domeniul arhitecturii peisagistice și urbanismului din Republica Moldova, dedicat elaborării metodologiilor de evaluare estetică a peisajelor – ***mediul natural***, ***mediul antropizat*** și ***mediul antropic*** - ale teritoriului țării, în scopul creării unor condiții funcționale, ecologice și estetice optimizate pentru dezvoltarea turismului național și internațional pe teritoriul Moldovei. Dezvoltarea sectorului turistic și recreativ al oricărui teritoriu este **strans** legată de resursele sale naturale. În acest context, una dintre cele mai importante caracteristici ale teritoriului este atractivitatea sa estetică, care sporește interesul față de teritoriu din partea tuturor categoriilor de recreanți. Cu alte cuvinte, proprietățile estetice ale teritoriului determină, în mare măsură, atractivitatea sa investițională. Frumusețea peisajelor reprezintă unul dintre principalele motive pentru care turiștii vizitează diferite locuri. Despre frumusețea naturii moldovenești au vorbit cu admirație călători și savanți din diverse țări și epoci. Aproximativ între anii 455–441 î.Hr., cercetătorul și istoricul grec Herodot se minuna de frumusețile dintre Nistru și Prut. În anii ’70 ai secolului al XVIII-lea, despre Basarabia a scris renumitul geograf și mineralog K. G. Laxman. În descrierea sa asupra regiunii, el nota cu entuziasm: „În comparație cu această țară, cele mai bune dintre ale noastre par a fi copiii vitregi ai naturii. Drumul de la Akkerman la Bender, de-a lungul râului Nistru, seamănă cu un paradis. Calea trece aproape în întregime printre podgorii și cele mai fermecătoare grădini”. În partea centrală „pajiști neasemuite se împletesc cu cele mai bogate câmpuri înflorite și cu păduri minunate.” Marele savant pedolog V.V. Dokuciaev a fost impresionat de originalitatea reliefului și a întregului peisaj al Codrilor, unde, după cum spunea el, „locurile acestea pot fi, pe drept cuvânt, numite Elveția Basarabiei” [8]. Peisajul este o componentă de bază astăzi a patrimoniului natural şi cultural European, contribuind la

bunăstarea umană și la consolidarea identității europene, fiind o parte importantă calității vieții din areale urbane / rurale [3].

Este un fapt incontestabil că oamenii au nevoi estetice pentru a căror satisfacere sunt dispuși să plătească. Acest aspect se referă atât la formele active, cât și la cele pasive de turism. Circumstanțele menționate impun necesitatea de a ține cont de proprietățile peisagistice și estetice ale teritoriului în procesul de planificare a dezvoltării teritoriale la nivel regional și local. Prin urmare, evaluarea proprietăților peisagistice și estetice ale peisajelor trebuie să devină o etapă obligatorie în planificarea teritoriilor turistice și recreative. Baza studiului proprietăților estetice ale spațiilor care înconjoară omul o constituie peisajul. ***Estetica peisajului*** reprezintă o direcție specială a științei peisajului, care studiază frumusețea și pitorescul peisajelor naturale și natural-antropice, particularitățile percepției și evaluării lor estetice. Prin abordarea aspectelor estetice, știința peisajului se apropie de artă. Domenii înrudite cu aceasta devin pictura peisagistică și fotografia artistică de peisaj, arhitectura peisageră, arta peisageră a grădinilor și parcurilor ș.a. Conservarea mediului natural, atât prin implementarea noilor tehnologii, cât și prin refacerea peisajelor degradate, inclusiv a proprietăților lor estetice, devine un atribut esențial al dezvoltării durabile.

Semiotica peisajului – spațiu cu valoare estetică, potrivit lui Iu. Lotman, poate funcționa ca un cod modelator al culturii. Astfel, apare o cerere socială pentru dezvoltarea unei direcții științifice – estetica peisajului, care include elaborarea metodelor de evaluare a proprietăților estetice ale peisajelor și a evaluărilor economice ale funcțiilor lor estetice. În același timp, se manifestă necesitatea de a conserva cele mai estetic atractive peisaje [9]. Peisajul este elementul de bază pentru studierea aspectelor estetice în arhitectura peisajistică, deoarece reprezintă materialul vizual fundamental (elemente naturale și construite) pe care arhitectul îl manipulează pentru a crea o compoziție armonioasă. Aspectele estetice se referă la cum sunt utilizate aceste elemente – formă, culoare, textură, lumină, spațiu și proporție – pentru a produce un efect emoțional și vizual plăcut.

În primul rând, în procesul de evaluare a calităților estetice ale peisajului, este important să se țină cont de atractivitatea acestuia — adică de gradul său de atracție. Observatorul poate întotdeauna să distingă fundalul obiectiv și figurile, precum și contururile acestora. Principalele calități ale atractivității depind direct de culoare, luminozitate și structura spațială. Astfel, de exemplu, după particularitățile combinațiilor de culori din peisaj se determină caracterul impactului lor asupra observatorului: cu cât acestea sunt mai pronunțate, cu atât calitățile atractive ale peisajului sunt mai ridicate. Pe lângă atractivitate, în geografia peisajului este introdus conceptul de percepție a peisajului, apropiat, în esență, de noțiunea de ***„percepție estetică”*** - percepția mediului înconjurător care poartă pentru subiect o anumită ***valoare estetică***. Subiectul percepției este observatorul; el percepe și evaluează obiectul percepției, adică peisajul propriu-zis. În același timp, „peisajul nu este doar lumea vizibilă, ci și procesul creării acesteia”. El este responsabil de formarea bazei materiale a întregii imagini peisagistice.

Peisajul este conceput ca sistem structurat în trei subsisteme:

- *subsistemul producător,*
- *subsistemul utilizator*,
- *subsistemul peisaj vizibil*, fenomen condiţionat de două categhorii de factori: *principali (relief şi climă)* şi *factori derivaţi (antropic, hidrologic, soluri, vegetaţie, faună).*

Sunt cunoscute nenumărate definiţii ale conceptului de **„peisaj”.** Majoritatea dintre ele se referă la **„peisajul obiectiv”,** adică la elementele concrete când accentul se pune pe realitatea obiectivă a peisajului caracteristicile căruia pot fi cuantificate prin măsurători directe.

