

A tengerek és óceánok műanyag szennyezésének komplex hatása - 1. rész: A probléma bemutatása

Gubek István

*Eötvös Loránd Tudományegyetem, Humánökológia MA,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: istvan.elte@gmail.com*

Összefoglaló: A tengerek és óceánok műanyag szennyezése az utóbbi évek egyik egyre többet kutatott témája. Hasonlóan globális szintű környezeti probléma, mint az éghajlatváltozás vagy a biodiverzitás csökkenése, ugyanakkor a közvélemény sokkal kevesebbet tud róla, mivel ez egy új kutatási terület, illetve nincs magyar nyelvű szakirodalom a témában. Ez az első átfogó összeállítás, mely a külföldi szakirodalom részletes áttanulmányozásával készült. Az első részben részletes leírást adok a tengeri környezetbe került műanyagok fizika, kémiai, biológia, ökológiai, gazdasági és társadalmi hatásairól, a második, befejező részben pedig bemutatom a már létező megoldási lehetőségeket.

Kulcsszavak: tengerek, óceánok, műanyagok, környezetszennyezés, hulladékszigetek, biodiverzitás, ökoszisztémák, tápláléklánc

Bevezetés

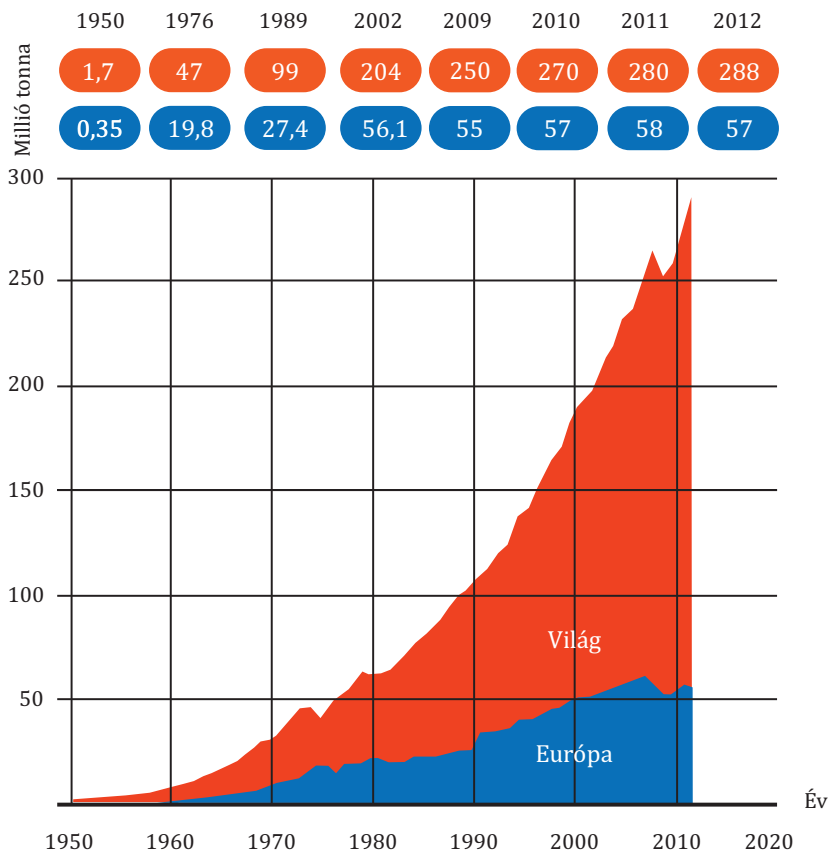
Ahogy az emberiség egyre sokasodik és egyre inkább igénybe veszi a Föld erőforrásait valamint hulladék-asszimiláló képességét, elkerülhetetlen, hogy újabb és újabb környezeti problémákkal kerüljön szembe. A 20. században 40-szeresére nőtt a világ ipari termelése, a világ népessége pedig több mint 3,5-szeresére. Mindez azt eredményezte, hogy mára már 1,5 Föld kellene az emberiség fenntartható ellátásához (McNeill 2011). Jelenleg a két legnagyobb globális környezeti probléma a globális éghajlatváltozás és a biodiverzitás csökkenése (Rockström *et al.* 2009). Az utóbbi 40 év kutatásai alapján azonban nyilvánvalóvá vált, hogy egy újabb, globális méretű környezeti probléma alakult ki a tengerek és óceánok műanyag elszennyezésének következtében (STAP 2011). Tanulmányomban bemutatom, hogy milyen hatása van annak az évi több millió tonna műanyag hulladéknak, mely a tengerekbe, óceánokba kerül. Az óceáni áramlatok összesen öt hatalmas, egyenként több 100 ezer km² kiterjedésű hulladékfoltot hoztak létre a Csendes-, az Atlanti- és az Indiai-óceánon. A legnagyobb gondot azonban az je-

lenti, hogy a műanyag még hosszú évek, évtizedek, évszázadok alatt sem bomlik le, csak felaprózódik és felhalmozódik az óceánok közepén, a tengerpartokon, a szigetek partjain és a táplálékláncban. Ráadásul ezek a mikrométeres műanyag szemcsék felületükön megkötik a kis koncentrációban jelen lévő mérgező szerves ipari szennyezőanyagokat, melyek így feldúsulva jutnak az élőlények szervezetébe, legvégül pedig az emberbe. A műanyagszennyezés azonban nemcsak a tengeri ökoszisztémák egészségét fenyegeti, hanem a fennmaradásukat is, hiszen elősegíti az invazívra váló fajok terjedését, ami a kevésbé ellenálló, helyi fajok eltűnéséhez vezethet. A probléma komplexitását mutatja, hogy a negatív ökológiai hatásokon túl negatív gazdasági és társadalmi hatásokkal is számolnunk kell. A tengerpartok tisztán tartása, az akvakultúrák fenntartása, a turizmus visszaesése, a tengeri élelmet fogyasztó emberek egészségi állapota mind-mind közvetlen kapcsolatban áll ezzel a még kevésbé ismert, de annál jelentősebb környezetkárosítással. Szükség van tehát az azonnali, átfogó cselekvési programokra. Ezeket a cikk folytatásában ismertetem.

