

2. A tengerek szennyezői, a műanyagok

Absztrakt: A műanyagok szinte mindenütt megtalálhatóak a tengeri környezetben, a városi strandoktól és erősen szennyezett parti vizektől kezdve egészen a távoli fekvésű területekig. Ilyenek például az elhagyatott szigetek, a tengerfenék és a sarkvidékek. A mikroműanyagokat a nyílt óceán és a zárt tengerek minden élőhelyén (a partokon, a vízfelszínen, a vízoszlopban és a tengerfenéken) kimutatták már. A műanyag környezetre gyakorolt hatása többféle lehet: élőhelypusztulás, alternatív élőhelyet és táptalajt biztosít az élőlények megtelepedéséhez, valamint a bióta lenyelheti a műanyagot. A tengeri élőlények többféle módon kerülhetnek kapcsolatba a mikroműanyagokkal. Ezek a kölcsönhatások számos negatív vagy potenciális hatást eredményezhetnek, amelyeket laboratóriumi vizsgálatok során tanulmányozták.

2.1. Műanyagtermelés és hulladékgyártás

A műanyag a szintetikus polimerek csoportjára használt gyűjtőfogalom. Ezeket az anyagokat úgy állítják elő, hogy eltérő tulajdonságokkal rendelkezzenek (UNEP, 2016). A műanyag polimerek a műanyagok előállításához használt építőegységek, amelyeket a gyártás során különböző adalékanyagokkal keverhetnek össze, hogy fokozzák a polimerek előnyös tulajdonságait. Az adalékanyagok lehetnek lágyítók, antioxidánsok, égésgátlók, UV stabilizátorok, csúsztatók (formaleválasztók) és színezékek. A hőre lágyuló műanyagok leggyakoribb példái: a polietilén (PE, nagy és kis sűrűségű [HDPE és LDPE]), polietilén-tereftalát (PET), polipropilén (PP), polivinil-klorid (PVC) és a polisztirol (PS, beleértve az expandált polisztirolhabot: EPS). A hőre keményedő műanyagok közül a leggyakoribbak a poliuretán (PUR) és az epoxigyanta bevonatok. Ezeket a polimereket különféle termékek gyártásához használják (3. táblázat, Plasticseurope, 2016).

A műanyagok fő felhasználási területei az Európai Unióban: csomagolás (39,9%, nagy része egyszer használatos), építőipar (19,7%), autóipar (8,9%), elektronikai ipar (5,8%), mezőgazdaság (3,3%) és egyéb felhasználási területek (22,4%, például fogyasztási cikkek és háztartási eszközök, bútor, sport, egészség és biztonság). Amikor polimerek elkezdtek befolyásolni a piaci keresletet, magától értetődően a kis sűrűségű polietilén (LDPE), valamint a polipropilén (PP) lett a legszélesebb körben használt csomagolóanyag. A nagyipari műanyaggyártás az 1950-es évek elején kezdődött, amikor a termelés szintje 2 millió tonna volt évente. 2015-re ez a mennyiség elérte az évi 322 millió tonnát (Plasticseurope, 2016).

A műanyag termékek használatának vitathatatlanul sok előnye van; ezért az ilyen termékektől való függés következtében megnőtt a tömegtermelés. Akadályok a már nem használható műanyagok kezelésénél jelentkeznek. Ez a műanyag életciklusának minden szakaszára vonatkozik: az öntéstől és az elszállításától a felhasználás során keletkező veszteségig, egészen az élettartam végéig. Akkor a műanyagokat már nem lehet többé

