

KEMIJSKA KARAKTERIZACIJA I PROSTORNA RASPODJELA MIKROPLASTIKE U POVRŠINSKIM VODAMA SREDIŠNJEG HIMALAJSKOG RIJEČNOG BAZENA U NEPALU

SAMIKSHA POKHREL¹, BOJAN ĐURIN², VLADO CETL³, TANJA TRABE BARANAŠIĆ³, HEM RAJ PANT⁴, PREM SAUD⁴, RAMESH PRASAD SAPKOTA¹, UDDHAB RAJ KHADKA¹, RAMESH RAJ PANT¹

¹ Central Department of Environmental Science, Institute of Science and Technology, Tribhuvan University, Nepal

² Sveučilište Sjever, Odjel za graditeljstvo, Varaždin, Hrvatska

³ Sveučilište Sjever, Odjel za geodeziju i geomatiku, Varaždin, Hrvatska

⁴ Faculty of Science and Technology, Far Western University, Nepal

Sažetak

Onečišćenje vodnih sustava mikroplastikom postaje sve izraženiji ekološki problem diljem svijeta. Ova studija istražuje prostornu raspodjelu, karakteristike i polimerni sastav mikroplastike u površinskim vodama (n=30 uzoraka) sliva rijeke West Rapti (WRRB), Nepal, tijekom predmonsunskog razdoblja. Mikroplastika je otkrivena na svim mjestima uzorkovanja, s prosječnom zastupljenošću od 81,6±45,11 čestica/100 L. Tip čestica koje su dominirale su fragmenti (48,7%), zatim vlakna (27,9%), pjene (12,8%), folije (8,5%) i peleti (2%). Čestice crne boje (27,9%) bile su najzastupljenije u riječnom slivu. Analiza raspodjele veličine mikroplastike pokazala je prevladavanje manjih čestica (≤0,5 mm) koje su činile 75,3% ukupnog broja, što upućuje na fragmentaciju većih plastičnih ostataka. FTIR analizom utvrđeno je da su polietilen i polipropilen glavne vrste polimera. Ovi rezultati naglašavaju utjecaj lokaliziranih ljudskih aktivnosti na prostorne obrasce raspodjele i pružaju osnovne podatke za razumijevanje onečišćenja plastikom u slatkovodnim riječnim sustavima Nepala.

Ključne riječi

West Rapti sliv, mikroplastika, onečišćenje vode, FTIR, površinske vode

1. Uvod

Pod pojmom mikroplastika podrazumijevaju se plastične čestice manje od 5 mm, koje predstavljaju sve veći ekološki problem (Range i sur., 2023). Te čestice mogu ući u okoliš kao vrlo sitne čestice koje se izravno oslobađaju, poput sintetičkih vlakana iz tekstila, mikrogranula iz proizvoda za osobnu njegu te granulata iz proizvodnje plastike, ili kao fragmenti i vlakna nastali razgradnjom većih plastičnih predmeta djelovanjem atmosferskih utjecaja i degradacije (Abbasi i sur., 2019). Zbog svoje male mase i hidrofobne prirode, mikroplastika lako ulazi u vodene ekosustave putem otpadnih voda, površinskog otjecanja, taloženja iz zraka i odlaganja plastičnog otpada, što ju čini trajnim problemom i u slatkovodnim i u morskim ekosustavima (Abbasi i sur., 2019; Bhardwaj i sur., 2024).