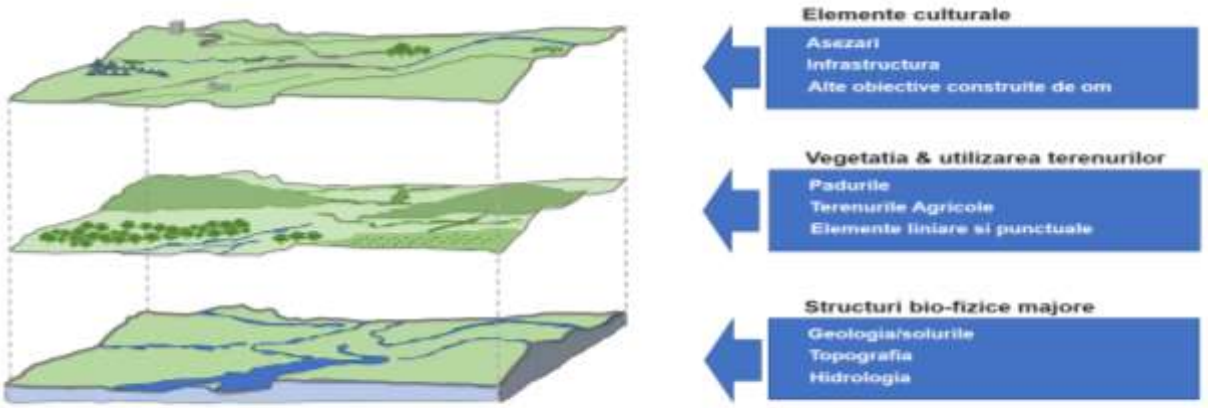


Fig.1 Structura peisajului (Wascher, 2000, dupa Krauze & Kloppel, 1996)

Bazele obiective ale analizei peisajului vizează componente stabile, repetabile care pot forma configurații spațiotemporale stabile și repetitive, componentele de bază fiind ***relieful*** și ***elementele terenului*** (Fig. 2).

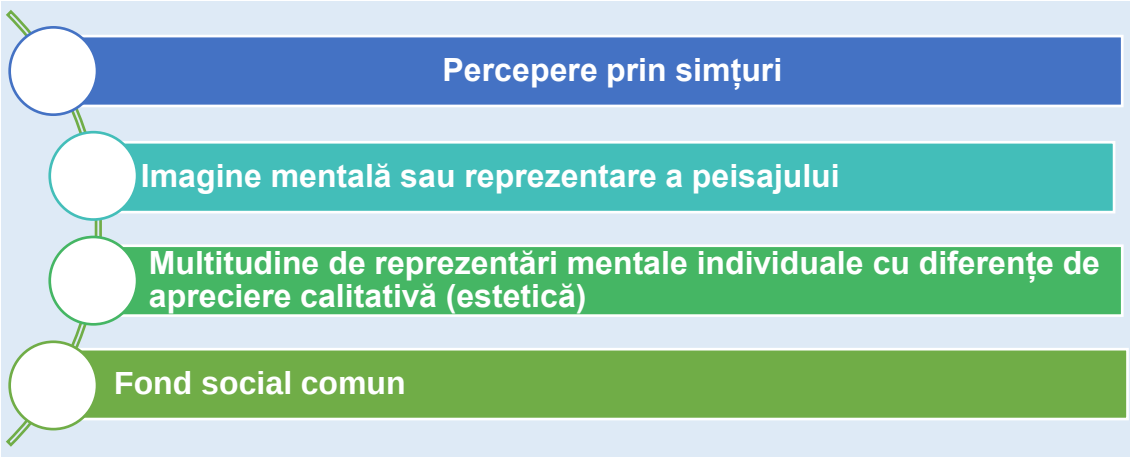
Relieful: structura primară, imitarea fiziologica sau orografica a campului visual, pante (cu influenta lor asupra ocuparii de om a peisajului – asazari, drumuri, parcelar, utilizare agricola, forestiera, vestigii).

Elemente ale terenului: elemente naturale – vegetația (forme, culori pe sezon) – elemente construite – ordonare --clădiri si rețele de comunicație sau tehnice/volum/culori.

De asemenea, analiza obiectivă a peisajului include și **epifenomene inconsistente** (de exemplu: culoarea, transparența aerului, însorirea etc.

Bazele subiective / perceptive ale analizei peisajului

- Percepția peisajului este individuală dar și socială;
- perceperea variază de la un individ la altul;
- percepția variază la același individ in functie de starea fizică, psihică și afectivă;
- sensibilitatea de tip european în perceperea peisajului este de natură esențial *vizuală* (nu simbolică);
- perceperea se face în primul moment instantaneu și instinctiv în totalitate, abia într-o a doua fază se trece la descernerea detaliilor.



