



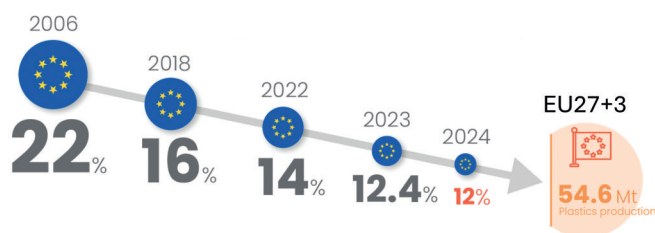
Zrínyi Zita¹, Gerencsérné Berta Renáta¹, Laczó-Duba Barbara¹,
Gresina Fruzsina², Orzó László³, Nemes László⁴, Zarándy Ákos³

■¹ Pannon Egyetem, Soós Ernő Kutató-Fejlesztő Központ ■² HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóintézet ■³ HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet
■⁴ Holodetect Instruments Ltd. | zrinnyi.zita@pen.uni-pannon.hu

Mikroműanyagok vizsgálata a felismeréstől a holografikus azonosításig

A környezeti mikroműanyagról

A mikroműanyagok története jól mutatja, hogyan lesz egy sokáig láthatatlan környezeti jelenségből szabályozási, technológiai és analitikai feladat. A műanyag nem önmagában „ellenség”: könnyű, tartós, olcsón formálható anyag, amelyre az egész modern gazdaság ráépült. Éppen ezek az előnyei okozzák a környezeti problémát is. A 2024. évi globális műanyagtermelés 430,9 millió tonna volt, ebből Európa (EU27+3) 54,6 millió tonnával körülbelül 12%-ot képviselt. Habár ez az arány 10%-kal kevesebb, mint 2006-ban (**1. ábra**), a mennyiség nagysága miatt már a felhasználás, a kopás, a mosás, a csomagolás, a közlekedés és a hulladékkezelés mindennapi folyamatai is elegendők ahhoz, hogy mikroméretű részecskék kerüljenek a környezetbe. A mikroműanyagok eredetük szerint lehetnek primer vagy szekunder részecskék.



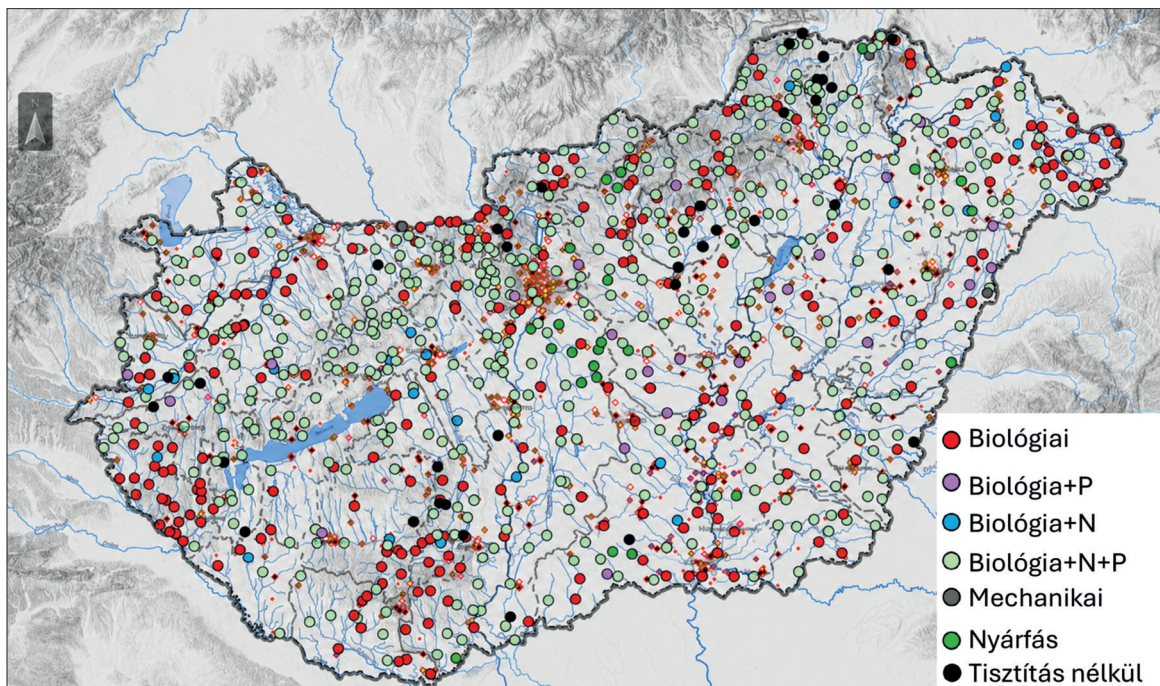
1. ábra. Európa részesedése a globális műanyagtermelésből
(Plastics EUROPE Fast Facts 2025)

