

Mikro- és nanoműanyagok mint új szennyezők

A mikroműanyagok definíció szerint nem tartoznak a szerves mikroszennyezők közé, mivel koncentrációjukat nem $\mu\text{g/l}$ vagy ng/l -ben adjuk meg, hanem az összetételtől függetlenül méret-tartományonként darabszámban. Azonban környezeti jelenlétük és elterjedésük mértéke, illetve a környezetre bizonyítottan káros és potenciálisan káros egészségügyi hatásaik miatt új szennyezőknek tekintjük a mikroműanyagokat. A mikroműanyag kifejezést Thompson alkalmazta először 2004-ben [188], amelyet 2008-ban tovább finomítottak [189], és minden olyan műanyagot magában foglal, amely 5 mm-nél kisebb átmérőjű részecske. Az alsó mérethatárról megoszlanak a vélemények, de jellemzően a mintázásra használt hálóméret szabja meg.

A nanoműanyagok pontos meghatározása sok vitát okozott, egyesek az 1 μm -nél kisebb átmérőjű, míg mások az 1–100 nm átmérőjű műanyag részecskéket sorolták a nanoműanyagok közé. Az ellentmondások egyik oka, hogy a mesterségesen előállított nanoanyagoknál a felső határ valóban a 100 nm, azonban a kolloidok fizikai és kémiai tulajdonságait figyelembe véve ez a definíció nem megfelelő a nanoműanyagokra nézve. Gigault (2018) az *Environmental Pollution* szaklapban [190] az alábbi definíciót javasolja: *A nanoműanyagok olyan 1 nm – 1000 nm méretű részecskék, amelyek ipari műanyag tárgyak lebomlásából keletkeznek, és kolloidokra jellemző viselkedést mutatnak.* Ez a definíció nem vonatkozik azokra a mesterségesen előállított nanoanyagokra, amelyek számos hétköznapi használt termékben, például kozmetikai szerekben, biogógyászati szerekben is megtalálhatók.

A második környezeti ENSZ-konferencián a mikroműanyagokat a második legfontosabb tudományos problémának nevezték a környezeti és ökológiai tudományok területén, amely globális méretű veszélyt jelent [191].

A világ műanyaggyártása 1950-ben 1,7 millió tonna volt, amely 2013-ra 299 millió tonnára nőtt [192]. Az előrejelzések alapján 2025-re megduplázódik, 2050-re pedig megháromszorozódik a műanyagtermelés, ha a populáció növekedése és a lakosság műanyag-felhasználása, illetve hulladékkezelési szokásai nem változnak [193]. Évente 5–13 millió tonna műanyag kerül az óceánokba, amely az előrejelzések szerint tízszeresére fog növekedni, ha nem teszünk megelőző lépéseket. Mivel a műanyagok rendkívül perzisztensek (féléletidejük több száz év), feltételezhető, hogy az eddig gyártott összes konvencionális műanyag még mindig jelen van a környezetben egészében vagy darabjaiban, amelyek egy része előbb vagy utóbb eléri az óceánokat is [192].

A környezetben megtalálható mikroműanyagoknak két fő típusuk van. Az ún. *elsődleges mikroműanyagok*, amelyeket mikroműanyagként gyártanak. Ezek az alábbiak lehetnek:

- a) *mikrogyöngyök*, elsősorban kozmetikai termékekben használják fel, például szappanokban, fogkrémekben,
- b) *csiszolóanyagok*,
- c) *fűrófolyadékok* az olaj- és gáziparban,
- d) *műanyaggyanta-pelletek*,
- e) műanyag porok vagy pellet, amelyeket a műanyaggyártás során használnak fel.

A másik csoport az úgynevezett *másodlagos mikroműanyagok*, amelyek nagyobb műanyagok fragmentálódásával, például UV, mechanikai hatásra, mikrométeres nagyságrendűvé válnak. A másodlagos mikroműanyagok másik jelentős forrása az *autógumik* kopásából adódó műanyag-

darabkák leválása, valamint a műszálas ruhák mosásából származó műanyag szálak. Számos *hajófesték és egyéb festék* is tartalmaz szintetikus polimereket, például alkideket, epoxigyantákat, poliakrilátot, polisztrént, amelyek szintén a környezetbe juthatnak. Továbbá nem elhanyagolható a *háztartási műanyagok* kopásából adódó környezetbe jutás [192].

