Co-funded by the European Union

INCDPM IO – BAS ARCES ORDU UkrSCES MBNAR TUIASI



ISBN 978-606-28-2329-0
www.editurauniversitara.ro

Coordonator proiect 101124670 – INCDPM
Ing. DEÁK György, Ph.D. Habil
Membru Asociat al Academiei O.S.R. (INCDPM)

MANUAL PRIVIND METODOLOGIA DE EVALUARE A POLUĂRII MARINE ȘI SURSELE ACESTEIA

Black Sea SIERRA



EDITURA UNIVERSITARĂ



MANUAL PRIVIND METODOLOGIA DE EVALUARE A POLUĂRII MARINE ȘI SURSELE ACESTEIA

Black Sea SIERRA

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Coordonator proiect 101124670 – Black Sea SIERRA
Ing. DEÁK György Ph.D. Habil
Membru Asociat al Academiei O.S.R. (INCDPM)

MANUAL PRIVIND METODOLOGIA DE EVALUARE A POLUĂRII MARINE ȘI SURSELE ACESTEIA

Black Sea SIERRA

EDITURA UNIVERSITARĂ
Bucureşti

Redactor: Laura Nicolescu
Tehnoredactor: Ameluţa Vişan
Coperta: Monica Balaban

Editură recunoscută de Consiliul Naţional al Cercetării Ştiinţifice (C.N.C.S.) şi inclusă de Consiliul Naţional de Atestare a Titlurilor, Diplomelor şi Certificatelor Universitare (C.N.A.T.D.C.U.) în categoria editurilor de prestigiu recunoscut.

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
Manual privind metodologia de evaluare a poluării marine şi sursele acesteia / coord.: György Deák. –
Bucureşti : Editura Universitară, 2026
Conţine bibliografie
ISBN 978-606-28-2329-0

I. Deák, György (coord.)

504
556

DOI: (Digital Object Identifier): 10.5682/9786062823290

© Toate drepturile asupra acestei lucrări sunt rezervate, nicio parte din această lucrare nu poate fi copiată fără acordul Editurii Universitare

Copyright © 2026
Editura Universitară
Editor: Vasile Muscalu
B-dul. N. Bălcescu nr. 27-33, Sector 1, Bucureşti
Tel.: 021.315.32.47
www.editurauniversitara.ro
e-mail: redactia@editurauniversitara.ro

Distribuţie: tel.: 021.315.32.47 / 0745 200 718/ 0745 200 357
comenzi@editurauniversitara.ro
www.editurauniversitara.ro

DETALII DOCUMENT

Acronim proiect	**Black Sea SIERRA**
Titlu proiect	Harnessing complementary curricular preparedness via sustainable management in response to civil and military pollution on the coastline, tributaries and lagoons in Black Sea's North, West, South zone
Numărul acordului de finanțare	101124670
Coordonatorul consorțiului	Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Protecția Mediului, București (INCDPM)
Durata proiectului	36 luni (01.10.2023 – 30.09.2026)
Autoritatea care acordă finanțarea	European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA)
Program de finanțare	European Maritime, Fisheries and Aquaculture Fund (EMFAF)
Apel	EMFAF-2023-PIA-FLAGSHIP - Regional flagships projects supporting sustainable blue economy in EU sea basins
Temă	EMFAF-2023-PIA-FLAGSHIP-2-BLACK - Harnessing preparedness and response to marine pollution in the Black Sea
Titlu document	***Manual privind metodologia de evaluare a poluării marine și sursele acesteia***
Pachet de lucru	WP6
Nivel de diseminare	PU - Public
Autori	DEÁK György, Tudor Georgeta, Matei Monica, Harabagiu Alexandra, Istrate Iulia - *Institutul Naţional De Cercetare-Dezvoltare Pentru Protecţia Mediului Bucureşti (INCDPM)* Pernice Alessandro, Terranova Melinda (*ARCES*) Mehmet Aydin - *Ordu Universitesi (ORDU)* Viktor Komorin, Yuliia Kotelnikova - *Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea (UkrSCES)* Pazara Tiberiu, Apetroaei Manuela Rossemary, Toma Alecu, Nedelcu Andra - *Academia Navală „Mircea cel Bătrân" (MBNAR)* Vizureanu Petrică, Sandu Andrei, Burduhos-Nergis Dumitru Doru - *Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iaşi (TUIASI)*

DISCLAIMER

Proiect finanțat de Uniunea Europeană. Punctele de vedere și opiniile exprimate aparțin însă exclusiv autorului (autorilor) și nu reflectă neapărat poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană, nici autoritatea care acordă finanțarea nu pot fi trase la răspundere pentru acestea.

MEMBRII CONSORȚIUM

Coordonator

INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE-DEZVOLTARE PENTRU PROTECȚIA MEDIULUI BUCUREȘTI - INCDPM
România

P1

INSTITUTUL DE OCEANOLOGIE DIN BULGARIA, ACADEMIA BULGARĂ DE ȘTIINȚE - IO-BAS
Bulgaria

P2

ORGANIZAȚIA E.M. A.R.C.E.S. - ARCES
Italia

P3

UNIVERSITATEA ORDU - ORDU
Turcia

P4

CENTRUL ȘTIINȚIFIC UCRAINEAN DE ECOLOGIE MARINĂ - UkrSCES
Ucraina

P5

ACADEMIA NAVALĂ MIRCEA CEL BĂTRÂN - MBNAR
România

P6

UNIVERSITATEA TEHNICĂ GHEORGHE ASACHI DIN IAȘI - TUIAȘI
România

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

CUPRINS

Capitolul 1. Introducere și contextul proiectului .....

1.1. Obiectivele proiectului Black Sea SIERRA 15

1.1.1. Identificarea elementelor poluante și a regiunilor intens poluate (puncte fierbinți). 15

1.1.2. Prelevări din diferite compartimente ale ecosistemului 15

1.1.3. Armonizarea metodologică între țări 16

1.1.4. Tehnologii inovatoare și remediere 16

1.1.5. Gestionare durabilă, consolidarea capacităților și cooperare transfrontalieră 16

1.2. Rezultatele unor studii recente care indică presiunea de poluare asupra Mării Negre 17

1.3. Scopul manualului 22

1.4. Metodologia de elaborare a manualului 22

Capitolul 2. Ghid metodologic al consorțiului 24

2.1. Strategii de prelevare la nivelul proiectului: protocolale comune de tern stabilite pentru matricile de apă, sedimente și biotă în regiunile de nord, vest și sud ale Mării Negre..... 24

2.1.1. Modul de prelevare 25

2.1.2. Matricea-protocoale specifice 26

2.1.3. Păstrarea și transportul probelor 27

2.2 Proceduri analitice standard de laborator: procese de pregătire a probelor 28

2.2.1. Conservarea probelor, reactivi și transport 28

2.2.4. Metale grele în apă și sedimente 30

2.2.5. Procesarea carotelor sedimentare și analiza geochimică 31

2.3. Metode statistice și metodologia de evaluare a datelor 32

Capitolul 3. Surse de poluare, distribuții și impactul conflictelor armate 33

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

3.1. Analiza surselor de poluare la nivelul bazinului: examinarea și compararea la scară regională a impactului deversărilor fluviale, activităților industriale și deșeurilor urbane asupra distribuției elementelor în apă și sediment. 33

3.1.1. Relațiile dintre regiuni și distribuția elementelor în sedimente 33

3.1.2. Comparații regionale ale concentrațiilor elementelor din sedimente 37

3.1.3. Relațiile și gruparea ierarhică a parametrilor apei și a elementelor 38

3.1.4. Gruparea spațială și caracteristicile regionale 39

3.1.5. Distribuția microplasticelor, caracteristicile morfologice și compoziția polimerică în sedimente 41

3.2. Compararea datelor din perioada anterioară și ulterioară conflictului armat: variațiile riscului evidențiate prin compararea datelor actuale obținute din zonele afectate de conflict cu datele istorice 43

3.2.1. Compararea datelor istorice și a datelor actuale utilizând carote de sediment 43

3.2.2. Obiectivul programului de monitorizare a poluării asociate conflictului armat 49

Capitolul 4. Bioacumularea și managementul riscului pentru sănătatea umană 52

4.1. Acumularea elementelor în organisme bioindicatoare: capacitatea de acumulare și procesele de biotransfer al elementelor la pești, macroalge și moluște 52

4.2. Modele de evaluare a riscurilor pentru sănătatea umană: riscuri de natură carcinogenă (CR) și necarcinogenă (THQ, HI) calculate pe baza consumului de fructe de mare. 57

4.2.1. Constatări critice care depășesc limita superioară acceptabilă de risc (10^{-4}) 59

4.2.2. Rezultate încadrate în intervalul de risc care necesită monitorizare (10^{-6}–10^{-4}) 59

4.2.3. Analize situate sub limita de risc ($<10^{-6}$) și contrastul cu TCR 60

4.2.4. Concluzii 61

5. Soluții inovatoare de remediere 62

5.1. Baza de date privind soluțiile tehnologice de remediere. Prezentarea celor mai avansate metode („state-of-the-art”) utilizate la nivel mondial și regional pentru combaterea poluării marine 62

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

5.1.1. Metode de tratare a poluării cu produse petroliere 62
5.1.2. Metode de tratare a deșeurilor plastice 63
5.1.3. Metode pentru combaterea eutrofizării și îndepărtarea nutrienților 63
5.1.4. Metode de tratare a poluării cu metale grele și contaminanți chimici 63
5.1.5. Concluzii 64
5.2. Protocolul de depoluare SIERRA: o descriere detaliată a designului, a mecanismului de funcționare și a posibilelor utilizări ale prototipului inovator creat în timpul proiectului. . 64
5.2.1. Geopolimerii ca materiale inteligente ecologice 64
5.2.2. Proiectarea prototipului de remediere a poluării marine 65
5.2.3. Producerea și caracterizarea filtrelor inteligente 65
5.2.4. Identificarea și caracterizarea materiilor prime adecvate 65
5.2.5. Identificarea celei mai adecvate metode de obținere 67
5.2.6. Caracterizarea geopolimerilor 68
5.2.7. Validarea in situ a prototipului de soluție pentru remedierea poluării marine 68
5.2.8. Concluzii 72
6. Evaluare generală și concluzii 73
6.1. Sinteza rezultatelor proiectului: o evaluare holistică a datelor privind poluarea, riscurile și remedierea obținute la nivelul bazinului Mării Negre 73
6.2. Plan pentru programele viitoare de monitorizare: pași strategici care trebuie întreprinși în viitor pentru managementul marin durabil și combaterea poluării 75
6.2.1. Stabilirea unor rețele de monitorizare adaptive integrate tehnologic 76
6.2.2. Instituționalizarea legăturii dintre știință și politici publice, integrarea datelor și consolidarea capacităților 76
6.2.3. Extinderea la scară largă a tehnologiilor pasive de remediere în teren (Scaling-Up).. 77
6.2.4. Cooperare transfrontalieră orientată către riscul cumulativ și legislația de mediu ... 78
Bibliografie 79
Anexe 82

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

LISTĂ DE FIGURI

Figura 1. Harta zonei de studiu 28
Figura 2. Clustering ierarhic și matrice heatmap care ilustrează relațiile geochimice și modelele de distribuție regională ale metalelor grele (normalizate prin scor Z) în locațiile costiere și fluviale investigate 35
Figura 3. Hartă termică (heatmap) și analiză de grupare ierarhică a parametrilor calității apei și a elementelor urmă din bazinul Mării Negre. 39
Figura 4. Profilele verticale ale C_{tot} (%), C_{org} (% DW), C_{inorg} (%), N_{tot} (%), P_{tot} (mg kg^{-1}), $\delta^{13}C$ (‰), $\delta^{15}N$ (‰), C_{org}/N_{tot} (raport) și N_{tot}/P_{tot} (raport) 45
Figura 5. Profilele verticale ale concentrațiilor elementelor, raportate la limitele Effect Range Low (ERL) și Effect Range Median (ERM) (Long și Morgan, 1991). 46
Figura 6. Variația Indicelui Poluării cu Metale (MPI) între diferite grupe taxonomice și tipuri de țesuturi de pe litoralul României și al Turciei..... 54
Figura 7. Reprezentarea prin diagramă cordală a relațiilor interdependente dintre factorii BAF și BSAF pentru cele 11 elemente analizate la taxonii non-ichtiofaunici..... 56
Figura 8. Diagramă aluvială pentru relațiilor BAF și BSAF ale celor 11 elemente pentru taxonii de pești 58
Figura 9. Prima (A) și a doua (B) variantă de proiectare a prototipului pentru remedierea poluării mediului marin (Burduhos Nergis și colab., 2025)..... 66
Figura 10. Cartarea elementală a geopolimerilor înainte (A) și după (B) utilizarea acestora în filtrarea apei sărate 70
Figura 11. Morfologia geopolimerilor înainte (A) și după (B) utilizarea în filtrarea apei sărate..... 71

LISTĂ DE TABELE

Tabelul 1. Estimarea riscurilor carcinogene (CR și TCR) asociate expunerii la metale grele prin consumul de pește din trei ecosisteme acvatice (Tunca et al., 2026). 59

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

CAPITOLUL 1
INTRODUCERE ȘI CONTEXTUL PROIECTULUI

Proiectul Black Sea SIERRA își propune să evidențieze diferitele încărcări de poluare din Marea Neagră prin prelevarea de probe din zonele de nord, vest și sud ale acesteia. În acest cadru, proiectul este conceput pentru a investiga presiunea de poluare exercitată asupra ecosistemului de către activitățile civile și de către conflictele militare recente de o importanță semnificativă, prin colectarea de probe de apă, sedimente și biotă din mare, din gurile de vărsare ale râurilor și din lagune. De asemenea, proiectul include în sfera sa de activitate partajarea rezultatelor cu factorii de decizie și furnizarea de instruire necesară. Obiectivele și scopurile proiectului pot fi grupate sub următoarele categorii.

1.1. Obiectivele proiectului Black Sea SIERRA

1.1.1. Identificarea elementelor poluante și a regiunilor intens poluate (puncte fierbinți)

În acest context, obiectivul principal este de a evidenția elementele responsabile pentru încărcarea de poluare. Determinarea stării actuale a numeroșilor agenți toxici, precum metalele grele, poluarea cu nutrienți și microplasticele din Marea Neagră, se află de asemenea printre obiectivele proiectului. Pe lângă acestea, identificarea regiunilor în care acești poluanți sunt concentrați, respectiv a „punctelor fierbinți” (hotspots), are o importanță majoră.

1.1.2. Prelevări din diferite compartimente ale ecosistemului

Pentru a evidenția starea actuală de poluare a ecosistemului printr-o abordare holistică, sunt incluse în planul de prelevare atât compartimentele abiotice (apă și sedimente), cât și cele biotice (plante, moluște și pești pentru determinarea elementelor). Pentru a evidenția transferul din apă și sedimente către țesuturile vii, respectiv profilul de bioacumulare, au fost vizate prelevări de la organisme aflate la diferite niveluri trofice. Această abordare permite evaluarea integrată a transportului și acumulării poluanților (elementelor) de-a lungul lanțului trofic.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

1.1.3. Armonizarea metodologică între țări

Stabilirea unei metodologii comune de prelevare în teren și de analiză de laborator între țările participante în proiect a fost vizată. Prin acest obiectiv s-a urmărit reducerea la minimum a diferențelor care pot apărea din utilizarea unor metodologii diferite între țări. În plus, prin aceste protocoale standardizate se urmărește ca rezultatele obținute în întregul bazin al Mării Negre să fie pe deplin comparabile între ele.

1.1.4. Tehnologii inovatoare și remediere

Curățarea unui mediu deja poluat reprezintă un proces extrem de dificil, care generează o încărcare de stres intensă asupra ecosistemului. În plus, rata sa de succes este, de asemenea, redusă. Printr-o abordare inovatoare, în cadrul proiectului s-a vizat dezvoltarea unui dispozitiv prototip pentru teste de remediere. Cu ajutorul acestui dispozitiv, se urmărește efectuarea de teste de remediere la nivel experimental pentru tipuri specifice de poluanți, pe coastele Mării Negre cu caracteristici diferite. De asemenea, identificarea celor mai bune tehnici disponibile (BAT) pentru intervenția asupra stării actuale de poluare din Marea Neagră se numără printre obiectivele proiectului.

1.1.5. Gestionare durabilă, consolidarea capacităților și cooperare transfrontalieră

Unul dintre cele mai importante obiective ale proiectului nu este doar producerea de rezultate științifice, ci și prezentarea unor rezultate care să asigure adoptarea măsurilor corecte de către autoritățile competente și factorii de decizie. De asemenea, se urmărește realizarea acestui obiectiv printr-o integrare multinațională între state membre ale Uniunii Europene (Italia, Bulgaria și România) și state din afara Uniunii Europene (Turcia și Ucraina). Acest protocol comun de lucru, care contribuie la construirea unei culturi comune de conservare a Mării Negre pe axa știință–politici publice, reprezintă, de asemenea, unul dintre cele mai importante obiective ale proiectului.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

1.2. Rezultatele unor studii recente care indică presiunea de poluare asupra Mării Negre

În studiul realizat de Önel și colaboratorii în 2025 în 8 orașe de-a lungul coastei Mării Negre din Turcia, au fost analizate nivelurile de acumulare a elementelor în *Mytilus galloprovincialis* și *Rapana venosa*. Clasamentul cantităților medii ale elementelor a fost: Fe > Al > Zn > Cu > As > Mn > B > Cd > Se > Ni > Cr > Pb > Co > Hg. Cantitățile medii au fost determinate, în ordine, ca 114,8 > 79,7 > 39,49 > 9,75 > 5,74 > 3,22 > 2,97 > 2,74 > 0,72 > 0,40 > 0,24 > 0,22 > 0,11 > 0,015 µg g−1. În timp ce MPI în Mytilus galloprovincialis a fost determinat ca fiind 1,25, MPI în Rapana venosa a fost de 2,51. De asemenea, valoarea THQ pentru Cd a fost determinată ca fiind peste 1, iar consumul său a fost raportat ca fiind inadecvat din punctul de vedere al sănătății publice (Önel et al., 2025).

În studiul realizat de Terzi și colaboratorii pe coastele Mării Negre din Turcia în 2025, au fost efectuate cercetări privind microplasticele în 29 de râuri. Conform rezultatelor, cantitatea de microplastice a fost determinată ca fiind 9,63 ± 1,27 MP m−3, cu un interval cuprins între 1,03 și 29,8 MP m−3. Capacitatea anuală de descărcare a fost de 1,49 × 10^1. Cele mai frecvent întâlnite tipuri de microplastice au fost: tereftalat de polietilenă 59,3% ± 2,66%, polietilenă 20,8% ± 2,04% și polipropilenă 14,1% ± 2,36% (Terzi et al., 2025).

Akçay și Kobya au investigat concentrațiile unor radionuclizi în algele brune de pe coastele estice ale Mării Negre din Turcia. Conform rezultatelor, valorile determinate au fost: ^{226}Ra 11,2, ^{232}Th 7,61, ^{137}Cs 2,74 și ^{40}K 690,7 Bq/kg. Doza efectivă anuală a fost calculată între 1,37–18,83 µSv/an. În consecință, rezultatele nu indică un potențial de risc (Akçay și Kobya, 2024).

În studiul publicat în 2025, Dağtekin și colaboratorii au investigat cantitatea de deșeuri bentonice dispersate în sedimente. Studiul a fost realizat în sectorul estic al coastelor Mării Negre din Turcia. Conform rezultatelor, densitatea medie a deșeurilor este de 48.744,69 ± 7.543,02 obiecte/km² și 151,35 ± 14,04 kg/km². Materialele plastice au reprezentat peste 50% din deșeuri, iar cele mai frecvente au fost pungile (36,4%) și sticlele (18,97%) (Dağtekin et al., 2025).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

În studiul realizat de Pramatarov și colaboratorii pe 4 specii diferite de bivalve de pe coastele Mării Negre din Bulgaria, au fost investigate atât microplasticele, cât și elementele Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn și Fe. Rezultatele au arătat că 94,7% dintre microplasticele identificate în specii au fost constituite din granule (pellets), iar în mod specific Pb a declanșat în mod semnificativ oxidarea proteinelor și modificarea nivelurilor de glutation (Pramatarov et al., 2025).

În studiul realizat de Bobchev și colaboratorii pe coastele Mării Negre din Bulgaria în 2024, au fost investigate cantitățile și tipurile de microplastice din sedimente. Rezultatele sunt următoarele: 464,44 ± 272,50 MP/kg în probele de plajă și 825,93 ± 396,30 MP/kg în probele de fund marin. În zonele costiere fără activitate antropică, valorile au fost de 84,44 ± 147,57 MP/kg în probele de plajă și 550,62 ± 245,71 MP/kg în probele de fund marin. Se consideră că poluarea generată de deșeurile de pe fundul mării reprezintă sursa microplasticelor (Bobchev et al., 2024).

În studiul realizat în 2024 de Nemirovskaya și colaboratorii, au fost analizate hidrocarburile alifatice și hidrocarburile aromatice policiclice (PAH) în materia particulată în suspensie din apă și în sedimentele de fund marin. În apele de suprafață offshore din golfurile Gelendzhik și Golubaya din Rusia, concentrația medie a hidrocarburilor alifatice a fost determinată ca fiind ≈20 µg/L, iar a PAH ≈130 ng/L (Nemirovskaya et al., 2024).

În studiul din 2024 realizat de Zakharikhina și colaboratorii, au fost analizate nivelurile de elemente de tip trace și ale elementelor de pământuri rare în macroalge marine. În cadrul studiului efectuat la gura de vărsare a râului Sochi din Rusia, a fost dezvoltat un nou indice denumit „Indicele total de poluare (Zc)”. De asemenea, s-a constatat că profilul de acumulare a elementelor în macroalgele din regiune, în special al elementelor de pământuri rare, reflectă în mod direct profilul geochimic regional transportat din valea râului Sochi (Zakharikhina et al., 2024).

În studiul realizat de Nemirovskaya și colaboratorii în 2025, a fost investigată starea poluării cu combustibili reziduali provenită din deversarea navelor-tanc Volgoneft-212 și Volgoneft-239. Compoziția bitumului cloroformat, a hidrocarburilor alifatice și a hidrocarburilor aromatice policiclice (PAH) a fost comparată cu cea identificată pe plaje, în

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

suspensia apelor de fund și în sedimentele de fund. Rezultatele arată că zona din proximitatea Anapa reprezintă regiunea cea mai critică din punct de vedere al poluării (Nemirovskaya et al., 2025).

În studiul realizat de Shoman și colaboratorii în 2026 pe coastele Sevastopolului din Marea Neagră, au fost investigate efectele toxice ale nanoparticulelor de oxid de zinc (ZnO) și oxid de cupru (CuO), precum și impactul acestora asupra comunității naturale de picofitoplancton din Marea Neagră. Conform rezultatelor, nanoparticulele de CuO au suprimat activitatea fotosintetică a algelor într-o manieră dependentă de doză (EC50 = 18,3 µg/L). De asemenea, la o concentrație de 20 µg/L, acestea au modificat structura comunității în favoarea picoeucariotelor, în proporție de 90–98%. În ceea ce privește nanoparticulele de ZnO, s-a observat că acestea au inhibat selectiv creșterea cianobacteriilor conținând ficobilină din regiune (Shoman et al., 2026).

În studiul multi-matriceal desfășurat pe o perioadă de 6 ani, publicat în 2025 de Oros și colaboratorii, au fost raportate cantitățile de Cd, Pb, Ni, Cr, Cu și Co în apele de suprafață ale Mării Negre din zona României. Cea mai ridicată concentrație medie a fost înregistrată pentru Cu, cu 10,80 µg/L. Limitele legale de poluare au fost depășite în proporție de 13% pentru Pb, 10% pentru Cd, 7% pentru Cu și 4% pentru Ni. Din cele 277 de probe de sedimente analizate, concentrația medie de Ni (40,20 µg/g) a depășit pragul de poluare (ERL = 20,9 µg/g) în peste 75% dintre probe; Cu și Pb au depășit acest prag în proporții de 21%, respectiv 4% (Oros et al., 2025).

În studiul realizat de Ciucă și colaboratorii în 2025, a fost efectuată o evaluare inițială a cantității, culorii, formei și dimensiunii microplasticelor din branhii și tractul digestiv al speciei *Engraulis encrasicolus* (hamsia europeană), colectată din diferite locații de-a lungul coastei românești a Mării Negre. Plasticul a fost detectat în sistemul digestiv și în branhii la 88% dintre indivizii analizați. În cadrul analizelor, 98,5% dintre particule au fost clasificate ca microplastice, iar 1,5% ca mezoplastice. A fost identificat un număr mediu de 3,03 particule de plastic per individ. De asemenea, cel mai frecvent tip de poluant a fost reprezentat de fibre transparente cu dimensiuni cuprinse între 330 µm și 1 mm (Ciucă et al., 2025).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

În studiul comun realizat de Bărbulescu și Barbeș în 2026, calitatea apei a fost analizată dintr-o perspectivă microbiologică (*E. coli* și enterococi intestinali) pe 20 de plaje diferite de-a lungul coastelor românești ale Mării Negre. Deși în majoritatea locațiilor au fost respectate standardele de calitate ale Uniunii Europene privind apa, contaminarea bacteriană a fost detectată în Năvodari, Vadu și Mamaia (Bărbulescu și Barbeș, 2026).

În studiul realizat de Damir și colaboratorii pe coastele românești ale Mării Negre în 2026, au fost investigate prezența și transferul trofic al metalelor grele, al poluanților organici persistenți (POP-uri: OCP-uri și PCB-uri) și al hidrocarburilor aromatice policiclice (PAH) în lanțul trofic. Conform rezultatelor cercetării, în timp ce transferul trofic al metalelor grele a prezentat variabilitate, poluanții organici (în special PCB-urile) au evidențiat o biomagnificare mai pronunțată în relațiile bentonice pradă–prădător. În general, în cadrul studiului s-a constatat că poluanții organici prezintă o biomagnificare mai puternică în rețeaua trofică comparativ cu metalele grele (Damir et al., 2026).

În studiul realizat de Snigirova și colaboratorii pe coastele Mării Negre din Ucraina în 2024, au fost analizate densitatea microplasticelor și relația acestora cu ihtioplanctonul. Conform rezultatelor obținute, s-a constatat că 75% dintre microplastice au formă de fibre (predominant negre și roșii), iar 25% sunt sub formă de fragmente, fiind compuse din polietilenă, poliester, poliuretan și polipropilenă. De asemenea, acestea au fost detectate la o densitate de 136±74 în stratul neustonic și 46±30 particule/m³ în stratul hiponeustonic (Snigirova et al., 2024).