Műanyagok a Földön

A műanyagok a modern kor iparának egyik legnagyobb mennyiségben előállított termékei. Tömegtermelésük 1950-től vált jelentőssé, akkor évi 1,5 millió tonnát állítottak elő. Azóta folyamatosan és drasztikusan növekedett a megtermelt mennyiség (átlagosan évi 9%-kal), ennek eredményeképp 2012-ben már 288 millió tonna műanyagot gyártottak (1. ábra). A tengerekbe, tengerpartokra a műanyag hulladék körülbelül 10%-a kerül (Krause *et al.* 2006) a szél, folyók, csatornák és szennyvíz közvetítésével (Wright *et al.* 2013), ami évi több millió tonnát jelent. A pontos értéket nem is lehet megbízhatóan megbecsülni, mindenesetre jelentős mennyiségről van szó. A 90-es évek elején csak a hajókról évi közel 6,5 millió tonna műanyag hulladék került az óceánokba (Derraik 2002). A termelés növekedésével párhuzamosan tehát a tengeri környezetbe kerülő műanyagok mennyisége is nő (STAP 2011). Figyelembe véve a termelői szilárd hulladék mennyiségét, összetételét, a népsűrűséget, a gazdasági fejlettséget és a hulladékkezelést, azt alapították meg amerikai kutatók, hogy 2010-ben átlag 8,75 millió tonna került be a tengeri környezetbe, ami az abban az évben előállított 275 millió tonna műanyag 3%-a (Jambeck *et al.* 2015). A folyamatos növekedésben két kisebb visszaesést látunk: a 1970-es évek olajválságát (a kőolaj 8%-ából műanyag készül) és a 2008-as gazdasági világválságot.

Előállításuk jellemzően fosszilis nyersanyagokból történik: kőolajból, szénből és földgázból, így elégetésükkel hozzájárulnak a klímaváltozáshoz, ráadásul



1. ábra. A műanyaggyártás növekedése a világban és Európában
(ábra forrás: PlasticsEurope 2013).

közben erőteljesen szennyezik a környezetet, mivel hosszú tartózkodási idejű és mérgező anyagok, furánok és dioxinok keletkeznek. Legelterjedtebbek a szintetikus műanyagok, melyek a világtermelés 90%-át adják, szemben a természetes alapúakkal, melyek részesedése 10%. Ez azért probléma, mert a szintetikus polimerekhez gyakran adnak veszélyes adalékanyagokat, mint például lágyítókat vagy BPA-t (biszfenol A). Gyors elhasználódásuk nagyban megnöveli a keletkező hulladék mennyiségét: PET palackok, csomagolóanyagok, egyszer használatos evőeszközök, poharak, bevásárlószatyrok, orvosi eszközök kerülnek a szemétkukába. Lebomlásuk nem, vagy csak évtizedek alatt megy végbe szárazföldön (Shah *et al.* 2008). Tengeri környezetben pedig évszázadokig, sőt évezredekig is eltarthat ez a folyamat (Kaposi *et al.* 2013). Miközben egyre jobban felaprózódnak, megkötik a kémiai szennyeződések és beépülnek a tengeri ökológiai rendszerekbe.

Mindez döntően hozzájárul az óceánok fizikai szennyezéséhez, mivel a lebegő tengeri törmelék 90%-át, az összes tengeri szemét 60-80%-át műanyag teszi ki (Derraik 2002, Setälä *et al.* 2014). A fennmaradó részt üvegpalackok, ruhadarabok, fémdarabok, építési faanyag, kötelek, cigaretta-csikkek, növényi és állati eredetű szerves anyagok alkotják.

A jelenlegi jövőkép nem túl biztató. A termelés növekedésével együtt a műanyagok iránti kereslet is egyre nő. A fejlett országok közül Közép-Európában – ahová hazánk is tartozik – a legnagyobb a növekedés: átlagosan évi 7,3%. Ez azt eredményezte, hogy ebben a régióban az elmúlt 35 évben ötszörösére nőtt az egy főre jutó évi műanyag használat, ami jelenleg kb. 45 kg/fő/év. A fejlődő országokban is gyorsan nő a műanyagok fogyasztása, olyannyira, hogy egyre inkább áttevéődik ide a gyártás folyamata.

Exponenciálisnak tekinthető a növekedés Ázsiában: a 21. század első évtizedében, 2000 és 2010 között több műanyagot gyártottak, mint korábban az egész 20. században (STAP 2011). Ez az óriási növekedés minden bizonnyal folytatódni fog a következő években is: az előrejelzések szerint 2050-re megháromszorozódhat a termelés, 700 millió tonna fölé nőhet (Wurpel *et al.* 2011). Így egyre sürgetőbbé válnak az egyéni, vállalati, kormányzati és nemzetközi szintű intézkedések a probléma kezelésére. Amennyiben nem történik semmi, 2025-re egy nagyságrenddel lesz nagyobb az évenkénti szennyezés mértéke is: a több tízmillió tonnát is elérheti. A legnagyobb problémát a keleti-, délkeleti-ázsiai régió jelenti Kínával és Indonéziával az élen (Jambeck *et al.* 2015).