A primer mikroműanyagok már eleve mikroméretben készülnek vagy kerülnek felhasználásra, például ipari alapanyagként, csiszolóanyagként vagy korábban egyes kozmetikai termékek összetevőiként. A szekunder mikroműanyagok ezzel szemben nagyobb műanyag tárgyak aprózódásával, kopásával, fizikai kémiai öregedésével keletkeznek [1] [2]. Ahogy humán és környezetegészség szempontjából ez utóbbiak különösen fontosak, mert alakjuk, méretük, felületük és összetételük rendkívül változatos lehet, úgy mérésük és kockázati értelmezésük is nehezebb.

Az európai szabályozás is ezen az úton haladt: először a látványos és könnyen azonosítható műanyag hulladék került célkeresztbe. Az egyszer használatos műanyagokról szóló 1990/269/EU irányelv (az ún. *Single-Use Plastics Directive*, SUP) még elsősorban bizonyos műanyag termékek környezeti hatásának csökken-

téséről szólt (tengeri műanyag hulladék csökkentése). A következő lépés azonban már nem csupán a hulladékmegelőzés, hanem a mikroműanyagok mérhetősége lett. Az ivóvíz-irányelvhez kapcsolódó 2024-es bizottsági döntés módszertant rendelt az ivóvízben lévő mikroműanyagok méréséhez, a REACH 2023/2055-ös módosítása pedig a szándékosan hozzáadott szintetikus polimer mikrorészecskéket korlátozza. Ez a szabályozási fordulat fontos üzenetet hordoz. A mikroműanyagok esetében ma még nem klasszikus határérték-alapú gondolkodásról beszélünk, hanem monitorozási és módszertani harmonizációról. Vagyis a szabályozás első kérdése nem az, hogy „mennyi a megengedett érték?”, hanem az, hogy egyáltalán mit, milyen mérettartományban, milyen mintavétellel, milyen egységben és milyen bizonytalansággal mérünk. Ez különösen lényeges, mert a mikroműanyag nem hagyományos oldott szennyező, hanem részecske, amelynek mérete, alakja, polimertípusa, felülete és öregedési állapota is befolyásolhatja a környezeti viselkedését, ott kifejtett hatását. A kockázateértékelés ezért nehéz. Egy oldott vegyületnél megszoktuk a koncentráció-alapú gondolkodást: mérhető környezeti koncentrációt hasonlítunk össze hatásküszöb-értékkel. A mikroműanyagoknál azonban ugyanaz a koncentráció egészen mást jelenthet, ha sok apró fragmentumról, néhány hosszú szálról, friss ipari részecskékről vagy öregedett, biofilmmel borított szemcsékről van szó. Nem véletlen, hogy a szakirodalom a mikroműanyag-kockázateértékelés egyik fő akadályaként említi a részecskék „többdimenziós” jellegét: nincs olyan egységes keretrendszer, amely egyszerre kezelné a koncentráció, méret, forma, sűrűség, kémiai összetétel és környezeti mátrix problémáját. Ebből következik, hogy egyetlen koncentrációadat (µg/L; µg/g) önmagában félrevezető lehet. A „db részecske/liter” szintén hasznos, de nem elég. Ugyanaz a minta nagyságrendekkel eltérő eredményt adhat attól függően, hogy 3, 10 vagy 100 mikrométer felett számolunk. A kockázati és technológiai értelmezéshez a darabszám mellett méreteloszlásra, morfológiára, rost-fragmentum arányra és lehetőség szerint polimerazonosításra is szükség van. A mikroműanyag-monitoring tehát nem egyetlen szám előállítása, hanem részecskeprofil készítése.

