

SISTEM PENTRU DETECTAREA ȘI MONITORIZAREA POLUĂRII CU MICROPLASTICE ÎN ECOSISTEMELE ACVATICE

CZU: 628.16:504.5:574.5

DOI: <https://doi.org/10.52673/18570461.25.3-78.02>

Doctor în științe inginerești, conferențiar universitar **Victor ABABII**

E-mail: victor.ababii@calc.utm.md

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0769-8144>

Doctor în științe inginerești **Viorel CARBUNE**

E-mail: viorel.carbune@calc.utm.md

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1556-4453>

Doctor în științe inginerești, conferențiar universitar **Viorica SUDACEVSCHI**

E-mail: viorica.sudacevschi@calc.utm.md

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0125-3491>

Doctor în informatică, conferențiar universitar **Galina MARUSIC**

E-mail: galina.marusic@adm.utm.md

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2984-2055>

Doctorandă **Rodica BRANIȘTE**

E-mail: rodica.braniste@ia.utm.md

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-8444>

Doctorandă **Silvia MUNTEANU**

E-mail: silvia.munteanu@calc.utm.md

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0749-8457>

Doctorandă **Olesea BOROZAN**

E-mail: olesea.borozan@ia.utm.md

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1091-5506>

Universitatea Tehnică a Moldovei

A SYSTEM FOR DETECTING AND MONITORING MICROPLASTIC POLLUTION IN AQUATIC ECOSYSTEMS

Summary. The increasing presence of microplastics and nanoplastics in aquatic ecosystems has raised significant environmental and public health concerns worldwide. These persistent pollutants, originating from both primary and secondary sources, are difficult to detect due to their microscopic size and widespread dispersion. Their impacts range from causing physiological damage to aquatic organisms to bioaccumulation and trophic transfer, ultimately affecting human health. This study proposes the development of a detection and monitoring system for the presence of microplastics in aquatic environments, based on the Tyndall effect – an optical phenomenon of light scattering observed in colloidal systems. The system integrates optical sensors, a laser light source, a video capture module, and the NVIDIA Jetson Orin™ Nano platform, which enables real-time analysis through AI-powered image processing and pattern recognition. The system's architecture supports both qualitative and quantitative estimation of microplastics in water samples and has the potential for continuous, adaptive environmental monitoring. This approach offers a scalable, energy-efficient, and cost-effective alternative to traditional laboratory methods, contributing to early pollution detection and improved water quality management strategies. The proposed system shows strong potential for integration into smart environmental monitoring networks and contributes to broader efforts aimed at sustainable ecosystem protection.

Keywords: monitoring system, pollutant detection, microplastics, nanoplastics, optical system, Tyndall effect, image processing.

Rezumat. Prezența tot mai accentuată a microplasticelor și nanoplasticelor în ecosistemele acvatice generează preocupări majore în ceea ce privește impactul asupra mediului și sănătății publice la nivel global. Acești poluanți persistenți, proveniți atât din surse primare, cât și din surse secundare, sunt dificil de detectat din cauza dimensiunilor microscopice și a dispersiei extinse. Efectele acestora includ deteriorări fiziologice ale organismelor acvatice, bioacumulare și

transfer trofic, ajungând până la influențarea negativă a sănătății umane. Lucrarea de față propune dezvoltarea unui sistem de detecție și monitorizare a prezenței microplasticelor în sistemele acvatice bazat pe utilizarea efectului Tyndall – un fenomen optic de dispersie a luminii observat în sistemele coloidale. Sistemul propus integrează senzori optici, o sursă laser, un modul video de captare a imaginilor și platforma NVIDIA Jetson Orin™ Nano, care permite analiza în timp real a imaginilor prin aplicarea inteligenței artificiale. Arhitectura sistemului permite estimarea calitativă și cantitativă a microplasticelor din probele de apă, cu potențial de monitorizare continuă și adaptivă la condițiile de mediu. Această abordare oferă o alternativă scalabilă, eficientă energetic și cu costuri reduse față de metodele clasice de laborator, contribuind la detectarea timpurie a poluării și la îmbunătățirea strategiilor de gestionare a calității apei. Sistemul propus prezintă un potențial înalt de integrare în rețele inteligente de monitorizare ambientală și contribuie la eforturile de protecție sustenabilă a ecosistemelor.

Cuvinte-cheie: sistem de monitorizare, detectarea poluanților, microplastice, nanoplastice, sistem optic, efectul Tyndall, procesarea imaginilor.

INTRODUCERE

În ultimele decenii, poluarea ecosistemelor acvatice a devenit o problemă globală de mediu, iar microplasticele și nanoplasticele sunt tot mai prezente în apele naturale. Identificarea și monitorizarea în timp real a acestor particule reprezintă o provocare majoră atât pentru cercetători, cât și pentru organele de decizie.