2016 januárjában jelent meg a davosi Világgazdasági Fórum tanulmánya, mely még nagyobb aggodalomra ad okot. Töretlenül tovább növekszik a műanyaggyártás Európában és a világon – ezzel együtt pedig a környezetbe, tengerekbe kerülő hulladék mennyisége is –, melynek fő összetevői a különféle csomagolóanyagok. Ha minden így folytatódik tovább, 2050-re a tengerekben, óceánokban felhalmozódó műanyagok tömege meg fogja haladni az ott élő halak tömegét (WEF 2016).

A tengerek új típusú szennyezői

A 70-es években figyeltek fel a kutatók először a műanyagok okozta újabb környezeti problémára. Már 1971-ben publikálták, hogy a tengerbe került és feldarabolódott műanyag potenciális veszélyt jelent a tengeri élőlények számára. Egy évvel később – 1972-ben – halakban meg is találták az első műanyag szemcséket. Kezdetben csak fizikai szempontból vizsgálták a műanyagok hatásait, dokumentálták az óceánokban mérhető koncentráció növekedését, a halakban és madarakban történő egyre nagyobb mértékű felhalmozódását. Azokra a sokkal jelentősebb, bio-

kémiai hatásokra, hogy a műanyaggal együtt mérgező szerves szennyeződések is bekerülnek az élőlények szervezetébe azonban csak a 2000-es években figyeltek fel. A 2010-es évektől kezdve ugrásszerűen nőtt a témával foglalkozó kutatások száma, mivel az egyre fokozódó tengeri műanyag szennyezés egyre fenyegetőbb és egyre komplexebb problémává vált. Már nemcsak az egyes tengeri élőlényekre fejtette ki negatív hatását, hanem az egész tengeri ökológiai rendszerre. Megjelent az óceáni szigetek partvonalán is (Hawaii-szigetek, Bermuda-szigetek, Húsvét-sziget, Kanári-szigetek) így az ottani élővilág is veszélybe került. A tengerpartok szennyezettsége is fokozódott (Japán, Chile). Hatása kimutathatóvá vált gazdasági (halászat, parttisztítás, turizmus) és társadalmi (egészség és biztonság) szinten is (Do Sul & Costa 2014).

Számtalan módon kerülhetnek műanyagok a tengeri környezetbe. Mindenekelőtt meg kell különböztetni a műanyagok két típusát: a fogyasztók által használt termékeket és az ipari gyártás alapanyagául szolgáló apró granulátumokat. A fogyasztói műanyagokat nyolc fő csoportba lehet osztani (Andrady 2011):

- PP (Polipropilén): kötelek, hálók, kupakok
- LDPE (Kis sűrűségű polietilén): szatyrok, fóliák, járművekben
- PVC (Poli(vinilklorid)): csövek, szigetelések
- HDPE (Nagy sűrűségű polietilén): csomagolás, palackok
- PET (Polietilén-tereftalát): palackok, műszálak
- PS (Polisztirol): ételhordók, evőeszközök
- PA (Poliamid, nylon): horgász-zsinór, műszálak
- CA (Cellulóz-acetát): cigaretta-filterek

Ezen termékek két forrásból kerülhetnek az óceánokba. Szárazföldi környezetből (ami magába foglalja a nem megfelelően felügyelt hulladéklerakókat is): a folyók, a kezeletlen szennyvíz és a szél transzportja révén; a tengerpartokról nagyobb viharok, hurrikánok, cunamik idején, rekreációs célú használat közben. Tengeri környezetből: hajózás, szállítás, halászat, tengeri gazdálkodás (akvakultúrás tenyésztés) során. A turizmus mindkét esetben szennyezhet.

A műanyagok ipari gyártása során műgyanta szemcsék kerülnek ki a környezetbe. Ezek a kicsi, 0,1–0,5 cm átmérőjű, 25 cm²/g fajlagos felületű, hengeres vagy lapos granulátumok a műanyaggyártás ipari nyersanyagai. E granulátumokat megolvastva és formába öntve készítik el a kívánt műanyag terméket. A szállítási és a gyártási folyamat során akaratlanul is kikerülnek közvetlenül a tengeri vagy szárazföldi környezetbe. Ez utóbbi esetben a felszíni lefolyással szintén a tengerekbe jutnak. Azokban a térségekben, ahol elmaradott a környezetvédelem, szándékosan is így szabadulnak meg a megmaradt vagy feleslegessé vált szemcséktől. Mivel nehezen bomlanak le, egyre nagyobb mértékben halmozódnak fel

az óceánokban és a tengerpartokon. Először 1972-ben észlelték az Atlanti-óceán észak-nyugati részén, azóta világszerte minden homokos tengerparton megfigyelhetők. A korábban kibocsátott, idősebb szemcsék nagyobb mérgező hatást mutatnak (több szerves szennyezést kötöttek meg), így a szennyezettség indikátoraivá váltak. Világszerte rendszeresen gyűjtenek mintákat, hogy nyomon kövessék a partok és parti vizek állapotának változását (Barnes *et al.* 2009).