Itt válnak kulcsszereplővé a környezeti kibocsátás szempontjából is jelentős hot spot-k (**2. ábra**), a szennyvíztisztító telepek. A telep egyszerre gyűjtőpont, technológiai szűrő és potenciális kibocsátási pont. Ide érkehetnek a háztartási mosásból származó



2. ábra.
Kommunális
és ipari szenny-
vízbevezetések
a Duna-vízgyűjtő
magyarországi
szakaszán
(VGT-3 (3-1))

textilszálak, a városi lefolyás részecskéi (utak, parkolók csapadékvizei), ipari eredetű mikroműanyagok, csomagolóanyag-fragmentumok és a csatornahálózatban keletkező másodlagos részecskék is. A tisztítás során ezek egy része eltávolítható vagy az iszapban feldúsulhat, más részük viszont a tisztított szennyvízzel a befogadóba kerülhet. Az új városi szennyvíz-irányelv (2024/3019/EU) ezért már szisztematikus mikroműanyag-monitoringot irányoz elő a szennyvíztisztító telepek befolyó és kifolyó pontjain, valamint az iszapban. Az irányelv magyar jogszabályi környezetbe való átültetésének 2027-ig kell megtörténnie. A szennyvíztelepi monitoring célja nemcsak környezetvédelmi adatgyűjtés, hanem üzemeltetési eszköz is lehet. Ha a befolyó és kifolyó mintákban követjük a részecskeszámot (akár részecskeméret, akár adott polimertípus koncentrációja szerint), akkor a tisztítási hatékonyság is követhető, optimalizálható. Ez különösen fontos lesz a technológiai fejlesztések értékelésénél, ahol nem elég azt mondani, hogy „csökkent a mikroműanyag-terhelés”, hanem tudni kell, milyen méretben és milyen típusú részecskéknél történt változás. A módszertani igény ugyanakkor ütközik az analitikai valósággal. Az ivóvízre kidolgozott JRC-módszertan [3] például legalább 1000 liter minta szűrésével számol, 100 és 20 mikrométeres szűrőkön, majd rezgési spektroszkópiai (FTIR- vagy Raman-mikroszkópos) elemzéssel azonosítja a polimertípust, a méretet és a részecske, vagy szál jelleget. Ez kiváló irány a harmonizációhoz, de jól mutatja a probléma léptékét is: nagy mintatérfogat egy tiszta mátrixtípusból, időigényes minta-előkészítés kontaminációmentes laboratóriumi környezetben, valamint speciális szaktudást igénylő és költséges műszeres háttér szükséges. Ugyanez a feladat a szennyvíztelepek víztípusaiból körülményesebb mintavételt, több és drágább minta-előkészítést jelentenek [4]. Az új szennyvíz-irányelv így a kimondott technológiai rekonstrukció mellett kimondatlan laboratóriumi követelményeket (tisztá tér, szaktudás, analitikai beruházás) is megfogalmaz.