A mikroműanyagok fizikai-kémiai tulajdonságai

A mikroműanyagok *fizikai tulajdonságai* közül a méret és alak, a kristályosság, *kémiai tulajdonságai* közül a felületi kémia, valamint a polimer és adalékanyag-összetétel azok a tulajdonságok, amelyek feltehetően szerepet játszanak a mikroműanyagok ökotoxikológiai hatásában. A műanyag részecske *mérete és alakja* fontos tulajdonságok, amelyek meghatározzák, hogy a táplálékkal bekerült részecske milyen módon lép kapcsolatba az élő szervezettel [194]. A felület mérete-nagysága is fontos szempont, mivel a részecske méretének csökkenésével a fajlagos felület nő. A felület a gömb alakú részecskék esetében könnyen kiszámolható a részecske méretéből, míg a szabálytalan alakúak felületét gyakran jelentősen (akár 7-szeresen) túlbecsülik, pedig a toxikológiai és egyéb hatásvizsgálatoknál a felület pontos méretének fontos szerepe lehet [194]. A fizikai tulajdonságok közül a *kristályosság* is fontos tulajdonság, mivel a kristályos régiók rendezettebbek és szigorúbban strukturált polimer láncokból állnak, ami számos fizikai tulajdonságot meghatároz, mint például a sűrűséget, a permeabilitást. A környezetben található mikroműanyagok kristályossága változik, mivel elsősorban az amorf részek bomlanak, így a műanyag méretének csökkenésével a kristályossága nő, amely meghatározza a többi fizikai és kémiai tulajdonságát (adalékanyagok kioldódása, szennyező anyagok adszorpciója), ezáltal befolyásolhatja hatásukat az élő szervezetekre, toxicitásuk eltérhet az anyamolekulától. Ezért a mikroműanyagokkal végzett vizsgálatok során ezeket a szempontokat figyelembe kell venni és dokumentálni kell.

A műanyagok felületi kémiája fotodegradációval és oxidatív lebomló folyamatok hatására megváltozik, az OH-gyökökkel, oxigénnel, nitrogén-oxiddal történő reakciók, és egyéb fotokémiai reakciók során kialakuló szabadgyökökkel reakcióba lépve új funkcionális csoportok jöhetnek létre. A kémiai reakciók hatására a felületen repedések jönnek létre, ami elősegíti a további degradációt, valamint további anyagok kioldódását is eredményezheti. Az irreguláris alak kialakulása pedig elősegítheti az élő szervezetben a jobb megtapadást. Ez jelentős különbség a környezeti mikroműanyagok és az elsődleges mikrogyöngyök között [194].

A kémiai tulajdonságok közül a polimer típusa az egyik legfontosabb tulajdonság. A műanyagok azonos építőelemekből, ismétlődő egységekből, ún. *monomerekből* felépített vegyületek. A műanyag polimerizációjához használt szerves anyagok mind nyersolajból származnak. A *polimerizációs reakciók* során a monomerekből *polimerek* képződnek. A legegyszerűbb szerves polimer a polietilén (PE), amely több ezer $-CH_2-$ egységből áll [195].

A polimerek láncszerkezete igen változatos lehet a monomerek különböző kapcsolódása miatt, amely változatosság a tulajdonságaikban is megnyilvánul. A polimerek lehetnek természetes polimerek (például fehérje, cellulóz, gyanták stb.), elasztomerek (természetes kaucsuk), műanyagok (PVC, PP, PE), vagy térhálós gyanták (epoxi, poliészter stb.) [196]. A műanyagokat számos szempont alapján lehet csoportosítani (jellemző hőmérséklet, tulajdonság, szerkezet), az alábbiakban a Pukánszky és Moczó által használt csoportosítást mutatjuk be [196]:

- a) *Elasztomerek*: Rugalmas, lineáris polimerek, kémiai térhálósításukkal nyerjük a gumikat.
- b) *Hőre lágyuló műanyagok*: Lineáris vagy elágazó molekulákból álló anyagok. A hőmérséklet növelésével az anyag megolvad, lehűlés után megszilárdul és tartja a formáját. Mind az olvasztás, mind a szilárdulás reverzibilis folyamatok. A hétköznapiakban gyakran használt tömegműanyagok közül idetartoznak a [193]
- polietilén (PE), felhasználása: játékok, samponos flakonok, csövek stb.;
 - polipropilén (PP), felhasználása: élelmiszer-csomagolóanyagok, -papírok, gépkocsi-alkatrészek stb.;
 - polietilén-tereftalát (PET), felhasználása: vizes- és üdítőspalackok stb.;
 - polisztiirén (PS), felhasználása: ételtároló haddobozok, szemüvegek, épületszigetelések stb.;
 - polivinil-klorid (PVC), felhasználása: ablakkeretek, csővezetékek, vezetékszigetelés stb.;
 - egyéb műanyagok, például polikarbonátok (PC), poliamidok (PA).
 - *Hőre keményedő anyagok, gyanták*: Általában merev, nagy szilárdságú műanyagok, mert a polimerizáció során a kötések a polimerek között permanensek. Idetartoznak [193]:
- c) poliuretán (PUR), felhasználása: szigetelés, párnák, matracok készítésénél stb.;
- epoxigyanták;
 - egyes akrilgyanták;
 - egyes poliészterek.
 - *Műszaki műanyagok*: Különösen nagy szilárdsággal és ütésállósággal bíró, hőre lágyuló műanyagok. Alkalmazási hőmérsékletük 100–150 °C feletti.
- d) *Kompozitok*: A töltő- és erősítőanyagot tartalmazó két- vagy többkomponensű műanyagok tartoznak ide.