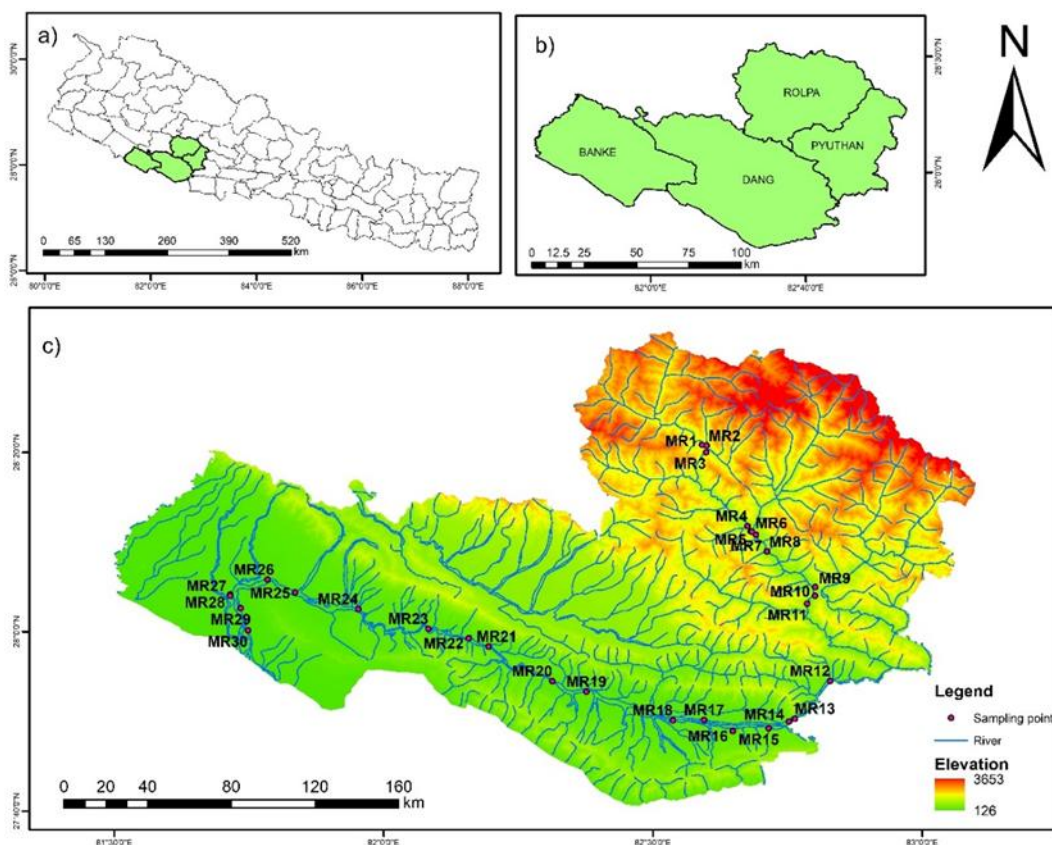
Mikroplastika je otkrivena čak i u udaljenim i netaknutim ekosustavima, uključujući dubokomorska područja, polarne regije poput Arktika i Antarktike, te u vodi i sedimentu visokoplaninskih jezera (Parolini i sur., 2024). Mikroplastika predstavlja značajan rizik za okoliš i javno zdravlje jer se može fragmentirati, akumulirati u organizmima i širiti hranidbenim lancima u vodenim i kopnenim ekosustavima (Han i sur., 2023). Osim toga, mikroplastika može prenositi i druge onečišćujuće tvari, poput kemijskih spojeva, teških metala i ostataka farmaceutika, djelujući kao vektor kemijskog onečišćenja u vodenom okolišu (Zandaryaa, 2021).

Posljednjih godina raste znanstveni interes za onečišćenje mikroplastikom s ciljem razumijevanja njenog utjecaja na okolišne sustave, ekološke procese i zdravlje ljudi i drugih organizama (Ahmad i sur., 2020). Široka uporaba plastike i plastičnih proizvoda te rastuća ovisnost o njima tijekom posljednjih 70 godina rezultirali su onečišćenjem mikroplastikom (Ritchie i sur., 2023). Ova studija procijenila je zastupljenost, prostornu raspodjelu i kemijska svojstva onečišćenja mikroplastikom duž WRRB-a, pružajući ključne uvide za upravljanje vodnim resursima.

2. Materijali i metode

2.1. Područje ispitivanja

WRRB se nalazi u zapadnom Nepalalu i prostire se na površini od oko 6300 km² (Slika 1). Rijeka izvire u području srednjih planina na otprilike 3600 m nadmorske visine i teče prema jugu kroz nizine blizu 100 m n.v., da bi se naposljetku ulila u Ganges u Indiji (Gharti i sur., 2025; Talchabhadel i sur., 2021). Rijeka je duga oko 257 km, a njezin sliv ima prosječan nagib od 16,8%. WRRB obuhvaća pet okruga: Rolpa, Pyuthan, Arghakhanchi, Dang i Banke, a njezini glavni pritoci su rijeke i potoci Madi, Lungri, Arun, Sit, Dunduwa, Sotiya i Gandheli. Sliv obuhvaća i ruralna i urbana područja, s približno 3.256.795 stanovnika (NSO, 2021). Gornji dio sliva obilježavaju strmi nagibi, uske doline i korita uvjetovana matičnom stijenom, dok u donjim dijelovima prevladavaju šire poplavne ravnice, razgranati kanali i aluvijalni nanosi. Područje prima prosječnu godišnju količinu oborina od približno 1500 mm, što je uvelike pod utjecajem ljetnog monsuna.



Slika 1. (a) Karta Nepala, (b) Područje istraživanja (c) WRRB s mjestima uzorkovanja

2.2. Uzorkovanje vode

Trideset uzoraka vode prikupljeno je diljem WRRB-a tijekom predmonsunske sezone. Uzimanje uzoraka

obavljeno je duž toka rijeke, od uzvodno (okrug Rolpa) do nizvodno (okrug Banke), pokrivajući raznolika područja korištenja zemljišta, uključujući poljoprivredna područja, naselja, mjesta kremiranja, zone vađenja pijeska i poplavne ravnice. Na svakom mjestu, voda je prikupljena pet puta pomoću čelične kante od 5 litara te je uzastopno propuštena kroz sito od 5 mm i 32 μ m. Ostatak sa sita od 32 μ m prenesen je u staklenu posudu uz pomoć filtrirane destilirane vode.