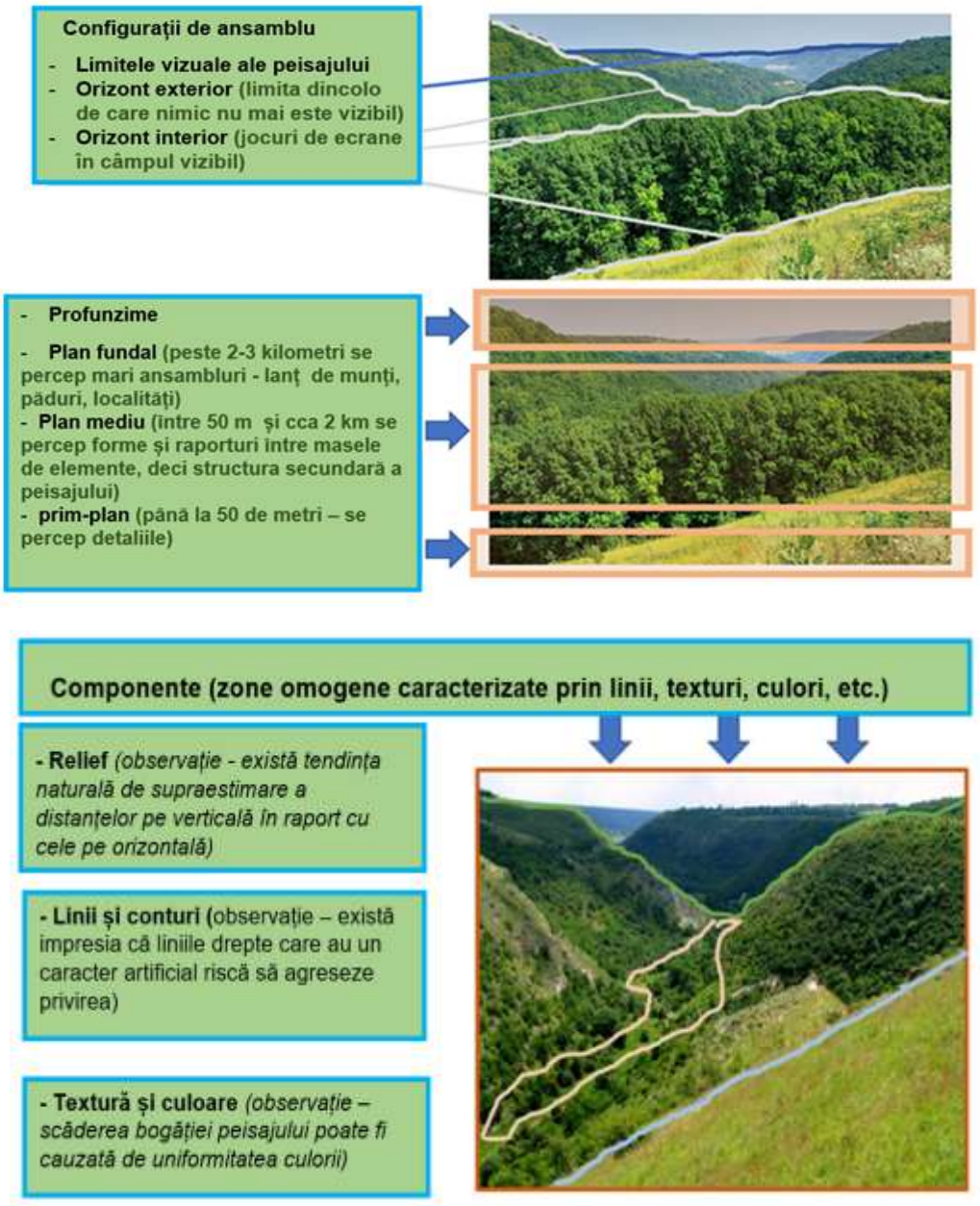


Fig. 2. Componentele principale ale peisajului.

La momentul actual, ***estetica peisajului*** s-a format ca o direcție specială a științei peisajului, care studiază frumusețea și pitorescul peisajelor naturale și natural-antropice, iar cel mai important — particularitățile percepției și evaluării lor estetice. Observatorul evaluează imaginea vizuală care i se deschide din orice punct al spațiului geografic. Prin această imagine se înțelege peisajul — „aspectul exterior al peisajului, perceput dintr-un anumit punct de vedere…”. În acest caz, estetica peisajului este orientată spre studiul ***armoniei*** și ***frumuseții*** peisajului. Ea reprezintă un proces destul de complex de interacțiune între om și peisaj — un proces de ***reflecție psihologică a frumuseții*** mediului natural prin intermediul percepției senzoriale [10]. Unul dintre cei mai importanți factori în ***formarea peisajului*** este relieful. El determină caracterul peisagistic al terenului, ***trăsăturile*** sale ***estetice*** și diversitatea peisajului.

De relieful unei regiuni depind distribuția și configurația rețelei hidrografice, caracterul învelișului de sol și al vegetației. Relieful reflectă structura geologică a teritoriului și, în cele din urmă, creează baza „portretului locului”, influențând totodată și gama cromatică.

Relieful determină structura morfologică a peisajului, ceea ce se reflectă în structura sa vizuală. „Peisajul” teritorial-zonal este alcătuit din mai multe (sau numeroase) părți mai simple, care se află în combinații interconectate și repetitive. Cu cât nivelul este mai înalt, cu atât, de regulă, complexele naturale sunt mai originale și mai irepetabile.

Pentru evaluarea rolului reliefului ca factor al atractivității ***estetice a peisajelor*** se utilizează diferite metode: *evaluarea de către experți, chestionarea, analiza structural-informațională.*

Sunt cunoscute numeroase încercări de evaluare expertă cu implicarea specialiștilor de înaltă calificare - artiști, fotografi de peisaj, călători, naturaliști — adică persoane cu un „ochi format” pentru frumusețea naturii și cu un bogat repertoriu de asociații peisagistice. Una dintre primele încercări de evaluare expertă a peisajelor a fost întreprinsă de K.D. Fines [6].