A folyók transzport szerepének jelentőségét jól mutatja egy 2014 elején megjelent német publikáció a Duna szennyezettségével kapcsolatban (Lechner *et al.* 2014). Két éven át vizsgálták Európa második legnagyobb folyójának Bécs és Pozsony közti szakaszát és megállapították, hogy 1000 m³ vízben átlagosan 3,2 g (275 db) halivadék és 4,8 g (317 db, 500 µm és 5 cm közti) műanyag darab található. Ez azt jelenti, hogy 15%-al több a Dunában a műanyag hulladék, mint a fejlődésben lévő halak száma. Ráadásul még így is alulbecsülték a szennyezettséget, hiszen a mintavételező háló csak a 0,5 mm-nél nagyobb darabokat fogta fel. A kutatók becslése szerint napi 4,2 tonna, évente pedig 1533 tonna műanyag törmelék kerül így a Fekete-tengerbe, melynek 80%-a ipari eredetű, a már említett műgyanta szemcsékkel kapcsolatos. Ez több mint az Észak-Atlanti-óceán hulladéksziget becsült tömege, ami 1100 tonna. A kutatás jelentősége, hogy ez volt első olyan vizsgálat, ami egy európai folyóban a műanyagok transzportját vizsgálta. Rávilágít arra is, mekkora veszélyt jelent ez a dunai halállományra nézve: ha a kis halak lenyelik a műanyag hulladékot közvetlenül bélelzáródásban vagy közvetetten, a műanyagon megkötött toxinok miatt, mérgezésben is meghalhatnak. A nagyobb halakban pedig felhalmozódnak a táplálékkal együtt felvett szemcsék és toxinok, így az emberi szervezetbe is bejuthatnak. Potenciális veszélyforrássá vált tehát a dunai halfogyasztás. Kaliforniában 2004-ben és 2005-ben két folyóban vizsgálták az 5 mm átmérő alatti műanyag darabokat. A szállított mennyiség itt is jelentős: 3 nap alatt 2,3 milliárd plasztikszemcsét juttattak el a Csendes-óceánba (~60 t) (Moore 2008).

A műanyagszennyezést két mérettartományra lehet bontani, bár ez a felosztás nem egységes (Cole *et al.* 2011). A makroplasztikumok (fogyasztói műanyagok) 5 mm-nél nagyobbak, a mikroplasztikumok 5 mm-nél kisebbek. Utóbbiak lehetnek elsődlegesek, azaz eredendően ilyen méretűek: ipari műgyanta szemcsék, kozmetikumok mikroszemcséi, szemcseszórásos tisztítás koptatóanyagai, ruhák műszálai. Másodlagosak, ha a nagyobb darabok mérete a környezet degradáló hatása miatt csökkent le.

A tengeri szennyezés domináns forrása a makroplasztikum volt egészen az elmúlt évekig, amikor is jelentősen elkezdett növekedni a mikroplasztikumok aránya. Ennek oka a háztartásokban keletkező szennyvíz a műszálás textilek és ruhák mosása, valamint a mikroszemcsés tisztítószeres használata során.

Egyre több szintetikus textilt és ruhát használ az emberiség. Ezek PS, akril és PA műszálakból épülnek fel. Egy kísérlet során ilyen anyagú takarókat, műgyapjakat és pólókat mostak ki több különféle mosógépben és azt az eredményt kapták, hogy egy átlagos mosás alkalmával egyetlen ruha-, illetve textildarab 1900-nál is több mikroszálat enged ki magából, s a keletkező szennyvíz literenként minden esetben 100-nál több mikroplasztikumot tartalmazott (Browne *et al.* 2011).

A másik nagy lakossági eredetű probléma a mikroszeszemcsés kéztisztítóknak, fogkrémeknek, arctisztítóknak, kozmetikai szereknak az elterjedése. Ezeket napi rendszerességgel használják az emberek. A bennük lévő PE, PP és PS granulátumokat mikrogyöngyöknek és mikro-hámlasztóknak hirdetik, melyek segítenek hatékonyan megtisztítani bőrünket. Régebben még természetes anyagokat tartalmaztak az arctisztítók (például habkő és dióhéj) mára már azonban felváltotta őket az olcsóbb, de hasonlóan hatékony műanyag. Az ipari műanyag szemcséktől könnyű megkülönböztetni őket: sokkal kisebbek (10–100 mikrométer nagyságúak) és szabálytalan formájúak (Fendall & Sewell 2009).

A kutatásban az szerepel, hogy a szennyvíztisztítók nem tudják eltávolítani az 1,5 mm-nél kisebb műanyag szemcséket, ezért megkérdeztem a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.-t, hogy a lakossági eredetű műanyag makro- és mikroszennyezés milyen módszerrel és határfokkal távolítható el a szennyvízből. Azt a választ kaptam, hogy a 10 mm-nél nagyobb szennyeződések eltávolítása gépi rácsokkal történik. Az ennél kisebb műanyag-szennyeződések eltávolítására flotációs technológiát alkalmaznak, mely során a kombinált homokfogó műtárgyba, levegőztető turbinával nagyméretű buborékokat vezetnek. A felszínére került szennyeződést gépi kotrókkal távolítják el. A rácsszűrés és a flotációs technológia után megmaradó kisebb méretű műanyag mikroszennyezők feltehetően beépülnek az eleveniszapba, így a fölősiszappal vagy az utóülepítőkon alkalmazott uszadék eltávolító berendezéssel eltávolításra kerülnek a szennyvízből, bár erre vonatkozó méréseket nem végeznek. Ezzel szemben egy amerikai tanulmány is kijelenti, hogy a mikroplasztikumokat minden bizonnyal nem távolítja el a hagyományos szennyvízkezelési eljárás, nagyrészt változatlan formában kerülnek ki a tisztítási folyamatból (Engler 2012).