Microplasticele, particulele de plastic cu dimensiuni mai mici de 5 milimetri, rezultă din degradarea materialelor plastice mai mari sau sunt fabricate direct la dimensiuni reduse pentru diverse utilizări comerciale și industriale. Microplasticele pot fi clasificate în modul următor: a) microplastice primare – particule de plastic fabricate sub formă de granule, microbuleți sau fibre, utilizate în compuși cosmetici, produse de curățare sau industriale; b) microplastice secundare – fragmente rezultate din degradarea obiectelor plastice mari (sticle, pungă, plase de pescuit etc.), sub acțiunea razelor ultraviolete, a valurilor și curenților de apă, sau prin abraziuni mecanice. Acest tip de microplastice se regăsește în ecosistemele poluate, precum apele marine și dulci, sedimente, organisme acvatice (pești, moluște, crustacee), dar și în alimente, apă potabilă, aer și sol.

În funcție de tipul de polimeri, sunt microplastice de polietilenă, polipropilenă, polistiren, polietilen-tereftalat sau clorură de polivinil. Compușii nu se dizolvă în apă, au forme variate și capacitatea de a absorbi substanțe toxice din mediul înconjurător (metale grele, pesticide etc.). Impactul microplasticelor asupra mediului, florei și faunei este divers. Particulele pot fi ingerate de organismele vii, cauzând blocaje digestive, inflamații sau efecte toxice și pot ajunge în lanțul trofic, inclusiv în cel al ființelor umane. Totodată, trebuie menționat faptul că microplasticele sunt ușor transportate de curenții de apă, pot pluti la suprafață, rămân suspendate în apă sau se pot depune pe fundul lacurilor, râurilor și oceanelor.

Așadar, surse de poluare cu microplastice în ecosistemele acvatice sunt:

a) apele uzate și stațiile de epurare, care, în procesul de evacuare a apelor reziduale provenite din gospodărie, industrie sau agricultură, pot conține fibre sintetice rezultate din spălarea hainelor, resturi de produse cosmetice etc., în special atunci când stațiile de epurare nu reușesc să rețină microplasticele și astfel acestea ajung în râuri și lacuri;

b) activitățile industriale legate de producerea și prelucrarea materialelor plastice din industriile cosmetică, textilă, chimică etc.;

c) ambalajele și deșeurile plastice abandonate – saci, sticle, plase, recipiente – care se fragmentează în timp sub acțiunea razelor UV, temperaturii și forțelor mecanice, ajungând ulterior în apă prin intermediul vântului, ploilor torențiale, rețelelor de canalizare sau deversărilor neautorizate;

d) activitățile de pescuit și transport maritim, prin pierderea accidentală sau abandonarea plaselor de pescuit rupte, frânghiilor și altor echipamente marine, precum și prin uzura vopselelor de pe corpul navelor;

e) traficul rutier și uzura anvelopelor, care generează particule de cauciuc și plastic ce ajung în apele de suprafață prin scurgerile pluviale;

f) produsele de consum, precum pasta de dinți, scrubul, gelurile exfoliante care conțin microgranule din plastic, dar și textilele sintetice (poliester, nailon, acrilic), care eliberează microfibre în timpul spălării.

Prin urmare, activitățile casnice și industriale, deșeurile și uzura urbană sunt sursele majore de poluare cu particule de microplastice ale ecosistemelor acvatice. Particulele plastice se acumulează în mediile acvatice, perturbă echilibrul ecologic, afectează fauna și flora și pot ajunge în lanțul alimentar. Gestionarea acestei forme de poluare necesită soluții integrate de monitorizare, prevenire și reciclare eficientă. Actualitatea și importanța cercetărilor sunt demonstrate de numeroasele publicații științifice [1-4].

În seria de lucrări [1], integrată în volumul *Microplastice și poluanți: interacțiuni, degradări și mecanisme*, care cuprinde 13 capitole, sunt analizate sursele, metodele de detectare și caracteristicile microplasti-

celor. De asemenea, sunt abordate transformările, interacțiunile și impactul microplasticelor asupra ființelor umane și asupra mediilor acvatice. Se menționează faptul că distribuția extinsă a poluării cu microplastice în mai multe ecosisteme de mediu (atmosfera, sedimente, sol și apă) este cauza îngrijorării globale cu privire la efectele lor periculoase. Microplasticele sunt considerate poluanți emergenți omniprezenți, ceea ce face urgentă necesitatea de a acoperi lacunele privind cunoștințele despre potențialele lor efecte adverse asupra sănătății umane, animalelor și asupra mediului. Transformarea mediului (determinată de factori chimici, fizici și biologici) și soarta microplasticelor în natură sunt studiate pe larg. Aceste cunoștințe sunt necesare pentru evaluarea biodisponibilității, bioacumulării, ecotoxicității și interacțiunii cu alți poluanți. A fost deja identificată o multitudine diversificată de comunități microbiene care colonizează și prosperă pe fragmentele de plastic. Dincolo de ingerarea microplasticelor, efectele dăunătoare asupra speciilor acvatice sunt provocate și de contaminanții anorganici sau organici adsorbiți pe suprafața particulelor de plastic. În plus, ca urmare a procesului de levigare, substanțele chimice sub formă de aditivi joacă un rol semnificativ în deteriorarea mediului. În acest context, autorii abordează în detaliu identitatea structurală, capacitatea de adsorbție și degradarea polimerilor constituenți, cauzată de factori precum fotoliza, hidroliza, acțiunea mecanică și alți factori de mediu.