A mikroműanyag-analitikában a fent említettekből fakadóan ma nincs egyetlen, minden kérdésre alkalmas módszer. A különböző eljárások nem ugyanazt az információt adják, és nem is ugyanarra a feladatra optimálisak [5] [6]. Az optikai módszerek, ideértve a fénymikroszkópiát, a fluoreszcens mikroszkópiát és a

holografikus mikroszkópiát, elsősorban részecskeszámot, méreteloszlást és morfológiai információt szolgáltatnak. Ezekkel követhető, hogy hány részecske van a mintában, milyen mérettartományba esnek, rostokról, fragmentumokról vagy szabályosabb alakú szemcsékről van-e szó. Módszertani korlátjuk, hogy önmagukban nem adnak biztos polimerazonosítást. A rezgési spektroszkópiai technikák (Raman, FTIR) ezzel szemben a mikroműanyagok kémiai azonosításában (anyagi összetétel, polimertípus) kulcsfontosságúak. Ez az egyik oka annak, hogy a mikroműanyagokat érintő kevés, publikált ISO szabvány között megjelenik javasolt analitikai módszerként a rezgési spektroszkópia. Ugyanakkor időigényes, költséges, speciális szaktudást igényel a kezelése, érzékeny lehet a fluoreszcens háttérre, a részecskeméretre és a spektrális könyvtárak korlátaira. Nagy mintaszámú, rutinszerű szennyvíztelepi monitoringban ezért önmagában nehezen alkalmazható minden minta teljes körű vizsgálatára. A termikus és tömegspektrometriás módszerek, például a pirolízis-GC-MS vagy más termoanalitikai-tömegspektrometriás eljárások, ismét más típusú adatot szolgáltatnak. Ezek nagy érzékenységgel képesek polimerek vagy bomlástermékek kimutatására és tömegalapú információt adnak a mintában jelen lévő műanyagfrakcióról. Ugyanakkor roncsolásos módszerek, ezért a vizsgálat után a részecske egyedi mérete, alakja, darabszáma és morfológiája már nem értékelhető. Továbbá egy-egy kiugró, vagy több nagyobb mikroműanyag-szemcse nagy változást okoz a végeredményben, ez nehezíti az adatok összehasonlíthatóságát, vagy évszakos, éves trendek felvételét.

Nem arról van tehát szó, hogy nincsenek használható protokollok. A kutatói gyakorlatban már ma is rendelkezésre állnak jól felépített eljárások: fém- és üvegeszközök használata a kereszt-szennyezés csökkentésére, vakminták, oxidatív szervesanyag-bontás, sűrűség szerinti elválasztás, esetleg fluoreszcens festés a polimer részecskék jelölésére, majd mikroszkópos vagy analitikai elemzés. Ugyanakkor egy szennyvíztelepi monitoringprogramban más információ szükséges a gyors terhelésváltozás jelzéséhez, más a technológiai eltávolítás követéséhez és megint más a polimerazonosításra épülő, szabályozási vagy tudományos megerősítéshez. A holografikus mikroszkópia ebben a rendszerben nem



önálló, mindenre választ adó technika lehet, hanem a gyors, nagy mintaszámú, részecskealapú előszűrés egyik ígéretes eszköze. A javaslat lényege a kétlépcsős gondolkodásban van. A Raman- és FTIR-mikroszkópia továbbra is az azonosítás „arany standardja”, mert polimerspecifikus információt ad. De drága, lassú, szakértőigényes, és nagy mintaszám esetén nehezen illeszthető rutinszerű telepi monitoringba. A holografikus mikroszkóp ezzel szemben nem polimerazonosító csodaszer, hanem gyors, olcsóbb és nagyobb áteresztőképességű előszűrő eszköz lehet. A digitális holografikus képalkotás a részecskék által létrehozott interferenciámintázatból morfológiai és optikai információkat nyer, és gépi tanulással támogatott osztályozásra is alkalmas. Friss kutatások szerint a holografikus, illetve polarizációs holografikus képalkotás nagy áteresztőképességű, dinamikus, automatizálható mikroműanyag-vizsgálat irányába mutat [7] [8].