Una dintre metodele obiective de evaluare este *metoda cartografierii de teren*, a cărei esență constă în analiza diferențiată a atractivității diferitelor componente naturale de-a lungul unui traseu stabilit în prealabil, pe baza materialelor cartografice. Scara recomandată a materialelor cartografice pentru studierea peisagistică de teren este de 1:10.000–1:25.000, iar pentru elaborarea schemei preliminare a traseelor conform metodei propuse sunt necesare materiale cartografice la o scară de cel puțin 1:50.000, deoarece este necesară o reprezentare detaliată a reliefului pentru a evidenția individualitatea acestuia. Ca semne obiective ale esteticii peisajului, specialiștii menționează pluralitatea planurilor, prezența unei dominante de peisaj, culisele care înconjoară peisajul, coloritul, aspectul sezonier, intactitatea, absența distrugerilor antropogene și altele. Criterii importante pentru evaluare sunt și prezența unei vederi panoramice, distanța orizontului și a perspectivei deschise, vizibilitatea orizontului și a planului apropiat, condițiile și caracterul vegetației, contrastul paletei de culori, prezența obiectelor de apă de tip plan sau liniar, caracterul activității umane care contribuie la creșterea/scăderea atractivității peisajelor, prezența punctelor de observare pe traseu, diversitatea și complexitatea peisajului. Conform opiniei expertilor, se pot distinge următoarele categorii de puncte de vedere:

• puncte de vizualizare înguste (de tip fante), cu un unghi mai mic de 30º; perspectiva peisajului care se deschide din aceste puncte este numită în arhitectura peisajului "vista";

- puncte de vizualizare sectorială – 30-115º;
- puncte panoramice – 120-240º;
- puncte de vizualizare circulară – "cirkoramice" – mai mult de 240º.

Metodele tradiționale de evaluare estetică sunt direct legate de cercetările de teren Prima metodă de evaluare este *studiul ecologico-estetic detaliat al peisajelor* realizat de K.I. Eringis și A.R. Budriunas (1975). Metoda include 80 de semne de evaluare a peisajului deschis și a zonei sale adiacente, împărțite în patru blocuri: percepția generală a peisajului, expresivitatea reliefului, diversitatea spațială a vegetației și gradul de transformare antropică a peisajului [2]. Fiecare indicator este evaluat pe o scală de puncte, ceea ce permite compararea rezultatelor evaluărilor pentru diferite teritorii. Ca exemplu, în tabelul 1 prezentăm o parte din indicatorii de evaluare.

Tabelul 1 Scala de evaluare a proprietăților estetice ale peisajelor

Indicatori de evaluare estetică		
Percepția generală a peisajului	1	Dominanta în peisaj
	2	Adâncimea și diversitatea perspectivelor
	3	Profunzimea câmpului vizual (prim plan, planul mijlociu,

		ultimul plan)
	4	Zonalitatea
	5	Naturalitatea (virginitatea) peisajului
	6	Prezența obiectelor acvatice
Exprimarea reliefului	7	Prezența aflorimentelor de roci
	8	Abundența vârfurilor și pantelor montane
	9	Abundența vârfurilor montane pe linia orizontului
Diversitatea spațială a vegetației	10	Gradul general de împădurire al peisajului
	11	Abundența vârfurilor și pantelor împădurite
	12	Abundența spațiilor deschise în peisajul împădurit
	13	Abundența diferitelor comunități arboricole și ierboase
Gradul de transformare antropică a peisajului	14	Gradul de urbanizare al peisajului
	15	Abundența localităților și construcțiilor izolate
	16	Abundența obiectelor antropice pe linia orizontului
	17	Integrarea terenurilor agricole, drumurilor și liniilor electrice în peisaj

Metoda lui D. L. Linton, modificată de L. Drăguț, evaluează estetica peisajelor geografice prin analiza combinată a trei componente principale: relieful, hidrografia și vegetația, bazată pe o scală de punctaj pentru fiecare factor [5]. Această metodă implică:

- *Evaluarea reliefului:* se analizează înălțimea, pantele, fragmentarea și diversitatea formelor de relief.

- *Evaluarea hidrografiei:* se examinează prezența și caracteristicile cursurilor de apă, lacurilor și a altor elemente hidrografice.

- *Evaluarea vegetației:* se iau în considerare tipul, densitatea, varietatea și culoarea vegetației. Aceste componente sunt punctate pe o scală numerică și apoi punctajele sunt combinate pentru a obține un scor total care reflectă estetica generală a peisajului (Tab. 2).

Tabelul 2 Evaluarea componentelor peisajului natural
(dupa Linton, 1968, modificat de Dragut, 2000)

Componentele peisajului geographic	**Valorile**
1. Relieful	
Câmpii joase	0
Câmpii înalte	10
Dealuri piemontane şi podişuri	20
Dealuri subcarpatice	30
Munţi joşi	40
Munţi înalţi	50
2. Tipuri de ocupare a spaţiului	
Peisaje industriale	0
Peisaje urbane	8
Peisaje rurale	16
Păşuni, fâneţe, culturi sau vegetaţie ierboasă cu aspect uniform	24
Păduri sau livezi uniforme	32
Elemente naturale şi/sau antropice cu aspect mozaicat	40
Peisaje acvatice sau „sălbatice”	50

Metoda descrisă favorizează componenta relief, care nu cuprinde valori negative. Pentru a se echilibra cele două componente ale peisajului, s-a adaptat sistemul de cotare, astfel încât acestea să cuprindă acelaşi ecart valoric, cu note cuprinse între 0 şi 50 (Tab. 3).

Tabelul 3 Evaluarea componentelor peisajului
(dupa Linton,1968, modificat de Dragut, 2000)

Componentele peisajului	Valori numerice	Valoarea estetică calitativă a categoriilor de peisaje
1. Relieful		
Câmpii joase	0	redusă
Câmpii moderat fragmentate	10	nesemnificativă
Câmpii deluroase puternic fragmentate	20	medie
Podişuri puternic şi moderat fragmentate	30	bună
Dealuri joase (cu altitudini sub 300 m)	40	apreciabilă
Dealuri înalte (cu altitudini peste 300 m)	50	foarte bună
2. Tipuri de ocupare a spaţiului		
Peisaje industriale	0	redusă
Peisaje urbane	8	nesemnificativă
Peisaje rurale	16	medie
Păşuni, fâneţe, culturi sau vegetaţie ierboasă cu aspect uniform	24	bună
Păduri sau livezi uniforme	32	apreciabilă
Elemente naturale şi/sau antropice cu aspect mozaicat	40	foarte bună
Peisaje acvatice sau „sălbatice”	50	redusă