A tengeri eredetű források közül a halászat, a tengeri szállítás és az akvakultúrák a legjelentősebbek. Évente 640 ezer tonna halászati eszközt (hálót, kötelet) hagyunk vagy dobunk el a világ óceánjaiban. Ez körülbelül 10%-a az összes óceáni szemétnek. Az 1950-es években még természetes szálakból, kenderből és gyapotból szőtték ezeket Délkelet-Ázsiában. Rugalmasságukat azonban használatuk során elvesztették, ezért eldobták őket. Ez azonban nem jelentett problémát, mivel gyorsan lebomlottak. A műanyagipar felfutásával később ezeket nylon (PA), poliolefin (PE, PP) és más szintetikus szálakkal helyettesítették. Tartósabbá és

erősebbé váltak, viszont környezetbe kerülésük már gondot okozott: nem bomlottak le, a vízben vagy a felszínen lebegve szétterjedtek vagy az aljzatra süllyedve felhalmozódtak (Gregory 2009). A kereskedelmi hajók minden nap 639 000 műanyag konténert szállítanak a világ óceánjain, ezek egy része elveszik az utazás, kirakodás, berakodás során és tartalmukkal együtt a tengeri szemét részévé válnak (Laist 1987). A tengeri tenyészetek szintén rendszeres szennyezőnek számítanak: a rákfarmokról műanyag szerkezeti elemek, a lazacfarmokról műanyag ételkészítők kerülnek a tengerbe. Chilében a legrosszabb a helyzet, a kormány ezért szigorított a szabályozáson 2002-ben és 2008-ban is, de a hatóságok nem ellenőrzik kellőképpen a törvények betartatását. A helyi akvakultúrák továbbra is meghatározó forrásai a dél-csendes-óceáni szemétnak (Thiel *et al.* 2011).

Fizikai hatás

A különféle forrásokból tengerekbe került makro- és mikroméretű plasztikumok idegen anyagnak számítanak és tartósan megmaradnak. Vízhez hasonló sűrűségük miatt lebegnek, az áramlatok egyrészt csapdázzák őket, másrészt az óceán minden részére eljuttatják, a tengerpartokra és a távoli szigetekre is. Közben fizikai kölcsönhatásba lépnek az óceáni környezettel, egyre kisebb darabokra esnek szét, felhalmozódásuk megkezdődik a tengeraljzaton is. Ezeket fejtem ki a következőkben.

Degradáció és diszperzió

A műanyagok sűrűsége hasonló, mint a tengervízé, ezért alapvetően a víztest felső régiójában helyezkednek el. Az $1,02\text{--}1,03\text{ g/cm}^3$ – hőmérséklettől és sótartalomtól függő – értéknél kisebb sűrűségűek a víz tetején, közvetlenül a vízfelszínen úsznak (PP, HDPE, LDPE), a nagyobb sűrűségűek a vízfelszín alatt lebegnek (PS, PA, CA, PVC, PET) és nagyobb eséllyel süllyednek el. A felszínükön megtelepedő mikrobák tovább növelik sűrűségüket. A felhasználói műanyagok gyakran több típusú polimerből tevődnek össze, lebegésük mélysége alapvetően összetételüktől és a bezárt levegőtartalomtól függ. További befolyásoló tényező az eső, a viharok és a turbulens vízmozgás, melyek dinamikus vertikális mozgást, keveredést idéznek elő. A gyártási arányokat és sűrűségviszonyokat ismerve nem meglepő az a megállapítás, hogy az óceánokban a felszín közelében lebegő mikroplasztikumok 80–90%-a PP, és 5–15%-a PE (Engler 2012).

Az egyik előnyös tulajdonságuk – a nagy ellenállóságuk – most az egyik legnagyobb problémává válik: nem bomlanak le, csupán felaprózódnak egyre kisebb darabokra az UV-sugárzás, a hullámozgás, az áramlások és a szél degradáló hatása

miatt. Az évek, évtizedek alatt a milliméteres és mikrométeres szemcseméretet is elérhetik. Mindeközben fajlagos felületük nő, ami majd kémiai tulajdonságaiknál kap jelentős szerepet (Andrady 2011).

Az óceáni környezetben évezredekig is jelen lehetnek, amennyiben lejutnak a tengerfenékre, ahol alacsony hőmérsékleten, oxigén és fényhiányos környezetben leülepednek (Barnes *et al.* 2009).

A széllel és áramlatokkal meglepően gyorsan és messzire el tudnak jutni. Az egyik hajó elveszett műanyag rakományát 10 évvel később 10 000 km-rel odébb találták meg. Amerika északi tengerpartján végzett nyomkövetős vizsgálatban átlagosan 60 nap alatt érték el a műanyag darabok az 1000 km-re lévő észak-atlanti-óceáni szubtrópusi vízkörzési zónát (Cole *et al.* 2011).