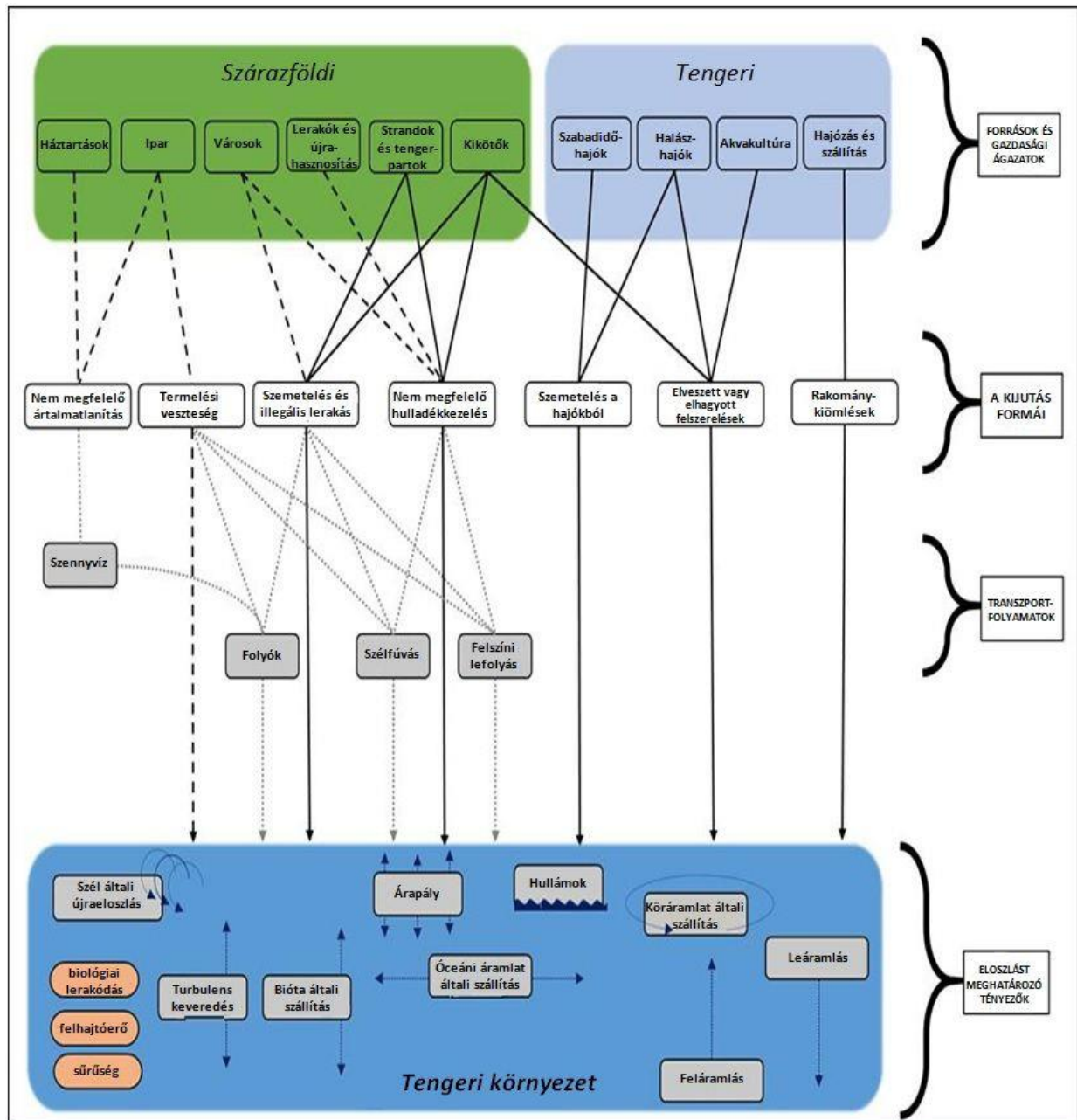
felhasználni. A keletkezett szilárdhulladékot megfelelően kezelni kell, hogy ne kerülhessen ki a környezetbe. Az, hogy az eldobott műanyagok milyen mértékben jutnak a környezetbe hulladék formájában, függ a szilárdhulladék-begyűjtés, a hulladékkezelés és a szennyvíztisztító létesítmények hatékonyságától, de a környezeti feltételek is befolyásolhatják (GESAMP, 2015). Előfordulhat, hogy a hulladékkezelési és újrahasznosítási infrastruktúra kapacitása a beérkező hulladék mennyiségéhez viszonyítva nem megfelelő, esetleg a nagyvárosi területeken nem elég hatékony. Az is előfordul, hogy a fogyasztók megfelelően gondoskodnak a hulladékok elhelyezéséről: újrahasznosító üzemekbe vagy hulladéklerakókra juttatják el azokat, de a kedvezőtlen időjárási viszonyok miatt a hulladék kijut a környezetbe. A mikroműanyagok a fogyasztási szokások következtében is kikerülhetnek a környezetbe a mikrogöngyöket tartalmazó kozmetikumok és tisztálkodószerek használata vagy szintetikus ruhaneműk mosása révén. Ilyenkor a kis műanyagdarabok a berendezés hatékonyságától, a tisztítási fázisok számától és az alkalmazott technológiától függően átjuthatnak a szennyvíztisztító rendszeren (Napper és mtsai., 2015; Ziajahromi és mtsai., 2016; Mahon és mtsai., 2017).

Regionális, országos és nemzetközi szinten eltérhet, hogy a szennyvíztisztító telepekről mennyi mikroszál kerül a környezetbe. Több kutató szerint, a mikro- vagy mikroszkópikus hulladékot is mikroműanyagként kell tekinteni (Norén és Naustvoll, 2011; Magnusson és Norén, 2011), például a gumidarabokat és más egyéb polimereket, amelyek szintén káros hatással lehetnek a környezetre és a biótárra. Ugyancsak mikroműanyagként számítanak a gumiabroncs darabok, a közút kopásából származó törmelékek és a műfüvek. Svédországban például az ilyen típusú részecskék kutatása prioritást élvez. A szárazföld, az édesvíz, a torkolatok és a tengerek a tömegtermelés, a tömegfogyasztás és a műanyag hulladékok nem megfelelő kezelése miatt váltak szennyezetté (GESAMP, 2016). Becslések szerint 4,8-12,7 millió tonna ilyen típusú műanyag hulladék jutott a világ óceánjaiba (Jambeck és mtsai., 2015).

2.2 A műanyagok bejutása a tengeri környezetbe

A különböző méretű műanyagok többféleképpen juthatnak az óceánba, ugyanakkor nem teljesen ismert, hogy az egyes források mennyire szennyezőek (2. ábra). Napjainkban még nem lehet megbízható kvantitatív összehasonlítást végezni a műanyagterhelések, a szennyezőforrások és -ágazatok között, ami jelentős hiányosság (UNEP, 2016). Már próbálták felmérni az egyes forrásokat (pl. Jambeck és mtsai., 2015), de a jelentésekben közzétett adatokat fenntartással kell kezelni a sok bizonytalanság és az alkalmazott extrapolációk miatt. Szárazföldi eredetű műanyagszennyezés történhet közvetlenül a partokról, vagy folyókon és a szennyvízvezetékeken keresztül. A használatban lévő műanyagok az időjárási események miatt véletlenszerűen kerülnek a környezetbe, de származhatnak a hulladékgazdálkodási folyamatból is. A tengeri eredetű szennyezés adódhat hajózási tevékenységből, véletlen káreseményből vagy szándékos szemetelésből (2. ábra).