Holografikus mikroszkópia

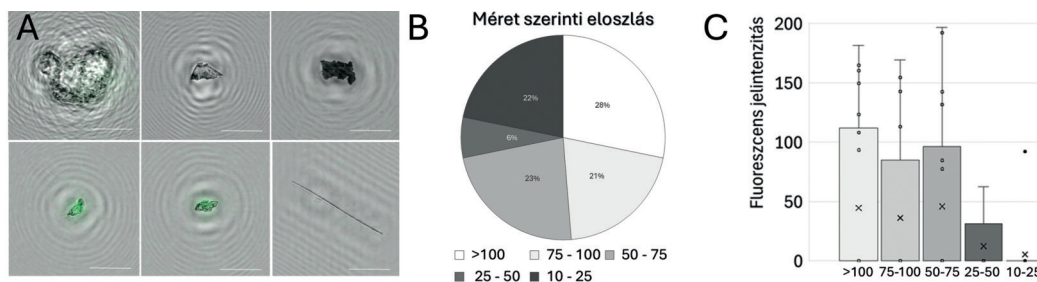
A digitális holografikus mikroszkópia (DHM) lényege, hogy a részecskén áthaladó vagy arról szóródó fényhullámot nemcsak egyszerű képként rögzíti, hanem referenciahullámmal létrehozott interferenciámintázat formájában [9]. Ezt a hologramot a rendszer digitálisan rekonstruálja, így a hagyományos intenzitásképp mellett például fázisinformáció is nyerhető. A fázisinformáció azt mutatja meg, hogyan változtatja meg a részecske a fény útját; ez kapcsolatban állhat a részecske alakjával, optikai vastagságával, törésmutatójával és belső inhomogenitásával. Másfélpén fogalmazva: a DHM nemcsak azt látja, hogy „ott van egy részecske”, hanem azt is, hogy a részecske milyen módon torzíttja a fény hullámfrontját. Egyrészt ez adja a holografikus képalkotás többletét a hagyományos optikai mikroszkópiához képest. A fénymikroszkópos kép elsősorban a látható alakot, kontúr, szint vagy fluoreszcens jelet mutatja, míg a holografikus mérés ugyanarról a részecskéről több fizikai-optikai jellemzőt képes kinyerni. Ezek a jellemzők különösen értékesek lehetnek akkor, amikor a műanyag részecskék méretben és alakban átfednek természetes eredetű komponensekkel, például algákkal, kovamoszatokkal vagy szerves törmelékkel. A DHM másik előnye és mikroműanyag-analitikai jelentősége a fénymikroszkópiával szemben, hogy fluoreszcens festéssel kombinálva, a morфомetriai paraméterek alapján gépi tanulással támogatott osztályozásra alkalmas analitikai platformmá fejleszthető. A szakirodalomban bemutatott megközelítésekben a digitális hologramokból kinyert morfológiai, texturális és holografikus jellemzőket gépi tanulási modellek, például támogatott vektorgepek vagy neurális hálók használják fel a részecskék elkülönítésére [8] [10]. Ebben az értelmezésben a mikroműanyag nem kémiai, hanem fizikai-optikai „ujjlenyomat” alapján válik felismerhetővé: a módszer nem azt mondja meg elsőként, hogy milyen polimerből áll a részecske, hanem azt, hogy a részecske viselkedése, fluoreszcens festődése alapján műanyaggyanús-e, és érdemes-e/kell-e mintázni a telep adott pontján további, kémiai megerősítő vizsgálatok céljából. Ez a szerep jól illeszkedik a szennyvíztelepi monitoring logikájához. Nagy mintaszámnál, változó mátrixban és technológiai összehasonlításoknál a gyors részecskealapú előszűrés önmagában is értékes információt adhat. A DHM segítségével követhetővé válhat a részecskeszám, a méreteloszlás és a morfológiai profil változása, miközben előzetesen kiszűrheti azokat a frakciókat vagy mintákat, amelyeknél Raman- vagy FTIR-mikroszkópos megerősítés szükséges (pl. a kötelező gyakoriságú éves adatszolgáltatáson túl). Így a holografikus mikroszkóp nem a rezgési