Laboratorijske analize provedene su prema NOAA protokolu koji su razvili Masura i sur. (2015). Uzorci su sušeni u pećnici na 70°C do potpunog isparavanja, a zatim podvrgnuti mokroj peroksidnoj oksidaciji (WPO) pomoću 30% vodikovog peroksida (H_2O_2) i 0,5 N otopine željeznog sulfata ($FeSO_4$) radi uklanjanja organskog materijala. Separacija po gustoći provedena je radi izdvajanja mikroplastike iz anorganskih čestica. Razgrađeni uzorak pomiješan je s otopinom cinkovog klorida ($ZnCl_2$) (specifična gustoća = 1,6 g/ml) omogućujući plastičnim česticama da plutaju dok se teže čestice talože na dno. Supernatant je vakuumski filtriran pomoću GF3 filter papira od staklenih vlakana i sušen na sobnoj temperaturi 24 sata.

2.3. Tehnika karakterizacije

Mikroplastika je analizirana pomoću stereomikroskopa pri povećanju od 40x, a test vrućom iglom korišten je za potvrdu prisutnosti plastike. Veličina čestica određena je softverom ImageJ. Odabrane mikroplastične čestice analizirane su Fourierovom transformacijskom infracrvenom spektroskopijom (FTIR) radi identifikacije tipova polimera. Dobiveni spektri uspoređeni su sa standardnim referentnim spektrima dostupnim u polimernim bibliotekama. S obzirom na to da su FTIR-om analizirane odabrane čestice veće od 1 mm, dok je najveći udio ukupno pronađene mikroplastike (75,3%) pripadao frakciji $\leq 0,5$ mm, identificirani polimerni sastav reprezentativan je samo za veću frakciju čestica te ne mora nužno odražavati polimerni profil cjelokupnog uzorka.

2.4. Kontrola kontaminacije

Svo stakleno posuđe i oprema temeljito su očišćeni i isprani filtriranom, destiliranom vodom. Tijekom rukovanja izbjegavani su plastični materijali, a uzorci su držani pokriveni kako bi se smanjila kontaminacija iz zraka. Korištene su pamučne pregače i nitrilne rukavice tijekom cijelog postupka. Pet praznih (blank) uzoraka pokazalo je u prosjeku $1,6 \pm 0,89$ mikroplastičnih čestica, što je oduzeto od broja čestica u uzorcima. Konkretno, prosječna vrijednost blank uzoraka oduzet je od broja čestica svakog pojedinog uzorka kako bi se dobio korigirani broj mikroplastičnih čestica.

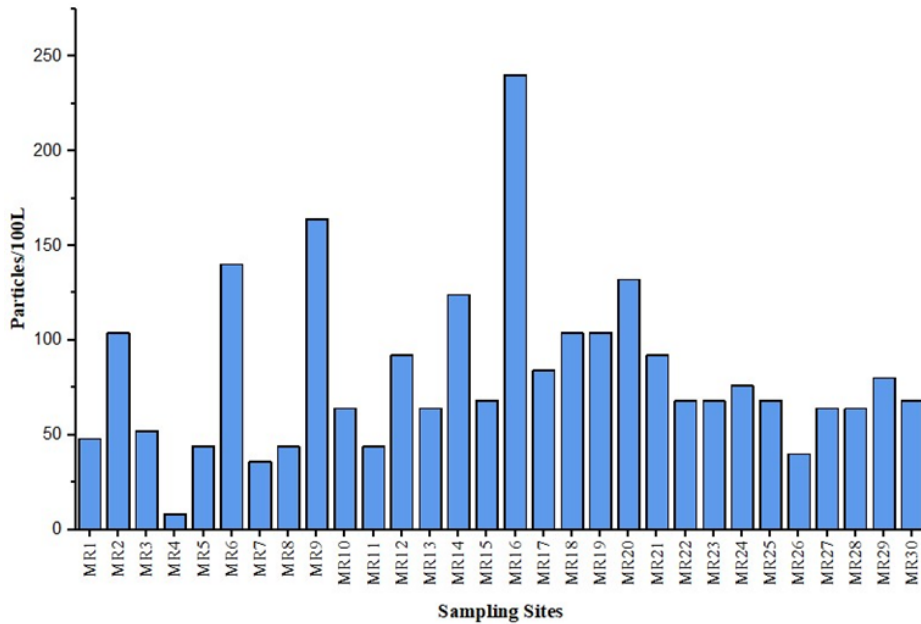
2.5. Analiza podataka

Opisna statistika, uključujući srednja vrijednost, maksimum, minimum i standardna devijacija, korištena je za prikaz raspodjele i prostorne varijacije mikroplastike kroz područje istraživanja. Analiza podataka provedena je softverom OriginPro 2024b i programom Microsoft Excel 2019.