2. ábra: Makro- és mikroműanyagok forrásai és közlekedési útvonalai a tengeri környezetben



A makroműanyagok szárazföldi eredetű forrásai például az ételes és italos dobozok, a háztartási cikkek, a csomagolások, az építkezések és a turizmus. A makroműanyagok tengeri eredetű szennyező forrásai a halászati és hajózási ágazatok. Az elhagyott, elvesztett vagy más módon eldobott halászeszközök (ALDFG) a halászati és az akvakultúra ágazatok legfőbb műanyag hulladék-forrásai, azonban relatív hozzájárulásuk regionális és globális szinten sem ismert (GESAMP, 2016). Az ALDFG-k leginkább a halássterületek környékén jelennek meg, de nagy távolságokra is eljuthatnak. Az akvakultúrában alkalmazott eszközök elsősorban műanyagból készülnek. Amennyiben ezeknek az eszközöknek a karbantartása elmarad vagy megrongálódnak a környezeti viszonyok miatt, jelentős mennyiségű műanyag törmelék keletkezhet. A hajózás során keletkező hajókonyhai és egyéb hulladékok tengerbe ürítése a MARPOL, a tengeri környezet védelméről szóló nemzetközi egyezmény alapján tilos.

Szállítmányozás közben viszont előfordulhat, hogy az áruk rakodás alatt elvesznek, illetve a rakományt elhagyják a szállítás során.

A mikroműanyagok több formában juthatnak a környezetbe. Elsődleges mikroműanyagok azok az anyagok, amelyeket 5 mm-nél kisebb méretben gyártanak. A másodlagos mikroműanyagok úgy alakulnak ki, hogy a nagyobb darabok széttöredeznek a környezetben és mikrométeres méretűek lesznek (Arthur és mtsai., 2009; Cole és mtsai., 2011). Többféle folyamat eredményezheti azt, hogy nagyobb műanyag tárgyakkól mikroműanyagok keletkeznek, például a szétaprózódás, az UV-sugárzás hatására bekövetkező degradáció, oxidáció és a hullámozás (Andrady, 2011; Andrady, 2015). Ezért a mikroműanyag-szennyezés a közeljövőben a környezeti és a jelenlegi mennyiség aprózódása és a jövőbeni műanyagtermelés következtében növekedhet. Szárazföldi eredetű mikroműanyag források a következők lehetnek: műanyaggyártóktól származó nyers műanyag granulátumok (amelyeket a műanyaggyártásban, illetve nagyobb műanyag termékek öntésénél használnak), kozmetikumokba és tisztálkodószerekbe kevert műanyag gyöngyök és szemcsék, textilekből és ruhaneműkből származó szintetikus szálak, valamint a használatból eredő gumiabroncs-kopás során a levegőbe kerülő rostok és törmelékek (2. ábra). A monomerek és polimerek a műanyagok építőegységei, de felszabadulhatnak a műanyagokból, aminek hatására azok törékennyé válnak és szétaprózódnak a környezetben. Előfordult, hogy a tengervízben és az üledékekben is kimutattak a partmenti régiókból származó sztírol monomereket, dimereket és trimereket (Known és mtsai., 2015). Az adalékanyagokat a gyártás során keverik a műanyagokhoz, habár a felhasznált mennyiségek nagyban eltérnek. Becslések szerint az adalékanyagok az előállított műanyagok teljes tömegének mintegy 4%-át teszik ki (Andrady & Neal, 2009; Lambert és mtsai., 2014).

2.3 A műanyagok eloszlása a tengeri környezetben és a biótában

A tengeri környezetben a műanyagok mind az öt környezeti mátrixban megtalálhatók, azaz a partokon, a vízfelszínen és a vízoszlopban, a tengerfenéken, az üledékekben és a biótában. Azt, hogy a műanyagok hogyan oszlanak szét és viselkednek a tengeri környezetben, befolyásolhatják a műanyagok jellemzői és tulajdonságai, valamint a környezeti viszonyok, amelyek magukban foglalják a mátrixokon belül és a közöttük lejátszódó folyamatokat. A műanyagoknak különböző jellemzői vannak, amelyeket a gyártásuk során felhasznált polimerek határoznak meg. A polimerek ezen tulajdonságai befolyásolhatják a viselkedésüket a környezetben. A környezeti eloszlás vonatkozásában például a műanyagok tengervízhez viszonyított sűrűsége az egyik ilyen mérvadó tulajdonság. A $0,90 - 1,39 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű műanyagok (1. táblázat) és azok a műanyagok, amelyek sűrűsége kisebb, mint az őket körülvevő víz, a felszínen fognak lebegni. Amelyeknek sűrűsége nagyobb, mint a tengervízé, azok lesüllyednek.

1. táblázat: Gyakori műanyagfélék, specifikus sűrűségük, piaci részesedésük, példákkal. Ezen értékek függenek a hőmérséklettől és a tenger sótartalmától, valamint a földrajzi elterjedéssel és a vízmélységgel változnak