spektroszkópai módszerek helyettesítője, hanem azok szükségességét célzottabbá tevő, nagy áteresztőképességű előszűrő vizsgálat, ami tized annyiba kerül (bekerülési költség, fenntartás) és speciális szaktudás nélkül alkalmazható a neurális háló előzetes feltanítása után. A jelenlegi hiányosságokat azonban nem szabad elhallgatni. A holografikus mérés érzékeny lehet a mintakezelésre és -előkészítésre (ugyanúgy fontos a terepi és laboratóriumi kontamináció minimalizálása), valamint a festési protokollra. A gépi tanulással támogatott osztályozás pedig csak annyira jó, amennyire jó a tanítóadatbázis: helyi szennyvízmátrixra, öregbített részecskékre, természetes zavaró anyagokra és különböző méretfrakciókra validálni kell.

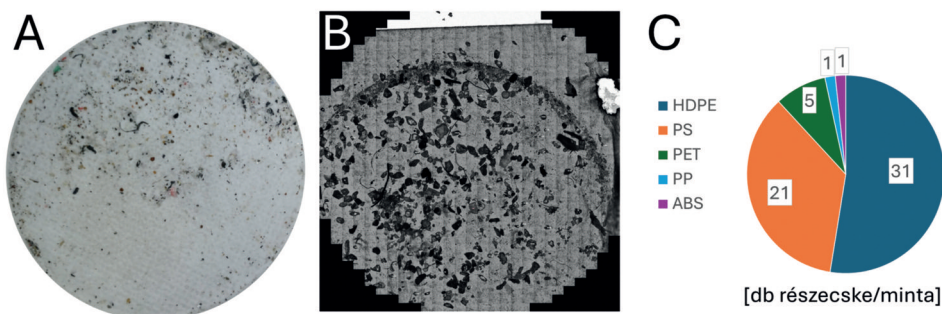
A szennyvíztelepi monitoringban a holografikus mikroszkóp alkalmas lehet arra, hogy gyakran, gyorsan és viszonylag kis költséggel jelezze a részecsketerhelés változását. Követheti a technológiai beavatkozások hatását, például új szűrési, membrános vagy kombinált tisztítási lépcsők bevezetésekor. Ehhez azonban a holografikus előszűrésnek is szigorú kritériumoknak kell megfelelnie. Rögzíteni kell a mintatérfogatot, a szűrési mérethatárokat, az előkezelést, a festési körülményeket és a mérési térfogatot. Minden sorozathoz szükség van vakmintára, visszanyerési vizsgálatra és referenciaanyagokra. A neurális hálóval támogatott osztályozást dokumentált tanító- és validációs mintákkal kell ellenőrizni. A jelentésben nemcsak átlagos részecskeszámot, hanem méreteloszlást, alak szerinti megoszlást, detektálási határt, bizonytalanságot és a Raman/FTIR-visszaellenőrzés arányát is közölni kell.

Nézzünk egy példát!