Az elkészült polimerhez mindig adnak adalékokat és társító anyagokat az előállítás során [196]. Ezek az anyagok akár a műanyag 50%-át is kitehetik, legfontosabb típusaik Pukánszky és Móczó alapján az alábbiak [196]:

a) Adalékok

- Stabilizátorok: a feldolgozás és alkalmazás körülményei között biztosítják a polimer tulajdonságainak megőrzését.
- Csúsztatók: segítik a műanyag feldolgozását.
- Formaleválasztók: elősegítik a késztermék eltávolítását a feldolgozó szerszámból.
- Lágyítók: a kemény műanyagokat (elsősorban PVC) hajlékonyra teszik.
- Égésgátlók: csökkentik a polimer éghetőségét és a füstképződést.
- Színezékek, pigmentek: biztosítják a kívánt színt.
- Optikai fehéritők: megszüntetik egyes polimerek sárgás színét.
- Szag- és illatanyagok: elveszik a műanyag kellemetlen szagát, vagy biztosítják a kívánt illatot.
- Antisztatikumok: csökkentik a műanyag felületi és/vagy térfogati ellenállását, elektrosztatikus feltöltődését.
- Gőcképzők: szabályozzák a műanyagok kristályosodását és kristályos szerkezetét.

b) Társító anyagok

- Polimerek: polimerkeverékek komponensei.
- Ütésálló adalékok: ezek általában elasztomerek, növelik a műanyag ütésállóságát, törési ellenállását, különösen alacsony hőfokon.

- Vezetőképesseget biztosító anyagok: korom- vagy fémrészecskék.
- Töltőanyagok: növelik a műanyag merevségét, és néha csökkentik az árát.
- Erősítőanyagok: anizometrikus adalékok, igen gyakran szálak, növelik a műanyag szilárdságát és merevségét.

Sorsuk a környezetben

A mikroműanyagok környezeti útját befolyásoló folyamatokról viszonylag keveset tudunk, de útjukat a környezetben jelentősen befolyásolja fizikai-kémiai tulajdonságuk (méret, alak, sűrűség).

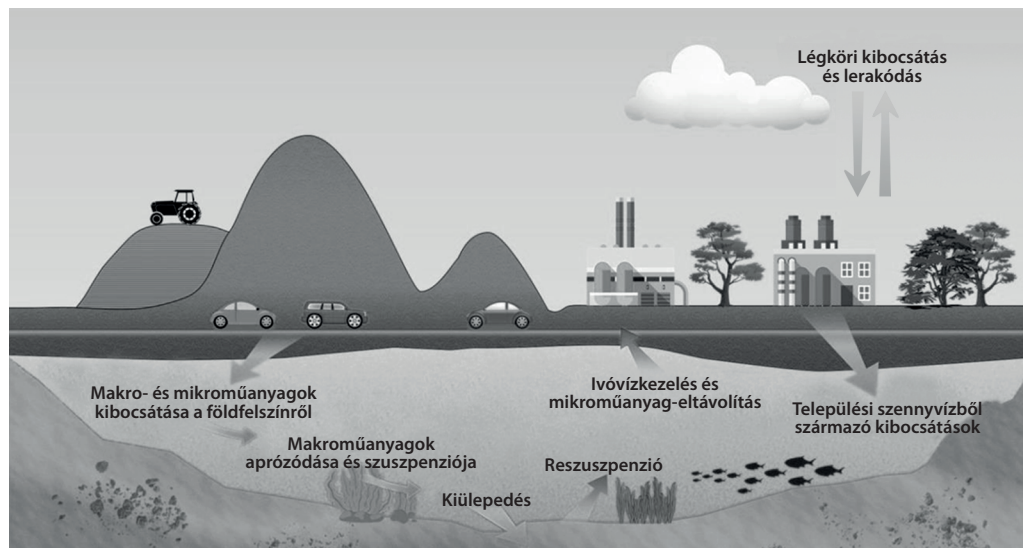
A leggyakoribb tömegműanyagok sűrűsége 0,85–1,41 g/cm³ közötti, így vannak, amelyek a víznél sűrűbbek és lesüllyednek, míg mások kevésbé sűrűek, így a felszínen úsznak. A műanyag sűrűségét a felületén kialakuló biofilm is befolyásolja.

A felhasznált műanyagok nagy része idővel az óceánokba, tengerekbe jut. A Természetvédelmi Világszövetség (IUCN) tanulmánya 7 forrást nevezett meg, amely jelentősen hozzájárul a mikroműanyagok óceánokba jutásához [197]:

1. *Műanyagpelletek*: A legtöbb műanyagot 2–5 mm közötti pellet vagy por formájában forgalmazzák. A gyártás, feldolgozás, szállítás és újrahasznosítás során ezek kisebb vagy nagyobb mennyiségben, véletlenszerűen a környezetbe juthatnak.
2. *Szintetikus textilek*: A textilek mosása során, legyen az ipari vagy házi mosás, a műszálak, műanyag szálak a mosóvízbe, onnan a szennyvíztisztítóba, végül a folyókba, óceánokba jutnak. Számos tanulmány azonosított ilyen szálakat nyílt vizekben, tengeri üledékben, amelyek főként poliészter, PE, akril vagy elasztán voltak. Egyetlen otthoni gépi mosással a polár anyagokból közel 2000 poliészter szál kerülhet a mosóvízbe [192].
3. *Gumiabroncsok*: Használat során a járművek gumiabroncsa folyamatosan kopik. A gumiabroncsok kb. 60%-a szintetikus polimer (SBR, sztirol-butadién kaucsuk), amelyet természetes gumival és adalékokkal kevernek. A levált abroncsdarabok a széllel szállítódnak vagy a csapadékkal lemosódnak.
4. *Útburkolati jelzések*: A közlekedési infrastruktúrák kiépítése és fenntartása során az útburkolati jelek festése során műanyagtartalmú anyagokat (festékek, hőre lágyuló műanyagok, útburkolati polimer szalagok, epoxik) használnak. Az időjárás hatására és a járművek koptatása miatt ezekből mikroműanyagok szabadulnak fel, amelyeket a szél vagy a csapadék nagy távolságokra juttathat el.
5. *Bevonatok*: A tengeri közlekedésben használt járművek bevonatolására használt anyagok, festékek, korrózióálló bevonatok stb.
6. *Kozmetikai termékek (PCP)*: A kozmetikai termékek a mikrogyöngyök mellett más műanyagokat is tartalmaznak, amelyeket a hatóanyagok szállításához, hámosításához vagy a megfelelő viszkozitás eléréséhez használnak. A felhasznált kozmetikumok a szennyvíztisztítókon keresztül vagy közvetlenül a felszíni vizekbe jutnak, például strandolás során.
7. *Városi por (city dust)*: Gyűjtőfogalom, amelynek egyes elemei önmagukban nem jelentékenyek, de együttesen már meghatározó forrásai a mikroműanyagoknak. Például szintetikus cipőtálp, szintetikus konyhai eszközök, műfü, épületburkolatok kopása, csiszológépek szóródása stb.

A mikroműanyag-kibocsátások 2/3-a szintetikus textilekből és gumiabroncsokból származik [197]. A műanyagok felszíni vízbe jutásának legjelentősebb forrásai a mezőgazdasági, illetve lakott területekről lefolyó csapadékvizek, a szennyvíztisztítók és a nem megfelelően kezelt

műanyag hulladék (például illegális hulladékelhagyás, rendezetlen lerakási körülmények) (13. ábra).



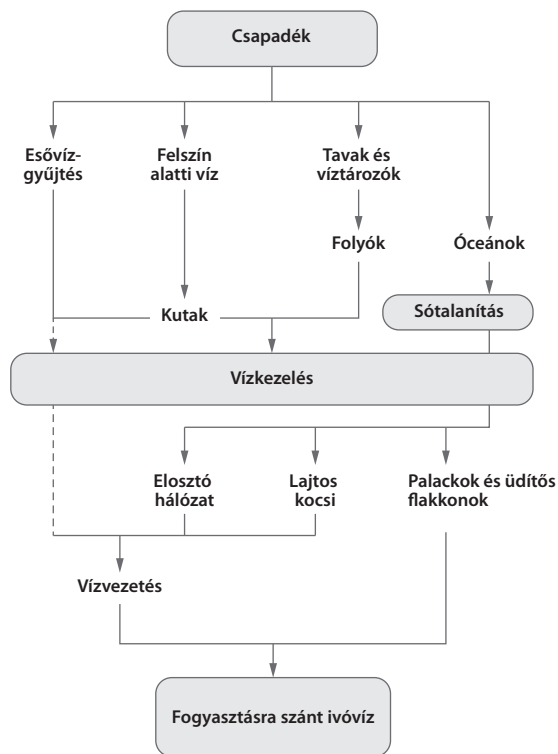
13. ábra: A műanyagok és mikroműanyagok felszíni vízbe jutásának újtai. Készítette: Goda Zoltán [193] alapján

A szennyvíztisztítók 90% vagy afölötti hatékonyságúak a mikroműanyagok eltávolításában, azonban az el nem távolított mikroműanyagok az elfolyó szennyvízen keresztül a felszíni vizekbe jutnak. A szennyvíztisztítás során a mikroműanyagok jelentős része a szennyvíziszapban koncentrálódik, amely jelentős forrása lehet a mikroműanyagoknak, ha bejut a felszíni vizekbe, valamint mezőgazdasági felhasználása során felhalmozódhat a talajban [198]. A mosással, kozmetikumok lemosásával, kiöntésével, háztartási műanyagok kopásával kerülnek mikroműanyagok a kommunális szennyvízbe. Bár a szennyvíztisztítók jelentős mikroműanyag-források, sokkal súlyosabb probléma a szennyvíztisztítás hiánya. Az alacsony vagy közepes jövedelemmel rendelkező országokban a lakosság csupán 33%-a rendelkezik szennyvízelvezetéssel, a maradék 67% helyben kezeli, vagy közvetlenül a talajba vagy a felszíni vizekbe engedi a szennyvizet. Emiatt a szennyvízkezelés hiánya vagy nem megfelelő módja jelentősebb mikroműanyag-forrás [193].