Criterii de evaluare a elementelor de imagine a peisajului

Elementele de imagine formează, prin asociere, structura vizuală a peisajului. Aceasta se pune în valoare valorificând cele opt criterii de evaluare ale elementelor de imagine *(după L. Drăguţ, 2000):*

a. lumina determină schimbarea imaginii peisajului şi a nuanţelor de culoare în funcţie de direcţia din care cade asupra acestuia; lumina din faţă determină aplatizarea imaginii; lumina din spate determină claritatea imaginii; conform experienţei fotografice, estetica elementelor peisajului este bine evidenţiată dimineaţa şi seara;

b. vizibilitatea reprezintă capacitatea de a percepe elemente peisagistice sau nu, dintr-un anumit punct;

c. distanţa dintre observator şi imagine; percepţia structurii vizuale este influenţată de situarea în spaţiu a obiectului; de asemenea, imaginea obiectului şi calitatea acesteia au de suferit în funcţie de distanţa – scurtă, medie, lungă – de la care este vizualizat;

d. unghiul de incidenţă reprezintă vizibilitatea suprafeţelor ce compun un peisaj. Suprafaţa vizibilă mare este sinonimă cu unghiul deincidenţă mare. Acesta poate fi subdivizat în unghi de depresiune şi unghi de elevaţie. Unghiul de incidenţă mare este exploatat în amenajările turistice;
e. unghiul de depresiune se relevă în cazul unui peisaj privit de sus. Este unghiul format între orizontala la nivelul observatorului şi linia privirii pentru obiectele situate sub nivelul orizontalei (ex. vederea panoramică de pe un deal sau munte);

f. unghiul de elevaţie; modul de percepţie a unei imagini situată deasupra liniei privirii (imaginea unui munte de la baza lui);

g. dimensiunea spaţiului invizibil*;* reprezintă gradul de invizibilitate pe linia privirii şi este direct proporţională cu înălţimea liniilor verticale; este influenţată de efectul de mascare indus de anumite obiecte şi de condiţiile meteorologice. Aceleaşi lucruri se pot aminti, în sens contrar, în cazul dimensiunii spaţiului vizibil; este valorificată în amenajarea turistică şi teritorială, la fel ca şi unghiul de incidenţă (mascarea obiectivelor industriale, zonele de absorbţie vizuală sau zone tampon: centuri forestiere sau spaţii verzi);

h. profunzimea peisajului, sinonimă cu ***tridimensionalitatea peisajului*** (peisaje plate/ peisaje profunde); valorificată în amenajarea turistică şi estetică a teritoriului; depinde de numărul planurilor perceptibile şi de condiţiile meteo-climatice.

Percepția vizuală a teritoriului poate fi evaluată ținând cont de altitudinea formelor de relief, care acționează ca elementele vizuale naturale cele mai accesibile ale mediului. Este necesar să fie delimitate limitele bazinelor vizuale sau zonele de vizibilitate, care permit determinarea panoramelor ce se deschid de la punctele de observație situate în fața observatorilor. În cadrul fiecărui bazin vizual se evaluează indicatorii estetici, pentru fiecare dintre care se elaborează un algoritm automatizat individual de evaluare, constituit dintr-o succesiune de procese de lucru. În etapa de verificare a rezultatelor evaluării GIS prin comparație cu datele observațiilor de teren, pot fi analizate nu doar atractivitatea estetică a peisajelor observate de la punctele panoramice de-a lungul traseului, ci și modelele dezvoltate pot fi folosite pentru estimarea atractivității punctelor de belvedere în cadrul unui anumit tip de microspațiu al întregului complex peisagistic. Evaluarea proprietăților estetice ale peisajelor se bazează pe zonele de vizibilitate construite din puncte model, care pot fi utilizate ca puncte panoramice potențiale. Punctele model sunt distribuite pe teritoriul studiat prin intermediul unei rețele regulate cu un pas de 80 m. Astfel, pe baza rezultatelor evaluării complexe a tuturor indicatorilor estetici, a fost estimată atractivitatea estetică generală a peisajelor vizibile din punctele panoramice, în limitele unităților naturale corespunzătoare. Cercetarea efectuată are ca scop elaborarea modelelor automatizate de evaluare GIS, utilizând date de teledetecție (RS – Remote Sensing) cu diferite rezoluții spațiale, pentru optimizarea configurației rețelei de trasee turistice și recreative. Rezultatele prezentate ale evaluării estetice complexe oferă posibilitatea ajustării traseelor existente și organizării unor noi rute cu caracteristici estetice superioare.

Cercetările moderne în arhitectura peisageră se concentrează pe utilizarea celor mai noi tehnologii pentru soluționarea problemelor ecologice, estetice și urbanistice, precum gestionarea microclimatului și a consumului de energie, dezvoltarea turismului și recreației, precum și restaurarea peisajelor și crearea zonelor verzi durabile. Direcțiile principale includ integrarea sistemelor „inteligente” din domeniul tehnologiilor informaționale și al inteligenței artificiale, care contribuie la proiectarea și administrarea eficientă a mediului construit și natural. Actualmente, la nivel global, sunt utilizate pe scară largă vehicule aeriene de mici dimensiuni (drone), controlate de la distanță prin sisteme de navigație, prin satelit. Prin intermediul echipamentelor specializate instalate pe aceste drone, cercetătorii reușesc să obțină rezultate remarcabile în diverse domenii ale activității umane, inclusiv în protecția mediului și conservarea frumuseții peisajelor contemporane.

Utilizarea *vehiculelor aeriene fără pilot* (*UAVs), sau drone,* în topografie și cartografie, marchează o evoluție semnificativă în modul în care studiem datele geospațiale. Progresele în tehnologia dronelor au deschis noi posibilități pentru colectarea datelor de înaltă rezoluție si calitate, transformând radical precizia si eficienta operațiunilor de teren. Dronele au îmbunătățit capacitatea de a realiza măsurători precise în terenuri greu accesibile și de a monitoriza schimbările ambientale la scară largă, oferind astfel o perspectivă nouă asupra gestionării resurselor și planificării teritoriale.