Az öt nagy hulladéksziget

Az óceáni áramlatok nemcsak szétoszlatják a hulladékot, hanem csapdázzák is. A meleg és hideg áramlatok körkörös mozgása öt nagy hulladékszigetet hoz létre a Föld óceánjain. Az ide bekerülő műanyagok éveken, évtizedeken át cirkulálnak a felszínen lebegve, miközben egyre jobban felaprózódnak. Az örvények közepén kisebb az áramlási sebesség, konvergáló zónaként viselkednek, begyűjtik és felhalmozzák környezetükből a műanyagokat. Három régiót tanulmányoztak eddig a kutatók részletesen: az észak-atlanti-óceáni (Law *et al.* 2010, Morét-Ferguson *et al.* 2010), az észak-csendes-óceáni (Moore *et al.* 2001) és a dél-csendes-óceáni-örvényt (Martinez *et al.* 2009, Eriksen *et al.* 2013). A dél-atlanti-óceáni- és indiai-óceáni-örvényt még nem vizsgálták meg alaposabban. Az északi féltekén az óramutató járásával megegyező irányban, a délin azzal ellentétesen forognak ezek az örvények. A jelenségnek több neve is van: szemétfolt (garbage patch), plasztik leves (plastic soup), műanyag szigetek (plastic islands), óceáni hulladéklerakó (ocean landfill) vagy szeméttörvény (trash vortex). A nemzetközi szakirodalom leggyakrabban a „garbage patch” kifejezést használja. A modellezés műholdas nyomkövetés és terepi mérések, megfigyelések alapján történik. Rendszeresen indulnak kutatóexpedíciók is, hogy gyakorlatban is nyomon kövessék az óceánok szennyezettségének alakulását. Ezeket olyan független, nonprofit, civil szakmai szervezetek (NGO-k¹) szervezik, mint a 5Gyres Intézet (<http://www.5gyres.org>) és az Algalita Tengerkutató Alapítvány (<http://www.algalita.org>). Önkéntesként bárki csatlakozhat az expedíciókhoz. Olyan feladatokban lehet segíteni mint a mintavételezés, vizuális megfigyelés, adatelemzés vagy a partok állapotának felmérése.

1 NGO = Non-Governmental Organization (nem kormányzati szervezet).

Ezen szervezetek felbecsülhetetlen értékű munkát végeznek, mivel az így kapott információkkal fel lehet hívni a kormányok és a közvélemény figyelmét a helyzet súlyosságára és a szükséges intézkedések meghozására.

További veszélyt jelent, hogy az óceáni szemétszigetek láthatatlanok, így nem vizualizálódik a probléma. Egy nagy óceáni hulladéksziget közepén körbenézve nem tapasztalható semmi szokatlan a környező vízfelszínen, víztestben. Nem figyelhetők meg a szó szoros értelmében vett hulladékhegyek, sem hulladékszigetek. Csak a mintavétel után lesz egyértelmű, hogy ez már a szemétfolt. A konvergens zóna felé közeledve exponenciálisan nő a vízben lévő milliméteres és mikrométeres szemcsék száma. Az Észak-Atlanti-óceán szubtrópusi régiójában 20 000 – 30 000 db/km² átlagos és 580 000 db/km² maximális koncentrációt mértek, ez háromszor több, mint a 70-es években (Law *et al.* 2010). Az Észak-Csendes-óceán örvényében 970 000 db/km² maximális sűrűséget mértek 2001-ben (Japán partjainál) – ez háromszorosa volt a korábbi 1990-es maximumnak. Még egy meglepő eredmény született: a mintákban lévő műanyag tömege hatszorosan meghaladta a planktonikus élőlényekét.

Azt, hogy pontosan mekkora egy óceáni szemétsziget, nem tudják a kutatók. Nincs definíció arra vonatkozólag, hogy milyen műanyag-sűrűségtől tekinthetjük az adott területet a sziget részének. Ideális esetben nulla antropogén eredetű részecskét tartalmaz a víztest egy km²-en. Gyakorlatilag ilyen már nem találni sehol. A hulladékörvények nagyságát viszont meg lehet becsülni: a konvergáló zónák mind az öt esetben 100 000 km² nagyságrendűek. Ez a hatalmas kiterjedés meglehetősen kis tömegsűrűséggel jár: az észak-csendes-óceáni hulladékfoltban mindössze néhány kg/km². Lehetetlen vállalkozás lenne megpróbálni összegyűjteni őket.

A dél-csendes-óceáni konvergáló zónát 2013-ben vizsgálták meg másodszor a 5Gyres Institue expedíciója során. Korábban nagyon kevés adat állt rendelkezésünkre a déli félteke óceánjainak szennyezettségéről, holott az Egyenlítőől délre a terület 81%-a tengervíz. A hulladéksziget modellt ismét alátámasztották: a centrum felé haladva ugrásszerűen nőtt, majd azt elhagyva hirtelen lecsökkent a mikroplasztikumok mennyisége. Az átlagos eloszlás 26 000 db/km², a maximális sűrűség 396 000 db/km² műanyag darab volt. A minták 96%-a tartalmazott műanyagot. Az adatok alapján a legnagyobb hulladéksziget az Észak-Csendes-óceánon van, második az Észak-Atlanti-óceánon, legkevésbé szennyezett a Dél-Csendes-óceán, viszont ennek a legerőteljesebb a felhalmozódási képessége. A térség jó helyezése annak köszönhető, hogy a nyugati világ szemszögéből nézve gazdaságilag kevésbé fejlett országok veszik körül az óceán ezen részét (Peru, Chile, Ecuador, kis szigetállamok), így kisebb mértékű a szárazföldről érkező szennyezés.

A kutatások elgondolkodtató eredménye, hogy az Atlanti-óceán északi részén a vizsgált 22 év alatt nem nőtt a plasztikumok mennyisége, annak ellenére, hogy az USA-ban erőteljesen nőtt a keletkező hulladék mennyisége. Ennek magyarázata az lehet, hogy alulbecsülték a szennyezettséget. A mintavétel minden esetben mantahálóval² történt, melynek 330 µm a szemnagysága. Egy svéd kísérlet kimutatta: 450 µm helyett 80 µm érzékenységgű hálót használva 100 000-szer nagyobb mikroplasztikum koncentrációt lehet mérni. Tehát nagyságrendekkel nagyobb lehet a valódi szennyezettség. A feldarabolódás gyorsabb ütemben zajlik az észak-atlanti térségben, mint gondoltuk (Cole *et al.* 2011).