3. Rezultati

3.1. Zastupljenost mikroplastike u WRRB-u

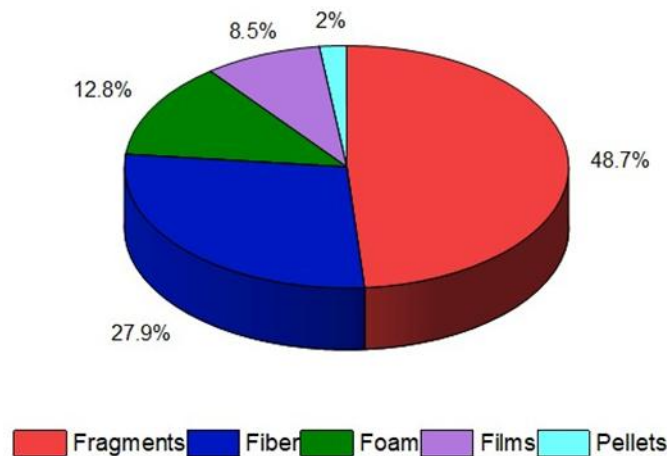
Mikroplastika je otkrivena u površinskoj vodi na svih 30 analiziranih lokacija u WRRB-u, što ukazuje na onečišćenje. Zastupljenost se kretala od vrlo niskih vrijednosti od otprilike 8 čestica/100 L do maksimalnih vrijednosti većih od 240 čestica/100 L, uz prosjek od $81,6 \pm 45,11$ čestica/100 L (Slika 2). Najveća zastupljenost zabilježena je na lokaciji MR16 (u blizini mjesta kremiranja), MR9 i MR6 (u blizini ljudskih naselja). Koncentracije mikroplastike značajno su varirale u gornjem i srednjem dijelu sliva, dok je donji dio pokazao ujednačenije vrijednosti.



Slika 2. Zastupljenost čestica (čestice/100 L) po mjestu uzorkovanja

3.2. Oblik mikroplastike

Mikroplastika je klasificirana u pet morfoloških tipova. Fragmenti su bili najzastupljeniji tip (48,7%), zatim vlakna (27,9%), pjene (12,8%), folije (8,5%) i peleti (2%) (Slika 3). Crna boja je bila najzastupljenija boja, čineći 27,9% ukupnih čestica, a slijede bijela (13,4%), crvena (11,1%), smeđa (10,7%) i plava (10,5%). Umjereni udjeli zabilježeni su za žutu (7,9%) i zelenu (6,9%) mikroplastiku, dok su prozirne mikroplastične čestice bile najmanje zastupljene (3,7%).

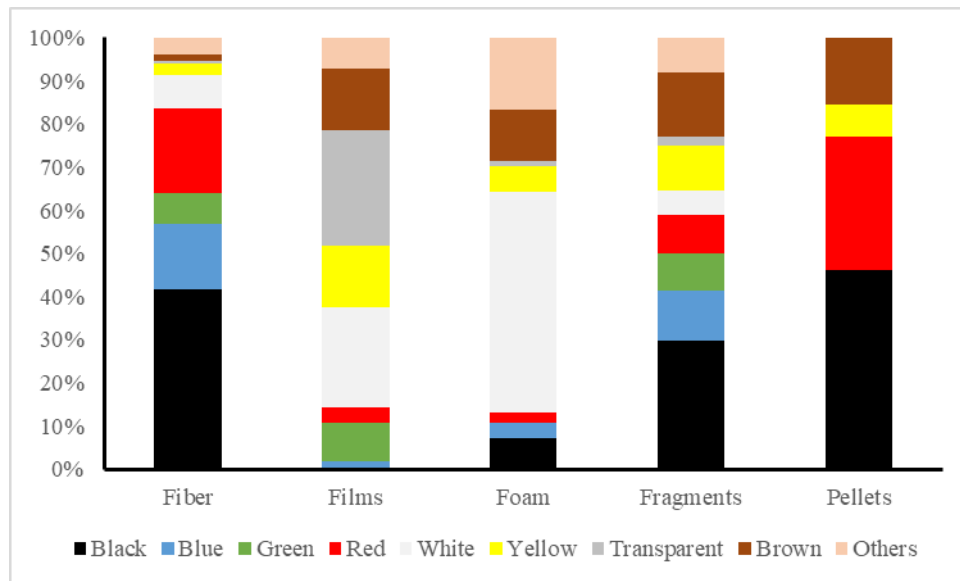


Slika 3. Sastav čestica prema obliku u postocima

3.3. Sastav boja mikroplastike prema obliku čestica

Sastav boja mikroplastike varirao je ovisno o obliku čestica (Slika 4). Vlakna su bila pretežno crna (41,53%), zatim crvena (19,67%) i plava (15,30%), s manjim udjelima zelene, bijele i ostalih boja. Kod fragmenata je