Rezultatele prezentate în lucrările [2] evidențiază sursele, abundența și impactul microplasticelor asupra ecosistemelor de apă dulce. Astfel, s-a evidențiat că microplasticele sunt poluanți, independent de salinitatea mediului înconjurător. Prezența microplasticelor în mediu reprezintă o problemă complexă, care trebuie abordată într-o manieră multidisciplinară, multilaterală și integrată, atunci când se încearcă înțelegerea impactului acestor materiale sintetice asupra lumii naturale. În prezent, pe piață există peste 5.300 de tipuri de polimeri sintetici. Datorită proprietăților fizico-chimice eterogene, aceștia determină un comportament și efecte la fel de variate, odată ce pătrund necontrolat în mediu.

În lucrările [3; 4], autorii menționează că microplasticele reprezintă unul dintre poluanții emergenți la nivel global. Cercetările prezic că, până în anul 2050, cantitatea de particule de microplastice din ape va depăși numărul peștilor. Astfel, sunt evidențiate originea, sursele, tipurile și transferul acestor poluanți în diferite sfere ale ecosistemului, ca urmare a activităților antropice, în special a producției industriale de produse de uz cotidian. Cercetările scot în evidență pericolul poluării cu microplastice și oferă analize și soluții re-

levante pentru reducerea acestui tip de poluanți, în vederea unui viitor durabil. De asemenea, este prezentată o analiză a contaminării mediului cu microplastice, precum și a progreselor înregistrate în tehnicile și politicile menite să combată poluarea cu plastic în general și cu microplastice în special. Sunt explicate riscurile potențiale, toxicitatea și daunele provocate de microplastice asupra diferitor ecosisteme. Autorii oferă o prezentare detaliată a tehnicilor disponibile care pot fi utilizate pentru detectarea, separarea și identificarea microplasticelor – informații utile pentru specialiștii din domeniul industriei și cercetători. Pentru organele legislative sunt utile discuțiile referitoare la recomandările de politici privind reducerea producției, limitarea răspândirii și prevenirea efectelor nocive ale microplasticelor asupra florei și faunei.

Așadar, microplasticele reprezintă o formă persistentă de poluare a mediului, greu de eliminat, cu efecte potențial negative asupra ecosistemelor acvatice și asupra sănătății umane. Controlul utilizării plasticului, precum și dezvoltarea sistemelor eficiente de monitorizare și filtrare sunt esențiale pentru combaterea acestei probleme globale.

Lucrarea de față prezintă dezvoltarea unui sistem bazat pe tehnologii de procesare a imaginilor, dispersia luminii și efectul Tyndall, pentru detectarea și monitorizarea poluanților microplastici în medii acvatice. Sistemul utilizează un ansamblu de senzori optici, care permit observarea modificărilor fizico-optice în apă, corelate cu prezența particulelor plastice de dimensiuni reduse. Informațiile colectate sunt analizate și interpretate prin metode avansate de învățare automată, care permit evaluarea calității apei în mod continuu și adaptiv. Integrarea acestui tip de sistem într-un cadru ecologic inteligent are potențialul de a transforma fundamental modul de abordare a monitorizării poluării cu microplastice, oferind un instrument eficient și scalabil pentru protejarea ecosistemelor acvatice.

DIAGRAMA DE COMPONENTE ALE SISTEMULUI

Diagrama de componente ale sistemului pentru detecția și monitorizarea poluării cu microplastice în ecosisteme acvatice este prezentată în Figura 1, unde:

Rezervor cu apă – rezervor transparent din sticlă pentru stocarea apei în procesul de analiză, cu un canal de **Intrare a apei** și de **Evacuare a apei**;

Robinet – dispozitiv pentru reglarea fluxului de apă care trece prin rezervor, controlat prin semnale electrice;

Sursa de lumină (se recomandă sursă de lumină laser) – generator de **Flux de lumină**, pentru asigurarea calității procesului de măsurare;