Anyag	Sűrűség	Piaci részesedés (%)	Példák
Polietilén (PE)	0,91–0,94	HD: 12,1; LD: 17,3	Táskák, flakonok, halászeszközök
Polipropilén (PP)	0,90–0,92	19,1	Kötelek, kupakok
Sztirol-butadién/sztirol-butadién gumi (SBR)	0,94	-	Tetőfedő anyagok és gumiabroncsok
Tiszta víz	1,00		
Expandált polisztirol (EPS)	0,96–1,05	lásd PS	Csalisdobozok, úszók, csomagolás
Tengervíz	~1,02–1,029		
Polisztirol (PS)	1,04–1,09	6,9	Szerszámok, csomagolás
Akrilnitril-butadién-sztirol	1,03–1,11	-	Elektronikai eszközök, gépjárművek utastere
Akril	1,09–1,20	-	Textilek, festékek
Polivinil-klorid (PVC)	1,16–1,30	10,1	Bóják, halászeszközök
Polamid vagy nylon (PA)	1,13–1,15	-	Haláskötelek, textilek
Poliuretán (PUR)	1,2	7,5	Szigetelés
Cellulóz-acetát vagy műselyem	1,22–1,24	-	Textilek, cigaretta filterek
Polietilén-tereftalát (PET)	1,34–1,39	7,1	Flakonok és egyszer használatos műanyagok
Poliészter gyanták	> 1,35	-	Textilek
Politetrafluoretilén (PTFE) vagy Teflon	2,2	-	Műanyag szigetelőanyagok

Forrás: Plasticseurope, 2016.

Az összes gyártott műanyagból az Európa számára készített polimerek tömegének kb. 50%-a a tengervízben lebeg (Plasticseurope, 2016); a polietilén (PE), és a polipropilén (PP) az édesvízben és a tengervízben egyaránt lebeg, míg az expandált polisztirol (EPS), polietilén (EPE) és polipropilén (EPP) csak a tengervízben lebeg. Az eredendően is úszásra képes műanyagok és a levegőt tartalmazó tárgyak azonban a felső vízrétegben fognak lebegni, ahogyan az a polisztirol esetében közismert. A lebegőképesség a polimerekhez adott adalékanyagok mellett (Andrady, 2015) a környezeti feltételektől is függ: az időjárástól és a biológiai lerakódásoktól (a diszturbanciával és turbulenciával együtt).

A tengerben úszó műanyagok az Északi-sarktól az Antarktiszig mindenhol megtalálhatók. A vízfelszíni lefolyás, az áramlatok és a vízrétegek keveredése felelős azért, hogy a műanyagok az adott óceánon belül és az egyes óceánok között milyen gyorsan és milyen messzire jutnak, valamint azért, hogy a szárazföldről a tengerekbe kerülnek (UNEP, 2016; GESAMP, 2015). A nyílt óceánon a kiterjedt, állandó jellegű felszíni áramlatok mintázata jellemezi a vizek áramlását, valamint uralja a lebegő tárgyak passzív szállítását. Az olyan állandó óceáni jellemzők, mint a feláramlási zónák akkumulációs zónái és az óceáni köráramlatok összegyűjthetik a lebegő tárgyakat. Például az Indiai-óceánban, a Csendes-óceán és az Atlanti-óceán északi és déli részein található öt szubtrópusi köráramlat viszonylag magas koncentrációban tartalmaz lebegő műanyagokat, a mikroműanyagokat is beleértve. A nagyobb lebegő tárgyakat a szél a partokra sodorhatja, amely tárgyak felhalmozódhatnak a partokon és a távoli óceáni szigeteken, az eredeti forrásuktól jelentős távolságra. Az olyan nagyvárosi és népszerű idegenforgalmi partmenti régiók, ahol nem

megfelelő hulladék-ártalmatlanítás és -kezelés, valamint intenzív halászat zajlik, általában bővelkednek a műanyagokban. A folyók és folyótorkolatok ezen felül helyi szinten képesek befolyásolni a part menti áramlatokat.

A lebegő műanyag törmelékét a szelek és az óceáni áramlatok szállítják a felső vízrétegben. A műanyagok hosszú ideig a vízoszlopban (pelágikus régió) tartózkodhatnak, amíg lesüllyednek a tengerfenékre, vagy lerakódnak a partokon. A lebegő szemét olyan környezeti hatások következtében, mint a tengervíz, napsugárzás és a hullámtevékenység (Andrady, 2011), idővel szétmállik és törékeny lesz. Ezek a darabok végül mikroműanyagokká töredeznek. Az időjárás, a biológiai lerakódás, a szél, a hullám, az áramlat, az árapály jelenség azonban – bizonyos mértékig – összekeverheti a műanyag darabokat a vízoszlopban.

A tengeri eredetű műanyagok általában a part mentén találhatóak. A makroműanyagok tekintetében ezek a partmenti területek kiemelt figyelmet kaptak. Nehéz azonban az ezeken a területeken talált hulladékok koncentrációit összehasonlítani egymással, mert a különböző módszerek és az adatszolgáltatási mértékegységek (például a hulladékok területenkénti darabszáma vagy az összsúly) különbözőek. Néhány gyakori mintázat azonban megfigyelhető volt, főként a városi és turisztikai övezetek közelében jelentkező nagyobb hulladékterhelés (Barnes és mtsai., 2009). Az áradások és heves időjárási események szintén növelik a parton talált hulladékok darabszámát. Ennek oka az, hogy a szállítás következtében egyre nagyobb mennyiségben kerülnek a hulladékok a partra, vagy nagyobb mennyiségben rakódnak le dagály és viharok után. A tengerpart-megfigyelő rendszerek szolgáltatják a legátfogóbb adatokat a műanyagokról, jelenleg azonban nehéz számszerűsíteni a mikroműanyagok szintjét a partokon, bár regionális és helyi szinten néhány példa rendelkezésre áll (Lusher, 2015). A tengerpartokon nem csak a felszínen, hanem eltemetve is találhatóak műanyagok (Turra és mtsai., 2014). A makro- és mikroműanyagok partokra gyakorolt ökológiai hatásai jelenleg nem tisztázottak (GESAMP, 2016).