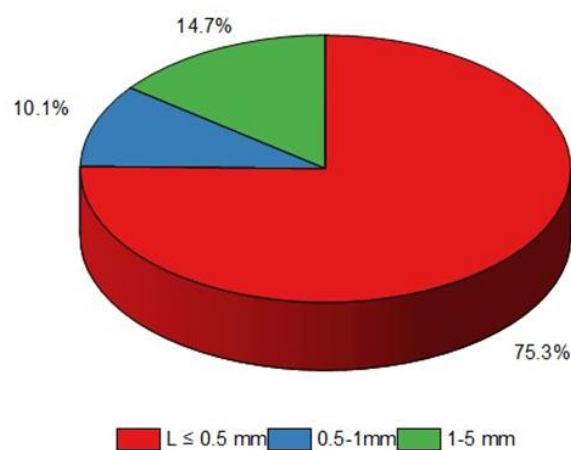
dominirala crna boja (29,78%), a slijede smeđa (14,73%), plava (11,6%) i žuta (10,34%), uz manje udjele ostalih boja. Folije su pokazale suprotan obrazac, pri čemu je prozirna boja bila najzastupljenija (26,79%), a zatim bijela (23,21%). Zabilježene su i umjerene količine žute (14,29%) i smeđe (14,29%). Čestice pjene bile su pretežno bijele (51,19%), a zatim su u manjim udjelima bile prisutne smeđe (11,90%) i crne (7,14%) čestice.



Slika 4. Sastav boja mikroplastike u različitim oblicima

3.4. Veličina mikroplastike

Raspodjela veličina mikroplastike pokazala je jasnu prevlast manjih čestica. Čestice $\leq 0,5$ mm činile su 75,3% ukupnog broja, dok je 14,7% bilo unutar raspona od 1-5 mm, a 10,1% između 0,5-1 mm (Slika 5). Prevlast najmanje frakcije ukazuje na široko rasprostranjenu fragmentaciju većih plastičnih ostataka unutar riječnog sustava.

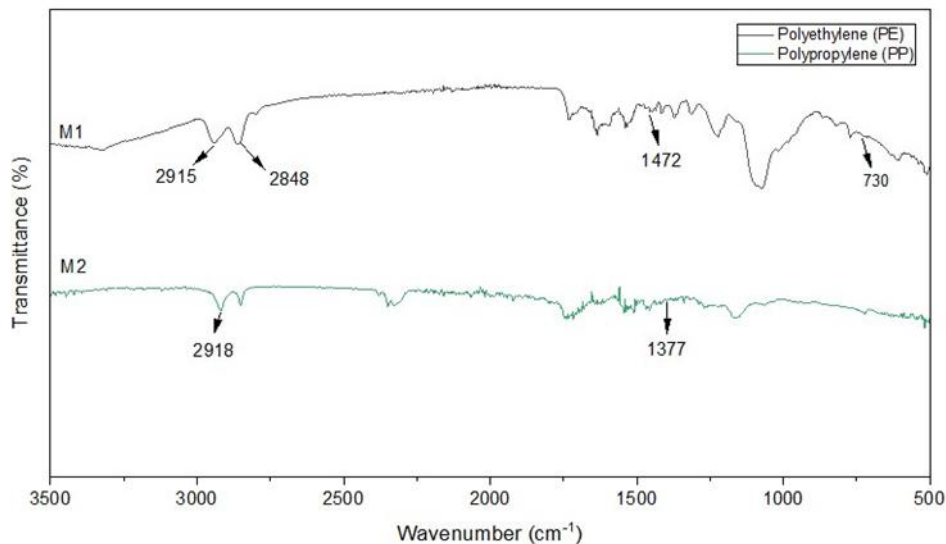


Slika 5. Sastav čestica po veličini u postocima

3.5. Identifikacija polimera mikroplastike

FTIR analiza odabranih mikroplastičnih čestica (> 1 mm) identificirala je dvije glavne vrste polimera (Slika

6). Spektar uzorka M1 pokazao je izražene apsorpcijske vrpce na 2915 cm^{-1} i 2848 cm^{-1} , što odgovara asimetričnom i simetričnom istezanju CH_2 , s dodatnim vrhuncima na 1472 cm^{-1} i 730 cm^{-1} koji označavaju savijanje i njihanje CH_2 , što je u skladu s polietilenom (Nishikida & Coates, 2003). U uzorku M2, apsorpcijske vrpce pojavile su se na 2918 cm^{-1} i 1377 cm^{-1} , što predstavlja istezanje C-H i savijanje CH_3 , što je u skladu s polipropilenom (Mecozzi i sur., 2016).