Magyarországon Bordós és munkatársai vizsgálták a mikroműanyagok koncentrációját halastavakban és természetes víztestekben (Zala folyó, Balaton, Tisza-tó) [199]. A vizsgált vízminták 92%-ában tudták kimutatni a mikroműanyag-részecskéket 3,52–32,05 részecske/ m^3 koncentrációban, míg az üledékminták 69%-a tartalmazott műanyag-részecskéket (0,46–1,62 részecske/kg). A domináns polimer a PP és a PE volt a vizekben, PP és PS az üledékben. Magyarország folyóit a Parányi Plasztiktalány projekt (PPT) keretében 2017–18 során vizsgálták, bár az eredmények még nem elérhetők lektorált tanulmányban, a műanyag.hu oldalon [200] közzétett adatok szerint az Ipolyban 1,7 részecske/ m^3 , a Rábában 12,1 részecske/ m^3 koncentrációban találtak mikroműanyagot. A szennyezés a Dunában volt a legmagasabb, 50 részecske/ m^3 . Egy korábbi vizsgálat során a 300 μm -nél nagyobb műanyag darabok száma 4,9/ m^3 volt a Dunában és 23,1 részecske/ m^3 a Tiszában. A Dunában és a Tiszában jellemzően PE, PP és PS műanyagokat találtak. A főként nemzeti parkokon folyó Ipolyban PP, és kisebb mennyiségben

akrilnitril-butadién-sztirolt (ABS, játékok, műszerfalak készítéséhez használják) mutattak ki. A Rábában detektált részecskék elsősorban precíziós alkatrészek, elektronikai termékekhez használt anyagok voltak, például polioximetilén (POM) [200].

A mikroműanyagok a városok, sűrűn lakott települések közelében nagyobb koncentrációban találhatók meg, így adott volt, hogy ivóvízben is elkezdtek vizsgálni a mikroműanyagok jelenlétét. 2017-ben jelent meg az első médiahír a mikroműanyagok ivóvízben való megjelenéséről, amelyet 2018-ban publikáltak [201]. Az ivóvízbe számos forrásból juthat mikroműanyag, amelyet a 14. ábra foglal össze.



14. ábra: A mikroműanyagok ivóvízbe jutásának lehetséges útjai [202]

Koelmans és munkatársai 50 tanulmányt vizsgáltak, amelyben ivóvíz, illetve annak bázisául szolgáló (főként felszíni) vízbázisok mikroműanyag-koncentrációját mérték [203]. A mikroműanyagokat gyakran detektálták felszíni vizekben és ivóvízben, amelyek koncentrációja tíz nagyságrendben változott ($1 \times 10^{-2} - 10^8$ részecske/ m^3). Azonban az egyes tanulmányok minősége és mintavételi módszereik között is jelentős különbségek voltak, ami felhívja a figyelmet a mintavételi módszerek egységesítésének fontosságára, amely az eredmények összevethetőségében is kulcsszerepet játszik. A fenti tanulmányban vizsgált, leggyakrabban detektált mikroműanyagok alapanyaga detektált mennyiség szerint $PE \approx PP > PS > PVC > PET$, amely tükrözi egyrészt az adott műanyag iránti keresletet, valamint a PVC és a PET nagyobb denzitása miatti nagyobb arányú ülepedést. Az alakjukat tekintve a műanyag törmelékek, szálak, hártványok, habok és pelletek fordultak elő leggyakrabban [203]. Az USA-ban két felszín alatti, karszt vízbázison

végeztek vizsgálatot, ahol 17 mintavételi pontból 16-ban találtak mikroműanyagot. Ezek mindegyike műanyag szál volt, 6,4 részecske/l medián koncentrációban, a maximumkoncentráció 15,2 részecske/l volt [204]. Mintenig és munkatársai [205] az ivóvíz nyersvízkivételéhez használt felszín alatti vízben vizsgálták a mikroműanyagok mennyiségét, valamint az ivóvízszerzés több pontján, egészen a fogyasztókig. Viszonylag alacsony koncentrációban találtak mikroműanyagokat (0–7 részecske/m³), az átlag 0,7 részecske/m³ volt. A 3 vizsgált felszín alatti vízkivételi helyen egy helyről mutattak ki polietilén mikroműanyagot [205].

Amikor az ivóvízbázis lehetséges mikroműanyag-szennyeződéséről beszélünk, fontos figyelembe venni a vízbázis típusát. A felszíni vízbázisok legtöbbje tartalmaz mikroműanyagokat, a felszín alatti vizek közül a karszt vízbázisok érzékenyek a felszíni szennyeződésekre, így a mikroműanyagok is könnyen bejuthatnak a felszínről bemosódó csapadékkal, illetve szennyvizekkel. A mélyen található, vízzáró réteggel ellátott felszín alatti vízbázisok nagyobb védelmet nyújtanak a mikroműanyagokkal szemben, azonban teljesen nem lehet kizárni bejutásukat, különösen, ha mesterséges visszapótlást vagy dúsítást is végeznek az adott vízbázisban. Továbbá a mikroműanyagok méretének csökkenésével nanoműanyagok keletkeznek, amelyek fizikai-kémiai tulajdonsága jelentősen eltérhet a mikroműanyagokétól, így azok környezeti migrációjáról még kevesebb információ áll rendelkezésünkre. Mindenképpen további vizsgálatok szükségesek, hogy pontosabb információink legyenek a mikroműanyagok felszín alatti vizekben történő előfordulásáról.