Integrarea tehnologii digitale noi în practicile de topografie și cartografie prin evaluarea atât a beneficiilor, cât și a limitărilor utilizării *vehiculelor aeriene fără pilot* deschide noi posibilități în studiul și modelarea noilor calități estetice ale peisajelor Republicii Moldova.

Caracteristicile peisagistice ale Republicii Moldova pot fi evidențiate cu ajutorul ***dronelor*** echipate cu camere de înaltă rezoluție, zburând deasupra unei zone de interes. Traseul de zbor al dronei este planificat printr-o serie de linii punctate care formează un model gridat, indicând acoperirea sistematică a zonei. Procesarea datelor acestei tehnologii are loc cu ajutorul unui ecran de calculator cu o interfață de software de fotogrammetrie, unde imaginile colectate sunt încărcate și procesate. Ecranul afișează progresia de la imagini individuale la un model 3D detaliat al terenului. Teledetecția implică utilizarea senzorilor montați pe drone pentru a măsura și a înregistra informații despre suprafața Pământului. Această tehnologie este esențială pentru identificarea tipurilor de vegetație, evaluarea resurselor de apă și monitorizarea schimbărilor ambientale. Prin utilizarea teledetecției, cercetătorii pot obține date valoroase despre zone care sunt altfel dificil de accesat. Drona este echipată cu unul sau mai mulți senzori specializați care pot detecta diferite tipuri de radiații electromagnetice. Acești senzori pot include camere fotografice, camere infraroșii, LiDAR *(Light Detection and Ranging),* și senzori multispectrali sau hiperspectrali. Fiecare tip de senzor este adaptat pentru a colecta anumite tipuri de date, de la imagini vizuale la informații despre temperatura suprafeței sau compoziția chimică. Înainte de zbor, este necesară planificarea traseului și a altitudinii de zbor pentru a acoperi eficient zona de interes. Aceasta implică stabilirea punctelor de referință, frecvenței de achiziție a datelor și a altor parametri specifici misiunii. Drona execută apoi zborul conform planului prestabilit, asigurându-se că senzorii colectează date de înaltă calitate și acoperă întreaga zonă țintă. Pe parcursul zborului, senzorii atașați dronei detectează radiațiile reflectate sau emise de obiectele de pe Pământ. Aceasta include lumina vizibilă, radiația infraroșie, microundele etc., în funcție de tipul de senzor utilizat. Datele colectate sunt înregistrate și stocate în memoria dronei sau transmise în timp real către o stație de bază.

În arhitectura peisagistică, dronele sunt utilizate pentru crearea modelelor 3D precise ale terenului, monitorizarea și inspectarea obiectivelor, precum și pentru filmări aeriene destinate vizualizării proiectelor. Acestea permit realizarea ridicărilor topografice exacte, crearea ortofotoplanurilor, evaluarea reliefului și integrarea datelor în programe ***BIM*** *(Building Information Modeling)* și ***GIS*** *(Geographic Information Systems).* În plus, dronele sunt folosite pentru stropire, plantare de vegetație și monitorizarea suprafețelor agricole și forestiere.

Crearea documentației de proiect și modelarea 3D

Cartare topografică precisă: Dronele generează modele 3D extrem de exacte ale terenului, mult mai detaliate decât imaginile satelitare, aspect esențial pentru planificarea peisagistică (Fig. 3).
Ortofotoplanuri și hărți-schemă: Imaginile obținute de drone permit crearea ortofotoplanurilor detaliate cu referință geodezică, utile în proiectare și analiză.

*Integrare în **BIM** și **GIS**:* Datele colectate de drone pot fi integrate în sistemele ***BIM și GIS***, facilitând vizualizarea, analiza și coordonarea proiectelor complexe.

Monitorizare și inspecție

Controlul lucrărilor de construcție: Dronele permit urmărirea progresului construcțiilor, compararea stadiului real cu planurile de proiect și controlul amplasării echipamentelor și materialelor. *Inspecția obiectivelor:* Dronele sunt utilizate pentruverificarea structurilor greu accesibile sau aflate la înălțime, cum ar fi clădiri, macarale-turn, dar și pentru evaluarea stării vegetației și detectarea dăunătorilor.

Studiul reliefului

Cu ajutorul dronelor se realizează prin fotogrammetrie și ***scanare laser (LiDAR)*** pentru crearea modelelor 3D detaliate, a imaginilor aeriene și a ortofotoplanurilor. Această metodă permite colectarea rapidă și sigură a datelor în zone greu accesibile, economisind semnificativ timp și resurse comparativ cu metodele tradiționale. Tehnologia este utilizată pe scară largă în geologie, arheologie, construcții și ecologie.

Domenii de aplicare:

Geologie: Studiul vulcanilor, analiza formațiunilor geologice, identificarea resurselor minerale și crearea hărților topografice detaliate.

Arheologie: Obținerea de informații detaliate despre relief, geologie și hidrologie pentru planificarea săpăturilor și protejarea siturilor arheologice.

Construcții și inginerie: Monitorizarea șantierelor de construcție, analiza stabilității pantelor, calcularea volumelor de lucrări terasamentale și planificarea excavațiilor.

Ecologie: Crearea hărților detaliate ale peisajelor și ecosistemelor, monitorizarea stării vegetației și a corpurilor de apă pentru evaluarea schimbărilor de mediu.