Slika 6. FTIR spektar mikroplastike

4. Diskusija

4.1. Zastupljenost mikroplastike

Prostorne varijacije u zastupljenosti mikroplastike u WRRB-u pružaju vrijedne uvide u raspodjelu onečišćenja u riječnom sustavu. Najveća zabilježena zastupljenost na mjestu MR16 (blizu krematorija) ukazuje na snažan utjecaj lokaliziranih antropogenih aktivnosti. Povišena onečišćenost mikroplastikom u blizini kremacijskih mjesta uglavnom se pripisuje antropogenim točkastim izvorima onečišćenja (Acharya i sur., 2025). Suprotno tome, minimalna zastupljenost na MR4, smještenom na poljoprivrednom zemljištu s manjom gustoćom naselja, potvrđuje utjecaj gustoće stanovništva na raspodjelu mikroplastike. Slični obrasci primijećeni su na rijeci Hanumante, gdje dijelovi koji izravno primaju odvodnju i kućne otpadne vode pokazuju povišene koncentracije mikroplastike (Bhatta i sur., 2024). Budući da je uzorkovanje provedeno isključivo tijekom predmonsunskog razdoblja, dobivene rezultate treba tumačiti kao sezonski presjek stanja, a ne kao cjelogodišnju sliku onečišćenja mikroplastikom u WRRB-u.

4.2. Sastav boje i oblika mikroplastike

Dominacija fragmenata (48,7%) i vlakana (27,9%) u WRRB-u slaže se s obrascima prijavljenim u drugim riječnim sustavima. Fragmenti uglavnom potječu od razgradnje većih plastičnih ostataka putem fizičke, kemijske i biološke degradacije (Xu i sur., 2021), dok su vlakna obično povezana s tekstilnom i ribarskom djelatnošću (Sharma i sur., 2024). Prevladavanje mikroplastike crne boje u fragmentima i vlaknima u skladu je s opažanjima s rijeke Koshi (Yang i sur., 2021). Bijele čestice pjene vjerojatno potječu od razgrađenih ambalažnih materijala (Islam i sur., 2025), dok su obojeni fragmenti i folije često povezani s ambalažnim materijalima i poljoprivrednim folijama za malčiranje (Briassoulis, 2023; Sajjad i sur., 2022).

Prevladavanje manjih čestica ($\leq 0,5\text{ mm}$, 75,3%) ukazuje na opsežnu fragmentaciju većih plastičnih ostataka

uslijed procesa atmosferskog trošenja (Gela & Aragaw, 2022). Slični rezultati dokumentirani su na rijeci Yangtze (Xia i sur., 2024) i rijeci Rajni (Range i sur., 2025). Posljedice za okoliš su značajne jer manje čestice mikroplastike ostaju dulje suspendirane, šire se na veća područja i teže ih je ukloniti klasičnim metodama pročišćavanja vode, čime se povećavaju rizici za ekosustave i zdravlje ljudi (Jolaosho i sur., 2025).

4.3. Identifikacija polimera mikroplastike u WRRB-u

FTIR analizom identificirani su polietilen i polipropilen kao dominantni polimeri, u skladu s istraživanjima u drugim nepalskim rijekama, uključujući rijeku Hanumante (Bhatta i sur., 2024), rijeku Sapta Gandaki (Kandel i sur., 2025) i rijeku Karnali (Maharjan i sur., 2025). Slični sastavi polimera zabilježeni su diljem svijeta, uključujući sliv rijeke Feiyan u Kini i rijeku Chao Phraya na Tajlandu (Ta & Babel, 2020; Tan i sur., 2025). Ti se polimeri često koriste za izradu plastičnih vrećica, ambalaže za hranu i poljoprivrednih folija, što upućuje na to da su komunalni otpad, poljoprivredne prakse i nepravilno odlaganje plastike glavni izvori onečišćenja u WRRB-u (Babel i sur., 2022; Stanly i sur., 2025; Wang i sur., 2020).