Kiderült az is, hogy a három vizsgált felhalmozódási zóna közül kettőből, az Észak- és Dél-Atlanti-zónából még van esélye kikerülni a műanyagoknak, azonban a Dél-Csendes-óceán szubtrópusi örvénye hosszú időre csapdázza őket, míg le nem ülepednek. Elképzelhető, hogy az Egyenlítőn is átjutnak a plasztikumok: Ecuador és Indonézia partjai mentén a határáramlatokkal. A Csendes-óceán északi részéről délre vándorolhat a szemét és vice versa egészen Hawaii partjáig. Az Antarktisz körüli vizekben is megjelent már a műanyagszennyezés, feltehetően a déli áramlatok és a hajóforgalom miatt (Eriksen *et al.* 2013).

Felhalmozódás tengerpartokon

A tengerpartok elszennyeződését a turizmus, a terjeszkedő települések és az ipari tevékenység mellett egyre inkább az óceán felől érkező szemét okozza. Az óceánokba juttatott műanyag szemét egy része visszatér a tengerpartokra az áramlás zavarai, a helyi áramlási és szélviszonyok, a földrajzi környezet sajátosságai, valamint az időjárás változékonysága miatt.

Panama megtisztította partjait a 90-es években, de 3 hónap múlva ismét megjelent a szemét, méghozzá az eltakarított mennyiség fele. Dél-Afrika partjai is évről évre szemetesebbé válnak (Derraik 2002).

Chilében rendszeresen szerveznek parttisztításokat, de ott döntően helyi eredetű a szemét (hajózás, halászat, akvakultúrák, helyi strandolók, turisták), mivel a dél-csendes-óceáni-örvény összegyűjtő hatása igen erős. Több szemét érkezik viszont az óceán felől Brazíliába, Ausztráliába vagy Japánba. Évente körülbelül 250 hulladék darab éri el 100 méterenként a tengerpartokat az észak- és dél-atlanti régióban. A zárt tengerek esetén, például a Mediterrán térségben még nagyobb intenzitású a partra mosódás. Belgiumban a száraz tengerparti üledékben háromszorosára nőtt a mikroplasztikumok mennyisége: 55 db/kg-ról (1990-es évek) 156 db/kg-ra (2000-es évek) (Cole *et al.* 2011).

2 Hasonlít a háló alakja az ördögrájáéra, ami latinul Manta, innen az elnevezés.

Felhalmozódás tengerfenéken

A 90-es évek óta vizsgálják a kutatók ezt a kérdést. Azóta minden óceán- és tengerfenéken találtak műanyagot. Mivel a szemcsék lebegnek vagy úsznak, lesüllyedésük biológiai aktivitásnak köszönhető: benövik őket a mikroorganizmusok vagy bekerülnek a tengeri élőlények szervezetébe és tetemükkel együtt jutnak le az aljzatra. A folyók hordalékával a kontinentális self területeken is leülepedhetnek: például Brazília partközeli tengeraljzatán sokkal több a műanyag, mint tengerpartján. Nagy sűrűséget mértek tengerparti kanyonokban is (akár 112 hulladék darab/km, ennek 70%-a műanyag). Egy arktiszi merülés során több ezer méter mélységben is láttak néhány műanyag darabot, amit a norvég áramlás szállíthatott oda az észak-atlanti térségből. A Tokiói-öböl alján a mesterséges objektumok 80-85%-a műanyag. Európa partjai mentén a Földközi-tenger aljzatán legnagyobb a műanyagok sűrűsége: elérheti a 100 000 db/km² értéket is, ami hasonló nagyságrendű, mint az óceáni hulladékszigeteken (Barnes *et al.* 2009).

Felhalmozódás szigeteken

Az áramlás időszakos változásai nemcsak a tengerpartokra sodorják vissza a szemetet, hanem távoli óceáni szigetek partjaira is. Sok esetben ezek lesznek a végső felhalmozódási zónák (Moore *et al.* 2001).

Hawaii szigetén, a Kamilo nevezetű 15 km-es partszakaszon önkéntesek évente 16 tonna hulladékot gyűjtenek össze. Úgy is nevezik: a Szemetes-part. Az ide kerülő műanyag szemét elhagyott halászeszközökből, vegyes nagyobb darabokból és nagy koncentrációjú PE és PP darabokból áll. Többségük nem a környező szigetekről származik, hanem idegen eredetű: vagy a helyiek nem használnak hasonló terméket, vagy külföldi nyelvű címkékből, jelölésekből és logókból lehet erre következtetni. A modellek szerint az észak-csendes-óceáni hulladékszigetről származnak. Ha az áramlások állandóak lennének, akkor egy foltban maradnának a műanyagok az örvényzónában, de a hidrodinamikai anomáliák kilökik és felhalmozzák őket Kamilo partjain (Carson *et al.* 2012).