A Pannon Egyetem Soós Ernő Kutató-Fejlesztő Központ és a HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet munkatársaiként 2024 decembere óta dolgozunk együtt a fluoreszcens csatornákkal is rendelkező Holodetect HiRes/LVöl + Fluor3 (Holodetect Instruments) holografikus mikroszkóp neurális hálózatának tanítóadatbázisán, amely a mikroműanyagokat méret szerint osztályozza és morфомetriai paraméterekkel jellemzi. Ahhoz, hogy ez környezeti mintán is tesztelhető legyen, először egy kutatási célú kompakt, rozsdamentes acél szűrőkaszkádot fejlesztettünk ki. Ez a terepen alkalmazható, integrált mintavételi és szeparációs rendszer lehetővé teszi felszíni vizek esetében legalább 400 liter, tisztított szennyvíz esetén 200 liter víz szűrését. A rendszer működési elve kaszkádszűrési megközelítésen alapul, amely különböző pórusméretű fém szitaszövetet alkalmaz. A víz-mintát szivattyú segítségével vezetjük át a szűrőrendszeren, folyamatosan monitorozva a nyomást, valamint az átszűrt víz mennyiségét. A mintavétel során a víz először egy durva előszűrőn (1,5 mm), majd sorrendben 100 μm , 50 μm és végül 25 μm pórusméretű szűrőkön halad át. Ez a mérettartomány a környezeti kutatásban, de különösen a monitoring tevékenység során viszonylag ritka, ugyanis már nagy kihívások elé állítja a szakembereket: nemcsak a mintavétel, hanem az analitikai mérések is tovább tartanak, a minta-előkészítés pedig több időt vesz igénybe, mint a nagyobb (300 μm feletti) mérettartományban. A moduláris rendszert csak laboratóriumban szedjük szét, a minta-előkészítés során a szerves anyagokat hidrogén-peroxidos oxidációval eltávolítjuk. A mintában lévő mikroműanyagok dúsításához a szakirodalomban javasolt protokollok szerint [6] cink-klorid telített oldatával történő, sűrűség szerinti elválasztást alkalmazunk, ahol a könnyebb (műanyag) frakciót külön gyűjtjük, majd ismét szűrjük és tisztítjuk. Utolsó lépésként a mintát Nílusvörös fluoreszcens festékkel festjük ($\lambda_{\text{max}} = 553 \text{ nm}$, Sigma-Ald-



3. ábra. Mikroműanyag-azonosítás környezeti mintából holografikus mikroszkóp segítségével. A) A részecskék holografikus képe. Zöld fluoreszcencia jelöli a polimer részecskéket Nilus-vörös alkalmazása, mint nem szelektív jelölés után. Skála: 50 µm. B) A részecskék méret szerinti eloszlása holografikus mikroszkóp neurális hálózattal történő osztályozása alapján. C) Az átlagos fluoreszcens jelintenzitás megoszlása az egyes csoportokban



4. ábra. A környezeti minta 100 µm átmérőjű fém szitaszövetről kapott szemcséinek üveg szűrőpapíron megjelenő vizuális és Raman-alapú térképezése: A) makroszkópos felvétel a szűrőfelületről; B) Raman-mikroszkópos pontonkénti szkennelésen alapuló részecskeloszlási térkép; C) a Raman-vizsgálat összesített eredménye: az azonosított mikroműanyagok eloszlása [db részecske/minta]

rich GmbH). A műanyag részecskék holografikus mikroszkópos meghatározásához a műszert támogató neurális hálót előzetesen feltanítottuk a partikulumok méret szerinti osztályozására az alábbi kategóriák szerint: 0–3; 3–10; 10–25; 25–50; 50–75; 75–100 és 100 µm feletti kis tengellyel jellemezhető részecskék. Ezek nem szigorú értelemben vett méretek, hiszen a neurális hálózat nemcsak a kis tengely méretét, hanem számos egyéb morfológiai paramétert is figyelembe vesz a tanulás során. A készülék jelenlegi elrendezése szerint a neurális hálózat az 50 µl-es cellán átfolyó minta 0,12 µl térfogatát értékeli egy hologramon, és ebből készíti a beállításoknak megfelelő mennyiségű felvételt. A készülék névleges detektálási határa 0,6 µm a felbontáshoz igazítva, ugyanakkor a mikroműanyagok terén, tapasztalataink szerint, az általunk alkalmazott Nilus-vörös festés a 10 µm feletti tartományban ad megbízható jelet. Mivel az általános laboratóriumi háttér-szennyezés is 10 µm alatt adja a legtöbb zavaró jelet, így a 10 µm feletti tartományban vizsgáljuk a mikroműanyagokat.