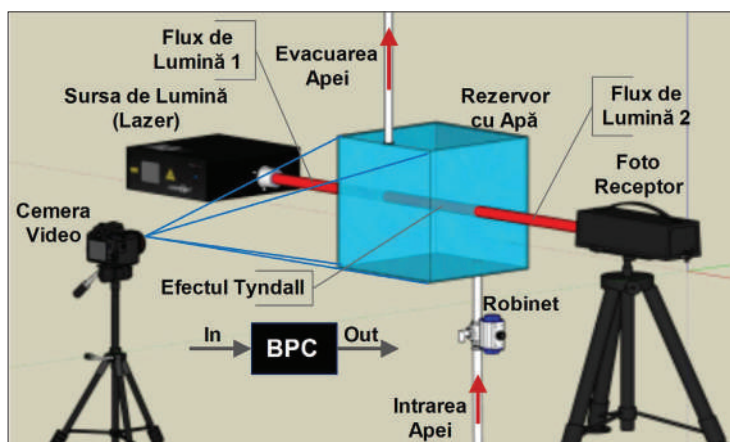


Figura 1. Diagrama de componente ale sistemului.

Fotoreceptor – componentă pentru perceperea **Fluxului de lumină** care traversează **Rezervorul cu apă**, utilizat la evaluarea purității apei;

Cameră video – orientată perpendicular pe planul lateral al **Rezervorului cu apă**; captează **Efectul Tyndall** al interacțiunii **Fluxului de lumină** cu particulele de microplastice prezente în apă;

BPC – **Bloc de procesare a datelor și Control** – cu semnale și magistrale de intrare (In) și ieșire (Out).

EFACTUL TYNDALL ȘI MICROPLASTICELE

La baza funcționalității sistemului pentru detectarea și monitorizarea poluării cu microplastice în ecosisteme acvatice stă efectul Tyndall [5]. Efectul Tyndall este un fenomen optic care constă în dispersia luminii atunci când aceasta trece printr-un coloid sau un sistem dispers, format din particule cu dimensiuni suficient de mari pentru a împrăști lumina, dar suficient de mici pentru a rămâne în suspensie [6]. În cercetarea dată, efectul Tyndall este observat atunci când un fascicul de lumină traversează un mediu în care particulele suspendate de microplastice deviază razele de lumină în mai multe direcții. Astfel, fasciculul devine vizibil în interiorul mediului, ca un flux de lumină clar conturat, și reprezintă un instrument valoros în știință. Este utilizat pentru a determina dacă o soluție este coloidală, pentru a studia dimensiunea particulelor în suspensie sau pentru a investiga compoziția fluidelor biologice. În esență, fenomenul deschide o fereastră spre invizibil, făcând vizibile proprietățile ascunse ale materiei. Efectul Tyndall nu este doar un fenomen optic, ci și o legătură dintre lumea vizibilă și cea microscopică, altfel inaccesibilă ochiului liber [5].

După cum s-a menționat, în mediile acvatice, microplasticele formează adesea suspensii stabile, greu de detectat prin metode tradiționale [1-4]. Având di-

mensiuni cuprinse între zeci de nanometri și câțiva micrometri, microplasticele se încadrează perfect în domeniul de sensibilitate al efectului Tyndall. Atunci când sunt suspendate în apă sau în alte lichide, fasciculele de lumină (precum cele ale unui laser sau ale unei surse LED) pot deveni vizibile datorită dispersiei pe suprafața particulelor de plastic. Această proprietate face posibilă identificarea calitativă a prezenței microplastice într-o probă, fără a necesita echipamente scumpe de laborator. În plus, prin corelarea intensității luminii dispersate cu concentrația și dimensiunea particulelor, se pot obține estimări cantitative preliminare [7-11].

DIAGRAMA FUNCȚIONALĂ A SISTEMULUI

Diagrama funcțională a sistemului pentru detectarea și monitorizarea poluării cu microplastice în ecosisteme acvatice este prezentată în Figura 2, unde:

RA – rezervor pentru stocarea apei supuse analizei în vederea detectării microplastice; realizat din sticlă transparentă, cu formă cubică;

SL – sursa de lumină (poate fi o sursă de tip laser) care generează fluxul de lumină de intrare (**FLI**) aplicat perpendicular pe planul lateral al rezervorului de apă (**RA**);

FR – fotoreceptor care percepe fluxul de lumină (**FLO**) după traversarea rezervorului cu apă (**RA**);

FIA – flux de intrare a apei în rezervorul **RA**;

FEA – flux de evacuare a apei din rezervorul **RA**;

RCN – robinet cu control numeric al fluxului de intrare a apei **FIA**;

BPC – bloc de procesare a datelor și de generare a semnalelor de control numeric, realizat pe baza platformei NVIDIA Jetson Orin™ Nano Developer Kit [12];

CV – cameră video, care percepe fluxul de capturare a imaginii (**FCI**) de pe suprafața rezervorului cu apă (**RA**), incluzând și **Efectul Tyndall**, generat prin