Prin capacitatea de a se integra cu ***Sistemele de Informații Geografice (GIS)***, această tehnologie oferă precizia necesară și permite analizarea datelor colectate într-un mediu digital, facilitând crearea de hărți detaliate, analize de teren. Integrarea ***GIS*** extinde capacitatea de a interpreta datele colectate, pentru deciziile de planificare și gestionare. Integrarea tehnologiilor de teledetecție cu drone și ***Sisteme de Informații Geografice (GIS)*** a deschis noi posibilitati în studierea și analiza datelor necesare pentru evaluarea parametrelor estetice ale peisajelor din Respublica Moldova. Avantajele Teledetecției cu Drone și Integrării cu *GIS* sunt:

- dronele pot zbura și colecta date din zone greu accesibile;

- senzorii montați pe drone pot capta imagini și date de înaltă rezoluție, oferind detalii fine necesare pentru analize precise în *sistemele de Informații Geografice GIS* [4].



Fig. 3. Studierea cartografică a terenului cu ajutorul UAV.

Studiul vegetației cu ajutorul dronelor. Studiul vegetației cu ajutorul dronelor include monitorizarea terenurilor agricole, analiza stării plantelor (identificarea bolilor, dăunătorilor și a deficiențelor de nutrienți), precum și crearea hărților pentru agricultura de precizie. Obținerea rapidă a datelor detaliate, colectate cu ajutorul senzorilor, analiza acestora și luarea la timp a măsurilor de gestionare a culturilor contribuie la creșterea randamentului și reducerea costurilor.

Direcțiile principale de cercetare

Monitorizarea și analiza stării plantelor:

- Detectarea timpurie a bolilor, dăunătorilor, deficienței de apă și a carenței elementelor minerale cu ajutorul camerelor de înaltă rezoluție și a senzorilor spectrali;
- Analiza indicilor de vegetație (precum NDVI) pentru evaluarea sănătății și densității vegetației;

Agricultură de precizie:

- Crearea hărților câmpurilor cu zone problematice pentru aplicarea diferențiată a îngrășămintelor și pesticidelor.
- Stropirea și fertilizarea cu drone specializate, care asigură o precizie ridicată a aplicării substanțelor.

Monitorizare ecologică:

- Supravegherea proceselor de reîmpădurire și evaluarea compoziției speciilor forestiere;
- Cartografierea speciilor rare și a habitatelor lor natural;
- În silvicultură, cu ajutorul dronelor, se analizează starea pădurilor, de exemplu, se identifică deteriorările cauzate de dăunători, se cartografiază teritoriile, se evaluează pagubele provocate de incendii și se stabilesc locurile pentru plantarea noilor arbori. Pentru aceasta sunt utilizate drone echipate cu camere specializate (multispectrale și termovizuale) și cu lidare.

Studiul stratului de sol cu ajutorul dronelor. Studiul stratului de sol cu ajutorul dronelor implică utilizarea ***UAV-urilor (vehicule aeriene fără pilot)*** echipate cu diverși senzori pentru colectarea datelor privind umiditatea, conținutul de materie organică, pH-ul, eroziunea și conținutul de substanțe nutritive. Dronele oferă cartografiere rapidă, precisă și la scară largă, generând hărți detaliate care îi ajută pe agricultori să optimizeze utilizarea resurselor, să crească productivitatea și să monitorizeze starea terenurilor agricole.

Metode de cercetare.

Fotografiere și cartografiere: Dronele realizează imagini aeriene de înaltă rezoluție, folosite pentru elaborarea hărților topografice precise și a modelului digital al reliefului.

Fotografiere multispectrală: Se folosesc camere speciale care captează date în diferite părți ale spectrului electromagnetic, permițând evaluarea stării vegetației și a solului.

Analiza umidității și a substanțelor nutritive: Prin intermediul senzorilor, se pot identifica zonele cu exces sau deficit de umiditate, precum și nevoile locale de elemente nutritive.

Evaluarea stării solului: Senzorii dronelor permit detectarea eroziunii, compactării și acidității solului (pH), oferind date esențiale pentru planificarea măsurilor de refacere și îmbunătățire a calității terenului. Pentru aceasta se utilizează camere cu rezoluție înaltă ***(RGB)***, ***senzori multispectrali și termovizuali****, precum și* ***lidaruri*** [1].

Tehnologia LiDAR. LiDAR este o tehnologie de teledetecție. Aceasta utilizează impulsuri laser pentru a colecta măsurători, care sunt folosite la crearea modelelor 3D și a hărților obiectelor și mediului înconjurător. Tehnologia LiDAR este utilizată, de obicei, pentru studierea suprafeței terestre, evaluarea informațiilor despre relieful solului, crearea unui „geamăn digital" al unui obiect sau detalierea spectrului de informații geospațiale. Sistemele LiDAR folosesc această tehnologie pentru a genera modele tridimensionale și hărți digitale de altitudine. De la sistemele portabile până la cele montate pe vehicule sau aeronave, există o gamă variată de soluții LiDAR pentru colectarea datelor necesare.

În cartografie, LiDAR utilizează un sistem de scanare laser cu un bloc de măsurare inerțial (IMU) integrat și un receptor GNSS, ceea ce permite corelarea fiecărei măsurători sau punct din norul de puncte obținut cu o poziție geografică precisă. Fiecare „punct" este combinat pentru a crea o reprezentare tridimensională a obiectului sau a zonei țintă.Hărțile LiDAR pot fi folosite pentru asigurarea preciziei poziționării – atât absolute, cât și relative – permițând utilizatorilor să cunoască exact locul în care au fost colectate datele și relațiile de distanță dintre puncte și obiecte.Datele LiDAR, sub formă de nori de puncte, pot fi folosite pentru cartografierea întregilor orașe, oferind factorilor de decizie posibilitatea de a identifica cu precizie structuri sau zone de interes, cu o exactitate de ordinul milimetrilor. Elemente și obiecte precum rețele rutiere, poduri, mobilier stradal sau vegetație pot fi clasificate și extrase automat. De asemenea, hărțile LiDAR pot fi utilizate pentru detectarea modificărilor și anomaliilor, cum ar fi degradarea suprafețelor, schimbările de pantă sau creșterea vegetației [7].