Az ivóvízben talált mikroműanyagok forrása nem csak a vízbázis mikroműanyag-szennyeződése lehet. Az ivóvízbe a vízvezetékéből is kerülhet műanyag az ivóvízhálózatok kialakításánál használt PE- és PVC-anyagokból, illetve a vízvezetékek belső borítására használt epoxigyantákból, PUR-anyagokból. Továbbá a víztisztítás folyamatában számos komponens PP-anyagból áll, a poliamidokat pedig a koaguláció során alkalmazzák. Műanyagokat alkalmaznak a víztisztítás során használt membránszűrőkben is. A palackozott ivóvizek esetében a palack, illetve a palackozás folyamata is potenciális mikroműanyag-forrás. Cox és munkatársai vizsgálataik során a palackozott vízben sokkal nagyobb koncentrációban (94,37 részecske/l) találtak mikroműanyagokat, mint a csapvízben (4,23 részecske/l) [206]. Az amerikai táplálkozási adatok alapján, ha kizárólag csapvizet fogyasztunk, átlagosan évi 4000 mikroműanyag-részecske jut a szervezetünkbe, míg ha ugyanezt palackozott ásványvízből tesszük, átlagosan évi 90 ezer részecske jut a szervezetbe, amely 22-szeres különbséget jelent. A PET-palackban tárolt ivóvízbe a palackozás során a levegőből, valamint a palackból, illetve a PP- és PE-műanyagból készült kupakokból is bekerülhetnek mikroműanyagok [206]. Ez utóbbiakat több helyen szabályozzák, hogy ne oldódjanak ki belőlük adalékok, monomerek vagy lágyítók olyan koncentrációban, amely aggodalomra adna okot [193].

A mikroműanyagok csapvízben való jelenléte azért okozott nagy lakossági aggodalmat, mert az ivóvízzel a szervezetbe juthatnak, és még nem ismerjük hatásukat a szervezetre. Cox és munkatársainak számításai alapján gyermekek számára a palackozott víz fogyasztása a legnagyobb mikroműanyag-forrás, míg a felnőttek számára a levegővel belélegzett részecskék a legjelentősebb források. Az amerikai táplálkozás alapján számított, szervezetbe jutott éves mikroműanyag-mennyiség 81–123 ezer részecske, amely nem tartalmazza a táplálkozás során a levegőből az ételre jutó részecskéket, valamint a hiányzó adatok miatt a számítás során nem tudták figyelembe venni az olyan gyakran fogyasztott élelmiszereket, mint a marhahús, szárnyasok, tejtermékek, gabonák, zöldségek fogyasztásából adódó mikroműanyag-fogyasztást [206].

A levegőbe jutó mikroműanyagok legnagyobb része feltehetően a gumiabroncsok és az utak kopásából adódik, de a ruhaszáritók, textilek kopása, a szél által szállított szennyvíziszap,

építkezési anyagok is hozzájárulnak a levegőben található műanyagrészcscékhez. Párizsban vizsgálták a levegőben található szálak mennyiségét. Beltéri levegőben 0,4–59,4 részecske/m³ volt, a medián érték 5,4 részecske/m³, míg a kültéri levegőben ez jelentősen alacsonyabb, 0,3–1,5 részecske/m³ volt. A szálak 67%-a természetes eredetű volt, míg a maradék 33% köölaj-származék, amelyek közül a PP volt a domináns [193]. A tengeri élelmiszerek fogyasztásával is jelentős mikroműanyag kerülhet az emberi szervezetbe [206]. A tengeri élelmiszerek közül a kagylófélékben találták a legtöbb mikroműanyagot, a vizsgálatok közül a legnagyobb átlagérték 4 részecske/g volt, az európai vizsgálatokban ez kevesebb mint 0,5 részecske/g [207]. Ennek egyik oka, hogy fogyasztásuk a tápcsatornával együtt történik. Számítások alapján azonban a levegőből az ételre hullott mikroműanyag-mennyiség jelentősen nagyobb (68 415 részecske/év/fő), mint ami a kagylófélék fogyasztásával jut a szervezetbe (4620 részecske/év/fő) [193].

A tengeri élőlényekben a tápláléklánc minden szintjén dokumentálták a mikroműanyagokat. A tápláléklánc alján található szűrőgetők az apró műanyagrészcskéket felveszik, így azok bekerülnek a táplálékláncba. Egyes polimerek az egész vízoszlop mentén megtalálhatók (például PET, poliamid, PC, PVC), míg mások a felszínre (PP, politejsav alapú műanyagok) vagy a felszín alatti vizekre (POM, ABS, polimetil-metakrilát alapú műanyagok) korlátozódnak [208]. Mikroműanyagokat detektáltak halakban, gerinctelenekben és madarakban, amelyek legnagyobb része műanyag szál és törmelék volt, hasonlóan a vizekben és az üledékben található mikroműanyagokhoz. Szigorú módszertant követve 400 halat vizsgáltak meg az Északi-tengerben, csupán egyetlen halban találtak 2 darab mikroműanyagot. A Balti-tengerben vizsgált halak és plankton mintázása alapján az elmúlt 30 évben nem tapasztaltak megnövekedett mikroműanyag-szennyezést az élőlényekben. Viszont egy 2017-es brit vizsgálat során a halak kb. 20%-a tartalmazott mikroműanyagot, amelyek 93%-a műanyag szál volt [209]. 2014-ben a Dunában élő halakat elemző vizsgálat (lektorált lapban nem publikált) eredményei alapján egyetlen halegyed bélrendszerében sem volt mikroműanyag a 30 vizsgált mintában. Egy másik dunai vizsgálat során 840 halat vizsgáltak, és két részecskét találtak [210].