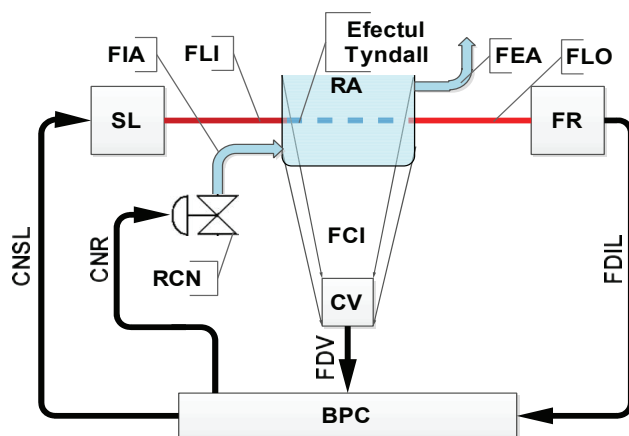


Figura 2. Diagrama funcțională a sistemului.

interacțiunea fluxului de lumină (FLI) cu particulele de microplastic. Camera video (CV) este orientată perpendicular pe planul lateral al rezervorului cu apă (RA) și pe raza fluxului de lumină (FLI);

FDV – flux de date al imaginii video capturate de camera video (CV);

FDIL – flux de date care determină intensitatea semnalului perceput de fotoreceptor (FR);

CNR – semnale de control numeric pentru robinetul RCN;

CNSL – semnale de control numeric pentru sursa de lumină SL.

Modul de funcționare al sistemului pentru detectarea și monitorizarea poluării cu microplastic în ecosisteme acvatice, având la bază diagrama funcțională descrisă (Figura 2), se desfășoară în mai multe etape secvențiale și integrate, în care interacționează componentele hardware și software ale sistemului:

Etapa 1. Inițializarea sistemului și controlul fluxului de apă.

Sistemul pornește prin activarea Blocului de procesare și control (BPC), bazat pe NVIDIA Jetson Orin™ Nano Developer Kit [12], care coordonează toate componentele sistemului. Robinetul cu control numeric (RCN) primește semnalul de control CNR de la BPC și reglează fluxul de intrare a apei (FIA) în rezervorul RA. Apa din ecosistemul monitorizat este direcționată controlat în RA, un rezervor cubic transparent, unde proba este analizată în timp real;

Etapa 2. Iluminarea probei și generarea efectului Tyndall.

Odată ce rezervorul este alimentat, sursa de lumină (SL), eventual de tip laser, este activată prin semnalul de control numeric CNSL. Fluxul de lumină de intrare (FLI) este direcționat perpendicular pe una dintre fețele rezervorului (RA), penetrând volumul de apă. Particulele de microplastic aflate în suspensie interacționează cu FLI, difuzând lumina conform

efectului Tyndall, ceea ce face posibilă vizualizarea și detectarea acestora;

Etapa 3. Detectarea optică și video.

Camera video (CV), poziționată perpendicular pe direcția fluxului de lumină, captează imaginea generată de dispersia luminii în prezența particulelor (Efectul Tyndall), sub forma unui flux de captură video (FCI). Aceste date sunt trimise către BPC sub forma unui flux de date video (FDV), prelucrate în timp real folosind algoritmi de viziune computerizată. Simultan, fotoreceptorul (FR) captează fluxul de lumină de ieșire (FLO), adică lumina care a traversat rezervorul cu apă (RA). Intensitatea acestui flux, afectată de prezența și densitatea particulelor, este convertită într-un flux de date (FDIL) care este trimis la BPC.

Etapa 4. Procesarea și analiza datelor.

BPC integrează ambele fluxuri de date (imagini și intensitate luminoasă). Imaginile sunt procesate pentru a detecta forma, dimensiunea, densitatea și dinamica particulelor de microplastic, iar variațiile de intensitate ale luminii captate de FR sunt analizate pentru estimarea concentrației acestora în apă. Algoritmii de procesare a datelor, care rulează pe platforma NVIDIA Jetson Orin™ Nano Developer Kit, permit detectarea automată a prezenței microplasticelor, estimarea concentrației și caracteristicilor acestora, precum și stocarea și raportarea rezultatelor în timp real și offline.

Etapa 5. Evacuarea probei și reinițializarea ciclului de analiză a apei.

După finalizarea analizei, fluxul de evacuare a apei (FEA) este activat pentru a goli rezervorul (RA). Astfel, sistemul inițiază un nou ciclu de analiză cu o probă nouă, asigurând un proces continuu sau secvențial de monitorizare, în funcție de algoritmul implementat în BPC.

Etapa 6. Monitorizare și control centralizat.

Toate activitățile sistemului sunt monitorizate în timp real printr-o interfață grafică (*dashboard*), care poate fi locală sau la distanță. Datele colectate sunt

stocate pentru analiză istorică, generarea de rapoarte și corelarea cu alți factori de mediu. La necesitate, sistemul poate fi integrat într-o rețea extinsă de monitorizare a ecosistemelor acvatice sau poate funcționa autonom.