A tengeri élőlények környezeti mátrixként viselkednek, ha a belükben vagy a különböző szöveteikben műanyagok találhatóak. A bióta számos, különböző trofikus szintű fajáról kimutatták, hogy műanyagokat nyel le (Kühn és mtsai., 2015; GESAMP, 2016). A műanyagok felvételének különböző okai vannak. A felvétel lehet direkt fogyasztás eredménye, például a táplálék összetévesztése a műanyaggal, és másodlagos fogyasztás is, amely során már az elfogyasztott zsákmány tartalmaz mikroműanyagokat. A műanyagok lenyelésével kapcsolatos további információkért lásd a 2.4. bekezdést.

2.4. A műanyagok hatása

A műanyagok tengeri ökoszisztémára gyakorolt környezeti hatásai sokfélék lehetnek: a siralmas látványt nyújtó szennyezett partoktól kezdve, a takarítás gazdasági költségein keresztül, a makroműanyagok látható hatásáig a tengeri biótára. A következmények nagyban függenek az adott műanyag méretétől. A következő bekezdésben bemutatjuk a műanyagok hatásait, amelyeket három különböző kategóriára lehet osztani: a) a környezetre gyakorolt hatások, b) a biótára gyakorolt hatások és c) a gazdaságra és társadalomra gyakorolt hatások.

2.4.1. Környezetre gyakorolt hatás

A nagyméretű műanyag darabok befolyásolhatják az élőhelyek minőségét. A szellemhalászat például negatívan befolyásolja a tengeri élővilágot (Stelfox és mtsai., 2016), míg az ALDFG-knek a fenéklakó életközösségekre lehet káros hatása. A makroműanyagok oxigénhiányos állapotot idézhetnek elő az üledékben (Mordecai és mtsai., 2011; Green és mtsai., 2015), ezáltal károsíthatják a fenéklakó életközösségeket. A műanyagok számos faj számára élőhelyként is szolgálhatnak. A lebegő műanyagokon a tengeri bióta változatos életközösségei, például a gerinctelenek és a mikrobák (Barnes és Milner, 2005; Kiessling és mtsai., 2015) telepedhetnek meg. A mikroműanyagokon biofilmek képződhetnek vagy kolóniák alakulhatnak ki, mert a műanyagok felülete szerves tápanyagokat köt meg, ez pedig vonzza a mikrobiális szervezeteket (Oberbeckmann és mtsai., 2015). Ha az élőlények megtelepednek a lebegő műanyagokon, befolyásolhatják a tárgyak lebegőképességét, degradációját és perzisztenciáját. A műanyag pedig segíti az úszó életközösségek diszperzióját az óceáni élőhelyek között.

2.4.2. Biótára gyakorolt hatás

A németországi Alfred Wegener Intézet (AWI) megjelentette a „Litterbase” nevű adatbázist, amelynek célja, hogy összegyűjtse és megjelenítse a műanyag elterjedésével kapcsolatos globális információ-forrásokat, és tartalmazza az elfogyasztott műanyaggal kapcsolatos adatokat is. Az adatbázis élő térképen jeleníti meg az ismert tengeri műanyag hulladékokat, amelyhez az adatokat szakmai publikációkból gyűjtötték össze (<http://litterbase.awi.de>). Az interaktív térkép összefoglalja a megjelent tanulmányokat, és segítségével a felhasználók áttekintést kaphatnak a műanyagok mennyiségéről és elterjedéséről, valamint a műanyag és az élővilág kölcsönhatásáról – mint például a lenyelés, a belegabalyodás és a kolonizáció.

A média egyre nagyobb figyelmet szentel a makroműanyagok biótára gyakorolt hatásának. A halászeszközökbe vagy háztartási termékekbe történő belegabalyodás rendkívül szembetűnő probléma, hiszen látványos képekkel, lesóványodott vagy elhullott egyedek bemutatásával szemléltetik. A makroműanyagok lenyelésének hatása szintén látványos probléma.

Korábban a teknősök, madarak és emlősök hulladékban történő fennakadása kapta a legnagyobb figyelmet, manapság azonban a többi fajra gyakorolt hatása is egyre nyilvánvalóbbá válik. Ezáltal a műanyag-szennyezés kérdése kiemelt figyelmet kap mind a populáris médiában, mind pedig a tudományos publikációkban. A belegabalyodás mértéke tengeri fajokként változik. Kühn és munkatársai 2015-ben végzett vizsgálatukban azt találták, hogy a tengeri teknősök 100%-a, a fókák 67%-a, a bálnák 31%-a és a tengeri madarak 25%-a akadt fenn tengeri eredetű törmelékben.