În studiul datat 2025 realizat de Kvach și colaboratorii, a fost analizat impactul războiului dintre Rusia și Ucraina asupra biodiversității din regiune. A fost abordat în detaliu impactul aportului brusc și de mare volum de apă dulce în Marea Neagră, asociat cu detonarea barajului de la Kakhovka. În studiu se menționează că activitățile militare (deversări de petrol, explozii, incendii) și distrugerea barajului de la Kakhovka, produsă la 6 iunie 2023, reprezintă cel mai mare dezastru ecologic, conducând la distrugerea habitatelor și pierderi de populații. În contrast, s-a evidențiat că presiunile antropice reduse ca urmare a războiului, precum traficul maritim, pescuitul și turismul, au generat o recuperare temporară a ecosistemului (Kvach et al., 2025).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

În studiul realizat de Boitsov și colaboratorii în 2026 pe coastele Mării Negre din Bulgaria, au fost analizați o serie de agenți toxici organici și anorganici. Studiul a avut ca scop și investigarea efectelor războiului în curs dintre Ucraina și Rusia asupra coastelor bulgare. În cercetarea publicată în 2026 au fost utilizate 32 de probe de sedimente de suprafață și 4 carote sedimentare. Pe lângă metale, au fost analizați și PAH, PCB, PBDE, DDT, HCH, HCB și PFAS. Conform rezultatelor, nivelurile de poluanți sunt scăzute în majoritatea locațiilor. Totuși, s-a detectat o poluare ridicată în porturile Varna și Burgas, precum și la gura de vărsare a râului Kamchia. PBDE și PFAS au fost raportate pentru prima dată în regiune. Deși în probele din carote s-a observat o creștere a PAH, nu a fost detectat un efect antropic asupra metalelor (Boitsov et al., 2026).

Studiul realizat de Komorin și colaboratorii pe coastele Odessei din Ucraina a fost publicat în 2026. Acesta acoperă perioada 2019–2025. În intervalul afectat de război, 2023–2025, au fost detectate scăderi ale nivelurilor minime de oxigen dizolvat și vârfuri bruște ale nutrienților. De asemenea, au fost identificate fluctuații intense ale metalelor grele și ale poluanților organici de-a lungul transectului râu–mare. Reziduurile de petrol ajunse pe țărm în 2025 au fost analizate, iar în cadrul studiului s-a demonstrat că acestea provin din surse multiple. Condițiile de război au generat în regiune puncte fierbinți (hotspots) concentrate în apropierea liniei de coastă, cu impact pe termen scurt, dar cu efecte puternice de perturbare a ecosistemului, mai degrabă decât o poluare generală și uniform distribuită (Komorin et al., 2026).

În studiul datat 2025 realizat de Jiang și colaboratorii, au fost analizați diferiți parametri în estuarul Nipru–Bug și în apele costiere ale Odessei, în perioada de după distrugerea barajului de la Kakhovka, fiind urmărită presiunea pe termen scurt exercitată asupra ecosistemului. Datele au fost colectate atât prin măsurători in situ, cât și prin imagini satelitare. Conform rezultatelor studiului, calitatea apei s-a deteriorat dramatic, concentrațiile de solide în suspensie totale și densitatea de clorofilă-a au crescut de peste 50 de ori față de valorile medii, iar transparența apei (disc Secchi) a scăzut semnificativ. Această situație a declanșat înfloriri algale severe, cu o durată de aproximativ 20 de zile (Jiang et al., 2025).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

1.3. Scopul manualului

Acest manual are ca scop consolidarea colaborării dintre mediul științific și factorii de decizie, precum și înțelegerea stării actuale a poluării în întreaga regiune și investigarea impactului războiului asupra acesteia. Obiectivele principale pot fi enumerate după cum urmează:

- **Determinarea stării actuale de poluare:** stabilirea, într-o abordare holistică, a stării generale de poluare a regiunii de studiu prin analiza compartimentelor abiotice și biotice.
- **Dimensiunea ecologică a războiului:** evidențierea, în toate dimensiunile sale, a stresului de poluare pe care războiul dintre Rusia și Ucraina l-a generat în regiune.
- **Testarea soluției de remediere specifice regiunii**: simularea reducerii cantității de poluanți la nivel regional prin utilizarea prototipului dezvoltat în cadrul proiectului.
- **Standardizarea metodologică:** dezvoltarea unei metodologii comune de lucru la nivelul întregului bazin al Mării Negre.
- **Politici regionale bazate pe dovezi:** crearea unei infrastructuri științifice pentru factorii de decizie.
- **Consolidarea capacităților și acțiunea comună:** dezvoltarea unei culturi a acțiunii comune prin stabilirea cooperării transfrontaliere.

1.4. Metodologia de elaborare a manualului

Metodologia de elaborare a acestui manual se bazează pe abordarea integrată a rapoartelor generate în cadrul proiectului, printr-o structură pe niveluri (straturi) multiple, în locul tratării acestora ca elemente separate. Fundamentul acestor straturi îl constituie stabilirea unei „metodologii comune” care unește cele 5 țări într-un consens comun.În manual, primul strat metodologic este situat imediat deasupra acestui fundament reprezentat de metodologia comună. Compartimentele abiotice (apă și sedimente) prelevate simultan în cadrul proiectului din zonele de nord, vest și sud ale bazinului Mării Negre constituie acest prim strat. Acest nivel evidențiază atât diferențele temporale, cât și distribuția spațială a poluării. În plus, comparațiile istorice realizate prin probele de carote sedimentare sunt de o importanță majoră

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

pentru acest strat al manualului. Al doilea strat metodologic este reprezentat de compartimentul biotic. O caracteristică importantă a acestui strat este evidențierea bioacumulării în diferite țesuturi ale organismelor aflate la diferite niveluri trofice. Al treilea strat din manual include investigarea riscurilor pentru sănătatea umană generate de bioacumularea în organismele consumate de populație. Al patrulea strat este dedicat gestionării acestor riscuri identificate. În acest context, metodele de remediere adaptate bazinului Mării Negre au fost identificate din literatura de specialitate, iar prototipul inovator SIERRA dezvoltat în cadrul proiectului este evidențiat în manual.

În procesul de creare a tuturor acestor niveluri, s-a adoptat ca principiu fundamental al manualului simplificarea simultană a metodelor ecotoxicologice complexe, a metodelor de evaluare și a numeroaselor abordări statistice inerente naturii pachetelor de lucru, precum și prezentarea acestora într-o structură clară și ușor de înțeles. Motivul acestei abordări este necesitatea ca manualul să fie accesibil tuturor categoriilor sociale, în special factorilor de decizie și legiuitorilor. În plus, acest manual nu s-a limitat doar la informațiile generate în cadrul proiectului. Noile rezultate obținute pe parcursul proiectului au fost integrate, acolo unde a fost necesar, cu rezultatele științifice anterioare, fiind astfel creat un document armonizat cu literatura de specialitate. În acest mod, au fost evidențiate atât similitudinile, cât și diferențele dintre noile constatări și cele raportate în studiile anterioare.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

CAPITOLUL 2

GHID METODOLOGIC AL CONSORȚIULUI

Acordul asupra unei metodologii comune are o importanță majoră pentru studiul desfășurat de 5 țări diferite într-un bazin atât de vast. În paralel, prelevările din compartimentele abiotice (apă și sedimente) și biotice (specii bioindicatoare aflate la diferite niveluri trofice) au fost realizate sincron, la date apropiate. Astfel, întregul bazin a fost integrat la scara unui singur studiu de teren. Prin această metodologie, examinarea coastelor nordice, vestice și sudice ale Mării Negre într-un context spațial și temporal unitar a devenit posibilă.

Ulterior, probele transportate în laborator au fost analizate prin metode standardizate, de asemenea în cadrul metodologiei comune, fiind aplicate și proceduri standardizate de control al calității (QA/QC) și intervale de referință.

Toate datele obținute din pachetele de lucru conduse de diferite țări au fost supuse unui filtru multidisciplinar în procesul de raportare. Aceste date integrate, obținute prin metodologia comună și de echipe de cercetare diferite, au fost corelate cu înregistrările istorice din carotele sedimentare și cu literatura de specialitate privind bazinul, rezultând un profil holistic al bazinului. În acest mod, pe lângă asigurarea coerenței metodologice, a fost garantată și progresia etapizată a proiectului pe baze științifice solide. În etapa finală, s-a urmărit ca materialele științifice detaliate, produse în mod comun, să fie clar comprehensibile pentru autoritățile regionale prin intermediul acestui manual și ușor de transformat în acțiuni concrete.

2.1. Strategii de prelevare la nivelul proiectului: protocolale comune de tern stabilite pentru matricile de apă, sedimente și biotă în regiunile de nord, vest și sud ale Mării Negre

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

2.1.1. Modul de prelevare

Consorțiul Black Sea SIERRA operează în cadrul unui cadru comun de prelevare în bazinul Mării Negre. În cadrul acestui studiu complex, realizat în colaborare de instituții din diferite țări, asigurarea integrității în teren a fost de o importanță majoră. În acest context, toți partenerii sunt obligați să respecte aceleași standarde ISO (de exemplu EN ISO 5667-1:2020; ISO 5667-3:2024; ISO 5667-12:2017; ISO 5667-19:2004). Toate probele trebuie să îndeplinească criteriile de reprezentativitate, stabilitate chimică și integritate fizică de la prelevare până la analiză, conform procedurii stabilite în comun.

În acest context, au fost preferate materiale din polietilenă, polipropilenă sau sticlă, în funcție de tipul probei. Campania de teren a fost repetată de 4 ori, de 2 ori în sezonul umed și de 2 ori în sezonul secetos (Figura 1 și Anexa Figura 1–5). Aceasta s-a desfășurat pe scară extinsă de-a lungul coastelor Turciei, Bulgariei, României și Ucrainei, în principalele guri de vărsare ale râurilor (Dunărea, Nistrul, Bugul de Sud, Niprul, Kızılırmak), în lagune și de-a lungul coastei Mării Negre.

În cadrul Proiectului Black Sea SIERRA au fost studiate în mod special două componente cheie care poartă amprente ale poluării. A) poluanți persistenți (metale grele, hidrocarburi petroliere totale, microplastice); B) un set standard de parametri fizico-chimici — pH, salinitate, temperatură, oxigen dizolvat, clorofilă-α, carbon anorganic dizolvat, specii de azot anorganic dizolvat (NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+) și fosfat reactiv dizolvat.Această metodologie de cercetare cuprinzătoare a fost concepută pentru a evidenția starea actuală a poluării și presiunea de poluare generată de război.

În cadrul campaniilor de teren, protecția personalului a reprezentat fără echivoc prioritatea principală. Fiecare membru al echipei a avut autoritatea de a opri activitatea atunci când a considerat că există condiții nesigure, fie din cauza stării mării, expunerii la substanțe chimice sau vizibilității reduse. Deși nu a apărut nicio astfel de situație, coordonatorul de teren a avut autoritatea de a impune utilizarea vestelor de salvare și a liniilor de siguranță ori de câte ori a fost considerat necesar.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Pentru toate substanțele chimice utilizate în teren, integritatea recipientelor a fost verificată înainte de campania de teren, iar informațiile privind tipul și concentrația au fost etichetate corespunzător. Pentru măsurătorile in situ au fost utilizate echipamente multiparametru. Înainte de campania de teren, toate calibrările instrumentelor au fost verificate, iar acolo unde a fost necesar, acestea au fost refăcute.

Datorită numărului mare de probe și a activităților de teren desfășurate de cercetători diferiți, o strategie corectă de etichetare a fost de o importanță majoră pentru obținerea unor rezultate valide ale proiectului (Anexa Tabel 1–2). În acest context, a fost utilizat un sistem de codificare alfanumeric (XYDDMMYYYYAA). Primul caracter indică tipul matricei (1 = apă, 2 = sediment, 3 = biotă), al doilea caracter indică categoria corpului de apă (1 = afluent, 2 = lagună, 3 = zonă costieră), următoarele opt cifre reprezintă data prelevării, iar ultimele două cifre indică numărul secvențial al probei din ziua respectivă. Pentru fiecare eveniment de prelevare au fost înregistrate coordonatele GPS, adâncimea de prelevare, ora și tipul matricei.

2.1.2. Matrice - protocoale specifice

Probele colectate din fiecare stație au fost plasate în recipiente din sticlă și din plastic. Probele de apă colectate pentru analiza clorofilei-α au fost transferate în canistre opace din plastic de 5 L. Probele au fost transportate către laborator în cel mai scurt timp posibil, la o temperatură de +4 °C.

Sedimentele colectate conform standardelor ISO 5667-2:1991 și ISO 5667-12:2017, au fost prelevate din stratul superior de 5 cm, omogenizate și supuse cernării uscate printr-o sită de 63 µm. Fracția rezultată a fost împărțită în două cu ajutorul unei spatule. Prima fracție a fost transferată într-un recipient din plastic pentru analize de metale urme, iar cealaltă a fost înfășurată în folie de aluminiu pentru analize de microplastice. Pentru fiecare analiză este necesară o cantitate de cel puțin 100–200 g din fracția <63 µm.

Raporturile $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ și %C și %N au fost utilizate ca indicatori ai istoricului trofic. În plus, au fost investigate și profilele elementelor de tip trace în funcție de adâncime. În acest context, au fost colectate carote sedimentare din Laguna Balık din Turcia. De la fiecare sit au fost prelevate două carote replică, situate la câteva zeci de metri distanță una de cealaltă,

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

rezultând un total de patru carote. Fiecare carotă a fost obținută prin introducerea manuală sau cu ajutorul unui ciocan de tip baros a unor tuburi din PVC cu lungimea de 60–70 cm și diametrul de 8–10 cm în sediment, astfel încât să fie obținut un strat de sediment de cel puțin 30–40 cm.

- A (înălțimea de compresie): interior (înălțimea carotei de la partea superioară a carotei până la suprafața de la interiorul carotei) minus exterior (înălțimea carotei de la partea superioară a carotei până la suprafața sedimentului din exteriorul carotei);
- B (penetrarea carotei): lungimea tubului – interior;
- Compresia % = A x 100 / B.

Carotele care prezentau o compresie mai mare de 20% nu au fost acceptate și au fost recoltate din nou. Carotele acceptate au fost sigilate la ambele capete, au primit un număr unic de identificare, au fost poziționate prin GPS și au fost transportate în poziție verticală pe durata transportului.

2.1.3. Păstrarea și transportul probelor

Toate probele au fost menținute la 2–4°C în cutii izoterme pe durata transportului. În laborator, acestea au fost depozitate în congelatoare adânci la −20°C, în conformitate cu standardul ISO 5667-3:2024. Probele de sedimente au fost depozitate în pungi din folie de aluminiu sau în pungi tip zip-lock din plastic; probele de apă au fost păstrate în recipiente sigilate din sticlă sau plastic, în funcție de analitul țintă. Carotele sedimentare au fost menținute în poziție verticală pe toată durata transportului și au fost congelate vertical imediat după sosirea în laborator. Această practică este esențială pentru a preveni amestecul între straturi și pentru a inhiba activitatea microbiană după prelevare.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

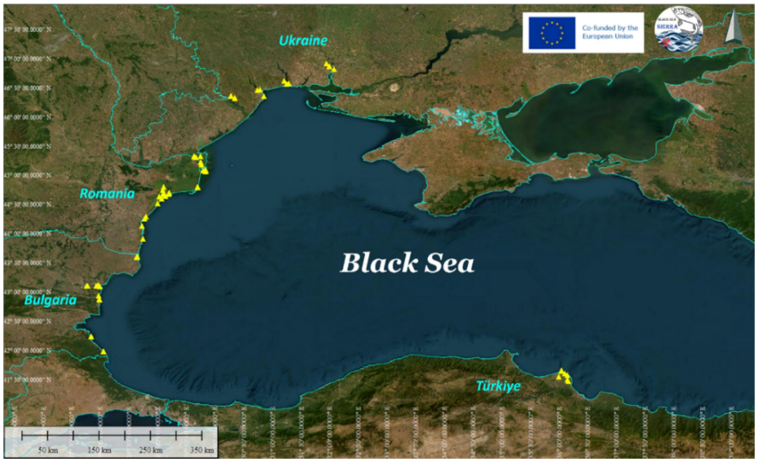


Figura 1. *Harta zonei de studiu*

2.2 Proceduri analitice standard de laborator: procese de pregătire a probelor

2.2.1. Conservarea probelor, reactivi și transport

S-a acordat atenție ca toți reactivii utilizați în studiile de teren să fie conformi cu calitatea reactivilor analitici (ISO 5667-3:2024). În plus, reactivii au fost etichetați, termenul de valabilitate nu a fost depășit, iar aceștia au fost depozitați separat de recipientele pentru probe între campaniile de teren. Imediat după adăugarea conservantului, fiecare probă a fost etichetată, iar pentru verificări periodice au fost utilizate probe martor de teren (field blanks).

În cazul probelor de apă, s-a ținut cont de importanța analitică a materialului recipientului. Probele pentru determinarea metalelor au fost acidificate cu HNO_3 până la pH < 2 în recipiente din polietilenă sau teflon, iar filtrele pentru clorofila-α au fost păstrate congelate la −20°C, în întuneric (Anexa Tabel 3). Conservarea probelor de sedimente variază în funcție de parametrul țintă.

2.2.2. Parametrii fizico-chimici

Valorile pH-ului au fost determinate potențiometric (EN ISO 10523:2012), iar oxigenul dizolvat a fost determinat prin titrare Winkler (EN 25813:2004). Saturația în oxigen a fost calculată din valoarea de echilibru la temperatura și salinitatea mediului ambiant. Speciile de nutrienți au fost măsurate spectrofotometric, după cum urmează: $N\text{-}NH_4$ la 630 nm, $N\text{-}NO_2$ la

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

540 nm, $N\text{-}NO_3$ la 540 nm după reducerea pe coloană Cu-Cd sau alternativ cu salicilat de sodiu la 415 nm (SR ISO 7890-3:2000); azotul total a fost determinat prin reducere Cu-Cd la 540 nm, după oxidare cu persulfat alcalin. Fosfatul a fost măsurat ca complex redus antimonil-molibdofosfat la 885 nm. Pentru fosforul total, înainte de aceeași citire colorimetrică s-a aplicat mineralizarea cu persulfat. Siliciul dizolvat a fost determinat ca complex redus silicomolibdat la 810 nm, cu adăugarea de acid oxalic pentru a elimina interferențele fosfatului. TOC (carbon organic total) a fost măsurat prin oxidare catalitică la 680°C, cu detecție în infraroșu nedispersiv (NDIR), după îndepărtarea carbonaților. TSM (materii totale în suspensie) a fost determinat gravimetric pe filtre din fibră de sticlă pre-uscate de 0,7 µm. Salinitatea, conductivitatea, TDS (solide dizolvate totale) și pH-ul in situ au fost înregistrate simultan în stațiile marine, lagunare și fluviale cu ajutorul unui multiparametru portabil, a cărui calibrare a fost verificată/efectuată înainte de campania de teren.

2.2.3. Microplastice

Probele de sedimente obținute în cadrul studiilor de teren au fost spălate cu apă deionizată, uscate la 60°C timp de 3 zile și trecute printr-o sită de 5 mm. Subprobe de 1 kg au fost supuse separării prin densitate cu $ZnCl_2$ (1,5 L, agitare magnetică timp de 2 minute, sedimentare peste noapte), procesul fiind repetat de trei ori; supernatantul a fost colectat cu ajutorul unei site metalice de 20 µm folosind apă Milli-Q.

După uscare la 60°C timp de 24 de ore, materia organică a fost digerată cu H_2O_2. Extractul a fost filtrat cu ajutorul unui filtru Whatman și uscat în vase Petri din sticlă la 60°C timp de 24 de ore. Particulele au fost examinate la microscop, utilizând analiză de imagine.

Ulterior, acestea au fost clasificate în funcție de culoare, formă (peletă, spumă, fragment, fibră, film) și dimensiune, pe cinci clase diferite (de la <1000 la 4001–5000 µm). Pentru identificarea chimică a fost aplicată spectroscopia FTIR, iar pentru fiecare grup vizual au fost analizate trei fragmente reprezentative.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

2.2.4. Metale grele în apă și sedimente

Apele de râu și lagunare (10 mL acidificate cu 0,1 mL HNO_3 65%) au fost analizate prin ICP-MS conform EPA 200.8 (TDS < 0,1%); în timp ce apele marine (0,1–0,2 mL diluate la 10 mL în HNO_3 suprapur 1%) au fost analizate conform procedurii EPA 6020 (TDS până la 0,2%). În ambele metode, s-au efectuat măsurători în triplicat utilizând standarde de calibrare Agilent pentru 27 de elemente (8500-6940 2A și 8500-6940 Hg), material de referință certificat (CRM) UME CRM 1201 și standard intern Agilent 5188-6525; limitele de detecție (LOD) și limitele de cuantificare (LOQ) au fost raportate pentru fiecare element (Anexa Tabel 4).Probele de alge au fost preparate utilizând o metodă EPA 200.2 modificată, în timp ce țesuturile de pești și moluște au fost procesate conform EPA 200.3. Probele de alge (0,2–0,5 g) au fost digerate în vase din teflon, într-un sistem de digestie cu microunde la 180 °C, utilizând acid azotic concentrat (65% HNO_3). Probele de țesut din pești și moluște (1,5 g) au fost digerate la 200 °C într-un sistem de digestie cu microunde, utilizând un amestec de acid azotic concentrat (65% HNO_3) și peroxid de hidrogen (30% H_2O_2).După finalizarea procesului de digestie, toate soluțiile au fost aduse la un volum final de 50 mL cu apă ultrapură și pregătite pentru analize elementare.Probele de sedimente au fost uscate la 50–55°C timp de ≥72 ore, măcinate într-un mojar de agat și cernute la dimensiunea <63 µm. Subprobele de 0,5–1 g au fost digerate în apă regală (HCl_3, 3:1; 9 mL HCl 30% + 3 mL HNO_3 65%) în recipiente închise din teflon, prin digestie cu microunde la 200°C timp de 15 + 15 minute (ISO 11466, ISO 12914). Ulterior, probele au fost transferate în tuburi din polipropilenă de 50 mL și diluate cu apă ultrapură.Pentru calibrare au fost utilizate standardul Agilent 8500-6940-2A-Hg și standardul intern 5188-6525, iar controlul calității a fost verificat în triplicat față de materialul de referință certificat CRM NIST 2702 (13 elemente certificate: As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, V, Zn). Valorile LOD, recuperarea (%R), %RSD și rezultatele CRM au fost tabelate. Alte 20 de elemente (Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ti, Mo, Ag, B, Al, Si, P, Se, Tl, U) au fost măsurate cu scop informativ, fără calcul de recuperare.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

2.2.5. Procesarea carotelor sedimentare și analiza geochimică

Carotele înghețate au fost secționate longitudinal și fotografiate pentru documentarea stratigrafică. Ulterior, acestea au fost împărțite în secțiuni de 1 cm cu ajutorul unui cuțit zimțat curățat. Fiecare secțiune a fost divizată în două; jumătate a fost procesată la Universitatea din Palermo pentru analize de metale trace și izotopi stabili, iar cealaltă jumătate a fost arhivată.

Pentru fiecare jumătate de secțiune, volumul a fost măsurat prin deplasarea cu seringă (60 sau 100 mL; 1 cc = 1 cm^3), greutatea umedă prin transferul în vase Petri pre-cântărite, iar greutatea uscată a fost determinată după uscare la 60°C până la masă constantă (24–48 ore) și răcire în exsicator timp de ≥1 oră. Ulterior, după îndepărtarea cochiliilor, pietrelor și a resturilor, probele au fost măcinate până la obținerea unei pulberi fine cu ajutorul unui mojar. Pentru fiecare subprobă a fost standardizată o masă uscată minimă de 15 g.

Fosforul total și metalele grele (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) au fost determinate cantitativ prin ICP-OES (Optima 8000, PerkinElmer; USEPA 6010C/2007), după digestie acidă cu microunde într-un amestec HNO_3:HF_2O_2 (6:2:0,4:1,6), utilizând sistemul Mars 5 CEM (USEPA 3051/2007). În analiza elementelor cu volatilitate ridicată, precum As și Hg, a fost integrat un generator de hidruri în sistemul ICP-OES. Pentru controlul calității a fost utilizat materialul de referință certificat CRM NIST 2702. Limita de cuantificare (LOQ) a fost stabilită la 0,003 mg kg^{-1} s.u. (substanță uscată) pentru majoritatea metalelor, 0,01% pentru Fe și Al și 0,005% pentru TP.

Raporturile izotopice stabile și conținutul elementelor ($\delta^{15}N$, $\delta^{13}C$, TN, TOC) au fost determinate prin IRMS (Thermo Scientific Delta XP) cuplat la un analizor elemental (Flash EA1112): ~20 mg de sediment măcinat în capsule din staniu (5×9 mm) pentru $\delta^{15}N$ și TN; iar ~10 mg de sediment măcinat în capsule din argint tratate cu HCl și uscate la 50°C timp de 30 de minute au fost utilizate pentru $\delta^{13}C$ și TOC.

Valorile au fost exprimate în notație delta (‰) raportat la azotul atmosferic (N_2) și standardul Pee Dee Belemnite (calcar): $\delta X_{proba}‰ = ((R_{proba}/R_{standard}) - 1) \times 1000$. Limita de cuantificare (LOQ) a fost stabilită la 0,005% pentru TN și 0,01% pentru TOC.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

2.3. Metode statistice și metodologia de evaluare a datelor

Pentru a face comprehensibil setul de date obținut în cadrul Proiectului Black Sea SIERRA, procesarea acestuia printr-o metodologie comună de analiză statistică, vizualizare și evaluare a fost de o importanță majoră. În acest context, au fost utilizate programele SPSS și R (RStudio) pentru analize statistice și vizualizări. Înaintea analizei de corelație, s-a verificat dacă datele prezintă o distribuție normală prin testul Shapiro-Wilk. În cazul în care datele nu au prezentat distribuție normală (sau numărul de eșantioane a fost redus), pentru corelații a fost utilizată analiza de corelație Spearman, iar pentru comparații au fost aplicate teste neparametrice. În studiu, dintre analizele de clusterizare a fost preferată analiza ierarhică de cluster (CA heatmap). S-a aplicat corecția Z-Score, a fost utilizată metoda Ward, iar distanța Euclidiană a fost aleasă ca metrică (Tunca et al., 2026). De asemenea, în cadrul proiectului au fost utilizate indici de bioacumulare și de acumulare fiziologică, precum și indici de evaluare a riscului pentru sănătatea umană. Explicațiile detaliate ale acestor indici pot fi consultate în Anexa Tabel 5. Semnificația statistică a diferențelor în caracteristicile microplasticelor (culori, forme și tipuri de polimeri) între siturile de studiu a fost evaluată prin analiza multivariată a variației permutative unifactoriale (PERMANOVA), bazată pe indicii de disimilaritate Bray-Curtis, utilizând 9.999 de permutări pentru asigurarea robusteții testului (Anderson, 2001).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

CAPITOLUL 3

SURSE DE POLUARE, DISTRIBUȚII ȘI IMPACTUL CONFLICTELOR ARMATE

În această secțiune sunt evaluate principalele surse de poluare care influențează distribuția elementelor în bazinul Mării Negre, respectiv deversările fluviale, presiunile industriale, deșeurile urbane și războiul dintre Rusia și Ucraina. Sunt prezentate tiparele spațiale și clusterizările statistice la scară de bazin, fiind comparate datele actuale cu înregistrările din perioadele pre- și post-conflict.Sunt analizate urmele războiului asupra calității apei și sedimentelor, posibilele modificări ale riscurilor și semnificația acestora pentru monitorizarea mediului, pe baza rezultatelor obținute. În plus, literatura de specialitate este utilizată pentru o mai bună înțelegere a efectelor generate de contextul ruso-ucrainean asupra bazinului Mării Negre. De asemenea, este propus un cadru de monitorizare bazat pe risc pentru detectarea, urmărirea și raportarea poluării induse de conflict.