5. Zaključak

Ovo istraživanje je pokazalo široku prisutnost mikroplastike u površinskoj vodi sliva rijeke West Rapti (WRRB) tijekom predmonsunskog razdoblja. Prostorne varijacije u zastupljenosti mikroplastike upućuju na učinke lokaliziranih antropogenih aktivnosti, osobito u blizini naselja i područja s izravnom interakcijom stanovništva s rijekom. Prema istraživanju, fragmenti i vlakna bili su dominantni oblici mikroplastike, dok su čestice ($\leq 0,5$ mm) činile većinu zabilježenih veličinskih frakcija, što upućuje na razgradnju većih plastičnih ostataka i unosa iz izvora povezanih s tekstilom. FTIR analizom utvrđeno je da su polietilen i polipropilen glavni plastični polimeri u WRRB-u. Rezultati ukazuju na to da su čak i relativno manje industrijalizirani riječni slivovi podložni onečišćenju mikroplastikom. Ovo istraživanje pruža temeljne podatke o WRRB-u i doprinosi ograničenoj bazi podataka o onečišćenju slatkovodnih sustava mikroplastikom u Nepal. Dobiveni zaključci od iznimne su važnosti u slučajevima poplava i sušnih perioda, budući da uz zagađenja, mikroplastika smanjuje i korisni prostor površinskih vodotoka. Ove spoznaje mogu se iskoristiti i za analize drugih vodotoka, s obzirom na lokaciju i vrstu mikroplastike.

Zahvala

Ovaj je rad nastao u sklopu projekta Hidrološko-geodetski model za predviđanje poplava i suša (IP-UNIN-TEH-2025-11), koji financira Europska unija – NextGenerationEU. Izneseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

Literatura

- Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O., & Jaafarzadeh, N. (2019). Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution*, 244, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.039>
- Acharya, D., Neupane, S., & Gahanutam, R. (2025). An Evaluation of Microplastics Contamination in Narayani River. *Bharatpur Pragma: Journal of Multidisciplinary Studies*, 3, 32–51. (Environment). <https://doi.org/10.3126/bpjms.v3i01.76241>
- Ahmad, M., Li, J.-L., Wang, P.-D., Hozzein, W. N., & Li, W.-J. (2020). Environmental perspectives of microplastic pollution in the aquatic environment: A review. *Marine Life Science & Technology*, 2(4), 414–430. <https://doi.org/10.1007/s42995-020-00056-w>
- Babel, S., Ta, A. T., Loan, N. T. P., Sembiring, E., Setiadi, T., & Sharp, A. (2022). Microplastics pollution in selected rivers from Southeast Asia. *APN Science Bulletin*. <https://doi.org/10.30852/sb.2022.1741>

- Bhardwaj, L. K., Rath, P., Yadav, P., & Gupta, U. (2024). Microplastic contamination, an emerging threat to the freshwater environment: A systematic review. *Environmental Systems Research*, 13(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00338-7>
- Bhatta, K., Sharma, G. D., Bohara, K. P., & Joshi, M. K. (2024). Assessment of Microplastics in Hanumante River of Kathmandu Valley. *Journal of Nepal Chemical Society*, 44(1), 99–111. <https://doi.org/10.3126/jncs.v44i1.62684>
- Briassoulis, D. (2023). Agricultural plastics as a potential threat to food security, health, and environment through soil pollution by microplastics: Problem definition. *Science of The Total Environment*, 892, 164533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164533>
- Gela, S., & Aragaw, T. A. (2022). Abundance and Characterization of Microplastics in Main Urban Ditches Across the Bahir Dar City, Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 831417. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.831417>
- Gharti, S., Poudel, P., Silwal, R., Baniya, S., Gautam, J., Mishra, O., Bista, S., & Dhungana, D. (2025). GIS and remote sensing based assessment of West Rapti River channel migration in Nepal. *Discover Water*, 5(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00183-w>
- Han, B., Yacoub, M., Li, A., Nicholson, K., Gruver, J., Neumann, K., & Sharma, S. (2023). Human Activities Increased Microplastics Contamination in the Himalaya Mountains. *Hydrology*, 11, 4. <https://doi.org/10.3390/hydrology11010004>
- Islam, N., Akter, F., Hossen, Md. Y., Bhuiyan, T., & Siddique, M. A. M. (2025). Microplastic pollution in the Jamuna River, Bangladesh: Abundance, polymer types, characteristics, and sources in riverbank and riverbed sediments. *Journal of Hazardous Materials: Plastics*, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.hazmp.2025.100006>
- Jolaosho, T. L., Rasaq, M. F., Omotoye, E. V., Araomo, O. V., Adekoya, O. S., Abolaji, O. Y., & Hungbo, J. J. (2025). Microplastics in freshwater and marine ecosystems: Occurrence, characterization, sources, distribution dynamics, fate, transport processes, potential mitigation strategies, and policy interventions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 294, 118036. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118036>
- Kandel, B., Adhikari, N., Chetri, A. K., Karki, A., Paudyal, H., Sharma, K. R., Giri, B., & Neupane, B. B. (2025). Distribution of microplastic contamination in Sapta-Gandaki river system, Nepal. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(8), 7065–7076. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06079-5>
- Maharjan, K. K., Pyakurel, P., Bista, S., & Dhungel, R. P. (2025). Assessment of microplastic contamination in the Karnali River: A baseline study in remote region of western Nepal. *Results in Engineering*, 27, 106562. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106562>
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., & Arthur, C. (2015). Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. <https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/1076>
- Mecozi, M., Pietroletti, M., & Monakhova, Y. B. (2016). FTIR spectroscopy supported by statistical techniques for the structural characterization of plastic debris in the marine environment: Application to monitoring studies. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.012>
- Nishikida, K., & Coates, J. (2003). Infrared And Raman Analysis Of Polymers. *Handbook of Plastics Analysis*. <https://doi.org/10.1201/9780203911983.ch7>
- NSO. (2021). National Population and and Housing Census 2021. Office of the Prime Minister and Council of Ministers. <https://censusnepal.cbs.gov.np/results>
- Parolini, M., Perin, E., De Felice, B., Gazzotti, S., Palazzi, A., Conti, L., Conterposito, E., Rosio, E., Bruno, F., Gianotti, V., & Cavallo, R. (2024). Altitudinal variation of microplastic abundance in lakeshore sediments from Italian lakes. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(24), 35864–35877. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33648-5>
- Range, D., Kamp, J., Dierkes, G., Ternes, T., & Hoffmann, T. (2025). Cross-Sectional Distribution of Microplastics in the Rhine River, Germany—A Mass-Based Approach. *Microplastics*, 4(2), 27. <https://doi.org/10.3390/microplastics4020027>