CONCLUZII

Conceptul valorizării peisajului național este strâns legat de problema evaluării diversității peisajelor și monitorizării acestora în scopul protecţiei şi managementului patrimoniului natural şi cultural. Progresul tehnico-științific a impulsionat dezvoltarea metodelor de evaluare și monitorizare a mediului, oferind suport practic și teoretic substantial pentru identificarea, evaluarea și valorificarea peisajelor. Această abordare holistică presupune percepţia spaţiului, recunoaşterea elementelor peisagere care dau valoare peisajului, dar și identificarea conexiunilor socio-istorice și a tendințelor evoluției peisajelor, ca și componentă esenţială a cadrului de viaţă pentru populaţie. În acest sens, ancorată în metodologia clasică, metodologia modernă în domeniul landșaftologiei integrează eficient tehnolgiile avansate, deschizând noi oportunități pentru identificarea și valorizarea peisajelor la nivelul teritoriului naţional.

Metodele clasice își mențin relevanța lor și în prezent, însă necesită modificare și actualizare. Metodele moderne vin în ajutorul celor clasice, sporind substanțial posibilitățile cercetării mediului.

Vehiculele aeriene fără pilot (UAV) sunt eficiente pentru studiile peisagistice. Ele dinamizează procesele de utilizare a resurselor materiale și temporale și eficientizează munca specialiștilor. Pentru o abordare modernă a realității înconjurătoare, se solicită competențe specifice și transdisciplinare.

Aceasta presupune formarea specialiștilor calificați ce dețin competențe de a investiga obiecte, fenomene și procese, utilizând tehnologiile moderne, inclusiv modelarea matematică, ce permite prognozarea și anticiparea schimbărilor peisajului, în raport cu dinamica condițiilor fizico-geografice și cu gradul de influență antropică.

REFERINȚE:

1. BÎRSAN, A., SPRINCEAN, V. Utilizarea tehnologiilor avansate bazate pe aplicarea dronelor în evaluarea agrocenozelor //Conferinţa ştiinţifică naţională cu participare internaţională „Integrare prin cercetare şi inovare” dedicată Zilei internaționale a Științei pentru Pace și Dezvoltare, 2023. pp. 790-798.
2. BUDRIUNAS, A.R., ERINGIS, K. Kraštovaizdžio estetinio rekreacinio vertinimo metodika. Vilnius, 2000. 48 p.
3. Conventie europeană a peisajului 1 din 20 octombrie 2000 Publicat în Monitorul Oficial, Partea I nr. 536 din 23 iulie 2002.
4. DAPONTE, P., PALADI, F., BULIMAGA, T. și al. 574090-EPP-1-2016-1-IT-EPPKA2-CBHE-JP Universitatea de Stat din Moldova. Educational for Drone (eDrone). 2019.
5. DRĂGUŢ, L. Evaluarea peisajelor geografice din teritoriul administrativ al municipiului Cluj-Napoca, Studia UBB, Geographia, XLV, 1, Cluj-Napoca**.** 2000.
6. FINES K.D. Landscape evaluation: a research project in East Sussex.-Reg.Stud.,1968, Vol. 2,1, pp. 41-55.
7. GROSU M. Utilizarea dronelor penru topografie și cartografie Conferinţa Tehnico-Ştiinţifică a Studenţilor, Masteranzilor și Doctoranzilor, Universitatea Tehnică a Moldovei Chișinău, Republica Moldova, 27-29 martie 2024, Vol. I Крупеников И.А. Дорогая природа Молдавии. «Картя Молдовеняскэ» 1982.167 с.
8. ЛОТМАН Ю. Об искусстве – СПб : Искусство,1998.).
9. ЭРИНГИС К.И., БУДРЮНАС А.Р. Сущность и методика детального эколого-эстетического исследования пейзажей // Экология и эстетика ландшафта. Вильнюс: Минтис, 1975. С. 107-159.

Autorii menționează proiectul de cercetare PHYSTECH cu cifrul 011210 (subprogram) finanțat de către Ministerul Educației și Cercetării.

Book of Proceedings of the Scientific and Practical Conference
"**Advanced Physical Technologies with UVS Application in Monitoring and Modeling of Environmental Factors**" (**TehFizUVS**), 6th Edition,
dedicated to the International Day of Science for Peace and Development

Culegere de Articole ale Conferinței științifico-practice
„TEHNOLOGII FIZICE AVANSATE CU APLICAREA UVS ÎN MONITORIZAREA ȘI MODELAREA FACTORILOR DE MEDIU" (TehFizUVS), Ediția a VI-a,
dedicată Zilei Internaționale a Științei pentru Pace și Dezvoltare



Book of Proceedings of the Scientific and Practical Conference
"**Advanced Physical Technologies with UVS Application in Monitoring and Modeling of Environmental Factors**" (**TehFizUVS**), 6th Edition,
dedicated to the International Day of Science for Peace and Development

Culegere de Articole ale Conferinței științifico-practice
„TEHNOLOGII FIZICE AVANSATE CU APLICAREA UVS ÎN MONITORIZAREA ȘI MODELAREA FACTORILOR DE MEDIU" (**TehFizUVS**)**,** Ediția a VI-a,
dedicată Zilei Internaționale a Științei pentru Pace și Dezvoltare

---

Bun de tipar 26.12.2025. Formatul Letter 215.9 x 279.4 mm.
Coli de tipar 19,7. Coli editoriale 17,3.
Editura USM
Str. Al. Mateevici, 60, Chișinău. MD 2009

Culegere de articole științifice a Conferinței științifico-practice

„TEHNOLOGII FIZICE AVANSATE CU APLICAREA UVS ÎN MONITORIZAREA ȘI MODELAREA FACTORILOR DE MEDIU”,

Ediția a VI-a

Collection of scientific articles of the Scientific-Practical Conference

„ADVANCED PHYSICAL TECHNOLOGIES WITH UVS APPLICATION IN MONITORING AND MODELING OF ENVIRONMENTAL FACTORS”,

6th edition

14 noiembrie /

TehFizUVS-2025