Lenyelés

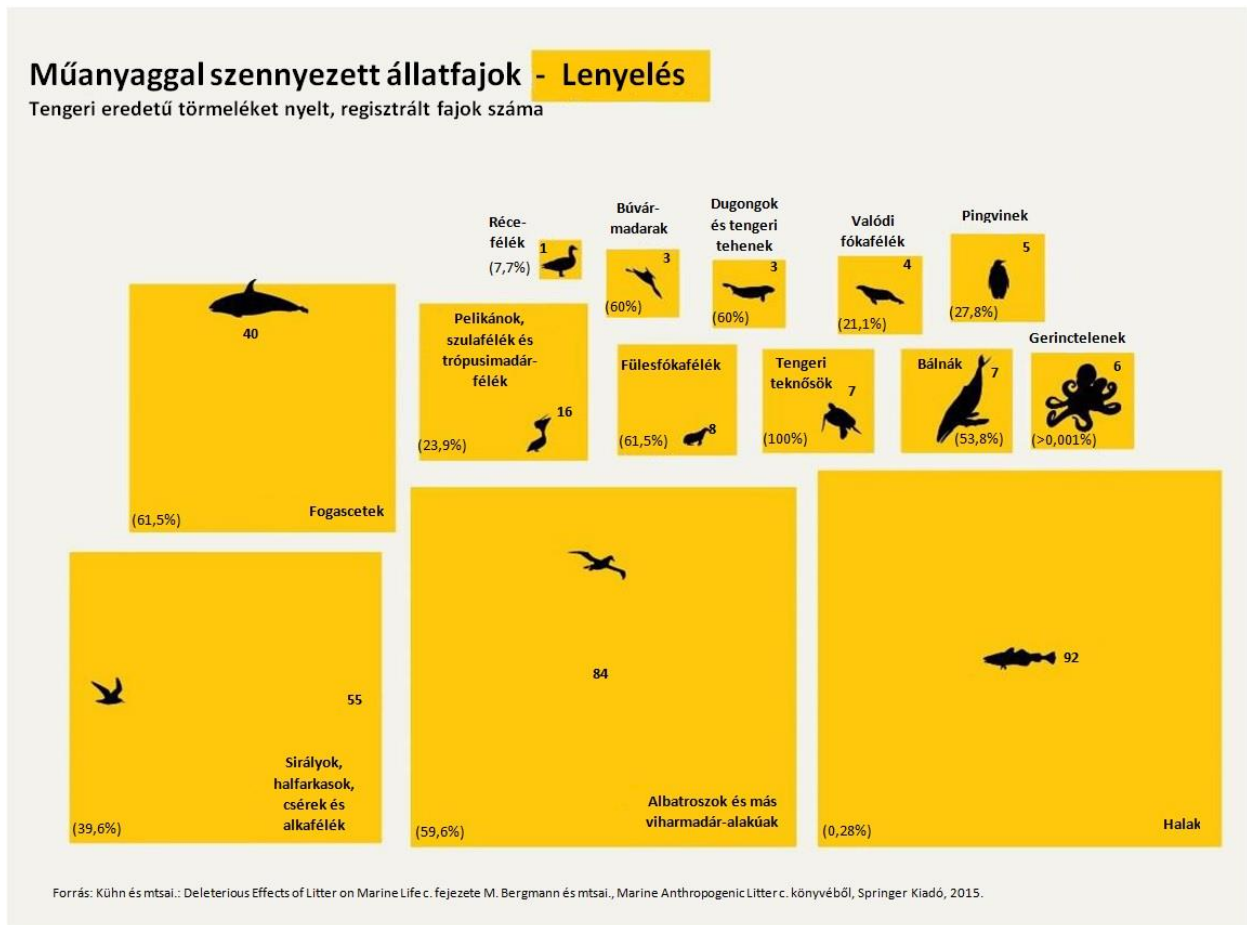
A lenyelés hatása kevésbé látványos, mint a hulladékba történő belegabalyodás; számos fajról kiderült, hogy műanyagot nyel le (3. ábra). A műanyagok fennakadhatnak a gyomorban, ha az élőlények nem képesek visszaöklendezni a darabokat a teljes emésztőrendszerükön keresztül (Kühn és mtsai., 2015). A műanyag szándékosan vagy véletlenszerűen nyelhető le, és ez összefügghet az egyes fajok táplálkozási szokásaival is (Kühn és mtsai., 2015; Lusher, 2015). A szándékos lenyelés valószínűsége attól függ, hogy milyen tényezők miatt fog a műanyag potenciális tápláléknak tűnni az állatok számára a táplálkozás során. Ezek a tényezők állatcsoportonként változhatnak. A táplálékspecialista tengeri madarak például valószínűleg csak akkor fogyasztanak műanyagokat, ha a műanyagdarab hasonlít a zsákmányukhoz. Azok a madarak azonban, amelyek a víz alá bukva szerzik táplálékukat és amelyek a vízfelszínhez közel vadásznak, gyakrabban nyelhetnek le műanyagot (Day és mtsai., 1985). Számos halfaj béltartalmában mutattak ki mikroműanyagokat, a lenyelési arány azonban nem függ a fajok ökológiai niche-étől (fenéklakó vagy nyílt tengeri faj), illetve a táplálkozási csoportjától (guildék: növényevő, rovarévó vagy ragadozó) (Phillips és Bonner, 2015).

A véletlenszerű lenyelés táplálkozási mechanizmusokkal is összefügghet. A sziláscetek például nagy mennyiségű vizet szűrnek meg, és nem képesek különbséget tenni a plankton és a mikroműanyagok között, míg a fogascetek akkor nyelhetnek le műanyagot, ha az hasonlít a zsákmányukhoz (Lusher és mtsai., 2015). Tehát a különböző fajok táplálkozási stratégiái befolyásolják az állat és a műanyag viszonyát, és a lenyelés gyakorisága a különböző táplálékszerzési technikáktól vagy prédafajoktól függően fajonként eltérhet. Bár a mindenevő ragadozók és a filtrálók hajlamosak leginkább a műanyag lenyelésére, számos példa van a szelektíven táplálkozók műanyag-bevitelére is. A dögevő (guberáló) egyszemélyes szintén lenyelhetnek műanyagot az üledék passzív felvételén keresztül (Murray és Cowie, 2011). Szintén kimutatták, hogy a planktonrákok (Vroom és mtsai., átdolgozás alatt) és kék kagylók (Bråte és mtsai., előterjesztve) több biológiai lerakódással borított műanyagot fogyasztanak, mint tiszta műanyagot.