3.1. Analiza surselor de poluare la nivelul bazinului: examinarea și compararea la scară regională a impactului deversărilor fluviale, activităților industriale și deșeurilor urbane asupra distribuției elementelor în apă și sediment

3.1.1. Relațiile dintre regiuni și distribuția elementelor în sedimente

Analiza de grupare ierarhică aplicată pentru determinarea distribuției metalelor grele în zona de studiu și a similitudinilor dintre stațiile de prelevare a evidențiat grupări distincte atât în funcție de elemente, cât și de localizare (Figura 2). Analizând rezultatele grupării pe baza elementelor, Cd se separă clar de celelalte trei elemente (Cu, Zn și Ni), formând un grup principal independent. Această separare indică faptul că aportul de Cd în zona de studiu provine dintr-o sursă diferită față de celelalte metale și/sau că prezintă un mecanism geochimic distinct. În cadrul celui de-al doilea grup principal, Cu și Zn au prezentat cel mai ridicat grad de similitudine, formând un subgrup distinct, în timp ce Ni a fost asociat mai slab

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

cu această pereche. Gruparea puternică dintre Cu și Zn sugerează că aceste două metale au pătruns în regiune prin surse similare, de origine industrială sau urbană. Această coocurență este, de asemenea, în concordanță cu asocierea acestor metale cu activități industriale și urbane similare, precum operațiunile portuare, acoperirile antivegetative (antifouling), infrastructura galvanizată și scurgerile de suprafață, surse recunoscute în literatura de specialitate ca factori principali ai coocurenței Cu–Zn în sedimentele costiere.Deși alama (aproximativ 70% Cu și 30% Zn) reprezintă și principalul material utilizat la fabricarea tuburilor cartușelor de muniție, coocurența Cu–Zn, în sine, nu constituie un indicator diagnostic fiabil al unei surse de origine militară, deoarece aceasta este compatibilă și cu numeroase surse antropice obișnuite, fără legătură cu conflictul armat. Atribuirea unei astfel de asocieri unei surse generate de conflict ar necesita dovezi suplimentare, precum detectarea concomitentă a reziduurilor de explozivi (de exemplu, TNT sau RDX) în aceleași stații, identificarea unor semnături izotopice specifice aliajelor utilizate pentru muniții sau proximitatea spațială față de situri documentate de depozitare a munițiilor. În absența unor astfel de dovezi, asocierea Cu–Zn observată în acest set de date trebuie interpretată în principal în contextul surselor convenționale de poluare industrială și urbană, rămânând totodată o ipoteză care merită testată în cadrul unor campanii viitoare de prelevare concepute special pentru identificarea simultană a markerilor explozivilor.În ceea ce privește gruparea stațiilor și distribuția regională, acumularea metalelor pare să fie strâns corelată cu deversările fluviale și cu morfologia zonei costiere. În cadrul analizei, stația Laguna Gıcı s-a evidențiat ca fiind locația cu cele mai distincte caracteristici.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

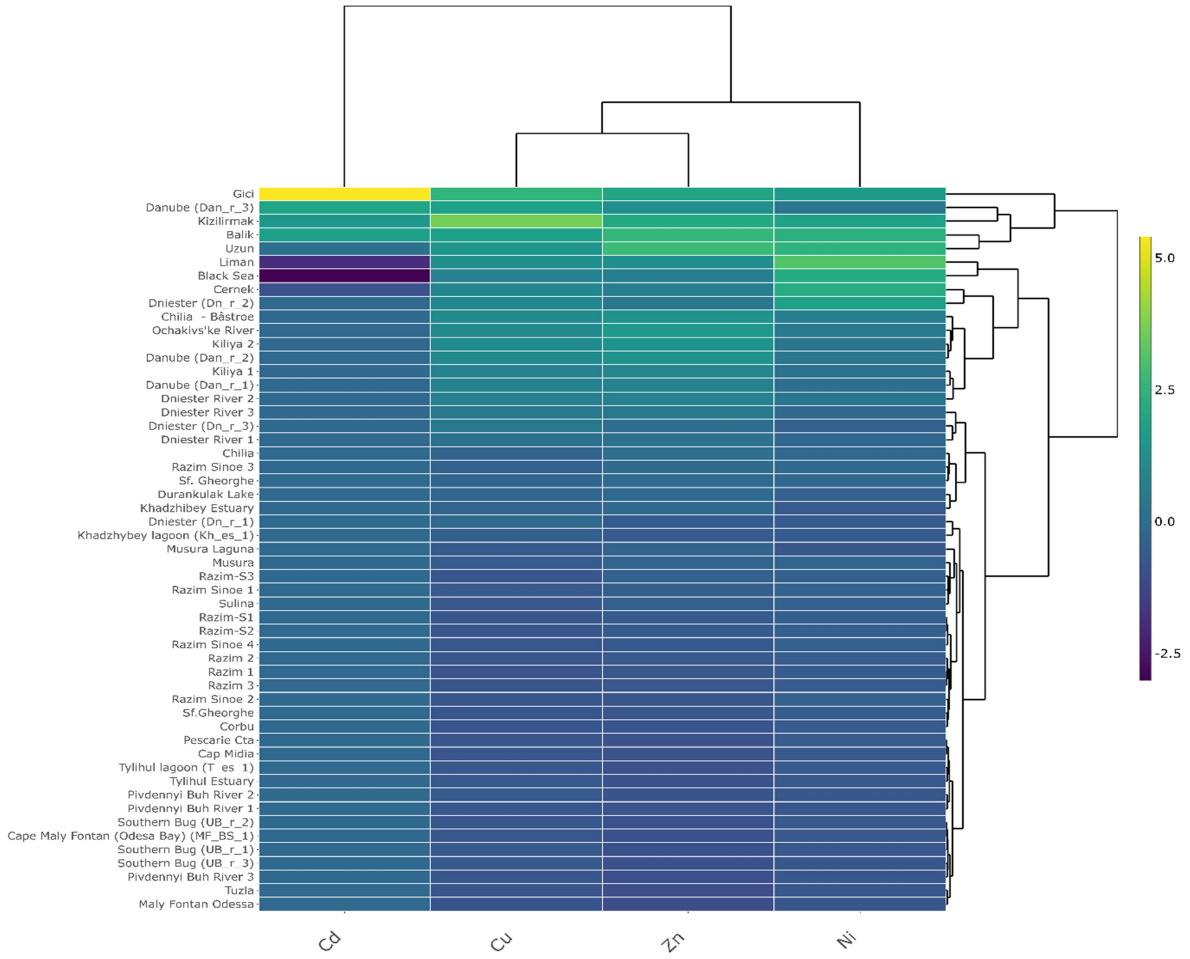


Figura 2. *Cluster ierarhic şi matrice heatmap care ilustrează relaţiile geochimice şi modelele de distribuţie regională ale metalelor grele (normalizate prin scor Z) în locaţiile costiere şi fluviale investigate*

Staţia Laguna Gıcı prezintă caracteristicile unui hotspot, reprezentând zona cu cea mai ridicată acumulare de metale din întregul set de date. În special, această staţie, care înregistrează o valoare extremă a concentraţiei de Cd (Z ≈ 5), poate fi supusă unei presiuni antropice intense. O astfel de valoare extremă poate conduce la creşterea deviaţiei standard a setului de date în procesul de normalizare prin scor Z. Ca urmare, valorile scorului Z pentru Cd în celelalte staţii se pot apropia de zero şi pot masca vizual diferenţele reale existente între unele dintre acestea.

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

În grupul secundar, alcătuit din Dunăre (Dan_r_3), râul Kızılırmak, Laguna Balık și Laguna Uzun, se remarcă o tendință de acumulare peste medie pentru Cu și Zn. Totodată, este evident faptul că aceste stații prezintă nuanțe închise în coloana Cd din harta termică, corespunzătoare unor valori negative ale scorului Z. Cu alte cuvinte, acest grup se caracterizează prin concentrații ridicate de Cu și Zn, dar prin concentrații de Cd situate sub media întregului set de date. Această anticorelație Cu/Zn–Cd reprezintă o dovadă geochimică suplimentară care susține separarea Cd în dendrograma elementelor. Ea consolidează ipoteza conform căreia Cd și perechea Cu–Zn sunt asociate unor surse și mecanisme de aport diferite în aceste stații. În cadrul acestui grup, râul Kızılırmak s-a evidențiat față de celelalte stații în special prin concentrațiile ridicate de Cu.

Spre deosebire de presiunea de poluare înregistrată pe canalul principal al Dunării (Dan_r_3), stațiile reprezentând brațele periferice ale Deltei Dunării (Chilia, Sulina, Musura și Sfântu Gheorghe) au fost încadrate în grupurile situate în partea inferioară a hărții termice. Aceste grupuri sunt caracterizate printr-o distribuție mai omogenă și concentrații scăzute până la moderate. Acest tipar indică faptul că dinamica depunerii metalelor diferă la nivelul întregii delte și că presiunea poluării se diminuează prin efectul de diluție către gurile de vărsare. În mod similar, stațiile din Ucraina (Nistru – Dn_r_1, Dn_r_2 și Dn_r_3, Pivdennyi Buh, Tylihul și regiunea Odesa – Maly Fontan) au prezentat încărcături reduse de metale și au fost incluse în grupul omogen corespunzător nivelului de fond („background”).

Complexul lagunar Razim–Sinoe, reprezentativ pentru litoralul românesc, împreună cu stațiile din apropierea localităților Cap Midia, Corbu și Pescarie Constanța au format cel mai extins și omogen subgrup din analiză. Faptul că în aceste zone concentrațiile metalelor s-au menținut la niveluri de fond, fără apariția unor valori maxime, indică un aport redus de metale provenite din bazinul hidrografic.

Stațiile Laguna Liman, Marea Neagră (coasta Deltei Kızılırmak) și Laguna Cernek se disting prin profilurile lor geochimice particulare. În aceste locații, valorile Cd s-au situat la cele mai reduse niveluri din întregul set de date, în timp ce concentrațiile de Ni au fost peste medie. Această diferențiere sugerează că sursele de Ni din regiune sunt, în mare măsură, diferite de cele ale Cd.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

În ansamblu, Cd apare drept principalul poluant dintre elementele investigate în zona de studiu, fiind concentrat în anumite hotspoturi locale. Din perspectiva distribuției generale, cu excepția canalului principal al Dunării din bazinul Mării Negre și a unor puncte specifice, precum Laguna Gıcı, metalele analizate indică un profil caracteristic unui mediu relativ curat sau ușor poluat.

3.1.2. Comparații regionale ale concentrațiilor elementelor din sedimente

Diferențele de acumulare au fost investigate statistic la un nivel de semnificație de 95%, iar comparațiile între țări au fost realizate pe această bază (Anexa, Tabelul 6). Bulgaria a fost exclusă din analiza comparativă a mediilor din cauza numărului redus de date disponibile.

Cupru (Cu): Concentrațiile de Cu din Turcia au fost semnificativ mai mari decât cele înregistrate în România 1 (INCDPM), România 2 (MBNAR) și Ucraina ($p < 0,001$). Valorile Cu din Ucraina au fost semnificativ mai ridicate comparativ cu ambele zone de studiu din România (INCDPM și MBNAR) ($p < 0,05$). În comparația realizată între cele două seturi de date din România nu a fost identificată o diferență semnificativă statistic în ceea ce privește acumularea Cu ($p = 0,198$).

Nichel (Ni): Similar cu Cu, Turcia a prezentat cele mai ridicate concentrații de Ni dintre toate regiunile investigate, diferența fiind semnificativă statistic ($p < 0,001$). În România, concentrațiile din România 1 au fost semnificativ mai mari decât cele din România 2 ($p = 0,003$). Între Ucraina și România 1 nu au fost identificate diferențe semnificative statistic ($p = 0,984$). Deși Ucraina a înregistrat valori mai ridicate decât România 2, această diferență nu a atins pragul de semnificație statistică de 0,05 ($p = 0,069$).

Plumb (Pb): Variabilitatea ridicată și eroarea standard mare (40,29) a concentrațiilor de Pb din Turcia au determinat ca diferențele dintre Turcia și celelalte țări să nu fie semnificative statistic ($p > 0,05$). Ucraina a prezentat concentrații de Pb semnificativ mai mari comparativ atât cu România 1 ($p = 0,042$), cât și cu România 2 ($p < 0,001$). Compararea celor două seturi de date din România a arătat că România 1 a înregistrat concentrații de Pb semnificativ mai ridicate decât România 2 ($p = 0,044$).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Zinc (Zn): Și în cazul Zn, Turcia a înregistrat cele mai ridicate concentrații dintre toate regiunile investigate, diferențele fiind semnificative statistic ($p < 0,001$). Concentrațiile de Zn din Ucraina au fost semnificativ mai mari decât cele din România 2 ($p < 0,001$), însă nu au diferit semnificativ de cele din România 1 ($p = 0,637$). Între cele două regiuni din România, România 1 a prezentat o acumulare de Zn semnificativ mai mare decât România 2 ($p = 0,003$).

Fier (Fe): Turcia a înregistrat și cele mai ridicate concentrații de Fe ($p < 0,001$). Între Ucraina și România 1 nu au fost identificate diferențe semnificative statistic ($p = 0,433$). De asemenea, nici între cele două studii realizate în România nu au fost observate diferențe semnificative statistic în ceea ce privește concentrațiile de Fe ($p = 0,194$). În schimb, Ucraina a prezentat concentrații de Fe semnificativ mai ridicate comparativ cu România 2 ($p = 0,001$).

Concluzii: Comparațiile statistice evidențiază existența unui gradient regional al poluării. Regiunea de coastă a Turciei prezintă în mod constant cele mai ridicate niveluri de acumulare pentru majoritatea metalelor analizate (Cu, Ni, Zn și Fe), în timp ce regiunea România 2 (MBNAR) se remarcă drept mediul relativ cel mai puțin contaminat, înregistrând, în general, cele mai scăzute concentrații de metale din întregul set de date.

3.1.3. Relațiile și gruparea ierarhică a parametrilor apei și a elementelor

Dendrograma parametrilor a evidențiat două subgrupuri distincte, separate între ele prin limite bine definite (Figura 3).

Clusterul I: Acest cluster include Cd, TPH, conductivitatea, temperatura, clorurile, $N\text{-}NH_4$ și $P\text{-}PO_4$. Corelația puternică dintre conductivitate, temperatură și cloruri reflectă gradientul de mineralizare și salinitate al maselor de apă. În dendrogramă, Cd formează cel mai apropiat subgrup împreună cu TPH, ceea ce indică o asociere puternică și o posibilă sursă comună pentru acești doi parametri. Această legătură strânsă cu TPH sugerează existența unor surse antropice specifice, precum activitățile portuare și traficul maritim. La un nivel ierarhic superior, Cd se conectează la grupul format din conductivitate, temperatură și cloruri.

Clusterul II: Acest cluster cuprinde Fe, clorofila, $N\text{-}NO_2$, Ni, $N\text{-}NO_3$, Zn, Cu, turbiditatea și pH-ul. Gruparea strânsă dintre Ni, Zn și Cu, precum și asocierea acestora cu turbiditatea, indică faptul că aceste metale sunt corelate cu materialul particulat aflat în

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

suspensie. Pe baza acestei observații, trebuie luată în considerare și posibilitatea ca Ni, Zn și Cu să fie transportate predominant în fază particulată. Acest tipar sugerează, de asemenea, că scurgerile de suprafață de origine terestră joacă un rol important ca mecanism de transport. O altă constatare importantă este asocierea clorofilei și a Fe în cadrul aceluiași subgrup. Aceasta sugerează că nivelurile de Fe din regiune ar putea reprezenta un factor limitativ care contribuie la producția primară.

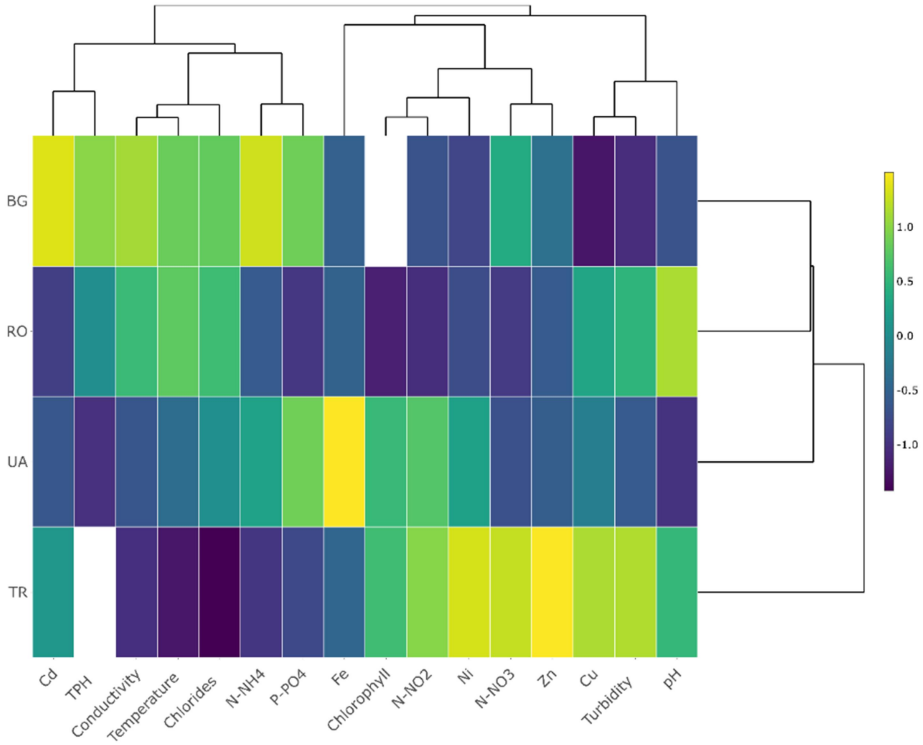


Figura 3. *Hartă termică (*heatmap*) și analiză de grupare ierarhică a parametrilor calității apei și a elementelor fizico-chimice din bazinul Mării Negre*

3.1.4. Gruparea spațială și caracteristicile regionale

Conform dendrogramei, ierarhia similitudinii dintre regiuni este următoarea: (Bulgaria – România) > Ucraina > Turcia, unde România 1 (INCDPM) și România 2 (MBNAR) sunt tratate ca un singur cluster.

***Bulgaria și România*:** Aceste două regiuni prezintă cel mai ridicat grad de similitudine în ceea ce privește parametrii de mineralizare. Bulgaria se remarcă față de toate

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

celelalte regiuni prin culoarea galbenă din coloana Cd a hărții termice, corespunzătoare celui mai ridicat scor Z din întregul set de date. Totodată, se observă și diferențe importante. Deși concentrațiile de Cd sunt ridicate, valorile Zn și Cu se numără printre cele mai scăzute din setul de date. Această separare între Cd și Cu–Zn reprezintă o constatare deosebit de importantă, sugerând că încărcătura de Cd din Bulgaria poate fi independentă de sursele industriale de metale, care, în mod obișnuit, sunt asociate cu prezența simultană a Zn și Cu, și că aceasta reflectă mai degrabă o dispersie provenită din surse punctiforme specifice. În România, în schimb, se remarcă faptul că, în timp ce valorile Cd se situează printre cele mai scăzute din setul de date, pH-ul atinge cel mai ridicat scor Z.

***Ucraina*:** Cea mai evidentă caracteristică a profilului Ucrainei este concentrația ridicată de $P\text{-}PO_4$, evidențiată prin culoarea galbenă în harta termică. Acest parametru atinge valoarea maximă dintre toate regiunile analizate. Această observație este deosebit de relevantă și în contextul conflictului armat, care reprezintă tema centrală a proiectului. În condițiile în care disfuncționalitatea sau oprirea stațiilor de epurare a apelor uzate ori distrugerea Barajului Kahovka pot conduce la creșterea semnificativă a încărcării cu nutrienți, această anomalie a $P\text{-}PO_4$ trebuie interpretată nu doar ca un proces hidrologic, ci și ca un posibil semnal al degradării infrastructurii cauzate de conflict.

***Turcia*:** Turcia este complet separată de celelalte țări în dendrogramă, fiind poziționată ca un grup distinct (outlier). Probele din Turcia au evidențiat valori considerabil mai ridicate decât cele din celelalte regiuni pentru Ni, Zn, Cu, $N\text{-}NO_3$ (care, spre deosebire de $N\text{-}NO_2$ din Ucraina, indică influența scurgerilor de suprafață provenite din activități agricole) și turbiditate. Nuanțele galbene din harta termică evidențiază clar aceste valori ridicate. În schimb, Turcia prezintă cele mai scăzute valori din întregul set de date pentru temperatură, cloruri și conductivitate (similar Ucrainei), ca urmare a efectului de diluție produs de aportul de apă dulce provenit din râuri. Asocierea dintre salinitatea redusă și valorile ridicate ale metalelor și turbidității consolidează ipoteza că aceste aporturi sunt predominant de origine terestră și sunt transportate prin intermediul sistemelor fluviale.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

3.1.5. Distribuția microplasticelor, caracteristicile morfologice și compoziția polimerică în sedimente

Pentru a evidenția într-o manieră integrată mecanismele de transport al poluării la nivelul bazinului și presiunea cronică exercitată de aporturile terestre asupra ecosistemului marin, în cadrul proiectului a fost realizat și un studiu privind microplasticele (MP). Studiul a fost efectuat pe probe colectate din Turcia. De-a lungul continuumului care se extinde de la sectorul fluvial către sistemele lagunare și, ulterior, către fundul marin costier, au fost investigate abundența microplasticelor, distribuția dimensională, profilul cromatic, caracteristicile morfologice și compoziția polimerică a microplasticelor din probele de sediment. Analizele efectuate au evidențiat existența unor variații în distribuția spațială și în caracteristicile fizico-chimice ale microplasticelor la nivelul întregului bazin.

***Abundența microplasticelor și gradientul transportului terestru*:** Prezența cantitativă a microplasticelor în sediment a prezentat o variație foarte semnificativă din punct de vedere statistic între locațiile de prelevare (ANOVA, $F = 11,76$, $p < 0,001$). Sedimentele fluviale, care au înregistrat cea mai mare încărcătură cu microplastice din bazin, s-au evidențiat drept principala sursă de poluare și principalul vector de transport, cu o valoare medie a abundenței de 70 particule/kg^{-1} (±26,94 particule/kg^{-1}). De-a lungul gradientului de transport, pe măsură ce distanța față de sursa de aport a crescut și sistemul a avansat către mediul marin, s-a înregistrat o scădere evidentă a densității microplasticelor, ca urmare a dispersiei hidrodinamice, dinamicii sedimentării și mecanismelor de diluție. Probele de sediment prelevate de pe fundul marin costier au prezentat cel mai redus nivel de poluare din întregul bazin, cu o abundență de 6,8 ± 4,14 particule/kg^{-1}. În schimb, sistemele lagunare, situate între compartimentele fluvial și marin, au prezentat valori intermediare, funcționând ca zone de tranziție care filtrează încărcătura cu materiale plastice provenită din scurgerea terestră. Astfel, râul pare să acționeze ca vector de transport (sursă pentru mediul receptor), marea ca mediu receptor, iar lagunele ca matrici de tranziție.

***Distribuția dimensională și dinamica fragmentării*:** Diferența statistică observată în datele privind abundența nu a fost evidențiată în distribuția particulelor de microplastic între zonele de prelevare în funcție de dimensiune, nefiind detectată o diferență semnificativă din

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

punct de vedere statistic (ANOVA, F = 0,775, p = 0,59). Dimensiunea particulelor a fost omogenă, independent de tipul matricei analizate.

***Profilul cromatic și semnalele trasoare localizate*:** În cadrul studiului, prezența microplasticelor în matricea sedimentară a fost identificată în 7 categorii cromatice distincte: alb, negru, transparent, albastru, roșu, verde și roz. Pentru analiza rezultatelor privind culoarea, a fost aplicată o analiză PERMANOVA unifactorială utilizând coeficientul Bray–Curtis. Spre deosebire de omogenitatea observată în distribuția dimensiunilor microplasticelor între diferitele medii, această analiză a confirmat existența unei variații foarte puternice în distribuția culorilor între stațiile de prelevare (PERMANOVA unifactorială, F = 1,973, p = 0,0031). În toate probele de sediment analizate, categoria de culoare „alb" a înregistrat cea mai mare abundență, reprezentând categoria dominantă. În schimb, microplasticele de culoare roz au prezentat cea mai redusă rată de apariție.

Clasificarea morfologică și profilul distribuției formelor: În urma studiilor de caracterizare morfologică efectuate asupra matricei sedimentare, au fost identificate patru forme principale de microplastice: spumă (foam), fibră (fiber), fragment (fragment) și peliculă (film). Forma de tip peletă (pellet) nu a fost însă identificată în niciuna dintre probe. Distribuția spațială a morfologiilor microplasticelor a prezentat o heterogenitate semnificativă din punct de vedere statistic între stațiile de prelevare (PERMANOVA unifactorială, F = 3,124, p = 0,0008).