Conceptual, sistemul funcționează ca un laborator automatizat în miniatură, capabil să identifice, monitorizeze și evalueze în mod eficient gradul de poluare cu microplastice din apele naturale. Combinația dintre senzori optici, viziune artificială și control numeric îl face o soluție performantă pentru aplicații de mediu, cercetare și intervenție anticipată.

DIAGRAMA FUNCȚIONALĂ A BLOCULUI DE PROCESARE A DATELOR ȘI CONTROL NUMERIC

Dispozitivul principal în arhitectura și funcționalitatea Blocului de procesare a datelor și control numeric (**BPC**) este placa de dezvoltare NVIDIA Jetson Orin™ Nano Developer Kit [12]. Această placă de dezvoltare reprezintă o platformă pentru crearea sistemelor de calcul performante, compacte și eficiente din punct de vedere energetic, orientată spre prototiparea aplicațiilor IA (Inteligență Artificială) și implementarea soluțiilor de viziune artificială, robotică, analiză video, automatizare industrială și monitorizare inteligentă în timp real.

Caracteristicile tehnice oferite de placa de dezvoltare NVIDIA Jetson Orin™ Nano Developer Kit satisfac integral cerințele necesare pentru dezvoltarea unui sistem inteligent de detectare și monitorizare a poluării cu microplastice în ecosistemele acvatice, și anume [12-16]:

Procesor NVIDIA Orin™ Nano SoC cu arhitectură Arm® Cortex-A78AE cu 6 nuclee, cu o frecvență de lucru până la 1.5 GHz;

GPU integrat NVIDIA Ampere™ cu arhitectură GPU cu 1.024 de nuclee CUDA® și 32 Tensor Cores;

Memorie RAM 4 GB LPDDR5, cu lățime de bandă mare, specializată pentru procesare AI intensivă;

Stocare software și date: slot microSD pentru sistem de operare și fișiere;

Interfețe I/O: 1x USB-C pentru alimentare și comunicare, 4x USB 3.2 Gen 2 Type-A, 1x HDMI 2.1 și 1x DisplayPort 1.4, 1x RJ45 Gigabit Ethernet, 1x M.2 Key E pentru module Wi-Fi/Bluetooth, 1x M.2 Key M pentru stocare NVMe, 1x slot cameră CSI, pini GPIO, I2C, I2S, SPI, UART și CAN.

Pentru dezvoltarea produselor program software, producătorul oferă suport complet pentru NVIDIA JetPack SDK, care include: TensorRT, cu optimizări AI specifice pentru inferență; CUDA, cu suport pentru accelerarea paralelă; DeepStream SDK pentru analiză

video; OpenCV, ROS 2, Python, și alte biblioteci AI/ML standard.

Diagrama funcțională a Blocului de procesare a datelor și control numeric pentru implementarea sistemului de detecție și monitorizare a poluării cu microplastice în ecosisteme acvatice este prezentată în Figura 3, unde avem:

SL – sursă de lumină, controlată numeric prin semnale generate de platforma NVIDIA, portul I2C;

FR – fotoreceptor, percepe intensitatea fluxului de lumină ce a trecut prin rezervorul cu apă și-l transmite către platforma NVIDIA, portul I2C;

RCN – robinet cu control numeric, acționat prin semnale generate de platforma NVIDIA, portul I2C;

CV – cameră video, percepe imaginea prin intermediul efectului Tyndall și o transmite la platforma NVIDIA, portul USB 3.2;

LAN – rețea locală, asigură accesul platformei NVIDIA la Internet, conectorul RJ45 Gigabit Ethernet;

KBD – tastatură conectată la portul USB 3.2;

Mouse – conectat la portul USB 3.2;

Monitor – conectat la Display Port 1.4;

Achiziția și preprocesarea datelor – colectarea datelor din porturile de intrare (I2C, USB 3.2) și din surse externe (baze de date din rețeaua Internet). Include și operații de filtrare, normalizare, curățare și completare a datelor;

Stocarea și managementul datelor – prevede depozitarea datelor pentru antrenarea modelelor sau pentru procesarea ulterioară. Este realizată la nivel local, dar poate fi extinsă prin stocare în cloud sau printr-o variantă combinată;

Modele de învățare – include algoritmi de Machine Learning / Deep Learning. Antrenează modele IA utilizând algoritmi precum: Rețele neuronale (CNN, RNN, Transformer), Random Forest, SVM, kNN etc. Se folosesc date istorice pentru învățare.