Végül pedig másodlagos lenyelés történik abban az esetben, ha az állatok olyan zsákmányokat fogyasztanak, amelyek korábban már nyeltek le műanyagot. Ez vonatkozhat a tengeri madarakra (van Franeker és mtsai., 2011), a halakra (Perry és mtsai., 2013), a rákokra (pl. Murray és Cowie, 2011; Watts és mtsai., 2014) és a fókákra (Eriksson és Burton, 2003). Perry és mtsai. (2013) nylon halász kötél „labdát” találtak egy alabukó testében, amely a hal gyomrában volt, amelyet a madár megevett. A mikroműanyagok táplálkozás útján történő átvitelét kísérleti úton számos fajban bebizonyították a zooplanktonoktól a nagyobb gerinctelenekig és a halakig (Setälä és mtsai., 2014; Farrell és Nelson, 2013; Batel és mtsai., 2016).

A korábbi feljegyzések inkább arról szólnak, hogy a madarak, teknősök és az emlősök nyelnek le műanyagot. A halak és gerinctelenek műanyag-lenyelésével foglalkozó kutatások a mikroműanyagok egyre szélesedő kutatási területén belül elért legújabb eredményeknek köszönhetően jelentek meg. A téma azóta került előtérbe, amióta először utaltak arra, hogy a műanyagok befolyásolják az élőlényeket (Thompson és mtsai., 2004).

3. ábra: A műanyag lenyelése különböző tengeri fajok esetében



Forrás: Kühn és mtsai. (2015) adatai alapján, a GRID-Arendal (2016) által

A Csendes-óceánban, az Atlanti-óceánban, az Indiai-óceánban és a Földközi-tengerben élő több halfaj emésztőtraktusában vannak mikroműanyagok. A mikroműanyagok átlagos koncentrációja az élőlények emésztőtraktusában jellemzően alacsony, egy vagy két darab egyedenként (Lusher, 2015; GESAMP, 2016). A FAO legfrissebb jelentésében azt a következtetést vonta le, hogy a huszonöt, a globális tengeri halászat szempontjából legfontosabb faj és nemzetség közül tizenkettőnek legalább egy egyedében található mikroműanyagok (2. táblázat).

2. táblázat: A legfontosabb kereskedelmi célú halfajokban található mikroműanyag mennyisége (Szórás – A mérési eredmények mögötti zárójelben található)

Fajok	Magyar név	Mikroműanyagok száma	Forrás
<i>Clupea harengus</i>	Hering	0–4 tartományban / 0–3 tartományban	Foekema és mtsai., 2013 Collard és mtsai., 2015 Rummel és mtsai., 2016;
<i>Engraulis japonicus</i>	Japán szardella	2,3 ±2,5	Tanaka és Takada, 2016
<i>Gadus morhua</i>	Atlanti tőkehal	0–2 tartományban 0–4 tartományban 0–2 tartományban	Foekema és mtsai., 2013 Bråte és mtsai., 2016 Liboiron és mtsai., 2016
<i>Micromesistius poutassou</i>	Kék puha tőkehal	Átlag 2,14	Lusher és mtsai., 2013
<i>Sardina pilchardus</i>	Szardínia	/ Átlag 1,78 (± 0,7) Átlag 2,75 (± 1,57)	Collard és mtsai., 2015 Avio és mtsai., 2015a Güven és mtsai., 2017
<i>Scomberomorus cavalla</i>	Királymakréla	0–6 tartományban	Miranda és mtsai., 2016
<i>Scomber japonicus</i>	Spanyol makréla	Átlag 0,57 (± 1,04) Átlag 10,25 (± 5,86)	Neves és mtsai., 2015 Güven és mtsai., 2017
<i>Scomber scombrus</i>	Közönséges makréla	Átlag 0,46 (± 0,78) 0–3 tartományban	Neves és mtsai., 2015 Rummel és mtsai., 2016
<i>Decapterus macrosoma</i>	Röviduszonyú makréla	Átlag 2,5 (± 6,3)	Rochman és mtsai., 2015
<i>Decapterus muroadsi</i>	Sárgacsíkos makréla	Átlag 2,5 (± 0,4)	Ory és mtsai., 2017
<i>Sardinella longiceps</i>	Indiai olaj szardínia	Előfordul	Sulochanan és mtsai., 2014

Forrás: A FAO sajtóközleménye

Kétségtelen, hogy az alacsonyabb trofikus szintű fajok is nyelnek le mikroműanyagokat. Találtak már mikroműanyagokat tenyésztett és vadon élő kék kagylókban is (Mathalon és Hill, 2014; Van Cauwenberghe és mtsai., 2015; Li és mtsai., 2015). Valamennyi vizsgálatban elsősorban mikroszálakat figyeltek meg. A vadon befogott kagylókban volt a legkevesebb mikroműanyag, Európában az eredmény kevesebb, mint 0,5 részecske volt grammonként. A kanadai Új-Fundlandon figyelték meg a legmagasabb koncentrációkat, amelyek körülbelül százszor magasabbak voltak az Európában mért szinteknél. (Mathalon és Hill, 2014) Az Atlanti-óceánból származó, tenyésztett osztrigákban (Van Cauwenberghe és mtsai., 2014), valamint az Északi- és az Ír-tenger partmenti vizeiből származó rákok, például a homoki garnéla (*Crangon crangon*) és a norvég homár (*Nephrops norvegicus*) (Devriese és mtsai., 2015; Murray és Cowie, 2011; Welden és Cowie, 2016) kopoltyúiban és emésztőtraktusaiban is azonosítottak mikroműanyagokat. Az északi-tengeri üledéklakó csilíféregben (*Arenicola marina*) is találtak mikroműanyagokat, a legmagasabb koncentráció grammonként 11 részecske volt (Van Cauwenberghe és mtsai., 2015).