Hatásuk

Kévs az a szakirodalom, amely vizsgálta a szervezetbe került mikroműanyagok hatását, az eredmények többsége vízi élőlényeken végzett vizsgálatokból, illetve ökotoxikológiai tesztekéből származik, epidemiológiai vagy humán vizsgálatokat még nem végeztek [193]. A mikroműanyagokkal kapcsolatos potenciális káros hatások három forrásból eredhetnek:

- a felületükön kialakuló biofilm;
- kémiai hatás, amely a részecskékből kioldódó káros anyagokból, illetve a felületen adszorbeált mikroszennyezőkből adódik;
- fizikai hatás, amelyet a műanyagrészcscse közvetlen érintkezése jelent a gazdaszervezet szöveteivel.

Minden felületen, amely nedvességgel érintkezik, *biofilm* alakulhat ki. Ez alól a műanyagok és a mikroműanyagok sem kivételek. A műanyagok felületén kialakuló biofilm közösséget Zettler és munkatársai *plasztiszférának* nevezték el [211], amelynek mikroba-összetétele eltér az azt körülvevő vizes élőhelytől. Az Északi- és a Balti-tengerben a potenciálisan patogén *Vibrio* spp.-t mutatták ki PE-, PP- és PS-részecskéken, ami arra utal, hogy a mikroműanyagok forrásai lehetnek patogén mikroorganizmusoknak [212]. Toxintermelő mikroorganizmusok feldúsulását is kimutatták a mikroműanyagok felületén található biofilmben, például a *Pfiesteria piscicida*

dinoflagellátát, amelyet összefüggésbe hoztak az algavirágzással és a tömeges halpusztulással [213]. Különösen azok a mikroműanyag-részecskék adhatnak okot aggodalomra, amelyek a szennyvíztisztítókból fertőtlenítés nélkül kerülnek a környezetbe [214].

A műanyag gyártása során felhasznált, a használat során a környezetbe, illetve a mikroműanyagok szervezetbe kerülése esetén potenciálisan *kioldódó anyagok* veszélyt jelenthetnek az élő szervezetre. Az egyes műanyagok ismert káros hatásai röviden az alábbiak [194]:

- polivinil-klorid – **PVC**: a legkárosabb műanyagként tekintik magas klór- és adalékanyag-tartalma miatt, valamint készítése és égetése során dioxin keletkezik;
- polikarbonát: egyes termékeket még mindig biszfenol-A-ból készítenek, amely az endokrin rendszert károsító anyag;
- poliakrilnitril – **PAN** és **ABS**: a Nemzetközi Rákkutatási Ügynökség potenciális karcinogénnek tekinti;
- polisztirol – **PS** és kopolimerei: a sztiren monomer feltételezett karcinogén, akut toxicitást okozhat, és zavarja a hormonrendszert [215];
- epoxigyanták: biszfenol-A oldódhat ki belőlük;
- polietilén-tereftalát – **PET**: ftalátok oldódhatnak ki, ami PET-palackokban tárolt ásványvíz esetében is kimutatható [150].

A mikroműanyagok harmadik potenciális veszélyforrása, hogy képesek különböző toxikus anyagok *felületi adszorpciójára*, amelyek a táplálékkal felvett mikroműanyagokon keresztül az élő szervezetbe juthatnak. Ezek lehetnek szerves anyagok, köztük hidrofób szerves szennyezők (HOC, *hydrophobic organic contaminants*), fémek (köztük nehézfémek, például kadmium, cink, nikkel, ólom), fémoxidok. Emiatt a szennyező anyagok vektorának is tekinthetők a mikroműanyagok. Toxikus anyagokkal borított műanyag részecskék szervezetbe jutása az adott kémiai anyag bioakkumulációját okozhatja, illetve károsíthatja az érintett élőlényt is. Ennek szintje azonban nem ismert, feltehetően fajspecifikus és az expozíció időtartama is befolyásolja. Az eddigi szakirodalmi adatok alapján mind a laboratóriumban, mind terepen igazolták, hogy a mikroműanyagok hatékonyan képesek szerves szennyezőket megkötni, amelyek típusa és mennyisége nagyban függ a polimer típusától és a szabad felszíntől. Rochman és munkatársai tengeri halaknál kimutatták a mikroműanyagok elfogyasztásával összefüggő szerves mikroszennyezők bioakkumulációját, amely a májban elváltozásokat okozott [216].

A szerves szennyezőtől függően hónapok, akár évek is lehetnek, míg kialakul az egyensúly a részecske és a környezet között, míg a felvett szennyező leadása 14 naptól több száz évig is tarthat. Emiatt egyes kutatók a mikroműanyagokat a szerves szennyezők szüllyesztőjének tekintik, míg mások attól tartanak, hogy a szennyező anyagok a bélrendszerbe jutva kioldódnak, így a mikroműanyagokra potenciális HOC-vektorként tekintenek. Ennek eldöntésére további, megfelelően kontrollált vizsgálatok szükségesek [209].