Spectroscopia FTIR și verificarea matricei polimerice: Analizele prin spectroscopie în infraroșu cu transformată Fourier (FTIR), efectuate în scopul verificării analitice a identificării vizuale, au arătat că microplasticele au fost alcătuite din patru tipuri principale de polimeri: polistiren (PS), polipropilenă (PP), polietilenă (PE) și polietilenă de înaltă densitate (HDPE). Distribuția spațială a acestor tipuri de polimeri între stațiile de prelevare a evidențiat o variație semnificativă din punct de vedere statistic, similară celei observate pentru distribuția formelor și a culorilor (PERMANOVA unifactorială, F = 3,383, p = 0,0001).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

3.2. Compararea datelor din perioada anterioară și ulterioară conflictului armat: variațiile riscului evidențiate prin compararea datelor actuale obținute din zonele afectate de conflict cu datele istorice

3.2.1. Compararea datelor istorice și a datelor actuale utilizând carote de sediment

Un număr total de patru carote de sediment au fost prelevate din Laguna Balık, situată în Delta Kızılırmak din Samsun, dintre care două din zone de referință (Ref_{R1} și Ref_{R2}) și două din zone afectate (Imp R_1 și Imp R_2). Scopul analizării acestor carote a fost compararea datelor din perioada trecută cu cele din prezent și identificarea unor eventuale dovezi privind impactul războiului. În acest sens, au fost comparate între ele straturile de suprafață și cele bazale ale carotelor de sediment prelevate din Laguna Balık.

Rezultatele au evidențiat modele geochimice distincte între zonele afectate și cele de referință. În zona afectată, distribuția pe verticală a carbonului organic (C_{org}) și a azotului total (N_{tot}) diferă între cele două carote. În carota Imp-R2 s-a observat că valorile maxime ale acestor parametri nu au fost înregistrate în straturile superficiale, ci în intervalul de adâncime de 8–19 cm, după care au scăzut semnificativ către suprafață, ajungând la valori similare celor din zona de referință (Figura 4). La suprafață, Corg a scăzut până la 0,2% din greutatea uscată (DW), iar Ntot până la 0,020%. În schimb, în carota Imp-R1, concentrațiile de Corg și Ntot au prezentat valori mai ridicate în partea inferioară a carotei. Fosforul total (P_{tot}) a urmat un model similar, fiind înregistrate valori ridicate în partea mediană a carotei Imp-R2, respectiv atât în partea superioară, cât și în cea inferioară a carotei Imp-R1.

Analiza datelor izotopice arată că valorile $\delta^{13}C$ din zona afectată se mențin, în general, reduse, deși prezintă o ușoară creștere către suprafață (până la −26,1‰). Această situație indică faptul că aportul de materie organică alohtonă (din surse externe) și presiunea continuă exercitată de eutrofizare își mențin predominanța în regiune. Valorile $\delta^{15}N$, în schimb, scad în apropierea suprafeței în carota Imp-R2, acest tipar putând fi interpretat ca o diminuare parțială a aportului antropic de azot.When trace element profiles are evaluated, it is seen that As exhibits a distinct increase towards the surface in the impacted zone (Figura 5). În carota Imp-R1, concentrația a crescut de la 6,19 mg kg^{-1} la 14,51 mg kg^{-1}. În schimb, cobaltul (Co) a

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

prezentat o îmbogățire evidentă în jumătatea superioară a profilului în ambele carote din zona afectată. În contrast, concentrațiile maxime ale Pb, Cu, Fe, Zn, V, Ni și Hg au fost observate doar în intervalul de adâncime de 8–20 cm în carota Imp-R2, în timp ce în carota Imp-R1, Cu, Fe și Zn au prezentat valori mai scăzute în partea mediană a profilului. Cromul (Cr) nu a prezentat un tipar vertical distinct în niciuna dintre zone.

În contrast cu zona afectată, probele de referință (Ref R1 și Ref R2) prezintă un profil vertical în mare parte uniform și omogen. Cu toate acestea, două excepții importante ies în evidență. Valorile $\delta^{13}C$ cresc de la −27,6‰ până la −21,3‰ către suprafață. Împreună cu scăderea concomitentă a valorilor $\delta^{15}N$, acest tipar indică o tranziție către surse autohtone de materie organică în perioada recentă și faptul că starea trofică s-a atenuat relativ. În același timp, manganul (Mn) prezintă o creștere treptată către suprafață în zona de referință, în timp ce concentrațiile de arsen (As) scad către suprafață. Acest model prezintă o tendință exact opusă celei observate în zona afectată.

În evaluarea de ansamblu, două constatări se evidențiază în mod deosebit. Perioada cu cea mai intensă poluare din zona afectată nu corespunde straturilor superficiale, ci intervalului de adâncime de 8–20 cm din carota Imp-R2 și părții inferioare a carotei Imp-R1. În schimb, în zona de referință, creșterea valorilor $\delta^{13}C$ și scăderea valorilor $\delta^{15}N$ către suprafață reprezintă un indicator al unei încărcări trofice care se manifestă nu prin îmbogățirea în elemente urmă, ci printr-o modificare a semnăturii izotopice și care s-a diminuat în perioada recentă.

Rezultatele obținute în urma studiului carotelor nu au evidențiat acumulări de elemente care să poată fi atribuite conflictului armat în Delta Kızılırmak din Samsun. Dimpotrivă, acestea au indicat o tendință de scădere a concentrațiilor majorității elementelor în perioadele recente. Cu toate acestea, riscul ca efectele generate de surse non-militare, în special de deversările provenite din activități agricole, industriale și menajere din regiune, să mascheze eventualele impacturi asociate războiului rămâne semnificativ.

În plus, secțiunea următoare prezintă o serie de studii importante care investighează impactul războiului dintre Rusia și Ucraina asupra regiunii.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

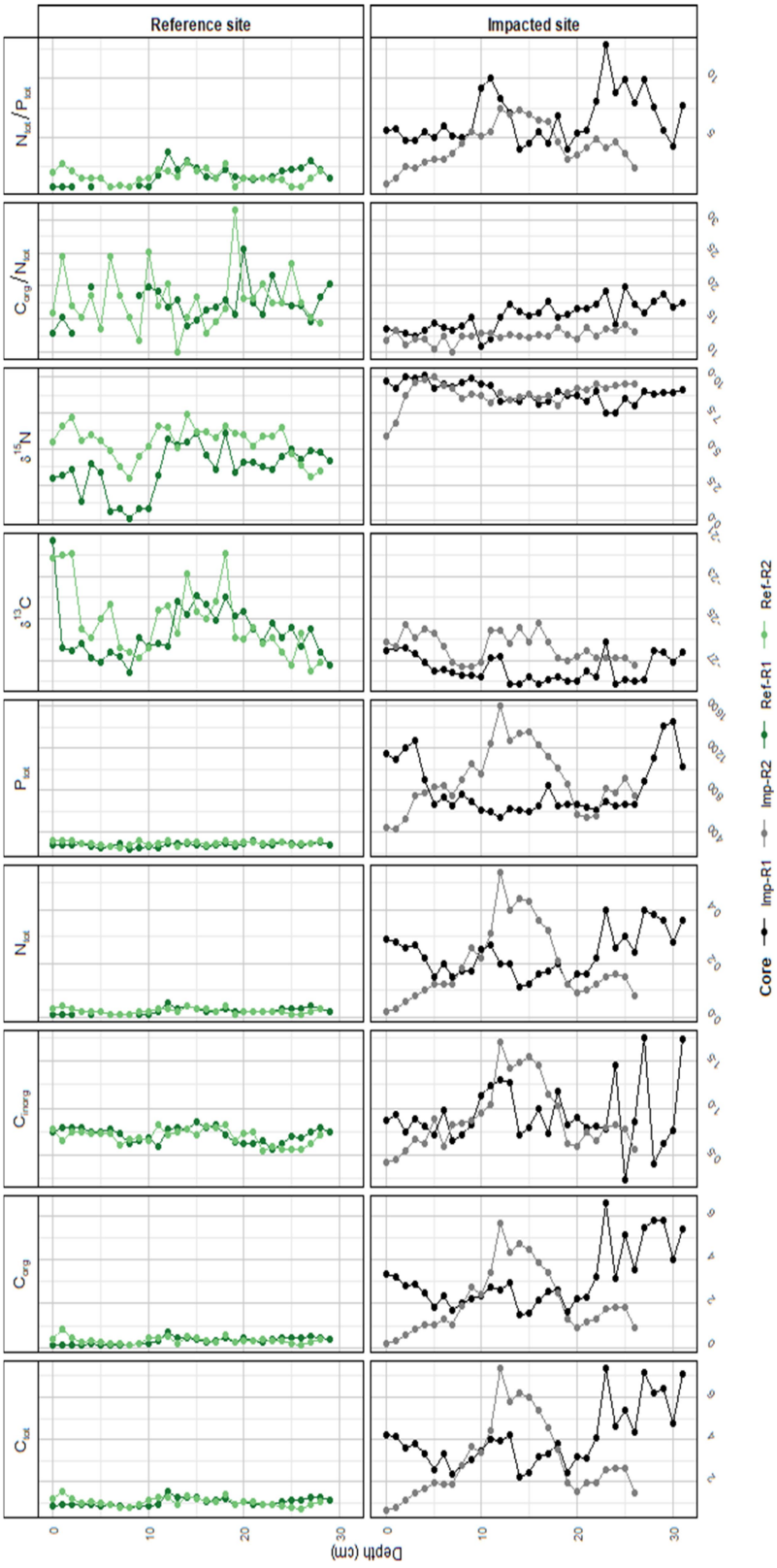


***Figura 4.** Profilele verticale ale C_{tot} (%), C_{org} (% DW), C_{inorg} (%), N_{tot} (%), P_{tot} (mg kg^{-1}), $\delta^{13}C$ (‰), $\delta^{15}N$ (‰), C_{org}/N_{tot} (raport) şi N_{tot}/P_{tot} (raport)*

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

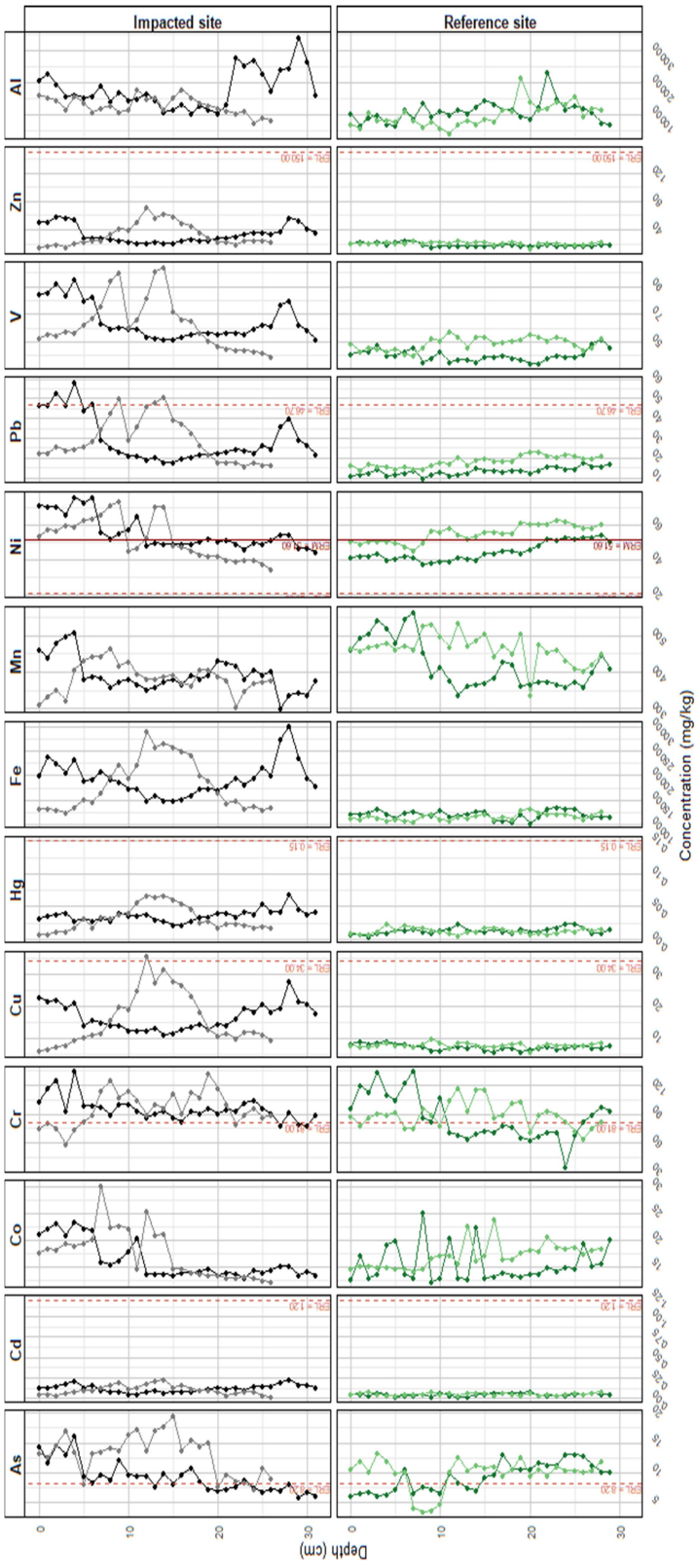


***Figura 5.** Profilele verticale ale concentraţiilor elementelor, raportate la limitele Effect Range Low (ERL) şi Effect Range Median (ERM) (Long şi Morgan, 1991)*

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

În studiul publicat în 2025, Kvach și colaboratorii au investigat impactul asupra ecosistemului Mării Negre generat de distrugerea Barajului Kahovka în timpul războiului dintre Rusia și Ucraina. Conform rezultatelor, în primele șase luni ale războiului (2022), prin analiza imaginilor satelitare au fost identificate 31 de deversări masive de petrol, care au acoperit 16,2% (4.711,6 km²) din nord-vestul Mării Negre. Aceste deversări au afectat sever ariile marine protejate (Marine Protected Areas – MPA) din regiune. Studiul a evidențiat că 21% din habitatul bentonic „Phyllophora lui Zernov" (Zernov's Phyllophora) și 67% din Parcul Național Beloberejia Sviatoslava au fost expuse poluării cu petrol. Potrivit autorilor, distrugerea Barajului Kahovka a determinat antrenarea în mare, printr-o inundație de mari proporții, a deșeurilor industriale acumulate timp de decenii în regiunea Zaporijjea, a sedimentelor de fund contaminate cu metale grele, a peste 150 de tone de uleiuri industriale, a deșeurilor organice și a minelor. Ca urmare, salinitatea a scăzut brusc, atingând în unele zone valori de numai 4–5‰, iar concentrația azotului amoniacal, indicator al poluării cu ape uzate, a crescut până la de 13,8 ori peste limitele legale. Aportul masiv de nutrienți (azot și fosfor) în ecosistem a determinat o creștere cu 170–280% a concentrației de clorofilă-a și o înflorire algală fără precedent, de peste 1.400%, a cianobacteriilor potențial toxice (alge albastre-verzi). Ca urmare a șocului produs de aportul masiv de apă dulce și a poluării, pe litoralul Mării Negre au fost observate mortalități masive ale crapului și ale altor specii de pești de apă dulce. Distrugerea barajului a condus, de asemenea, la pierderea a aproximativ 11.400 de tone de resurse piscicole, evaluate la circa 267 milioane de dolari. În estuarul Niprului, unde mediul a devenit aproape integral dulce, s-a constatat dispariția completă a unor organisme marine, precum creveții, ctenoforele și meduzele, în timp ce speciile dulcicole, precum babușca (*Scardinius erythrophthalmus*) și știuca (*Esox lucius*), au devenit dominante. Odată cu intensificarea debitului de apă dulce, ierburile marine din estuar au fost smulse și transportate, fiind înlocuite de planta acvatică dulcicolă *Ceratophyllum demersum* (cornaci), care a devenit dominantă de-a lungul țărmului până la aproximativ 200 m de la coastă (Kvach și colab., 2025).

În studiul publicat în 2025, Jiang și colaboratorii au analizat răspunsurile biogeochimice pe termen scurt produse în nord-vestul Mării Negre după distrugerea Barajului

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Kahovka, utilizând imagini satelitare Sentinel-3 OLCI, modelare hidrologică și date obținute in situ. Rezultatele au arătat că prăbușirea barajului a afectat peste 50% din suprafața nord-vestică a Mării Negre. În 57% din regiune, concentrația solidelor totale în suspensie (Total Suspended Solids – TSS) a depășit de peste cinci ori media înregistrată înaintea dezastrului, iar în două zone – litoralul Fontanka (de la 0,5 g/m³ la peste 55 g/m³) și sectorul central al nord-vestului Mării Negre (de la 0,6 g/m³ la 65 g/m³) – concentrațiile au fost de aproximativ 100 de ori mai mari decât nivelurile anterioare. În ceea ce privește nutrienții, în apropierea coastei orașului Odesa au fost înregistrate creșteri semnificative ale concentrațiilor de nitrați și fosfați. Acest șoc ecologic a declanșat în decurs de o săptămână înfloriri algale intense, care au persistat aproximativ 20 de zile. În 66% din nord-vestul Mării Negre, concentrația de clorofilă-a a depășit de peste cinci ori media anterioară colapsului barajului. Raportul mediu Chl-a/TSS în interiorul penei de dispersie a solidelor în suspensie a crescut de la 0,6 în data de 9 iunie la un maxim de 1,8 în 16 iunie, determinând schimbarea culorii apei din brun-cenușiu în verde. Totodată, distrugerea barajului a favorizat transportul către nord-vestul Mării Negre al unor concentrații ridicate de metale grele (Fe, Mn, Cu, Zn, Cr și Cd). Analizele apei au arătat că unele dintre aceste metale, în special Zn, au depășit standardele de calitate a mediului (Environmental Quality Standards – EQS) (Jiang și colab., 2025).

În studiul publicat în 2026, Komorin și colaboratorii au investigat, în nord-vestul Mării Negre, în special în apele costiere ale Odesei și de-a lungul transectului fluviu–estuar–mare al Niprului care alimentează această zonă, semnalele de poluare generate pe litoralul Mării Negre în contextul războiului dintre Rusia și Ucraina. Acestea au fost identificate și modelate prin trei abordări complementare: analize hidrochimice de rutină, determinarea poluanților prioritari și analiza amprentei chimice a reziduurilor petroliere eșuate pe țărm. Conform rezultatelor, deși monitorizarea pe termen lung indică existența unui ciclu sezonier bine definit al caracteristicilor apei marine, începând din a doua jumătate a anului 2024 au fost înregistrate anomalii de scurtă durată, dar de mare intensitate. Acestea s-au manifestat prin scăderi bruște ale concentrației oxigenului dizolvat până la niveluri critice și prin creșteri accentuate ale concentrațiilor de nutrienți, în special azot și fosfor. Poluanții prioritari (metale

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

grele, hidrocarburi aromatice policiclice – HAP, bifenili policlorurați – PCB etc.), determinați de-a lungul transectului fluviu–estuar–mare în perioada 2023–2025, au prezentat variații spațiale pronunțate și formarea unor zone de tip hot spot către sectorul marin. Reziduurile petroliere depuse pe litoralul Odesei între 24 ianuarie și 18 martie 2025 (precum și în lunile următoare) au fost analizate prin cromatografie gazoasă cuplată cu spectrometrie de masă (GC-MS). Analizele amprentei chimice au demonstrat fără echivoc că poluarea nu provenea dintr-un singur naufragiu sau dintr-o deversare izolată. Materialele eșuate au fost clasificate în trei categorii: (1) păcură puternic alterată, (2) amestecuri de păcură cu fracții distilate și (3) materiale de tip motorină/gaz oil. Această diversitate de compoziții indică faptul că diferite tipuri de produse petroliere au pătruns continuu în regiune prin căi multiple de transport (Komorin și colab., 2026).

Studiul publicat de Boitsov și colaboratorii în 2026 a inclus analiza probelor de sediment superficial prelevate din 32 de locații și a carotelor de sediment colectate din patru locații de pe litoralul bulgăresc al Mării Negre. În probele de sediment au fost investigate atât poluanți organici, cât și anorganici. Au fost analizate metale, hidrocarburi aromatice policiclice (HAP), bifenili policlorurați (PCB), polibromodifenil eteri (PBDE), diclorodifeniltricloretan (DDT) și produșii săi de degradare, hexaclorciclohexani (HCH), hexaclorbenzen (HCB), precum și contaminanți emergenți de interes, respectiv substanțe per- și polifluoroalchilice (PFAS). PBDE și PFAS au fost raportate pentru prima dată în sedimentele marine din această regiune. Conform rezultatelor, nu au fost identificate dovezi ale unui impact al războiului dintre Ucraina și Rusia asupra calității sedimentelor (Boitsov și colab., 2026). În cadrul proiectului a fost conceput un program de monitorizare destinat urmăririi poluării generate de conflictul armat.

3.2.2. Obiectivul programului de monitorizare a poluării asociate conflictului armat

Obiectivul principal al programului de monitorizare este evaluarea degradării ecologice directe (muniții, epave scufundate, reziduuri rezultate în urma bombardamentelor) și indirecte (prăbușirea infrastructurii, precum distrugerea Barajului Kahovka și întreruperea funcționării stațiilor de epurare a apelor uzate) produse de conflictul armat dintre Rusia și

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Ucraina asupra ecosistemului Mării Negre. În plus, clasificarea acestor impacturi și fundamentarea lor din punct de vedere juridic reprezintă, de asemenea, un obiectiv esențial al programului. În locul dezvoltării unui sistem complet nou, programul propune o arhitectură de monitorizare adaptativă și bazată pe risc, construită pe baza directivelor internaționale existente (MSFD, WFD) și a infrastructurilor regionale (BSIMAP). Prioritatea principală este asigurarea unui flux continuu și sigur de date, prin protejarea personalului de teren împotriva riscurilor generate de mine și de desfășurarea conflictului activ, în conformitate cu principiul „Do No Harm”.

Contaminanți, matrice și frecvența prelevării probelor

Cadrul analitic al programului gestionează toate subgrupele specifice de contaminanți generate de conflict și de distrugerea infrastructurii, matricele care urmează să fie investigate și frecvența temporală a activităților de teren prin intermediul matricelor prezentate în Anexa, Tabelele 7–8. Constrângerile privind accesul fizic și riscurile de securitate generate de condițiile de război impun implementarea programului de monitorizare prin utilizarea unor metode tehnologice inovatoare.

Instrumente inovatoare:

- Vehiculele de suprafață fără pilot (USV), vehiculele aeriene fără pilot (UAV/drone) și vehiculele subacvatice autonome (AUV/ROV) vor fi utilizate pentru prelevarea probelor și colectarea datelor în zonele cu risc ridicat, în care navele cu echipaj nu pot opera din cauza pericolului reprezentat de mine sau de conflictul activ.
- Datele de observare a Pământului obținute prin satelit au fost integrate în sistem pentru monitorizarea la scară largă a deversărilor de petrol, a penelor de dispersie fluvială, a distribuției materialului solid în suspensie și a înfloririlor algale.

Gestionarea și raportarea datelor:

- Toate datele obținute din teren și prin tehnici de teledetecție vor fi centralizate și stocate în platforma Black Sea e-Platform și în baza de date privind calitatea apei

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

(Water Quality Database – WQDB), administrate de UkrSCES (Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea).

- Elementul fundamental care conferă programului de monitorizare relevanță juridică și internațională constă în faptul că datele colectate nu vor rămâne la nivel local, ci vor fi integrate direct în rețele instituționale europene, precum EMODnet Chemistry și WISE Marine. Această integrare va asigura menținerea oficială a degradării ecologice generate de conflict în Marea Neagră în atenția politicilor de mediu ale Uniunii Europene, a ciclurilor de raportare și a viitoarelor mecanisme de răspundere și reparare a prejudiciilor asupra mediului.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

CAPITOLUL 4

BIOACUMULAREA ȘI MANAGEMENTUL RISCULUI PENTRU SĂNĂTATEA UMANĂ

Una dintre cele mai importante teme abordate în cadrul studiului este modul în care nivelurile actuale ale elementelor din bazinul Mării Negre sunt transferate și acumulate în organismele vii. În acest scop, au fost colectate probe biologice aparținând unor organisme cu niveluri trofice diferite și caracteristici de bioindicator, din mai multe locații din Turcia și România, iar profilurile elementelor au fost determinate prin analiza diferențiată a țesuturilor.

4.1. Acumularea elementelor în organisme bioindicatoare: capacitatea de acumulare și procesele de biotransfer al elementelor la pești, macroalge și moluște

În cadrul acestui proiect, pentru compararea nivelului acumulării elementelor între diferite țesuturi și specii a fost utilizat Indicele Poluării cu Metale (Metal Pollution Index – MPI) (Figura 6). Fierul (Fe) a fost exclus în mod deliberat din calculul MPI pentru a evita ca nivelurile sale naturale ridicate să mascheze semnalele toxicologice ale elementelor urmă, precum Cd și As. Această abordare previne distorsionarea rezultatelor și reprezintă o alegere metodologică intenționată.

Valorile MPI înregistrate la stațiile de prelevare din România și Turcia au variat între 0,043 (cochilia externă a R. venosa, Razim 3) și 29,620 (alge, Laguna Balık). În Turcia, algele au constituit matricea cu cele mai ridicate valori MPI, respectiv în Laguna Balık (29,620), râul Kızılırmak (13,261) și Marea Neagră (10,846).