A 3.A ábrán látható a mikroműanyagok holografikus megjelenése (zöld fluoreszcenciát adó partikulumok). A szoftver minden egyes detektált részecskéről felveszi a holografikus képet, valamint a morfológiai adatokat és a fluoreszcencia adatokat, az adatsor pedig további statisztikai feldolgozásra exportálható. A 3.B ábrán egy környezeti mintából származó mérés részecske-méret szerinti százalékos eloszlása látható a 10 µm feletti tartományban. Ezeknek a részecskéknek kb. 9%-a mutatott fluoreszcens jelölést, ennek mértékét, az átlagos fluoreszcens jelintenzitást az egyes méretkategóriákban a 3.C ábra mutatja. A 4. ábra a minta Raman-mikroszkópos mérésének részleges folyamatát (A és B), valamint az azonosított polimertípusokat mutatja be (C).

Összefoglalás

A mikroműanyagokkal kapcsolatban ma az egyik legfontosabb felismerés az, hogy a mérés maga is környezetvédelmi infrastruktúra. Amit nem mérünk következetesen, arra nem tudunk

technológiát fejleszteni, szabályozást alkotni vagy üzemeltetési döntést alapozni. A szennyvíztelepek a következő években természetes monitoringpontokká válhatnak: megmutatják, milyen mikroműanyag-terhelést termel a városi élet, mennyit képes tisztítani a tisztítás és mely frakciók igényelnek új technológiai válaszokat. A vízmintákból történő mikroműanyag mérésre alkalmas holografikus mikroszkóp erőssége a darabszám, a méret és az alak gyors meghatározása. A morfológiai paraméterek segítségével a különböző eredetű és alakú részecskék összehasonlíthatóvá válnak. Ez különösen hasznos másodlagos mikroműanyagoknál, amelyek nem szabályos gömbök vagy ipari mikroszemcsék, hanem szakadt, töredezett, nyúlt, hajlott vagy biofilmmel módosult fragmentumok. A módszer Nilus-vörös festéssel kombinálva erősítheti a műanyaggyanús részecskék felismerését. A módszer ezért nem pusztán mikroszkópos megfigyelés, hanem strukturált adatok előállítása további osztályozáshoz és döntéstámogatáshoz. A kérdés az, hogy képes-e a mikroműanyag-monitoring jelenlegi arany standard módszereit neurális hálózat alkalmazásával használhatóbbá tenni: több mintát előszűrni, gyorsabban jelezni a változásokat, olcsóbban követni a technológiai hatékonyságot és célzottabban kijelölni a megerősítő vizsgálatokat. Ehhez a kutatás, a szabályozás és az ipar szakembereinek összefogása és közös fejlesztése szükséges.

IRODALOM

- [1] Newton D. E., Plastics and Microplastics: a reference handbook. ABC-CLIO, Santa Barbara, (California), 2021, 23.
- [2] Adam V., Yang T., Novak B., Environmental Toxicology and Chemistry (2019) 2, 436.
- [3] https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/new-methodology-measure-microplastics-eus-drinking-water-2024-04-23_en (2026.01.15.)
- [4] Jahanpeyma P., Baranya S., Periodica Polytechnica Civil Engineering (2024) 62, 684.
- [5] Radwa S. J., Bulletin of the National Research Centre (2023) 47, 174.
- [6] Picó Y., Barceló D., ACS Omega (2019) 4, 6709.
- [7] Abimola I., Thevar T., McAfee M., Creedon L., Khosravi H., Gharbia S. Emerging Contaminants (2025) 11, 100558.
- [8] Bianco V., Memmolo P., Carcagnì P., Merola E., Paturzo, M., Distante C., Ferraro P. Advanced Intelligent Systems (2020) 2, 1900153.
- [9] Byeon H., Go T., Lee S. J., Optics and Laser Technology (2019) 113, 77.
- [10] Bianco V., Pirone D., Memmolo P., Merola E., Ferraro P., ACS Photonics (2021) 7, 2148.