Az Európai Élelmiszerbiztonsági Hatóság becslése alapján, amennyiben a szerves szennyező anyag maximum adszorpciójával és a felvételt követően a maximális kioldódással számoltak, a szerves szennyező anyag bevitelének nagyon kis mértékű növekedésére lehet számítani: **PCB** <0,006%, **PAH**-vegyületek <0,004%, **BPA** ~2%. Az ENSZ Élelmészeti és Mezőgazdasági Szervezete is hasonló eredményre jutott a **PCB**-, **PAH**-, **DDT**-, **BPA**- és **PBDE**-vegyületek esetén [193].

A mikroműanyagok *fizikai hatásukat* a szervezetbe jutva fejtik ki, amelynek két fő útja a tápcsatornán és a légzőszerveken (például halaknál a kopolytún) keresztül történő bekerülés [215].

A levegőben szállított, légutakon keresztül bejutó mikroműanyagokról még kevés információ áll rendelkezésre. Nejlonszálakat készítő üzemből a munkásoknál nem találtak megnövekedett rákos elváltozásokat, azonban nagyobb volt a légúti irritáció, a munkások 4%-ánál mutattak ki

a munkakörrel összefüggő intersticiális tüdőbetegséget, amely köhögéssel, légszomjjal és csökkent tüdőkapacitással jár (*flock workers disease*). Kimutatták, hogy a nejlonszálak allergiás reakciókat tud kiváltani, amely foglalkozási asztmát okozhat. Egyes műanyag szálak képesek behatolni a tüdő mélyebb rétegeibe, ahol a 15–20 µm hosszúságú szálak perzisztálhatnak [217, 218].

Laboratóriumi vizsgálatokban, bár bizonyos esetekben 100%-os ürülést is igazoltak, kimutatták, hogy számos szervezet a tápcsatornáján keresztül felveszi a műanyagrészcskéket [219]. Feltehetően az ürülés ideje, a bélrendszer összetétele, a mikroműanyag alakja, fajtája, mind befolyásolja, hogy milyen gyorsan ürül a részecske, illetve a tápcsatornában töltött idő alatt kifejti-e káros hatást a szervezetre [219]. Halaknál a tápcsatorna mellett a kopoltyúban, a májban és az izomban is találtak mikroműanyagokat, halak esetében felhalmozódást és szöveti károsodást is kimutattak az érintett szövetekben [215]. Zebradániónál a májból mutattak ki mikroműanyagot, amelyet összefüggésbe hoztak antioxidatív enzimaktivitással és a metabolitösszetétel megváltozásával. A szövettani vizsgálatok alapján a mikroműanyagok erős gyulladásos reakciót váltottak ki a célszövetekből [215]. Limonta és munkatársai megvizsgálták, hogy HDPE és PS mikroműanyagok, környezeti koncentrációban milyen génexpresszió-változást okoznak zebradániónál, és azt találták, hogy az immunitással és az anyagcsereutakkal kapcsolatos gének expressziója megváltozott a májban, a mikroműanyagok jelenléte hatással volt a kopoltyúk és a tápcsatorna épségére (nagy számú fehérvérsejtet találtak), valamint befolyásolta a zebradániónál a viselkedését [215].

A tápcsatornára kifejtett hatást a mikroműanyagok alakja is jelentősen befolyásolja. A *Hyalomma azteca* (mexikói bolharák) felemáslábú rákon végzett vizsgálatoknál a polipropilén rostok toxicitása nagyobb volt a PP-gyöngyökhöz képest. Hasonlót tapasztaltak a mesterséges nanorészecskékénél is, a cink-oxid nanopálcák nagyobb toxicitást okoztak, mint a nanogömbök zebradániónál [194]. Mindkét esetben a szabálytalan, tűszerű képlet könnyebben tapad mind a külső, mind a belső felületekhez, ezáltal erősebb hatást tud kifejteni. Egérvizsgálatban kimutatták, hogy az 5 µm PS mikroműanyagok felhalmozódnak a bélben, befolyásolják a bélfal védekezőfunkcióját, megváltoztatják a bél mikroba-összetételét, és metabolikus elváltozásokat okoztak [191].

A nanoműanyagok hatása a környezetre és az emberi egészségre feltehetően eltér a mikroműanyagokétól. Fontos lenne egységes álláspont a mikroműanyagok alsó mérethatáiról, illetve az alosztályok meghatározásáról, mivel a méret csökkenésével megváltozhat a részecske tulajdonsága, ami befolyásolja a környezeti sorsát, illetve növelheti esetleges negatív hatását az érintett élő szervezetekben. Továbbá elengedhetetlen a mintavételi módszerek egységesítése, amely a különböző laboratóriumok méréseit összevethetővé teszi.

Fejezetzáró kérdések

1. Mik azok a nano- és mikroműanyagok?
2. Melyek a mikroműanyagok legfontosabb forrásai, hogyan jutnak a környezetbe?
3. Mi a mikroműanyagok sorsa a környezetben?
4. Melyek a mikroműanyagok szervezetbe jutásának legvalószínűbb forrásai?
5. Melyek a mikroműanyagok egészségre gyakorolt hatásai?
6. Mit tudunk a nanoműanyagok egészségre gyakorolt hatásairól?