În România, cele mai ridicate valori au fost înregistrate la Rapana venosa, evidențiindu-se valoarea determinată pentru organismul întreg la Razim 3 (22,513), precum și valoarea determinată în ouă la Pescarie (20,616). Valorile MPI pentru algele din România au variat între 1,043 (Pescarie Cons.) și 3,428 (Pescarie). Valorile corespunzătoare organismului întreg al speciei R. venosa au atins maximul la Razim 3 (22,513), urmate de Sulina (8,750). În Turcia, valoarea MPI pentru organismul întreg al aceleiași specii a scăzut până la 4,230 în

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

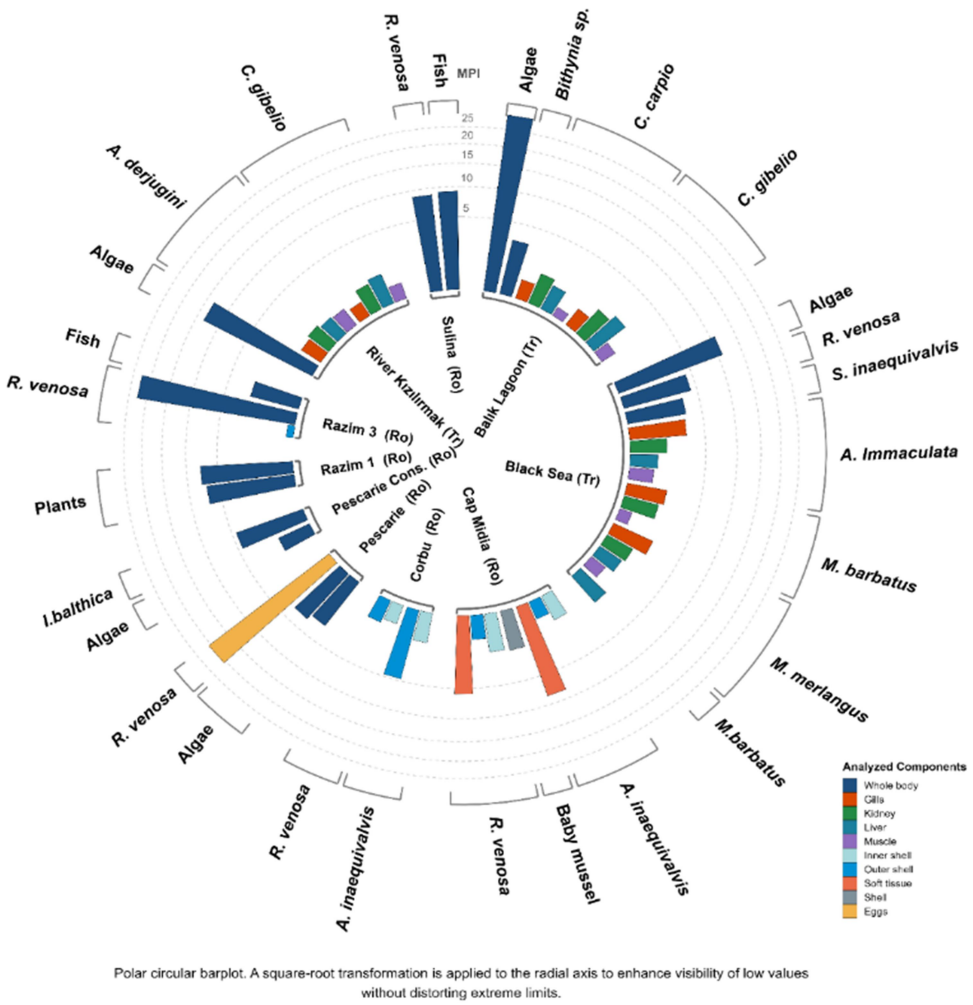
stația Marea Neagră. Valoarea MPI determinată în ouă la Pescarie (20,616) s-a apropiat de valoarea maximă înregistrată pentru organismul întreg la Razim 3.

În cadrul probei Cap Midia, valorile MPI determinate la nivelul diferitelor țesuturi au prezentat o variație de 10,5 ori, de la cochilia externă (0,554) până la țesutul moale (5,795). Cochilia internă (1,396) a prezentat valori intermediare între aceste două extreme. Fracțiile de cochilie au înregistrat valori constant scăzute în toate stațiile din România. Astfel, valorile pentru cochilia externă au fost de 0,043 la Razim 3, 0,535 la Corbu și 0,554 la Cap Midia, iar pentru cochilia internă de 1,396 la Cap Midia și 0,353 la Corbu.

În cazul bivalvei Anadara inaequivalvis, colectată la Cap Midia, valoarea MPI determinată în țesutul moale (8,360) a fost de aproximativ 12 ori mai mare decât cea din cochilia internă (0,688) și de aproximativ 25 de ori mai mare decât cea din cochilia externă (0,330). Pentru aceeași specie, la Corbu, valoarea MPI a cochiliei interne (0,856) a fost mai mare decât cea determinată la Cap Midia (0,688), iar cochilia externă a înregistrat o valoare remarcabil de ridicată (4,701).Plantele colectate la Razim 1 au prezentat două valori apropiate ale MPI (6,825 și 7,509), iar valoarea MPI determinată pentru *Idotea balthica* la Pescaria Cons. a fost de 4,453.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea



Polar circular barplot. A square-root transformation is applied to the radial axis to enhance visibility of low values without distorting extreme limits.

Figura 6. *Variația Indicelui Poluării cu Metale (MPI) între diferite grupe taxonomice și tipuri de țesuturi de pe litoralul României și al Turciei*

La trei specii de pești marini prelevați din Marea Neagră turcă, branhiile au înregistrat cele mai ridicate valori ale MPI la nivel tisular: *Alosa immaculata* (2,858), *Merlangius merlangus* (1,670) și *Mullus barbatus* (1,431). Țesutul muscular a prezentat cele mai scăzute valori la toate cele trei specii (0,533, 0,283 și, respectiv, 0,147). Valorile pentru rinichi și ficat au fost apropiate pentru *M. merlangus* (0,773 și 0,627), în timp ce la *M. barbatus* au fost aproape identice (1,120 și 1,132).

În Turcia, ierarhia țesuturilor la două specii de ciprinide a prezentat diferențe. În timp ce ficatul (1,423) și rinichii (0,952) au depășit valoarea atribuită branhiei (0,371) la *Carassius*

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

gibelio din Laguna Balık, țesutul muscular a rămas la cea mai mică valoare (0,230). La *Cyprinus carpio*, rinichii (0,952) și ficatul (0,645) au depășit valoarea branhială (0,359) și, similar cu *C. gibelio*, țesutul muscular a rămas din nou la cea mai mică valoare (0,087). În râul Kızılırmak, *C. gibelio* a menținut modelul ponderat în funcție de ficat (ficat (0,948) > rinichi (0,737) > mușchi (0,255) > branhii (0,239)). *Alburnus derjugini*, pe de altă parte, a devenit specia care a prezentat cea mai restrânsă distribuție interțesutulară dintre speciile eșantionate (rinichi: (0,601) > branhii (0,472) > ficat (0,460) > mușchi (0,385)).

Factorul de bioacumulare (BAF), care reprezintă raportul dintre acumularea elementului în țesut și acumularea elementului în apă, precum și factorul de acumulare biotă-sediment (BSAF), care reprezintă raportul dintre acumularea elementului în țesut și acumularea elementului în sediment la speciile capturate, sunt, de asemenea, importanți.

La speciile animale, clasamentul elementelor dominante diferă de la o specie la alta. La *R. venosa*, Mn (36917) și Cd (25614) au ocupat primele două locuri, în timp ce la *S. inaequivalvis* Mn a atins o valoare mult mai mare (96636), urmat de Fe (14996) și Cd (14540). La *Bithynia sp*., Cr (29657) s-a evidențiat ca element dominant, iar *Bithynia sp.* a fost singurul organism dintre speciile animale la care Cr a fost detectat în afara BDL.

Analiza BSAF se grupează, în general, în trei clase: BSAF < 1: non-concentratori, 1 < BSAF < 2: concentratori cu nivel scăzut și BSAF > 2: concentratori cu nivel ridicat (Jolaosho et al., 2024). În consecință, cea mai semnificativă depășire în analiza BSAF a fost observată la *R. venosa*. Această specie a depășit pragul pentru cinci elemente: Cd (74,07), Hg (4,29), Cu (2,83), As (1,82) și Zn (1,61). S. inaequivalvis a depășit pragul doar pentru Cd (42,05) și Zn (1,27). Valorile BSAF ale celorlalte elemente s-au situat între 0,805 (Hg) și 0,003 (Cr). Toate valorile BSAF ale speciei *Bithynia sp.* au variat între 0,407 (Cd) și 0,001 (Pb), iar niciun element nu a atins pragul. Dintre alge, doar Mn în algele din Lacul Balık (5,42) și, în algele din Marea Neagră, Cd (2,53) și As (1,78) au depășit pragul de bioacumulare. În algele din Kızılırmak, cea mai mare valoare BSAF a fost înregistrată pentru Zn (0,77). De asemenea, s-au efectuat calcule ale BAF și BSAF pentru patru țesuturi specifice (mușchi, rinichi, ficat, branhii) ale a șase specii de pești din trei locații diferite (Figura 8). Aceste specii sunt *A. immaculata*, *M. merlangus* și *M. barbatus* din Marea Neagră. Diagrama evidențiază

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

relație Element-Specie-Locație în cadrul BAF și BSAF. Grosimea fluxului indica intesnitatea acumulării (media valorilor element-specie, suma valoriloe specie-locașie). Datele au fost transformate și normalizate în vederea prelucrării diagramei.

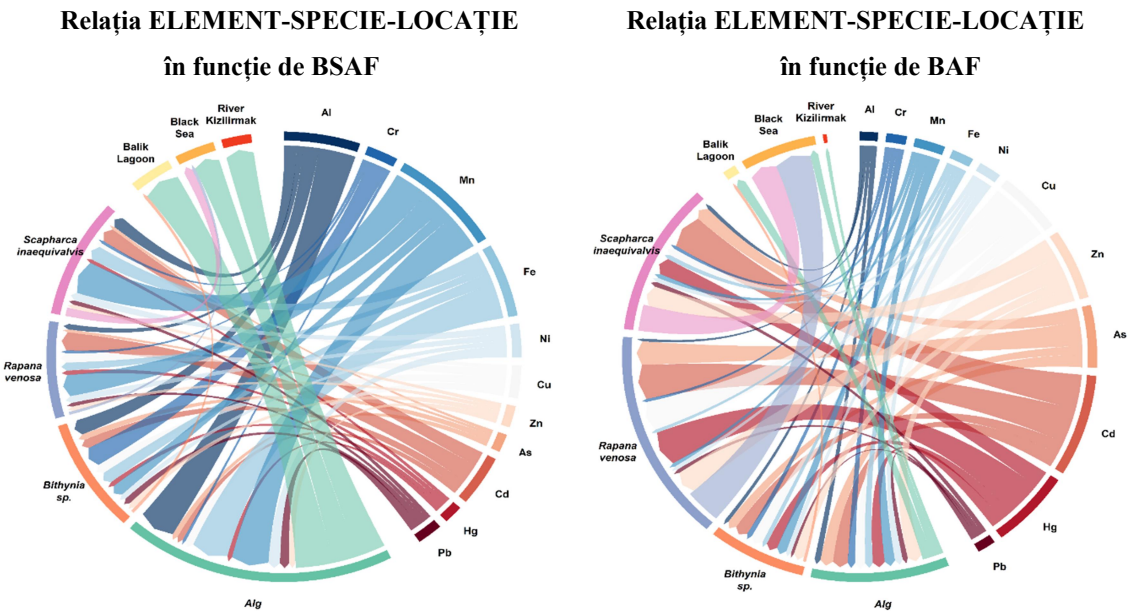


Figura 7. *Reprezentarea prin diagramă cordală a relațiilor interdependente dintre factorii BAF și BSAF pentru cele 11 elemente analizate la taxonii non-ichtiofaunici*

În cazul valorilor BAF, diferențierea în funcție de locație, atât la nivel de element, cât și de specie, este extrem de pronunțată. În ecosistemul Mării Negre, țesutul branhial al speciei A. *immaculata* a înregistrat valorile maxime globale din setul de date pentru Mn (417268), Al (27377) și Ni (10988). Pentru elementul Fe, cea mai mare valoare BAF a fost observată în ficatul speciei *C. gibelio* din râul Kızılırmak (63144). În plus, cea mai mare valoare a BAF pentru Cd a fost înregistrată din nou în rinichiul speciei *C. gibelio* din râul Kızılırmak (14 063), pentru Cu în ficatul speciei *C. gibelio* (24 312), pentru Cr în ficatul speciei *C. carpio* din Lacul Balık (7 495) și pentru As în ficatul speciei *A. derjugini* (455). Zn (1893,94) și Pb (690,55) au atins acumulări remarcabile în branhiile speciei *A. derjugini*, în timp ce acumularea de Hg în țesutul muscular al aceleiași specii (10331) a depășit toate celelalte țesuturi și a reprezentat valoarea maximă a Hg din setul de date. Analiza BSAF derivată din

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

sedimente s-a menținut într-un interval mult mai restrâns în comparație cu BAF derivată din apă, iar valoarea maximă globală a setului de date a atins doar nivelul de (10,48). Un aspect demn de remarcat în ceea ce privește valorile BSAF a fost nivelul relativ ridicat al elementelor extrem de toxice, precum As, Cd și Hg. Hg a înregistrat din nou valoarea maximă globală, iar acumularea sa intensă în țesutul muscular a atras, de asemenea, atenția. Dintre toate speciile, cea mai mare acumulare de Hg a fost observată din nou la A. derjugini. Modelele BAF și BSAF prezintă o divergență marcată în ceea ce privește dinamica absorbției elementelor din mediu.

4.2. Modele de evaluare a riscurilor pentru sănătatea umană: riscuri de natură carcinogenă (CR) și necarcinogenă (THQ, HI) calculate pe baza consumului de fructe de mare

În cadrul studiului, au fost calculați indicii riscului carcinogen individual (CR) și ai riscului carcinogen total (TCR), care indică efectul cumulativ pe baza concentrațiilor de metale grele din speciile de pești (*C. carpio, C. gibelio, M. barbatus, A. immaculata, M. merlangus, A. derjugini*) prelevate din Laguna Balık, Marea Neagră și râul Kızılırmak (Tabelulul 1). Atunci când rezultatele obținute sunt evaluate în contextul valorilor de referință cuprinse între 10^{-6} (limita inferioară) și 10^{-4} (limita superioară), care reprezintă intervalul de risc acceptabil, se observă că riscul cumulativ prezintă o imagine mult mai critică în comparație cu riscurile. asociate fiecărui element în parte.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Diagrama aluvială pentru relațiile ELEMENT-ȚESUT-SPECIE-LOCAȚIE în funcție de BAF

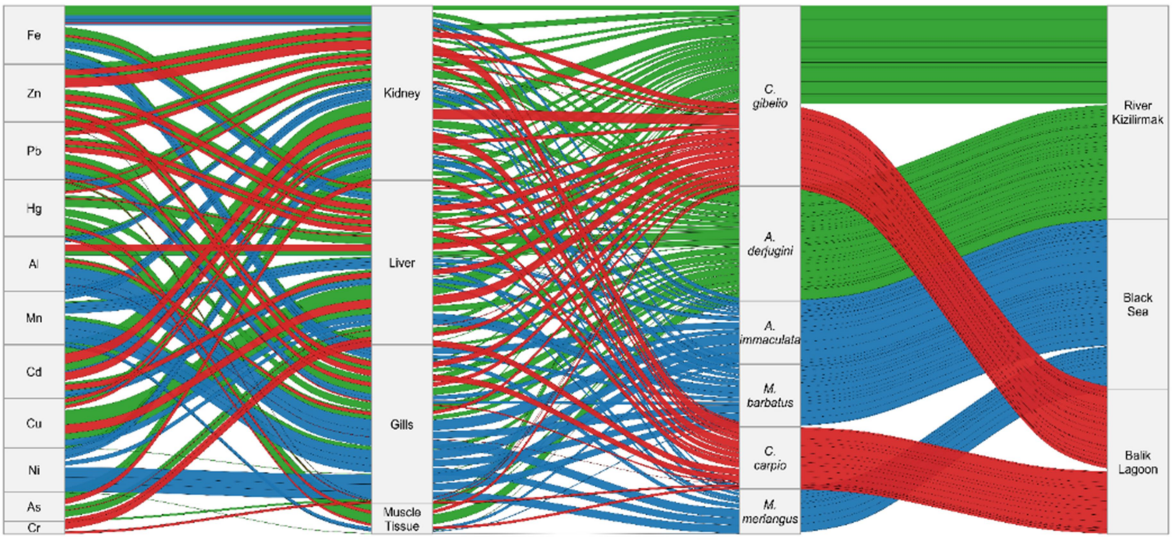


Diagrama aluvială pentru relațiile ELEMENT-ȚESUT-SPECIE-LOCAȚIE în funcție de BSAF

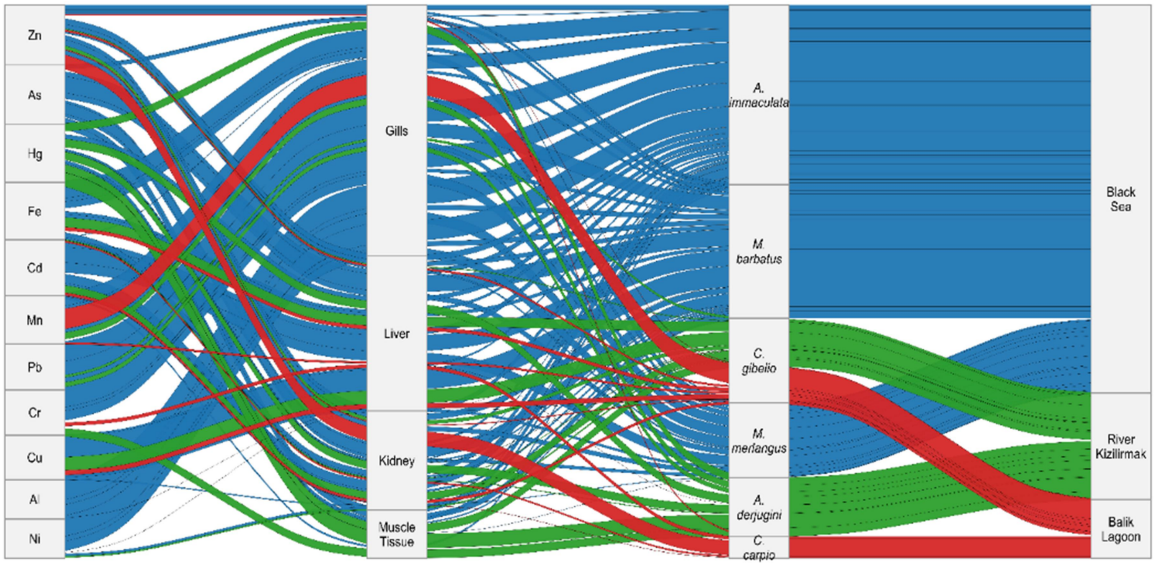


Figura 8. *Diagramă aluvială pentru relațiilor BAF şi BSAF ale celor 11 elemente pentru taxonii de pești*

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Tabelul 1. *Estimarea riscurilor carcinogene (CR şi TCR) asociate expunerii la metale grele prin consumul de peşte din trei ecosisteme acvatice (Tunca et al., 2026)*

		Cr	Ni	As	Cd	Pb	TCR
CR							
Marea Neagră	***A. immaculata***	9.96E-07	8.20E-06	8.15E-05	1.52E-04	5.51E-08	2.42E-04
	M. merlangus	2.09E-07	0	1.20E-05	8.75E-05	4.06E-08	9.97E-05
	M. barbatus	4.33E-07	1.25E-07	8.55E-05	4.77E-05	3.72E-08	1.34E-04
Laguna Balık	***C. gibelio***	2.04E-07	0	4.86E-07	1.70E-05	5.06E-08	1.77E-05
	C. carpio	2.85E-09	0	8.87E-07	8.19E-06	3.73E-08	9.12E-06
Râul Kızılırmak	***C. gibelio***	3.46E-07	0	1.31E-06	1.70E-05	3.77E-08	1.86E-05
	A. derjugini	4.69E-06	2.52E-05	9.21E-07	9.54E-06	3.84E-08	4.04E-05
C_{SF}: Factor de pantă carcinogenă mg/kg/day)		0.42	0.91	1.5	15	0.0085	10^{-4}

4.2.1. Constatări critice care depășesc limita superioară acceptabilă de risc (10^{-4})

Atunci când riscul este analizat pentru fiecare element în parte (CR), singura valoare care depășește limita superioară acceptabilă de risc de 10^{-4} este concentrația de Cd determinată la specia A. immaculata colectată din Marea Neagră ($1{,}52 \times 10^{-4}$). Cu toate acestea, atunci când analiza este realizată din perspectiva riscului carcinogen total (TCR), severitatea situației devine mai evidentă. Limita superioară inacceptabilă de risc (10^{-4}) este depășită de două specii provenite din Marea Neagră. Astfel, specia *A. immaculata* prezintă cel mai ridicat nivel al riscului carcinogen cumulativ din întregul set de date, cu o valoare TCR de $2{,}42 \times 10^{-4}$. De asemenea, pentru specia *M. barbatus* recoltată din aceeași zonă, valoarea TCR a fost calculată la $1{,}34 \times 10^{-4}$, depășind în mod evident limita superioară de risc, deși niciun element individual (CR) nu a depășit această limită. În plus, valoarea TCR pentru specia *M. merlangus* din Marea Neagră a fost de $9{,}97 \times 10^{-5}$, valoare foarte apropiată de pragul de risc inacceptabil ($1{,}00 \times 10^{-4}$).

4.2.2. Rezultate încadrate în intervalul de risc care necesită monitorizare (10^{-6}–10^{-4})

Valorile care depășesc limita inferioară de risc (10^{-6}), dar rămân sub limita superioară (10^{-4}), sunt prezentate mai jos pentru fiecare element.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Cadmiul (Cd) s-a încadrat în acest interval de monitorizare pentru toate speciile, cu excepția speciei *A. immaculata*, care a înregistrat cea mai ridicată valoare cumulativă. Riscul asociat arsenului (As) este predominant în probele din Marea Neagră (*M. barbatus*: 8,55 × 10^{-5}; *A. immaculata*: 8,15 × 10^{-5}; *M. merlangus*: 1,20 × 10^{-5}), iar în afara Mării Negre pragul inferior de risc a fost depășit doar la specia *C. gibelio* (1,31 × 10^{-6}) din râul Kızılırmak.

În cazul nichelului (Ni), valorile care au depășit limita de 10^{-6} au fost înregistrate numai la A. derjugini (2,52 × 10^{-5}) din râul Kızılırmak și la *M. barbatus* (8,20 × 10^{-6}) din Marea Neagră. Pentru crom (Cr), singura valoare care a depășit pragul a fost determinată la *A. derjugini* (4,69 × 10^{-6}) din râul Kızılırmak.

Din perspectiva efectului cumulativ (TCR), toate probele care nu au depășit limita superioară în Marea Neagră s-au încadrat în intervalul de risc ce necesită monitorizare. Astfel, valorile TCR au fost de 4,04 × 10^{-5} pentru *A. derjugini* și 1,86 × 10^{-5} pentru *C. gibelio* în zona Kızılırmak, respectiv 1,77 × 10^{-5} pentru *C. gibelio* și 9,12 × 10^{-6} pentru *C. carpio* în Laguna Balık.

4.2.3. Analize situate sub limita de risc (<10^{-6}) și contrastul cu TCR

Atunci când riscul carcinogen (CR) este evaluat pentru fiecare element individual, plumbul (Pb) s-a situat mult sub valoarea de referință de 10^{-6} în toate speciile și locațiile investigate. Cea mai ridicată valoare pentru Pb a fost înregistrată la *A. immaculata* din Marea Neagră (5,51 × 10^{-8}).

Cu toate acestea, cea mai importantă concluzie a studiului este că, atunci când riscul carcinogen total (TCR) este analizat în mod integrat, nicio specie de pește investigată nu se încadrează sub limita inferioară de risc de 10^{-6}, considerată zona lipsită de risc. Chiar dacă nivelurile de risc asociate fiecărui element sunt reduse, efectul cumulativ al expunerii determină încadrarea tuturor speciilor cel puțin în categoria „intervalului de risc care necesită monitorizare”. Chiar și *C. carpio* din Laguna Balık, care prezintă cea mai mică valoare din acest interval (9,12 × 10^{-6}), depășește limita considerată lipsită de risc.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

4.2.4. Concluzii

Analiza integrată a riscului individual și a celui cumulativ demonstrează că zona Mării Negre reprezintă principala sursă de risc carcinogen cumulativ, în special ca urmare a acumulării de Cd și As. Speciile *A. immaculata* și *M. barbatus* au depășit limita superioară acceptabilă de risc carcinogen (10^{-4}) ca urmare a expunerii simultane la mai multe metale.

Faptul că numeroase situații considerate individual lipsite de risc (CR < 10^{-6}) sunt încadrate în categoria care necesită monitorizare atunci când contribuțiile tuturor elementelor sunt evaluate cumulativ evidențiază importanța esențială a utilizării riscului carcinogen total (TCR) în evaluarea riscului pentru sănătate.

În cadrul studiului au fost calculați și indicatorii Target Hazard Quotient (THQ) și Hazard Index (HI) pentru evaluarea riscurilor necarcinogene asupra sănătății. Spre deosebire de profilurile de risc carcinogen, valorile THQ și HI nu au depășit pragul acceptabil (>1) la niciuna dintre speciile de pești analizate și în niciuna dintre locațiile de eșantionare. Acest rezultat indică faptul că riscurile sistemice necarcinogene asociate consumului speciilor investigate se mențin în limite considerate sigure în condițiile actuale de mediu.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

CAPITOLUL 5

SOLUȚII INOVATOARE DE REMEDIERE

În ultimul deceniu, dezvoltarea tehnologică a oferit soluții eficiente pentru combaterea poluării mediului marin. Totuși, nicio metodă de tratare nu poate elimina în mod eficient toate tipurile de poluanți. Alegerea metodei de remediere pentru poluanți precum materialele plastice, metalele grele, produsele petroliere și deșeurile industriale depinde în totalitate de natura poluantului și de caracteristicile mediului contaminat.

5.1. Baza de date privind soluțiile tehnologice de remediere. Prezentarea celor mai avansate metode („state-of-the-art") utilizate la nivel mondial și regional pentru combaterea poluării marine

5.1.1. Metode de tratare a poluării cu produse petroliere

Poluarea cu produse petroliere reprezintă una dintre cele mai grave forme de degradare a mediului marin. Aceasta poate proveni din activități de extracție, transport sau din explozii ale navelor cauzate de conflicte armate. Literatura de specialitate evidențiază trei categorii principale de metode de remediere: mecanice, chimice și biologice.

Metode mecanice: utilizarea sistemelor de skimmere și baraje plutitoare (booms) permite colectarea eficientă a peliculei de petrol de la suprafața apei, datorită simplității și costurilor reduse.

Metode chimice: dispersanții și agenții de solidificare fragmentează produsele petroliere și facilitează degradarea lor naturală. Totuși, utilizarea acestor substanțe trebuie atent controlată pentru a evita transformarea lor în surse suplimentare de poluare.

Bioremedierea: este considerată cea mai ecologică metodă, deoarece utilizează microorganisme și bioparticule capabile să accelereze degradarea produselor petroliere într-un mod compatibil cu mediul.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

5.1.2. Metode de tratare a deșeurilor plastice

În pofida programelor de reducere a utilizării plasticului, poluarea marină cu materiale plastice continuă să se intensifice. Produsele de degradare ale acestora exercită efecte toxice asupra ecosistemelor, iar numeroase obiecte din plastic constituie capcane letale pentru fauna marină. Metodele de remediere diferă în funcție de tipul plasticului și de localizarea acestuia.