- Range, D., Scherer, C., Stock, F., Ternes, T. A., & Hoffmann, T. O. (2023). Hydro-geomorphic perspectives on microplastic distribution in freshwater river systems: A critical review. *Water Research*, 245, 120567. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120567>
- Ritchie, H., Samborska, V., & Roser, M. (2023). Plastic Pollution. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Khan, M. A., Liu, Y., Wang, J., Lian, F., Wang, Q., & Guo, G. (2022). Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sharma, D., Dhanker, R., Bhawna, Tomar, A., Raza, S., & Sharma, A. (2024). Fishing Gears and Nets as a Source of Microplastic (pp. 127–140). https://doi.org/10.1007/978-981-99-8357-5_8
- Stanly, S., S, R., & Rahut, D. (2025). Far-Reaching Impact of Microplastics on Agricultural Systems: Options for Mitigation and Adaptation. *Land Degradation & Development*, 36, 1430–1451. <https://doi.org/10.1002/ldr.5459>
- Ta, A., & Babel, S. (2020). Microplastic contamination on the lower Chao Phraya: Abundance, characteristic and interaction with heavy metals. *Chemosphere*, 257, 127234. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127234>
- Talchabhadel, R., Aryal, A., Kawaike, K., Yamanoi, K., & Nakagawa, H. (2021). A comprehensive analysis of projected changes of extreme precipitation indices in West Rapti River basin, Nepal under changing climate. *International Journal of Climatology*, 41(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.6866>
- Tan, T., Liu, A., Yang, Y., Yu, R., Lin, N., Ke, Q., Wang, Q., Tan, T., Liu, A., Yang, Y., Yu, R., Lin, N., Ke, Q., & Wang, Q. (2025). Microplastic Pollution in Typical Subtropical Rivers in Eastern China: A Case Study of the Feiyun River Basin. *Water*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/w17213170>
- Wang, G., Lu, J., Tong, Y., Liu, Z., & Et., A. (2020). Occurrence and pollution characteristics of microplastics in surface water of the Manas River Basin, China. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136099>
- Xia, W., Rao, Q., Liu, J., Chen, J., & Xie, P. (2024). Occurrence and characteristics of microplastics across the watershed of the world's third-largest river. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135998. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135998>
- Xu, Y., Chan, F. K. S., Johnson, M., Stanton, T., & Et., A. (2021). Microplastic pollution in Chinese urban rivers: The influence of urban factors. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105686>
- Yang, L., Luo, W., Zhao, P., Zhang, Y., Kang, S., Giesy, J. P., & Zhang, F. (2021). Microplastics in the Koshi River, a remote alpine river crossing the Himalayas from China to Nepal. *Environmental Pollution*, 290, 118121. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118121>
- Zandaryaa, S. (2021). Freshwater Microplastic Pollution: The State of Knowledge and Research. In F. Stock, G. Reifferscheid, N. Brennholt, & E. Kostianaia (Eds.), *Plastics in the Aquatic Environment—Part I* (Vol. 111, pp. 255–272). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/698_2021_748