A lenyelés hatásai halakra és gerinctelenekre laboratóriumi vizsgálatok alapján

A műanyagoknak, különösen a mikroműanyagoknak olyan tulajdonságai vannak, amelyek miatt képesek elnyelni a környezetben jelen lévő hidrofób szerves szennyezőanyagokat (Gouin és mtsai., 2011; Rochman, 2013). A mikroműanyagokban a leggyakrabban a DDT, PAH és PCB vegyületeket azonosították. Ezek a hidrofób kémiai vegyületek tartósan fennmaradnak a környezetben, mivel ellenállnak a környezeti lebomlásnak, így évekig jelen lehetnek és átjuthatnak a tengeri biótába (GESAMP, 2016). A tudomány jelenlegi állása szerint számos kutató azt állítja, hogy a környezetben jelen lévő többi szennyezőforráshoz képest a perzisztens szerves szennyezők kevésbé veszélyesek a biótára (pl. Lohmann, 2017; Koelmans és mtsai., 2016). Ez a jelentés ezért nem erre a szempontra koncentrál.

Úgy tűnik, hogy a halak megbirkóznak a nem emészthető anyagok lenyelésével; alkalmazkodtak a folyamathoz és képesek kiválasztani az emészthetetlen anyagokat, például a homokot is (Grigorakis és mtsai., 2017). Ugyanakkor azt is megfigyelték, hogy a halak keringési rendszerében nanométer nagyságrendű műanyag részecskék találhatók, amelyek átkerültek a halak májába is (Avio és mtsai., 2015b). Más kutatók továbbá azt találták, hogy a nanorészecskék képesek megváltoztatni a halak anyagcseréjét (Cedervall és mtsai., 2012). További vizsgálatok kimutatták, hogy a műanyag megváltoztatja a génkifejeződést, például a zsírsavak és az aminosavak szintézisének szabályozását (Lu és mtsai., 2016), és megállapították, hogy a mikroműanyagok hatására akár májelégtelenség is kialakulhat (Rochman és mtsai., 2013).

Laboratóriumi vizsgálatok arra is rámutattak, hogy a mikroműanyagok a gerinctelenekre is hatással vannak. A kék kagylók 3-10 μm mérettartományban nyelnek le mikroműanyagokat, és a részecskék átkerülhetnek az emésztőtraktusból a keringési rendszerbe (Browne és mtsai., 2008). Von Moos és mtsai. (2012) igazolták, hogy a kis műanyag részecskék felhalmozódhatnak az emésztőrendszer felhámsejtjeiben, és ott gyulladásszerű válaszreakciót idézhetnek elő. A kutatások szerint a mikroműanyag jelenléte a tengerben az osztriga szaporodását is befolyásolhatja (Sussarellu és mtsai., 2015). A csaliféreg esetében számos vizsgálat bizonyítja, hogy a mikroműanyagok valódi károsító hatással van az állatok táplálkozási tevékenységére: a polivinil-klorid (PVC) (Wright és mtsai., 2013) vagy a polisztirol (Besseling és mtsai., 2013) hatására csökkent a csaliféreg táplálkozási aktivitása (a minták száma alapján). A táplálkozási aktivitás csökkenését másik laboratóriumi teszttel is igazolták a biológiailag lebomló politejsav (PLA), továbbá a HDPE és a PVC esetében. A tanulmányban megállapították, hogy a három polimer közül a PVC váltotta ki a legerősebb válaszreakciót (Green és mtsai., 2016).

2.4.3 Társadalomra és gazdaságra gyakorolt hatás

A műanyagoknak lehetnek társadalmi és gazdasági hatásai. A műanyagoknak például esztétikai következményei is vannak, mert a látogatók nem szívesen mennek olyan helyre, ahol a tengerpartot műanyag hulladék borítja (GESAMP, 2016). Mindemellett a műanyagoknak közvetlen és közvetett hatásai lehetnek a testi és mentális egészségükre (Wyles és mtsai., 2016). Az emberi fogyasztásra szánt élelmiszerekben található mikroműanyagok lehetséges fizikai kockázatait vizsgáló jelenlegi kutatások alapján fennáll annak a veszélye, hogy a fogyasztók, akik felismerték a mikroműanyagok hatásainak veszélyét, másként viszonyulnak a tengeri eredetű ételekhez. Bár a mikroműanyagok humán egészségügyi kockázatai jelenleg nem ismertek, nagy a bizonytalanság ezzel kapcsolatban, ami megváltoztathatja a fogyasztók magatartását a tengeri eredetű ételekkel szemben. A probléma számos gazdasági ágazatra is hatással van – különösen a halászatra és az akvakultúrára, a turizmusra és a szabadidős tevékenységekre, valamint a hajózásra. A halászatban előfordulhat, hogy a halászok bevétele a kevesebb tengeren töltött nap miatt megcsappan vagy a kifogható zsákmány mennyisége a szellemhalászat következtében csökken. A turizmus szintén érintett lehet, mert az emberek nem szívesen látogatnak olyan helyre, amely műanyagokkal erősen szennyezett. A műanyag a hajózásban is gondot jelenthet, mivel a navigációs kockázat miatt balesetek, szennyeződés és javítási költségek jelentkezhetnek. Végül pedig, a mikroműanyag-fogyasztástól való „félelem” csökkentheti a tengeri eredetű étel fogyasztásából keletkező bevételeket (GESAMP, 2016).