- bariere și baraje plutitoare;
- curățare mecanică și manuală;
- micoremediere și degradare microbiană;
- metode chimice, precum piroliza, care transformă deșeurile plastice în materii prime utile fără emiterea de produse secundare toxice;
- tehnologii inovatoare, precum metoda cu role din plasă dublă și integrarea materialelor inteligente, utilizate pentru separarea microplasticelor din mediul acvatic.

5.1.3. Metode pentru combaterea eutrofizării și îndepărtarea nutrienților

Aportul excesiv de azot și fosfor provenit din scurgerile agricole și evacuările de ape uzate determină eutrofizarea ecosistemelor marine, favorizând dezvoltarea accelerată a algelor, epuizarea oxigenului dizolvat și apariția condițiilor hipoxice.

Principalele abordări sunt:

- metode fizice (aerare și îndepărtarea sedimentelor);
- metode chimice (precipitarea nutrienților cu floculanți și coagulanți);
- metode biologice (utilizarea microorganismelor și plantelor acvatice).

Niciuna dintre aceste metode nu este suficientă utilizată individual, motiv pentru care dezvoltarea unor strategii integrate este considerată esențială.

5.1.4. Metode de tratare a poluării cu metale grele și contaminanți chimici

Poluarea cu metale grele reprezintă una dintre cele mai persistente probleme ale mediului marin.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Metodele utilizate includ:

- dragarea sedimentelor și utilizarea materialelor adsorbante;
- aplicarea fosfaților și electrocoagularea pentru transformarea metalelor grele în compuși mai puțin toxici;
- biostimularea, bioaugmentarea și fitoremedierea (în special utilizarea zambilei de apă, Eichhornia crassipes);
- aplicarea nanotehnologiilor, precum reactivul Fenton și nanoparticulele de fier nanometric cu valență zero (nZVI).

5.1.5. Concluzii

Deși există tehnologii specifice fiecărui tip de poluant, cea mai eficientă strategie pentru reducerea poluării viitoare constă în creșterea nivelului de conștientizare, implicarea societății și a factorilor de decizie, precum și consolidarea cooperării internaționale. Programele educaționale dedicate tinerilor reprezintă cea mai sustenabilă investiție pe termen lung pentru promovarea metodelor de remediere și reducerea generării deșeurilor.

5.2. Protocolul de depoluare SIERRA: o descriere detaliată a designului, a mecanismului de funcționare și a posibilelor utilizări ale prototipului inovator creat în timpul proiectului.

Această secțiune prezintă prototipul inovator dezvoltat în cadrul proiectului SIERRA pentru reducerea simultană a poluanților din mediul marin. Soluția propusă constă într-un sistem de filtrare multietajat și multistrat (mecanic și chimic), bazat pe matrici geopolimerice.

5.2.1. Geopolimerii ca materiale inteligente ecologice

Geopolimerii sunt lianți anorganici obținuți prin activarea alcalină a precursorilor aluminosilicați, precum cenușa volantă sau metacaolinul. Aceștia necesită un consum redus de energie și generează emisii scăzute de CO_2. Structura lor poroasă oferă o suprafață specifică ridicată pentru adsorbția și imobilizarea permanentă a ionilor metalelor grele (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cr^{6+} și Cu^{2+}), eficiența de îndepărtare fiind cuprinsă între 90 și 100 %.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

5.2.2. Proiectarea prototipului de remediere a poluării marine

A fost proiectat un sistem de filtrare în două etape care funcționează fără sursă externă de energie (pompe etc.). Deși analizele ciclului de viață (LCA) demonstrează avantajele climatice ale geopolimerilor, experimentele de laborator actuale nu reproduc în totalitate complexitatea chimiei mediului marin.

- Prima etapă: îndepărtarea poluanților grosieri prin filtre din nisip și pietriș, urmată de un filtru lavabil de 50 µm.
- A doua etapă: un cartuș inteligent alcătuit din geopolimeri multistrat cu porozitate controlată, urmat de un al doilea filtru de 50 µm, care mărește timpul de contact și eficiența adsorbției metalelor grele.

5.2.3. Producerea și caracterizarea filtrelor inteligente

Tehnologia geopolimerizării permite obținerea unor materiale capabile să înlocuiască cimentul Portland obișnuit (OPC), prin valorificarea deșeurilor solide industriale și transformarea acestora în materiale utile. Sistemul geopolimeric este alcătuit din două componente principale. Prima componentă este reprezentată de un material bogat în oxizi de aluminiu și siliciu, cum ar fi nămolul roșu (red mud), metacaolinul, cenușa din coji de orez, argilele calcinate, cenușa volantă, sticla uzată, sterilul provenit din exploatările miniere de cupru și zeolitul. Cea de-a doua componentă este activatorul, care poate fi un lichid cu caracter alcalin sau acid. Atunci când se utilizează activarea alcalină, activatorul este alcătuit, în general, din hidroxid de sodiu, silicat de sodiu, hidroxid de potasiu sau silicat de potasiu. În schimb, activarea acidă se realizează, de regulă, prin utilizarea unor activatori pe bază de acid fosforic.

5.2.4. Identificarea și caracterizarea materiilor prime adecvate

Materiile prime utilizate în cadrul acestui studiu au inclus metacaolin (MK), silicat de sodiu (Na_2SiO_3), hidroxid de sodiu (NaOH), peroxid de hidrogen (H_2O_2) și agregate de zeolit. Procedura de sinteză a acestor materiale a fost realizată în conformitate cu metodologia descrisă de Burduhos Nergis și colab. (2025).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

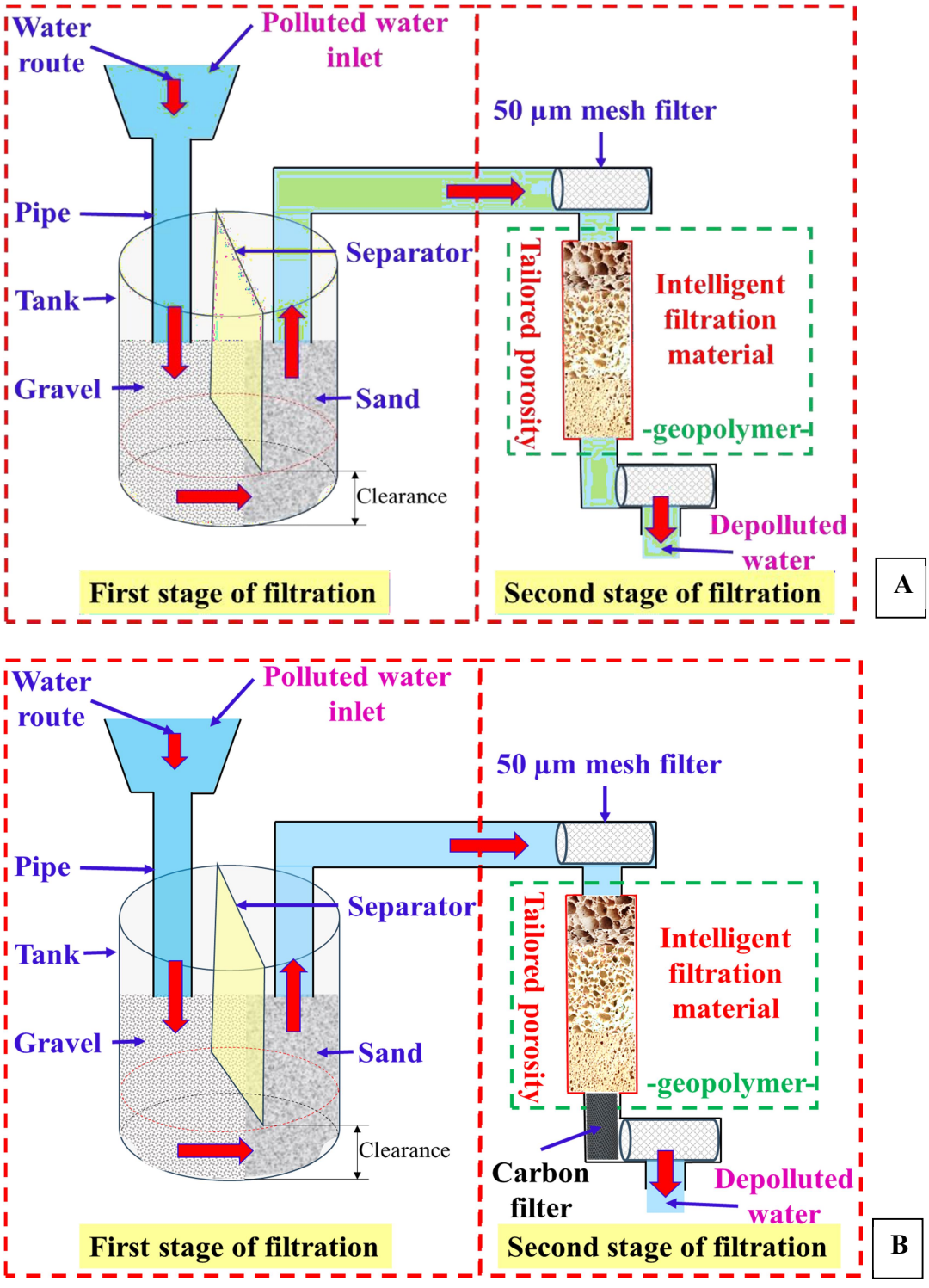


Figura 9. *Prima (A) şi a doua (B) variantă de proiectare a prototipului pentru remedierea poluării mediului marin (Burduhos Nergis şi colab., 2025)*

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Agregatele de zeolit natural utilizate la producerea geopolimerilor pentru cel de-al doilea tip de prototip sunt alcătuite în principal din clinoptilolit (87–90%). Acestea prezintă stabilitate termică până la 450 °C. Proba de zeolit este constituită în principal din siliciu (Si) și aluminiu (Al), care reprezintă 26 %, respectiv 5,5 % din masa totală a probei. Aceste elemente formează structura caracteristică de aluminosilicat, specifică zeoliților.

Proba conține, de asemenea, o cantitate semnificativă de carbon (C), reprezentând 2,8% din masa totală. Acesta este urmat de metale alcaline și alcalino-pământoase, care acționează, cel mai probabil, ca cationi extrarețea, incluzând calciu (Ca) în proporție de 2,2%, potasiu (K) – 1,8%, sodiu (Na) – 0,8% și magneziu (Mg) – 0,8%.

Conținutul de metale de tranziție este dominat de fier (Fe), cu o proporție de 1,4%, urmat de cupru (Cu), cu 0,9%, precum și de cantități de urme de mangan (Mn) și titan (Ti), fiecare reprezentând 0,1% din masa totală. Celelalte elemente minore contribuie cu mai puțin de 0,1% din masa totală, în timp ce oxigenul (O) reprezintă fracția rămasă și are rolul de a stabiliza structura tetraedrică a mineralului. Raportul molar Si/Al este de aproximativ 4,54, valoare caracteristică zeoliților de tip clinoptilolit.

5.2.5. Identificarea celei mai adecvate metode de obținere

Au fost comparate patru metode de bază utilizate în producerea geopolimerilor poroși:

- Metoda auto-formării (SFM – Self-forming method): Produce pori mici și închiși, nefiind adecvată pentru aplicații de filtrare a apei.
- Metoda adăugării de umplutură (AFM – Filler addition method): Este potrivită pentru aplicații de izolare, însă nu este favorabilă pentru filtrarea apei, deoarece suprafețele exterioare ale materialului rămân compacte.
- Metoda stivuirii particulelor (PSM – Particle stacking method): Controlul porozității este dificil, prezentând riscul unei rezistențe mecanice reduse din cauza sinterizării incomplete.
- Metoda spumării directe (DFM – Direct foaming method): Permite obținerea unei porozități adaptate în funcție de tipul și cantitatea agentului de spumare utilizat; aceasta a fost selectată ca fiind cea mai potrivită metodă pentru filtrarea apei.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Metodologia este descrisă în detaliu de Burduhos Nergis et al. (2025).

5.2.6. Caracterizarea geopolimerilor

- Analiza SEM înainte de utilizare: A evidențiat o matrice alumino-silicatică omogenă rezultată în urma unei reacții eficiente de geopolimerizare. Macroporii interconectați asigură permeabilitatea la apă, în timp ce mezoporii maximizează suprafața de contact (Figura 10 și Figura 11).
- Analiza EDS înainte de utilizare: A confirmat prezența unor concentrații ridicate de Si și Al (scheletul polimeric), precum și a ionilor liberi de Na^+ în canalele structurale. Acești ioni sunt capabili să realizeze schimb ionic cu ionii metalelor grele (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cu^{2+}).
- Analiza SEM după utilizare: În porii mici au fost observate precipitate fine și un fenomen ușor de colmatare. Această situație reprezintă o dovadă directă a retenției mecanice. Marginile inițial ascuțite ale porilor au devenit rotunjite. În același timp, nu s-au format fisuri în structura principală, confirmând rezistența mecanică a matricei în condiții de apă sărată (Figura 10 și Figura 11).
- Analiza EDS după utilizare: A indicat o scădere semnificativă a densității ionilor Na^+ (dovadă a mecanismului de schimb ionic), precum și apariția în structură a unor elemente provenite din apa de mare, precum Cl și Mg, și a unor urme de contaminanți, precum Cu și P. Menținerea constantă a raportului Si/Al indică faptul că procesul de filtrare reprezintă un schimb ionic superficial și controlat și că materialul nu a suferit degradare chimică.

5.2.7. Validarea in situ a prototipului de soluție pentru remedierea poluării marine

Modelul prototipului este descris de Burduhos-Nergis et al. (2025). Acesta a fost testat pe probe de apă colectate în cadrul a două campanii distincte desfășurate pe teren, din patru regiuni diferite ale Mării Negre (Corbu, Cap Midia, Pescărie Constanța și Tuzla). Probele au fost prelevate atât sub formă de apă netratată, cât și de apă filtrată.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Rezultatele îndepărtării metalelor grele

- Îndepărtarea Cu: 99,91% în Locația 1, 42% în Locația 2, 58,31% în Locația 3 și 49% în Locația 4.
- Îndepărtarea Zn: 54,36% în Locația 1, a rămas stabilă în Locația 2, 49% în Locația 3 și 13% în Locația 4.

Mecanismele fundamentale de adsorbție constau în schimb ionic ($Na^{+} \rightarrow HM^{2+}$), complexare de suprafață, precipitare de suprafață, interacțiuni electrostatice și difuzie în pori. O creștere redusă a conținutului de fier a fost observată în toate locațiile, iar pentru eliminarea acestei probleme s-a sugerat utilizarea unor materii prime cu un conținut scăzut de fier.

S-a determinat că geopolimerii pe bază de metacaolină au rămas insuficienți pentru îndepărtarea compușilor de azot (nitriți, nitrați, amoniu), a fosfaților și a cloriților. Din acest motiv, ulterior a fost dezvoltat un geopolimer compozit care conține 20% agregat de zeolit.

- Îndepărtarea fosfaților: Reducere până la niveluri nedetectabile în Locațiile 1 și 2, 91,37% în Locația 3 și 89,36% în Locația 4.
- Hidrocarburi totale din petrol (TPH – Total Petroleum Hydrocarbons): Scădere de 45% în primele trei locații; în Locația 4 nu s-a observat nicio modificare, deoarece concentrația inițială era foarte redusă (0,03 mg/L).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

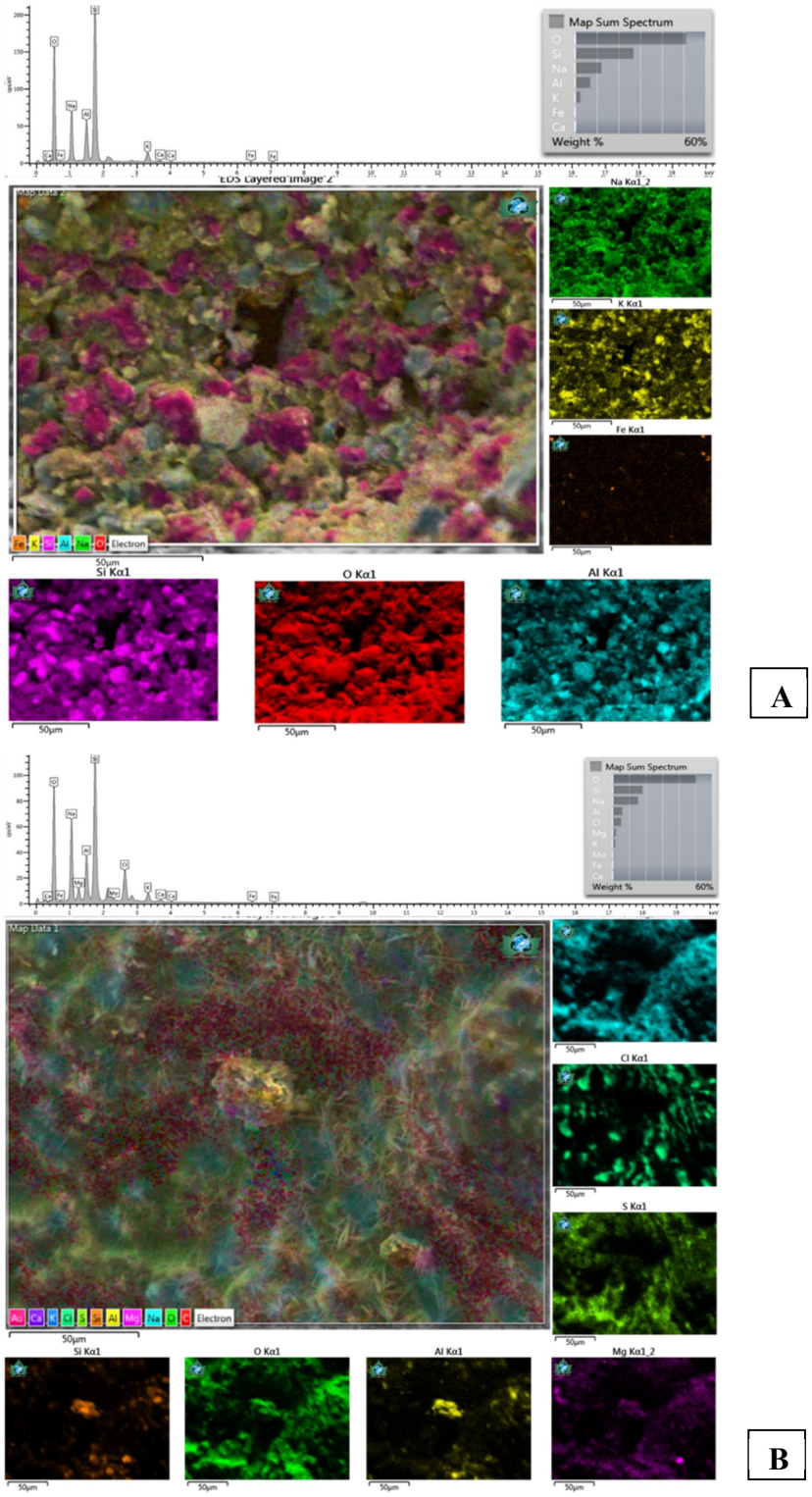


Figura 10. *Cartarea elementală a geopolimerilor înainte (A) şi după (B) utilizarea acestora în filtrarea apei sărate*

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

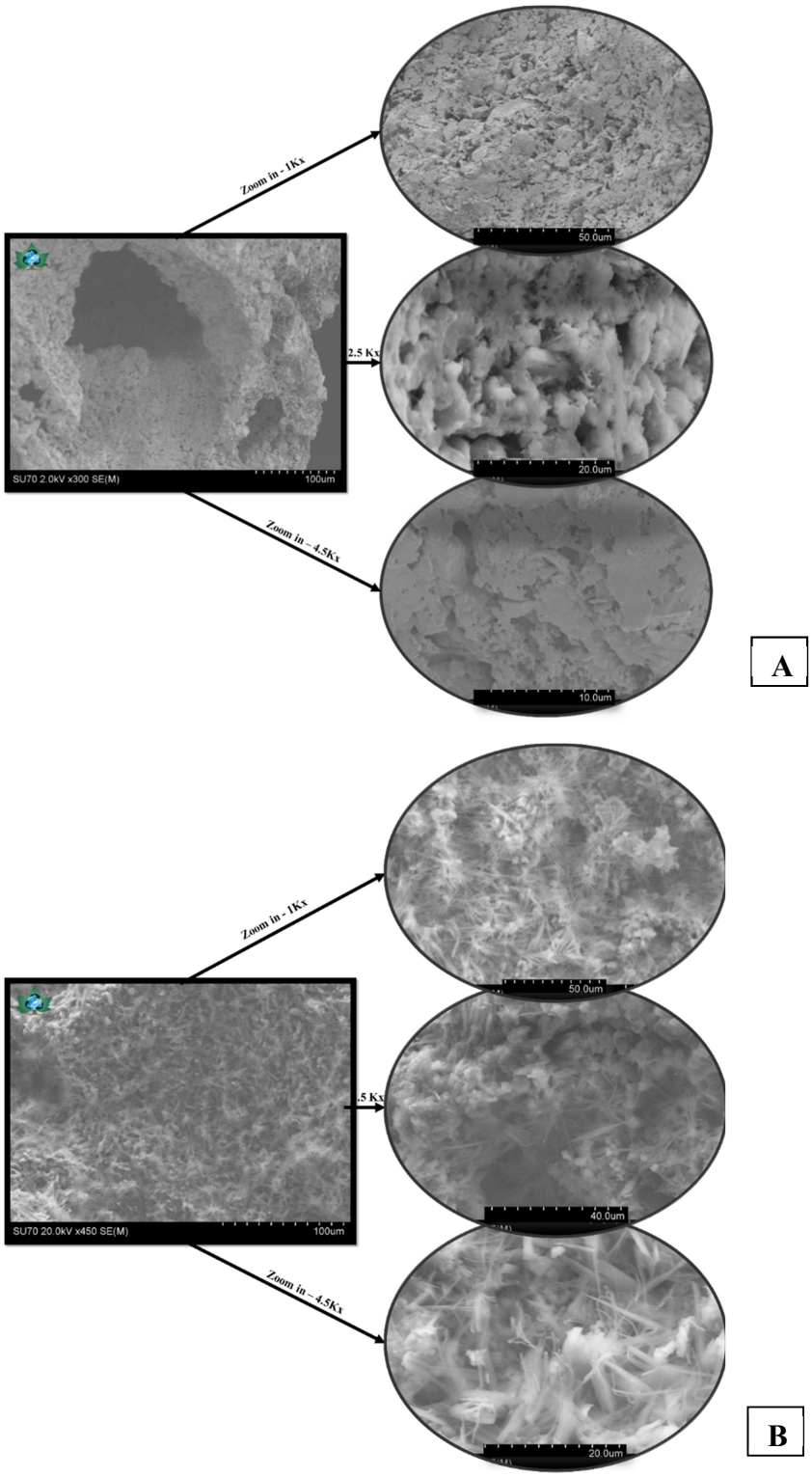


Figura 11. *Morfologia geopolimerilor înainte (A) şi după (B) utilizarea în filtrarea apei sărate*

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Problema creșterii turbidității apei la ieșirea din sistemul de filtrare a fost rezolvată prin adăugarea unui filtru cu carbon activ în aval de filtrul pe bază de geopolimer (Figura 9). Acest al doilea design creează un sistem de tratare sinergic prin combinarea funcției de barieră mecanică și membrană moleculară a filtrului de geopolimer cu funcția de îndepărtare a materiei organice și a turbidității realizată de carbonul activ.

Sistemul nu necesită o sursă externă de energie (nu conține pompă sau electrovalvă) și, datorită structurii sale compacte și multistratificate, poate fi amplasat în orice punct afectat de poluare prin intermediul unor ambarcațiuni automate de mici dimensiuni sau al unor vehicule subacvatice autonome. Materialele filtrante utilizate pot fi reevaluate ulterior ca materii prime pentru producția de beton sau mortar.

5.2.8. Concluzii

Această secțiune prezintă o soluție de remediere pasivă, multistratificată, împotriva poluării marine de origine militară și industrială. Sistemul de filtrare în două etape dezvoltat se evidențiază prin eficiențe variabile în funcție de concentrația de intrare, în special în ceea ce privește îndepărtarea metalelor grele. Îndepărtarea Cu atinge 99,91% în anumite locații. În schimb, îndepărtarea fosfaților depășește 99% în anumite condiții, utilizând geopolimerul compozit cu agregat de zeolit. Rezultatele obținute pentru compușii de azot și hidrocarburi rămân însă mai limitate.

Se recomandă ca cercetările viitoare să se concentreze pe experimente de adsorbție în regim discontinuu (batch adsorption experiments) care să includă microplastice și reziduuri farmaceutice, precum și pe analize ale izotermelor de adsorbție, ale cineticii și ale parametrilor termodinamici în condiții diferite de pH. Soluțiile de remediere trebuie dezvoltate astfel încât să poată fi implementate direct în condiții reale de teren.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

CAPITOLUL 6
EVALUARE GENERALĂ ȘI CONCLUZII

6.1. Sinteza rezultatelor proiectului: o evaluare holistică a datelor privind poluarea, riscurile și remedierea obținute la nivelul bazinului Mării Negre

Proiectul Black Sea SIERRA a reunit instituții de cercetare din Turcia, România, Ucraina, Bulgaria și Italia în cadrul unui cadru metodologic comun. În acest context, studiul care a acoperit întregul bazin al Mării Negre a fost realizat ca un singur studiu de teren, utilizând protocoale ISO comune, proceduri standardizate pentru colectarea probelor, conservarea acestora și analizele de laborator, precum și practici standard de asigurare și control al calității (QA/QC). Datele obținute din compartimentele abiotice, combinate cu datele privind țesuturile organismelor situate la diferite niveluri trofice, indică faptul că bazinul Mării Negre este afectat simultan de încărcări cronice provenite din activități industriale și agricole și de șocuri ecologice acute generate de conflictele armate.

Abordările statistice aplicate la nivelul întregului bazin au evidențiat modele specifice distribuției poluanților în regiune. Analizele comparative au demonstrat că litoralul Turciei prezintă concentrații semnificativ statistic mai ridicate de Cu, Ni, Zn și Fe comparativ cu celelalte țări riverane Mării Negre incluse în proiect. În schimb, România a fost identificată ca având, în termeni relativi, cele mai curate zone costiere. Dintre elementele analizate, Cd s-a diferențiat printr-un model distinct de distribuție față de celelalte elemente. Acest fapt a crescut probabilitatea ca sursa Cd să fie diferită și a permis identificarea sa ca poluant independent, asociat unor puncte fierbinți (hotspots) la nivelul bazinului. În analizele de apă, grupări comune au fost identificate ca urmare a variațiilor puternic corelate dintre Cd și TPH (hidrocarburi totale din petrol). Acest aspect sugerează existența unei presiuni provenite din surse punctuale, specifice activităților portuare și traficului naval.