Motor de inferență și decizie – aplica modelele antrenate pentru a oferi răspunsuri sau a lua decizii automate. Recunoașterea, identificarea și clasificarea imaginilor;

Modul de control/acționare – generează comenzi pentru controlul numeric al dispozitivelor periferice (**SL, RCN, CV**);

Modul de monitorizare și optimizare – urmărește performanța modelelor generate de inteligență artificială. Include auditul, ajustarea și actualizarea acestora;

Interfața cu utilizatorul – permite interacțiunea utilizatorului cu sistemul de inteligență artificială prin intermediul interfeței utilizatorului (UI web), afișarea informației pe ecranul monitorului și introducerea comenzilor cu ajutorul KBD sau Mouse.

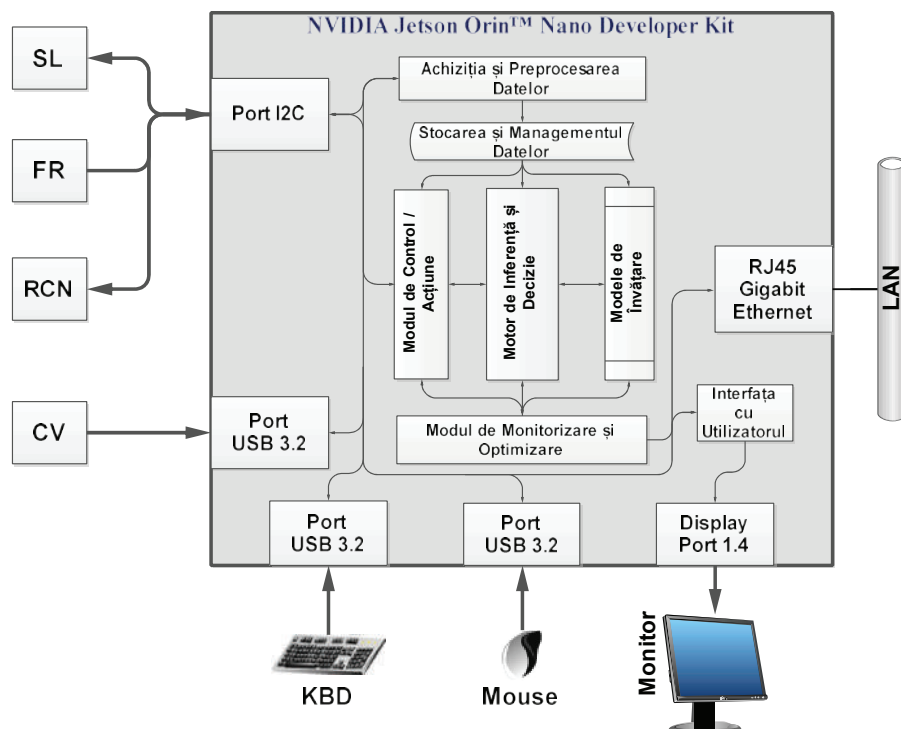


Figura 3. Diagrama funcțională a Blocului de procesare a datelor și control numeric.

CONCLUZII

Poluarea cu microplastice și nanoplastice în ecosistemele acvatice reprezintă una dintre cele mai importante provocări de mediu ale secolului XXI, cu implicații majore asupra biodiversității, sănătății umane și stabilității ecologice la nivel global. Persistența, mobilitatea și capacitatea acestor particule de a interacționa cu alți poluanți chimici fac ca detectarea și monitorizarea lor să fie o sarcină deosebit de complexă și costisitoare, mai ales în condițiile în care metodele tradiționale de laborator implică proceduri cu consum intensiv de resurse și nu permit evaluări în timp real.

În acest context, lucrarea de față propune o soluție tehnologică avansată, prin dezvoltarea și conceptualizarea unui sistem pentru detecția și monitorizarea microplasticelor în medii acvatice. Inovația centrală constă în utilizarea efectului Tyndall – un fenomen optic de dispersie a luminii – pentru a evidenția prezența particulelor de plastic în suspensie, în combinație cu procesarea imaginilor captate video și analiza acestora prin algoritmi de inteligență artificială. Sistemul integrează componente optoelectronice (senzori, sursă laser, cameră video) și un modul de calcul de înaltă performanță (NVIDIA Jetson Orin™ Nano), care asigură procesarea datelor în timp real și automatizarea completă a procesului de monitorizare. Prin arhitectura sa funcțională modulară și controlul numeric al parametrilor de funcționare, sistemul permite realizarea unei evaluări calitative și cantitative a concentrației microplasticelor în apă, fără a necesita intervenții umane

directe sau condiții de laborator. Mai mult, sistemul oferă posibilitatea integrării într-o rețea de monitorizare inteligentă, capabilă să transmită date în timp real către autorități sau centre de decizie, contribuind la o gestionare mai eficientă a resurselor de apă și la intervenții rapide în caz de situații de poluare gravă.