Impactul războiului asupra Mării Negre este reflectat prin intermediul mai multor parametri. Pe litoralul ucrainean, distrugerea infrastructurii de tratare a apelor uzate în condiții de conflict și modificările bruște și dramatice ale parametrilor apei generate de distrugerea

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

barajului Kahovka se evidențiază ca rezultate importante asociate războiului. Carotele de sedimente din laguna Balık din Delta Kızılırmak evidențiază dimensiunea temporală a procesului de poluare. Cel mai intens profil de contaminare nu a fost localizat la suprafață, ci la o adâncime de 8–20 cm, iar concentrațiile recente ale elementelor au prezentat o tendință generală de scădere. Deși nu au fost obținute dovezi empirice privind acumularea directă a elementelor cauzată de război în această regiune, nu trebuie ignorat faptul că aporturile agricole și industriale pot masca eventualele semnale asociate conflictului. Pe de altă parte, rezultatele din literatura de specialitate au documentat în mod cuantificabil încărcarea ecologică produsă la nivelul bazinului: distrugerea barajului Kahovka a transportat metale grele către nord-vestul Mării Negre, a crescut azotul amoniacal până la 13,8 ori peste limitele legale și a generat o creștere record de +1400% a densității cianobacteriilor.

Transferul presiunii poluante din compartimentele abiotice către rețeaua trofică a fost evidențiat clar prin intermediul indicilor BAF (Biota Accumulation Factor) și BSAF (Biota-Sediment Accumulation Factor). S-a determinat existența unui flux ridicat de macroelemente (Mn, Fe, Al) din coloana de apă către branhii. De asemenea, s-a constatat că elementele trasoare cu toxicitate ridicată provenite din sedimente și apă (Cd și Hg) au depășit limitele severe de bioacumulare la speciile bentonice, precum R. venosa.

Reflectarea poluării asupra sănătății umane a demonstrat matematic cât de înșelătoare pot fi analizele bazate pe un singur poluant. În timp ce, pe baza riscului carcinogenic individual (CR – Carcinogenic Risk), doar Cd a depășit limita superioară într-o singură specie, evaluarea bazinului prin prisma riscului carcinogenic total (TCR – Total Carcinogenic Risk) a evidențiat o situație mult mai gravă. Speciile A. immaculata și M. barbatus au depășit pragul de risc inacceptabil (10^{-4}) ca urmare a expunerii simultane la mai multe metale. Faptul că niciuna dintre speciile de pești analizate nu s-a încadrat în zona fără risc ($<10^{-6}$) în context cumulativ demonstrează că abordarea bazată pe risc total (TCR) reprezintă o necesitate incontestabilă în gestionarea riscurilor la nivelul bazinului. În schimb, indicatorii de risc sistemic non-carcinogenic (THQ/HI) s-au menținut în limite considerate sigure pentru toate speciile și locațiile analizate.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

În fața acestui nivel complex și multistratificat de poluare, identificat prin monitorizare extinsă și analize de risc, abordarea nu s-a limitat la simpla evaluare a situației existente. A fost dezvoltat un prototip inovator de remediere, utilizat ca instrument de intervenție directă și testat în condiții de teren. Filtrul compozit pe bază de geopolimer sintetizat din metacaolină și agregat de zeolit, care funcționează atât ca sită moleculară chimică, cât și ca barieră mecanică, a îndepărtat cu succes metale grele țintă (de exemplu, Cu – 99,91%) și fosfați (100%) din apa de mare. Modulul de carbon activ integrat ulterior în această structură autonomă, care nu necesită o sursă externă de energie, a transformat sistemul într-o soluție sinergică pentru îndepărtarea materiei organice și reducerea turbidității.

Datele holistice obținute vor fi integrate în rețele europene precum EMODnet Chemistry și WISE Marine. Toate aceste rezultate demonstrează necesitatea unor politici internaționale care să depășească limitele naționale pentru restaurarea ecologică a Mării Negre. Aceste politici bazate pe dovezi trebuie susținute prin metodologii comune, iar soluțiile tehnologice pasive de remediere trebuie transformate în instrumente operaționale aplicabile direct în teren.

6.2. Plan pentru programele viitoare de monitorizare: pași strategici care trebuie întreprinși în viitor pentru managementul marin durabil și combaterea poluării

Proiectul Black Sea SIERRA a evidențiat profile de poluare multistratificate în bazinul Mării Negre, pe baza unor date cuantificabile, și a investigat distrugerile ecologice acute generate de conflictele armate. În același timp, proiectul a identificat metode pentru remedierea poluării existente și a dezvoltat un prototip inovator.

Cu toate acestea, managementul marin durabil este posibil nu doar prin evaluarea situației actuale, ci și prin transformarea rezultatelor științifice obținute în planuri de acțiune adaptive și proactive orientate spre viitor. Foaia de parcurs strategică stabilită pentru programele viitoare de monitorizare și remediere se bazează pe patru piloni principali:

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

6.2.1. Stabilirea unor rețele de monitorizare adaptive integrate tehnologic

Restricțiile privind accesul fizic în teren și riscurile generate de mine, în condițiile de război, determină întreruperea programelor clasice de monitorizare bazate pe nave. De asemenea, siguranța personalului reprezintă o problemă majoră. Programele viitoare trebuie să treacă la rețele de monitorizare hibride, în care să fie integrate vehicule de suprafață fără pilot (USV), vehicule aeriene fără pilot (UAV/İHA), vehicule subacvatice autonome (AUV/ROV) și date satelitare de înaltă rezoluție (Sentinel).

Această tranziție reprezintă, în același timp, echivalentul operațional al principiului „Do No Harm” („A nu face rău”), prin protejarea personalului de teren împotriva riscurilor asociate conflictelor active și prezenței minelor. Aceste metode de monitorizare vor crește siguranța personalului la cel mai înalt nivel și vor asigura continuitatea fluxului de date.

Aceste sisteme integrate de monitorizare trebuie să poată fi utilizate și în scenarii de dezastre imediate. Pentru instituționalizarea protocoalelor de „Răspuns Rapid”, care pot fi activate imediat în cazul unor dezastre bruște, precum distrugerea barajului Kahovka, trebuie dezvoltate rețele autonome de senzori amplasate în puncte-cheie la gurile de vărsare ale râurilor.

În plus, domeniul analitic al programelor de monitorizare planificate nu trebuie să rămână limitat la poluanții convenționali. Reziduurile explozive provenite din conflicte (de exemplu TNT, RDX) și metalele grele specifice provenite din muniții (Pb, Cd etc.) trebuie integrate în programe de monitorizare multimatrice care să includă apa, sedimentele, biota și habitatele costiere.

6.2.2. Instituționalizarea legăturii dintre știință și politici publice, integrarea datelor și consolidarea capacităților

Depășirea gestionării fragmentate a datelor la nivelul bazinului reprezintă un pas critic în contextul dreptului internațional de mediu și, de asemenea, o necesitate pentru creșterea preciziei științifice. Armonizarea metodologică (metode ISO, proceduri comune QA/QC, studii de teren comune etc.) asigurată în cadrul proiectului Black Sea SIERRA trebuie

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

transformată într-un standard obligatoriu pentru toate programele naționale viitoare de monitorizare.

Datele produse privind compartimentele abiotice, biotice și evaluarea riscurilor trebuie stocate centralizat în platforma electronică Black Sea e-Platform și baza de date privind calitatea apei (WQDB) din cadrul UkrSCES. Ulterior, acestea trebuie transferate simultan către rețele europene precum Rețeaua Europeană de Observare și Date Marine (EMODnet) și WISE Marine. Această integrare va garanta elaborarea unor politici regionale bazate pe dovezi, aliniate obiectivelor Directivei-cadru privind Strategia Marină (MSFD) și ale Directivei-cadru privind Apa (WFD), precum și recunoașterea oficială a distrugerilor ecologice generate de conflicte în cadrul mecanismelor europene de responsabilitate de mediu.În același timp, realizarea unor investiții în programe de consolidare a capacității instituționale și în colaborări educaționale transfrontaliere este obligatorie pentru ca rezultatele științifice să poată fi transformate în acțiuni concrete de către factorii de decizie și autoritățile locale.

6.2.3. Extinderea la scară largă a tehnologiilor pasive de remediere în teren (Scaling-Up)

Utilizarea filtrelor geopolimerice compozite pe bază de metacaolină-zeolit, a căror eficiență a fost demonstrată la scară pilot, trebuie transferată din etapele de laborator și testare către o implementare industrială la scară largă în condiții reale de teren. Aceste sisteme de tratare pasivă trebuie amplasate ca bariere permanente în zonele potențiale cu risc ridicat de poluare (hotspots), precum punctele de evacuare ale râurilor, ieșirile din porturi și zonele de acumulare a poluanților.

În etapa în care sistemul își finalizează durata de viață operațională, posibilitatea transformării materialelor filtrante în agregate pentru beton sau mortar reprezintă un potențial major pentru economia circulară, iar acest aspect trebuie evaluat ca unul dintre principalii parametri de proiectare în procesele de extindere la scară largă.

Cercetările și dezvoltările viitoare trebuie să se concentreze pe creșterea eficienței de îndepărtare a sistemului pentru compușii de azot și hidrocarburile petroliere, precum și pe adaptarea acestuia pentru poluanții de generație nouă (contaminanți emergenți), precum

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

microplasticele, reziduurile farmaceutice și PFAS. De asemenea, trebuie acordată o atenție deosebită dezvoltării capacității de adsorbție a materialului.

6.2.4. Cooperare transfrontalieră orientată către riscul cumulativ și legislația de mediu

Una dintre cele mai importante concluzii rezultate din constatările proiectului este faptul că, deși concentrațiile individuale ale elementelor pot părea inofensive, pragurile de risc inacceptabil (10^{-4}) sunt depășite atunci când evaluarea este realizată prin prisma riscului carcinogenic total (TCR – Total Carcinogenic Risk).

Din acest motiv, viitoarele standarde de calitate a mediului (EQS – Environmental Quality Standards) și politicile privind consumul de produse marine trebuie reorganizate pe baza parametrilor de presiune toxicologică cumulativă, în locul analizelor individuale ale unui singur poluant. În plus, trebuie dezvoltate metode noi și detaliate de calcul, iar efectele sinergice trebuie incluse în mod obligatoriu în aceste evaluări.

Țările riverane bazinului Mării Negre trebuie să renunțe la abordarea izolată în gestionarea dezastrelor de mediu și să dezvolte o legislație comună pentru managementul crizelor și restaurarea ecologică, sub coordonarea BSIMAP (Black Sea Integrated Monitoring and Assessment Program – Programul integrat de monitorizare și evaluare a Mării Negre).

În consecință, restabilirea rezilienței ecologice a Mării Negre va fi posibilă nu prin abordări statice limitate la granițele naționale, ci prin implementarea fermă a acestei foi de parcurs integrate, în care știința, tehnologiile avansate și voința politică internațională comună se reunesc într-un cadru unitar.

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

BIBLIOGRAFIE

[1] AEPDI. (2024). Tarım Ürünleri Piyasaları - Agricultural Products Market Su Ürünleri / Aquaculture.

[2] Akçay, N. & Kobya, A. İ. (2024). Activity Concentrations of 226Ra, 232Th, 137Cs and 40K in *Cystoseira barbata* Samples Harvested from the Eastern Black Sea Coast of Türkiye. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. doi:10.17714/gumusfenbil.1471768.

[3] Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. Austral Ecology, 26(1), 32–46. https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x

[4] Arnot, J. A., & Gobas, F. A. P. C. (2006). A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms. Environmental Reviews, 14(4), 257-297. doi:10.1139/A06-005.

[5] Bărbulescu, A. & Barbeş, L. (2026). Integrated Assessment of Bathing Water Quality along the Romanian Black Sea Coast. Water, 18(4), 439. doi:10.3390/w18040439.

[6] Bobchev, N., Berov, D., Klayn, S. & Karamfilov, V. (2024). High Microplastic Pollution in Marine Sediments Associated with Urbanised Areas along the SW Bulgarian Black Sea Coast. Marine Pollution Bulletin, 209(Pt A), 117150. doi:10.1016/j.marpolbul. 2024.117150.

[7] Boitsov, S., Heldal, H. E., Doncheva, V. G. & Buhl-Mortensen, L. (2026). Organic and Inorganic Contaminants in Surface and Subsurface Sediments from Bulgarian Black Sea Waters. Marine Pollution Bulletin, 229, 119784. doi:10.1016/j.marpolbul. 2026.119784.

[8] Burduhos Nergis, D. D., Vizureanu, P., Deák, G., Tudor, G. & Sandu, A. V. (2025). Intelligent Filtration Method for Marine Pollution Decontamination. International Journal of Conservation Science, 16(4), 1993-2002. doi:10.36868/IJCS.2025.04.26.

[9] Ciucă, A. M., Stoica, E. & Barbeș, L. (2025). First Report of Microplastic Ingestion and Bioaccumulation in Commercially Valuable European Anchovies (*Engraulis encrasicolus*, Linnaeus, 1758) from the Romanian Black Sea Coast. Journal of Marine Science and Engineering, 13(3). doi:10.3390/jmse13030394.

[10] Dagtekin, M., Kasapoglu, N., Ok, M., Ilhan, S., Buyukdeveci, F., Erik, G., Özsandikci, U., Selim Mısır, D. & Gundogdu, S. (2025). Assessment of Spatiotemporal Distribution of Benthic Marine Litter for the Southern Black Sea Coasts of Turkiye. Marine Pollution Bulletin, 216, 117940. doi:10.1016/j.marpolbul.2025.117940.

[11] Damir, N., Coatu, V., Oros, A. & Danilov, D. (2026). Pollutant Biomagnification in Marine Food Webs of the Romanian Black Sea: A Sustainability Perspective. Sustainability, 18(7), 3251. doi:10.3390/su18073251.

[12] Dvorak, P., Roy, K., Andreji, J., Liskova, Z. D. & Mraz, J. (2020). Vulnerability Assessment of Wild Fish Population to Heavy Metals in Military Training Area:

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Synthesis of a Framework with Example from Czech Republic. Ecological Indicators, 110, 105920.

[13] GICHD. (2021). Guide to Explosive Ordnance Pollution of the Environment. Geneva International Centre for Humanitarian Demining.

[14] Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y., Kushnir, D., Ovcharuk, V., Spyrakos, E., Stanica, A., Slabakova, V. & Tyler, A. (2025). The Biogeochemical Response of the North-Western Black Sea to the Kakhovka Dam Breach. Communications Earth & Environment, 6(1). doi:10.1038/s43247-025-02153-z.

[15] Jolaosho, T. L., Elegbede, I. O., Akintola, S. L., Jimoh, A. A., Ndimele, P. E., Mustapha, A. A., & Adukonu, J. D. (2024). Bioaccumulation dynamics, noncarcinogenic and carcinogenic risks of heavy metals in commercially valuable shellfish and finfish species from the world largest floating slum, Makoko, Nigeria. Marine Pollution Bulletin, 207, 116807. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116807.

[16] King County Environmental Lab. (1997). Recommended Guidelines for Measuring Organic Compounds in Puget Sound Marine Water, Sediment and Tissue Samples. U.S. Environmental Protection.

[17] Komorin, V., Leposhkin, O., Titiapkyn, A., Dykhanov, Y., Miasnikova, O., Vyshnevskyi, V. & Oleinik, Y. (2026). War-Related Pollution in Black Sea Coastal Waters: Hydrochemistry, Priority Pollutant Profiles and Shoreline Oil Backtracking. Marine Pollution Bulletin, 230, 119835. doi:10.1016/j.marpolbul.2026.119835.

[18] Kvach, Y., Stepien, C. A., Minicheva, G. G. & Tkachenko, P. (2025). Biodiversity Effects of the Russia–Ukraine War and the Kakhovka Dam Destruction: Ecological Consequences and Predictions for Marine, Estuarine, and Freshwater Communities in the Northern Black Sea. Ecological Processes, 14(1). doi:10.1186/s13717-025-00577-1.

[19] Long, E. R. & Morgan, L. G. (1991). The Potential for Biological Effects of Sediment-Sorbed Contaminants Tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52. National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, WA.

[20] Nemirovskaya, I. A., Khramtsova, A. V. & Zavialov, P. O. (2024). Hydrocarbons in Waters and Bottom Sediments of the Coastal Areas of the Caucasian Sector of the Black Sea (2021-2023). Marine Pollution Bulletin, 208, 116949. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116949.

[21] Nemirovskaya, I. A., Zavialov, P. O., Medvedeva, A. V., Khalikov, I. S., Konovalov, B. V. & Kalgin, V. U. (2025). Transformation of Fuel Oil in the Black Sea Two and Half Months after the Tanker Accident. Doklady Earth Sciences, 523(2). doi:10.1134/s1028334x25607461.

[22] OEHHA. (2009). Appendix H: Exposure Routes and Studies Used to Derive Cancer Unit Risks and Slope Factors - 2009 Technical Support Document for Cancer Potency Factors.

[23] Onel, E. S., Turkmen, M. & Kalipci, E. (2025). Hazard Analysis and Human Health Risk Assessment in the *Mytilus galloprovincialis* and *Rapana venosa* Species in the Black Sea's Turkiye Coastline by Multivariate Analysis. Biological Trace Element Research, 203(8), 4347-4360. doi:10.1007/s12011-024-04482-0.

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

[24] Oros, A., Marin, D., Reiz, G. & Nenita, R. D. (2025). Tracing Heavy Metal Pollution in the Romanian Black Sea: A Multi-Matrix Study of Contaminant Profiles and Ecological Risk across the Continental Shelf and Beyond. Water, 17(16), 2406. doi:10.3390/w17162406.

[25] Öğretmen, Ö. Y., Karsli, B. & Emanet, M. (2025). Metal(oid) Bioaccumulation, Se-Hg Balance, and Human Health Risk Assessment in Anchovy (*Engraulis encrasicolus*) from the Southern Black Sea. Marine Pollution Bulletin, 217. doi:10.1016/j.marpolbul.2025.118047.

[26] Pramatarov, I. G., Tsvetanova, R. E., Ilinkin, M. V., Andreeva, N. M., Alexandrova, V. A. & Chipev, H. N. (2025). Effects of Microplastics and Metal Pollution on Bivalves from the Bulgarian Black Sea Sublittoral, with Comments on Their Adaptive Capacity. Acta Zoologica Bulgarica, 77(1), 107. doi:10.71424/azb77.1.002837.

[27] Shoman, N., Solomonova, E. & Akimov, A. (2026). Assessing the Ecological Risks of ZnO and CuO Nanoparticles to Black Sea Picophytoplankton. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 304, 110490. doi:10.1016/j.cbpc.2026.110490.

[28] Snigirova, A. O., Mihas, R. V., Khutornoi, S. O., Vinogradov, A. K., Gazyetov, Y. I., Gascooke, J. R., Sinigirov, S. M. & Leterme, S. C. (2024). Microplastic and Ichthyoplankton in the Ukrainian Waters of the Black Sea. Regional Studies in Marine Science, 80, 103884. doi:10.1016/j.rsma.2024.103884.

[29] Terzi, Y., Öztürk, R. Ç., Eryaşar, A. R., Yandi, İ., Şahin, A., Yılmaz, F., Gedik, K. & Gündoğdu, S. (2025). Riverine Microplastic Discharge along the Southern Black Sea Coast of Türkiye. Environmental Research Letters, 20(2), 024061. doi:10.1088/1748-9326/adaf47.

[30] TUIK. (2022). Yaş Grubu ve Cinsiyete Göre Kilo Ortalamaları, 2008-2022 / Average Weights by Sex and Age Group, 2008-2022. TÜİK, Türkiye Sağlık Araştırması, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2019, 2022 / TurkStat, Türkiye Health Survey, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2019, 2022.

[31] Tunca, E., Ugurlu, O., Tudor, G. & Aydin, M. (2026). Decoupling Environmental Contamination from Human Health Risk through Selective Bioaccumulation: The Role of Analytical Spectrum and Physiological Modulation. Marine Pollution Bulletin, 228, 119604. doi:10.1016/j.marpolbul.2026.119604.

[32] USEPA. (2024). Regional Screening Level (RSL) Subchronic Toxicity Supporting Tabelul November 2024.

[33] Zakharikhina, L. V., Gorbunova, T. L., Ryndin, A. V., Lesnikova, P. S. & Rogozhina, E. V. (2024). Chemical Composition and Growth Responses of Brown, Green, and Red Macroalgae to Pollution in the Russian Black Sea. Marine Pollution Bulletin, 207, 116831. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116831.

[34] Zellmer, S. D. & Schneider, J. F. (1993). Heavy-Metal Contamination on Training Ranges at the Grafenwoehr Training Area, Germany. Argonne National Lab. doi:10.2172/10132677.

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

ANEXE

LISTĂ DE FIGURI

Anexa Figura 1. Harta de localizare – Ucraina 83
Anexa Figura 2. Harta de localizare – România 84
Anexa Figura 3. Harta de localizare – România (continuare) 87
Anexa Figura 4. Harta de localizare – Bulgaria 86
Anexa Figura 5. Harta de localizare – Turcia 87

LISTĂ DE TABELE

Anexa Tabelul 1. Date standardizate care trebuie înregistrate pentru fiecare punct de prelevare 88
Anexa Tabelul 2. Model pentru informațiile privind punctul de prelevare 88
Anexa Tabelul 3. Recomandări privind dimensiunea probelor, recipientele de prelevare, tehnicile de conservare și perioadele de stocare (King County Environmental Lab., 1997)..... 89
Anexa Tabelul 4. Material de referință certificat (CRM), procentele de recuperare și limitele de detecție (LOD) pentru toate matricile analizate (Tunca et al., 2026)..... 89
Anexa Tabelul 5. Prezentare generală a ecuațiilor, criteriilor de clasificare și definițiilor parametrilor utilizați pentru BAF, BSAF, MPI și indicii de evaluare a riscului pentru sănătatea umană..... 90
Anexa Tabelul 6. Comparații multiple perechi ale concentrațiilor de metale grele (Cu, Ni, Pb, Zn, Fe) între țări 92
Anexa Tabelul 7. Prioritatea categoriilor de contaminanți și metodele analitice utilizate 93
Anexa Tabelul 8. Matrice și frecvența de eșantionare 93

Co-funded by the European Union

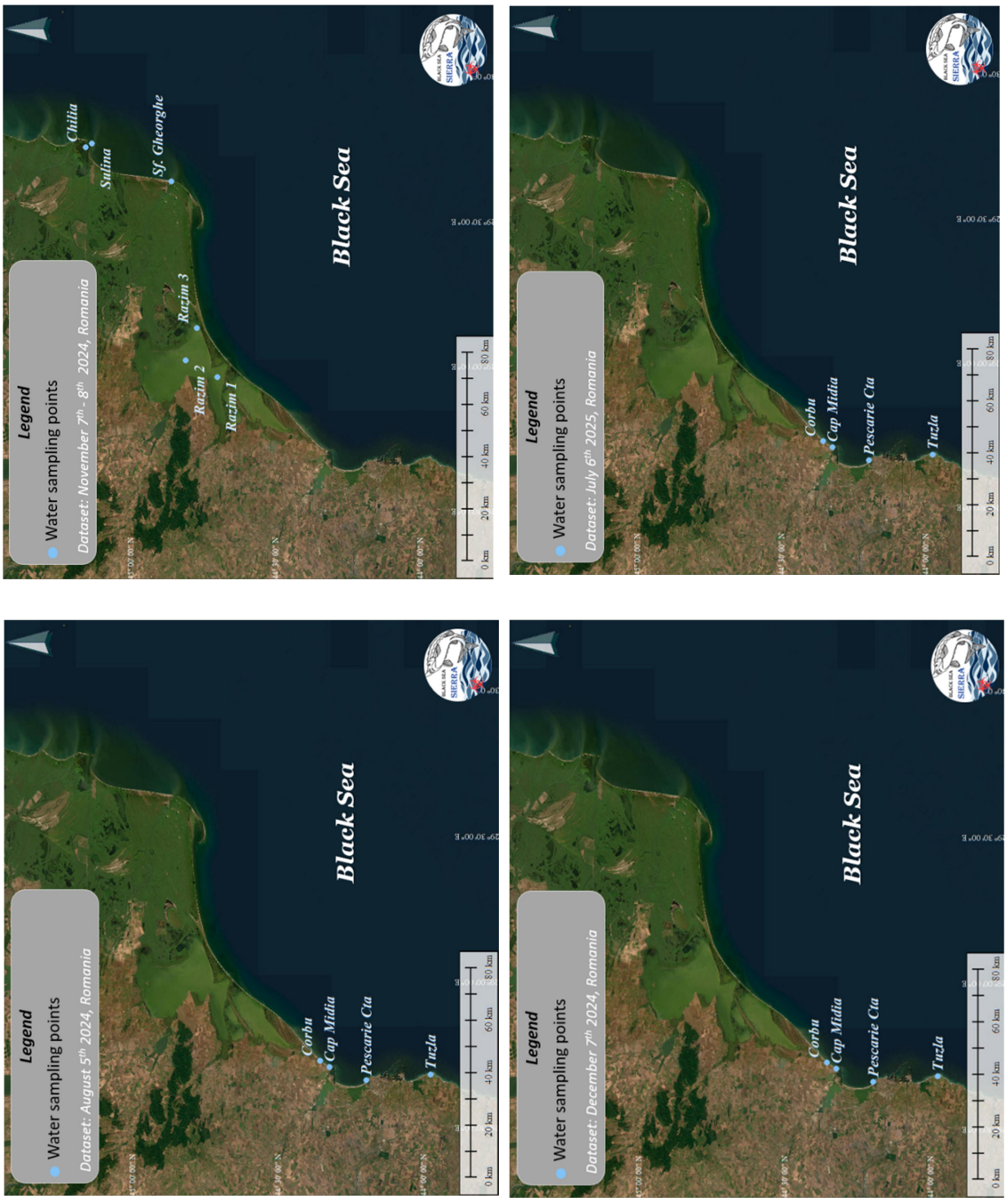
Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea



Anexa Figura 1. *Harta de localizare – Ucraina*

Co-funded by the European Union

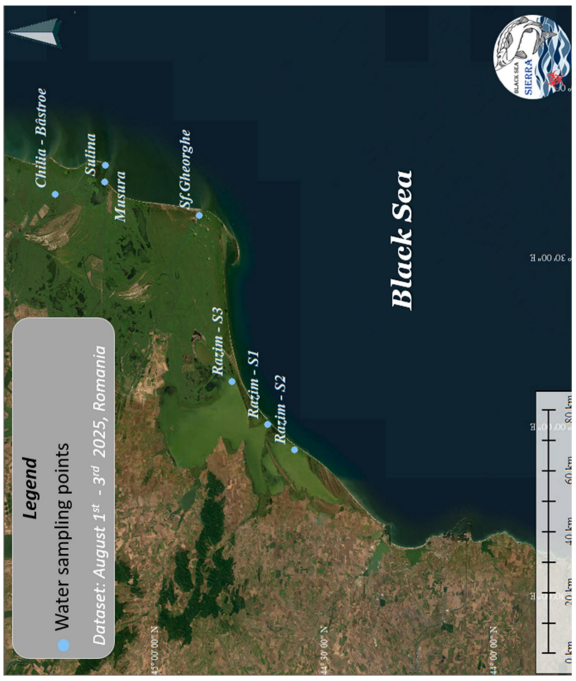
Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

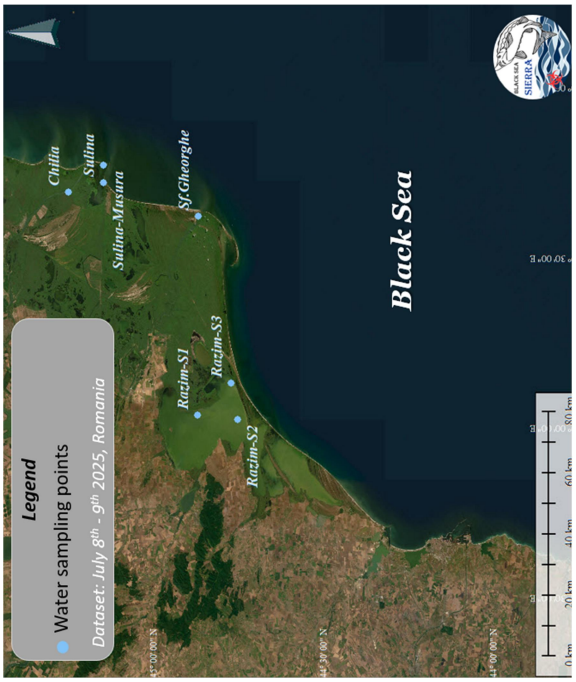


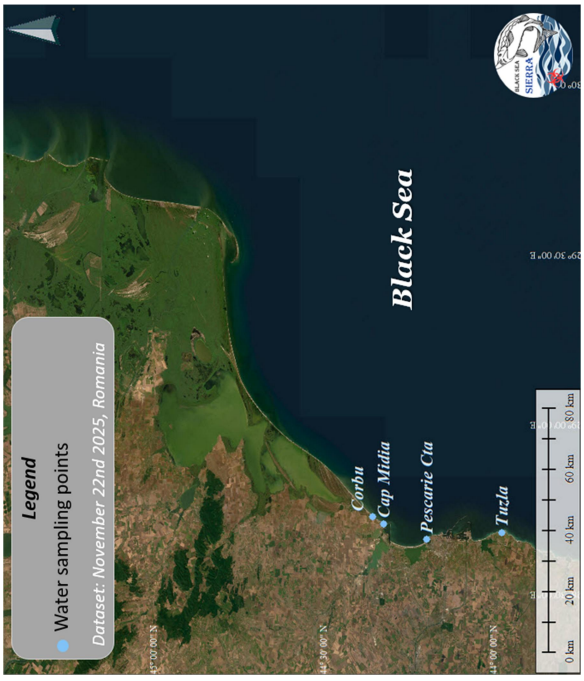
Anexa Figura 2. *Harta de localizare – România*

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea



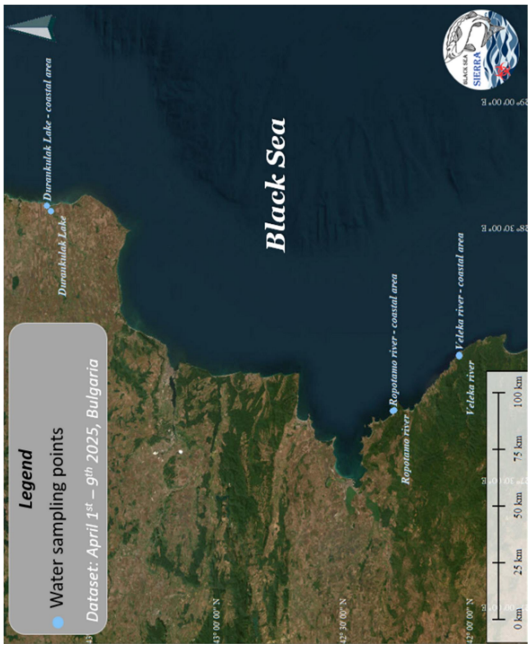


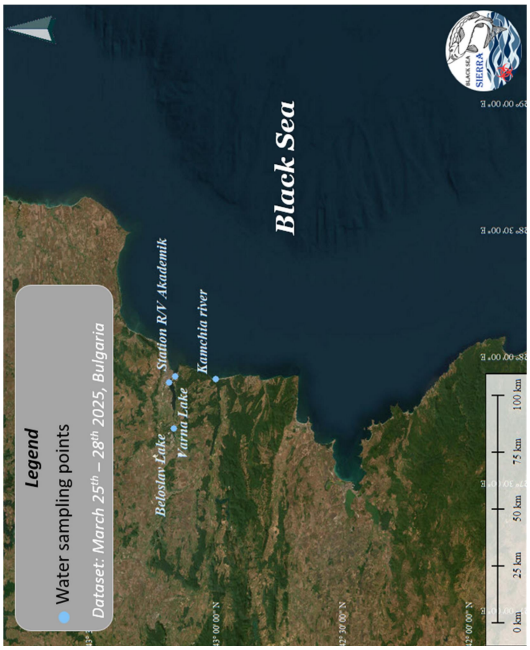


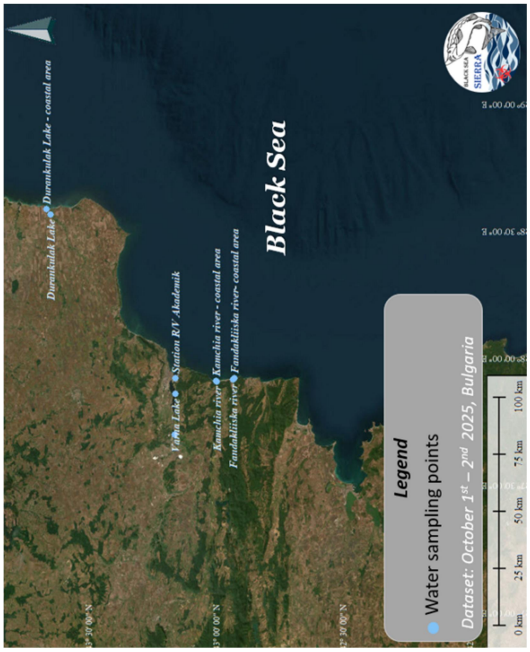
Anexa Figura 3. *Harta de localizare – România (continuare)*

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea



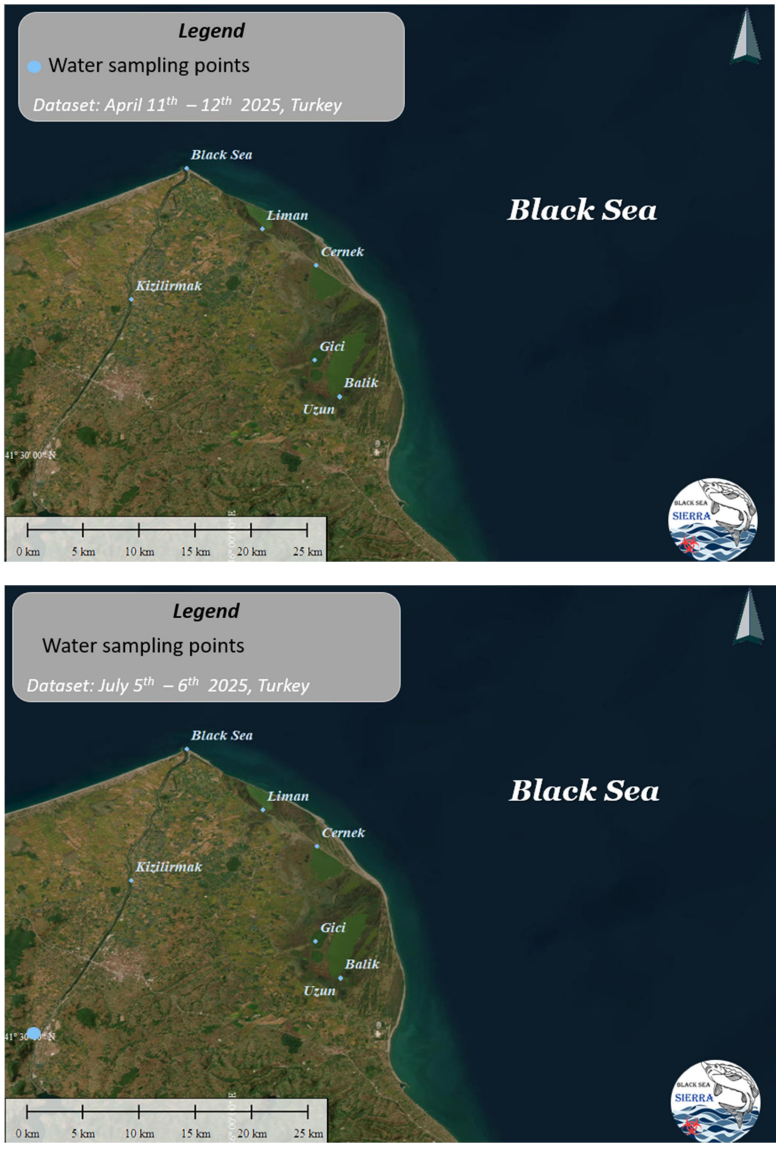




Anexa Figura 4. *Harta de localizare – Bulgaria*

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea



Anexa Figura 5. *Harta de localizare – Turcia*

Co-funded by the European Union

Finanţat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziţia Uniunii Europene sau a Agenţiei Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanţatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Anexa Tabelul 1. *Date standardizate care trebuie înregistrate pentru fiecare punct de prelevare*

Proiectul Black Sea SIERRA							
Data colectării probei: DD/MM/YYYY				Ora colectării probei: HH:MM:SS			
Locația punctului de prelevare							
Latitudine (N) DD.MM.SS or DD.DDDD				Longitudine (E) DD.MM.SS or DD.DDDD			
Adâncimea de prelevare (m)							
Tipul probei: W – probă de apă; S – probă de sediment; B – probă pentru evaluarea bioacumulării							
ID Probă XYDDMMYYYYAA Structura codului probei:X – tipul probei: 1 – probă de apă; 2 – probă de sediment; 3 – probă pentru bioacumulare. Y – tipul corpului de apă: 1 – afluenți; 2 – lagună; 3 – zonă de coastă; ZZLLAAAA – data prelevării probei. AA – numărul probei colectate în ziua respectivă (de la 00 la 99).							

Anexa Tabelul 2. Model pentru informațiile privind punctul de prelevare

Proiectul Black Sea SIERRA							
Data colectării probei:	25	09	2024	Ora colectării probei:	13	00	00
Locația punctului de prelevare:							
Latitudine (N)	44º 52’ 48’’			Longitudine (E)	29º 37’ 01’’		
Adâncimea de prelevare {m}					0.5		
Tipul probei					W		
ID-ul Probei					112509202404		

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile şi punctele de vedere exprimate aparţin exclusiv autorului/autorilor şi nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură şi Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană şi nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Anexa Tabelul 3. *Recomandări privind dimensiunea probelor, recipientele de prelevare, tehnicile de conservare şi perioadele de stocare (King County Environmental Lab., 1997).*

Parametrii	Dimensiunea minimă a probei (g)	Recipient	Tehnica de conservare	Timp de stocare
Solide totale	50	Sticlă sau polietilenă (LDPE)	Congelare (-18°C); Refrigerare (4°C)	6 luni; 14 zile
Solide volatile totale	50	Sticlă sau polietilenă (LDPE)	Congelare (-18°C); Refrigerare (4°C)	6 luni; 14 zile
Carbon organic total	25	Sticlă sau polietilenă (LDPE)	Congelare (-18°C); Refrigerare (4°C)	6 luni; 14 zile
Uleiuri și grăsimi	100	Sticlă	Congelare (-18°C); Refrigerare (4°C)	6 luni; 28 zile
Sulfuri totale	50 (250 mL pentru 5 mL acetat de zinc)	Sticlă	Refrigerare (4°C) (+5 mL sol. Zn-Acetate 2N)	7 zile
Azot total	25	Sticlă sau polietilenă (LDPE)	Refrigerare (4°C)	28 zile
Cerința biochimică de oxigen	50	Sticlă sau polietilenă (LDPE)	Refrigerare (4°C)	7 zile
Cerința chimică de oxigen	50	Sticlă sau polietilenă (LDPE)	Refrigerare (4°C)	7 zile
Compuși organici volatili	50	Sticlă sau polietilenă (fără headspace)	Refrigerare (4°C)	14 zile
Compuși organici semivolatili	100	Sticlă	Congelare (-18°C); Refrigerare (4°C)	1 an; 14 zile

Notă: Acest tabel prezintă protocoale generale de referință (King County Environmental Lab., 1997), adoptate pentru activitățile de teren. Au fost analizate și raportate doar acele parametri specifici relevanți pentru obiectivele proiectului (de exemplu, metale, nutrienți și carbon organic total – TOC).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Anexa Tabelul 4. *Material de referință certificat (CRM), procentele de recuperare și limitele de detecție (LOD) pentru toate matricile analizate (Tunca et al., 2026)*

Analit	V	Sb	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Hg	Pb
Unitate	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB	PPB
Sezonul umed															
Alg															
IAEA 336 (Măsurat)	1457	73.88	695209	1065	63350	440731	277	1066	3609	30218	605	152	116	205	4905
IAEA 336 (Estimat)	1470	73	680000	1060	63000	430000	290	1070	3600	30400	630	153	117	200	4900
Randamentul de recuperare (%)	99.13	101.22	102.24	100.51	100.56	102.50	95.72	99.66	100.26	99.40	96.06	99.88	99.89	102.59	100.11
LOD	0.00782	0.00726	0.5701	0.09758	0.04707	0.5894	0.0164	0.1049	0.1055	0.3038	0.01842	0.04697	0.00171	0.00987	0.01541
Țesuturi															
TORT-2 (Măsurat)	1687	77	23669	741	13572	109916	518	2506	106670	175712	21565	918	26957	267	350
TORT-2 (Estimat)	1640	X	23500	770	13600	105000	510	2500	106000	180000	21600	950	26700	270	350
Randamentul de recuperare (%)	102.87	X	100.72	96.23	99.79	104.68	101.58	100.26	100.63	97.62	99.84	96.62	100.96	98.98	100.05
LOD	0.007517	0.01171	0.5244	0.08412	0.05308	0.5894	0.01478	0.1066	0.09806	0.3232	0.02026	0.02285	0.00223	0.00808	0.01192
Sediment															
UME EnvCRM 03 (Măsurat)	69109	1385	58645502	56594	515025	19121783	41644	48843	67520	127624	70165	506	1303	322	63587
UME EnvCRM 03 (Estimat)	69500	1380	58864000	56400	520000	19189000	41700	48900	67300	128500	70300	X	1290	310	63100
Randamentul de recuperare (%)	99.44	100.39	99.63	100.34	99.04	99.65	99.86	99.88	100.33	99.32	99.81	X	101.03	103.92	100.77
LOD	0.01503	0.01405	1.824	0.1464	0.07011	0.8841	0.02704	0.1693	0.1998	0.5817	0.03574	0.02285	0.00223	0.00897	0.01657
Apă															
UME CRM 1201 (Măsurat)	0	5.32	100.4	34.9	14.2	45.6	9.6	16.9	80.7	100.5	6.5	<0.000	3.9	0.1	14.4
UME CRM 1201 (Estimat)	X	5.37	102	34.6	14.5	45.6	9.6	16.8	83.1	104	6.5	X	3.65	X	14.7
Randamentul de recuperare (%)	X	99.20	98.40	100.77	98.13	99.95	99.64	100.49	97.16	96.59	99.66	X	99.17	X	97.97
LOD	0.007517	0.01405	0.5701	0.08916	0.05008	0.5423	0.01463	0.09309	0.09251	0.3232	0.01916	0.02285	0.00237	0.00897	0.01454
Sezonul uscat															
Sediment															
UME EnvCRM 03 (Măsurat)	68998	1361	57330318	56338	512750	19128318	41233	48585	66653	127439	70040	717	1280	304	62279
UME EnvCRM 03 (Estimat)	69500	1380	58864000	56400	520000	19189000	41700	48900	67300	128500	70300	X	1290	310	63100
Randamentul de recuperare (%)	99.28	98.65	97.39	99.89	98.61	99.68	98.88	99.36	99.04	99.18	99.63	X	99.25	98.17	98.70
LOD	0.02389	0.01305	2.76	0.1039	0.07229	0.6151	0.0389	0.01204	0.4054	X	0.0486	0.1371	0.0024	0.00797	0.0526
Apă															
UME CRM 1201 (Măsurat)	<0.000	5.34	102.85	34.44	14.37	45.78	9.63	16.66	83.22	102.60	6.53	0.81	4.03	0.18	14.56
UME CRM 1201 (Estimat)	X	5.37	102	34.6	14.5	45.6	9.6	16.8	83.1	104	6.5	X	3.65	X	14.7
Randamentul de recuperare (%)	X	99.46	100.83	99.56	99.12	100.39	100.29	99.14	100.14	98.66	100.56	X	102.04	X	99.11
LOD	0.01551	0.01283	1.455	0.0856	0.06747	0.5515	0.02893	0.00880	0.2654	X	0.03564	0.1371	0.0032	0.0089	0.0462

Anexa Tabelul 5. *Prezentare generală a ecuațiilor, criteriilor de clasificare și definițiilor parametrilor utilizați pentru BAF, BSAF, MPI și indicii de evaluare a riscului pentru sănătatea umană*

Indici	Formula	Clasificare și interpretare	Definiții
***BAF**: Factor de bioacumulare*	$BAF = \frac{C_i}{C_w}$	BAF < 1000: fără potențial de bioacumulare; 1000 < BAF < 5000: potențial de bioacumulare; BAF > 5000: potențial ridicat de bioacumulare	C_i: *concentrația metalului în org* */țesut biologic;* Cw: *concentrația metalului în ap*
***BSAF**: Factor de acumulare biota-sedime nt*	$BSAF = \frac{C_i}{C_s}$	BSAF < 1: organisme neconcentratoare; 1 < BSAF < 2: organisme cu capacitate redusă de concentrare; BSAF > 2: organisme cu capacitate ridicată de concentrare	C_i: *concentrația metalului în bio* Cs: *concentrația metalului în se*
***MPI**$_{tissue}$: Indicele de poluare cu metale (bazat pe țesut)*	$MPI = (C_1 x C_2 x \dots x C_n)^{1/n}$	Indice comparativ; valorile mai ridicate indică o încărcare mai mare cu metale în țesuturile analizate.	$C_1 \dots C_n$: concentrațiile metalelor în țesutul specific; n: numărul total de elemente analizate.
***EDI**: Aport zilnic estimat*	$EDI = \frac{C \text{ x } FCR \text{ x } EF \text{ x } ED}{BW \text{ x } AT} = \frac{C \text{ x } FCR}{BW}$	Evaluat prin raportare la valorile de referință pentru RfD sau TDI.	(exprimat sub tabel)
***THQ**: Coeficient de risc*	$THQ = \frac{C \text{ x } FCR \text{ x } EF \text{ x } ED}{RfD \text{ x } BW \text{ x } EF \text{ x } ED} = \frac{EDI}{RFD}$	THQ < 1: lipsa unui risc semnificativ non-carcinogenic; THQ ≥ 1: posibil risc non-carcinogenic.	EDI: Aport zilnic estimat
***HI**: Indice de risc acumulat*	$HI = \sum_{i=1}^{n} THQ_i$	HI < 1: expunere acceptabilă; HI ≥ 1: posibilitatea apariției efectelor adverse.	THQ_i: *coeficientul de risc țintă p* Σ: *suma valorilor THQ*
CR: Risc carcinogenic	$CR = \frac{C \text{ x } FCR \text{ x } EF \text{ x } ED \text{ x }}{BW \text{ x } AT} = EDI \text{ x } C_{SF}$	CR < 10^{-6}: risc neglijabil; 10^{-6} < CR < 10^{-4}: risc acceptabil/tolerabil; CR > 10^{-4}: risc carcinogenic inacceptabil.	**EDI:** aport zilnic estimat; **C_SF:** factor de pantă carcinogenică $(mg/kg/zi)^{-1}$
***TCR**: Risc carcinogenic total*	$TCR = \sum_{i=1}^{n} CR_i$	TCR < 10^{-6}: risc neglijabil; 10^{-6} < TCR < 10^{-4}: risc tolerabil; TCR > 10^{-4}: risc inacceptabil.	CR_i: *riscul carcinogenic individ* n: *numărul metalelor cu potenți*

Concentrația elementelor analizate în țesutul muscular al peștilor.

FCR (Fish Consumption Rate): Rata de consum de pește – 7,1 kg/an (AEPDI, iulie 2024).
EF (Exposure Frequency): Frecvența expunerii – 365 zile/an.
ED (Exposure Duration): Durata expunerii – 75,3 ani (OMS – date pentru țara 792).
BW (Body Weight): Greutatea corporală medie – 73,7 kg (TÜİK, 2022).

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

AT (Average Time / Total Exposure Time): Timpul total de expunere – calculat ca produs între frecvența expunerii (EF) și durata expunerii (ED).
RfD (Reference Dose): Doza de referință utilizată pentru evaluarea riscului non-cancerigen (Öğretmen, Karsli & Emanet, 2025; USEPA, 2024).
C_SF (Carcinogenic Slope Factor): Factorul de pantă carcinogenică utilizat pentru estimarea riscului cancerigen (OEHHA, 1 iunie 2009).

Anexa Tabelul 6. *Comparații multiple perechi ale concentrațiilor de metale grele (Cu, Ni, Pb, Zn, Fe) între țări*

Cu				**Fe**			
I	**J**	**Diferența medie**	**Sig.**	**I**	**J**	**Diferența medie**	**Sig.**
Ro1	**Ro2**	3.80783	0.198	Ro1	Ro2	3618.73795	0.194
Ro1	**Tr**	-36.46262*	0.000	Ro1	Tr	-24100.48643*	0.000
Ro1	**Ua**	-9.40759*	0.003	Ro1	Ua	-4142.61032	0.433
Ro2	**Tr**	-40.27045*	0.000	Ro2	Tr	-27719.22437*	0.000
Ro2	**Ua**	-13.21542*	0.000	Ro2	Ua	-7761.34826*	0.001
Tr	**Ua**	27.05503*	0.000	Tr	Ua	19957.87611*	0.000
Ni				**Zn**			
Ro1	**Ro2**	9.98249*	0.003	Ro1	Ro2	17.56733*	0.003
Ro1	**Tr**	-92.83667*	0.000	Ro1	Tr	-65.71143*	0.000
Ro1	**Ua**	-3.96283	0.984	Ro1	Ua	-9.89535	0.637
Ro2	**Tr**	-102.81915*	0.000	Ro2	Tr	-83.27876*	0.000
Ro2	**Ua**	-13.94531	0.069	Ro2	Ua	-27.46268*	0.000
Tr	**Ua**	88.87384*	0.000	Tr	Ua	55.81608*	0.000
Pb							
Ro1	**Ro2**	2.46207*	0.044				
Ro1	**Tr**	-64.43336	0.578				
Ro1	**Ua**	-3.96590*	0.042				
Ro2	**Tr**	-66.89543	0.538				
Ro2	**Ua**	-6.42797*	0.000				
Tr	**Ua**	60.46746	0.642				

Semnificație statistică: $p < 0,05$

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea

Anexa Tabelul 7. *Prioritatea categoriilor de contaminanți și metodele analitice utilizate*

Contaminant	Componentele principale	Metodă analitică
Hidrocarburi petroliere și lubrifianți	TPH (Hidrocarburi Petroliere Totale), PAH (Hidrocarburi Aromatice Policiclice), lubrifianți proveniți din distrugerea navelor și a infrastructurii portuare	Set standard de analiză MSFD/WFD
Metale grele și elemente în urme	Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Hg, As	ICP-MS / ICP-OES (EPA)
Explozivi și compuși energetici	TNT, RDX, HMX, nitroaromatici, nitramine și reziduuri provenite din muniții militare	HPLC/LC-MS (EPA)
POPs și contaminanți agricoli	PCB-uri (Bifenili policloruraţi), pesticide organoclorurate, substanțe chimice industriale și contaminanți agricoli transportați de inundații	Set standard MSFD/Convenția de la Stockholm
Deșeuri, materiale plastice și produse de combustie	Macro-deșeuri, micro-/mezoplastice, produse de combustie eliberate direct în mare în urma bombardamentelor și atacurilor cu rachete	Numărare fizică / tehnici de imagistică

Anexa Tabelul 8. *Matrice și frecvența de eșantionare*

Matrice	Motivație	Frecvența procesului	După eveniment
Coloana de apă	Distribuția contaminanților acuti, pana de dispersie fluvială, deversările de petrol, impulsurile chimice și nutritive de scurtă durată	Sezonier-lunar	Campanie intensificată (răspuns rapid)
Sediment	Arhivă pe termen lung (rezervor de acumulare); metale grele, poluanți organici persistenți (POP), reziduuri explozive și macro-deșeuri de dimensiuni mari provenite din colapsuri structurale	3–6 ani (WFD/MSFD/OSPAR CEMP)	Prelevare de carote (probe din sedimente) + eșantionare intensificată
Biotă	Monitorizarea bioacumulării și biomagnificării; bivalve specifice regiunii (midii) + pești demersali (specii de fund)	Anual-bianual	Campanie suplimentară în zone critice
Habitate de coastă și plaje	Prima linie receptoare; acumulări de bile de gudron (tarballs), plastic/macro-deșeuri, pânze de dispersie provenite din transportul fluvial	Determinată de eveniment - periodică	În funcție de prioritățile de curățare și clasificarea riscurilor

Co-funded by the European Union

Finanțat de Uniunea Europeană. Opiniile și punctele de vedere exprimate aparțin exclusiv autorului/autorilor și nu reflectă în mod necesar poziția Uniunii Europene sau a Agenției Executive Europene pentru Climă, Infrastructură și Mediu (CINEA). Nici Uniunea Europeană și nici autoritatea finanțatoare nu pot fi considerate responsabile pentru acestea