Aportul lucrării este multiplu: se propune o nouă metodologie pentru detectarea poluanților emergenți. Prezenta cercetare valorifică fenomene fizice optice în scopuri ecologice, demonstrează posibilitatea și potențialul aplicării platformelor de inteligență artificială în monitorizarea mediului, oferă o alternativă sustenabilă la metodele convenționale de laborator. În plus, sistemul este eficient energetic, relativ ușor de implementat, cu costuri reduse în comparație cu tehnologiile clasice și prezintă un potențial ridicat de extindere și adaptare la alte tipuri de poluanți coloidalii.

În consecință, lucrarea oferă un cadru tehnic și tehnologic viabil pentru dezvoltarea unor soluții de monitorizare ecologică scalabile, autonome și inteligente, care pot contribui semnificativ la îmbunătățirea politicilor de mediu, protejarea ecosistemelor acvatice și reducerea impactului negativ al poluării cu plastic asupra sănătății umane și a mediului înconjurător. Într-un context global în care tranziția spre sustenabilitate devine o prioritate, integrarea unor astfel de sisteme în infrastructura de mediu este nu doar oportună, ci și necesară.

Aplicarea efectului Tyndall în studiul microplasticelor deschide o nouă direcție de monitorizare ecologică accesibilă, neinvazivă și eficientă energetic.

Detectarea timpurie a acestor poluanți în sursele de apă poate reduce riscul acumulării lor în rețelele trofice și contribuie la protejarea sănătății ecosistemelor și a populației umane. Pentru viitor, sunt planificate cercetări privind implementarea, testarea și evaluarea sistemului propus, cu utilizarea modelelor de rețele neuronale în procesul de identificare și monitorizare a poluanților de microplastice în ecosisteme acvatice, fântâni și rețele de alimentare cu apă.

BIBLIOGRAFIE

1. Sivasankar, V.; Sunitha, T.G. *Microplastics and Pollutants: Interactions, Degradations and Mechanisms*. Springer, 2024. 322 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-031-54565-8>
2. Wagner, M.; Lambert, S. *Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminations*, *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer, 2018. 301 p., DOI: 10.1007/978-3-319-61615-5
3. Muthu, S.S. *Microplastic Pollution. Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing and Chemistry*. Springer, 2021, 174 p., <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0297-9>
4. Shah Nawaz, M.; Adetunji, C.O.; Dar, M.A.; Zhu, D. *Microplastic Pollution*. Springer, 2024. 546 p., <https://doi.org/10.1007/978-981-99-8357-5>
5. Tyndall, J. On the blue colour of the sky, the polarization of skylight, and on the polarization of light by cloudy matter generally. In: *Proc. R. Soc. Lond.* 17, 1869, 223-233, DOI: <https://doi.org/10.1098/rspl.1868.0033>
6. Helmenstine, A.M. Tyndall Effect Definition and Examples, [online] <https://www.thoughtco.com/definition-of-tyndall-effect-605756?print> (consultat: 19.05.2025).
7. Galloway, T.S.; Cole, M. and Lewis, C. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. In: *Nature ecology & evolution*, 1(5), 0116, 2017, p. 21.
8. Prata, J.C. Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions. In: *Marine pollution bulletin*, 129(1), 2018, 262-265, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.046>
9. Sharma, S. and Chatterjee, S. Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review. In: *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 2017, 21530-21547, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9910-8>
10. Nicolai, E.; Pizzoferrato, R.; Li, Y.; Frattegiani, S.; Nucara, A., and Costa G. A New Optical Method for Quantitative Detection of Microplastics in Water Based on Real-Time Fluorescence Analysis. In: *Water*, 14(20), 2022, 3235, <https://doi.org/10.3390/w14203235>
11. Sarker, M.A.B.; Butt, U.; Imtiaz, M.H., and Baki, A.B. Automatic Detection of Microplastics in the Aqueous Environment. In: *The 2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2023, 0768-0772, DOI: 10.1109/CCWC57344.2023.10099253
12. NVIDIA Corporation. (2023). *Jetson Orin Nano Developer Kit User Guide*, [online] <https://developer.nvidia.com/embedded/learn/jetson-orin-nano-devkit-user-guide/index.html> (consultat: 05.06.2025).
13. NVIDIA Corporation. (2023). *Jetson Linux Developer Guide. Versiunea JetPack 6.0*, [online] <https://docs.nvidia.com/jetson/> (consultat: 12.06.2025).
14. NVIDIA Developer. (2023). *Jetson Orin Nano Module Datasheet*, [online] <https://developer.nvidia.com/embedded/downloads> (consultat: 16.06.2025).
15. JetsonHacks (2023). *Getting Started with Jetson Orin Nano. Tutoriale și resurse video*, [online] <https://www.jetsonhacks.com/> (consultat: 21.06.2025).



Aurel David. *Floarea-soarelui*, relief decorativ, sec. XX, ghips, tonare, 61 × 60 cm (colecția MNAM).