Hasonló jelenség játszódik le más óceáni szigeteken. A korábban említett 2013-as dél-csendes-óceáni expedíció végállomása a Húsvét-sziget volt. Ez a világ legelszigeteltebb lakható földterülete (2100 km-re fekszik a legközelebbi sziget). Őslakói előrelátás nélkül aknázták ki természeti erőforrásait, kultúrájuk összeomlott. A szigetről eltűntek a fák, a madarak és a virágok. A megmaradt néhány lakos megpróbálja visszaállítani a talaj termőképességét és fenntartható életvitelt folytatni. A szigetet napjainkban újabb veszély fenyegeti: partjainál elkezdett felgyülni az óceáni szemét. Homokos partszakaszait elborították a színes műanyag darabok milliói, melyek a közeli hulladékfoltból származnak (Eriksen *et al.* 2013).

A Hawaii-hoz és Chiléhez hasonló izolált óceán-közepi szigetek természetes hálóként működve gyűjtik be a hulladékörvényekből a szennyeződések. Reális veszély, hogy a Föld óceánjainak minden szigete szeméttelpeppé válik.

Kémiai hatás

Az óceánok műanyaggal történő elszennyezése nem csak esztétikai problémát okoz. Kiderült, hogy a felaprózódás közben felszabadulnak a veszélyes adalékanyagok, továbbá a tengerekben kis mennyiségben jelen lévő szerves szennyeződések is megkötik, ezzel akár milliószorosára feldúsítva a koncentrációt. Végleg eloszlott az a tévhit, hogy a műanyagok tiszták és biztonságosak. A kémiai hatás részletei következnek.

Szerves szennyeződések az óceánokban

Az óceánokban és tengerekben kis koncentrációban jelen lévő antropogén szerves szennyeződések több névvel is illetik: POPs (Persistent Organic Pollutants), HOCs (Hydrophobic Organic Compounds) vagy még pontosabban PBTs (Persistent Bioaccumulative and Toxic substances).

Négy fő tulajdonságuk van: nehezen bomlanak, mérgezőek, élőlényekben felhalmozódnak és víztaszítók. Nehezen bomlanak le, mert stabil, ellenálló vegyületek. Ártalmasak, mert magzatkárosítók, megnövelik a mutációk gyakoriságát és rákkeltők, károsítják a hormonrendszert. Felhalmozódnak az élőlények szervezetében és a táplálékláncban is. Vízben nem oldódnak, a műanyag szemcsék felületéhez viszton könnyen hozzátapadnak (Kershaw *et al.* 2011).

A POP vegyületcsalád tagjai a környezetbe kerülhetnek mezőgazdasági használat során: növényvédő szerek és rovarölő szerek (pl. DDT és HCH-k) szétpermetezésével. Ipari tevékenység, szén-, olaj- és földgázégetés is lehet a forrásuk (pl. dioxinok és PAH). Kikerülhetnek mesterséges objektumokból is: transzformátorok hűtő-szigetelő vagy hidraulikus rendszerek hőátadó folyadékából (PCB-k), elektronikai eszközökből (égésgátló anyagok), valamint építő-anyagokból (PBDE-k). Veszélyességüket jelzi, hogy használatukat szigorúan korlátozzák és felügyelik, többet be is tiltottak közülük a nyugati országokban a 20. század második felében. Ennek ellenére a DDT-t malária ellen máig használják több országban, például Vietnamban, Costa Ricában, Indiában és Dél-Afrikában. Ezen POP vegyületek az esővízzel, folyókkal és felszíni lefolyással a tengerekbe jutnak (Hirai *et al.* 2011).

Szerves szennyeződések felületi megkötődése

A PBT vegyületeket a mikropasztikumok nagyobb koncentrációban kötik meg felületükön, mint más oldott részecskék, derült ki egy 2001-es japán vizsgálatból (Mato *et al.* 2001). A Tokiói-öbölben PP ipari műgyanta szemcsék PCB és DDE³ adszorbeáló képességét vizsgálták. A PP szemcsék felületi megkötődési együtthatója 10^5 – 10^6 értékűnek bizonyult. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy a szemcsék képesek 100 000-szer vagy 1 000 000-szor nagyobb mértékűre dúsítani a szennyező anyagok koncentrációját. Ennek egyik oka erősen víztaszító felületük. Telített szénhidrogén egységekből épülnek fel, felszínük nem poláris. Kiválóan alkalmas arra, hogy a PCB-hez és DDT-hez hasonló víztaszító szennyeződések megkösse. Másrésről a PP szemcsék kis sűrűségük miatt a víz felszínén lebegnek, pontosan ott, ahol feldúsulnak ezek a vegyületek. A PBT vegyületekkel túltelített víz-levegő határfelületi mikrorétegben igen hatékonyan tud végbemenni a felületi megkötődés. Kísérletet is végeztek a japánok: 6 napra kihelyeztek hasonló szemcséket az öböl vizére és a megkötés sebessége alapján arra következtettek, hogy néhány év alatt elérheti a szennyezettség ezt a magas koncentráció értéket. Ez több tényezőtől függ: a felület bomlása, roncsolódása segíti a megkötést, a több üreg, repedés növeli a kötőhelyek számát, ugyanakkor az oxigén-tartalmú molekula csoportok szabaddá válása csökkenti a hozzátapadás erősségét.

Egy másik tanulmány a PAH vegyületek megkötődését vizsgálta műgyanta szemcséken. A PE és PS szemcsék magasabb koncentrációban kötötték meg a víztaszító polimereket, mint a PP, PET, PVC anyagúak (Rochman *et al.* 2013).

Ugyanakkor a műanyagok nemcsak kötőhelyei, de forrásai is lehetnek a szennyeződéseknek. Feldarabolódás közben felszabadulnak belőlük a gyártás során hozzáadott adalékanyagok: stabilizátorok, lágyítók (ftalátok), égésgátlók (PBDE vegyületek), baktériumölők, kiindulási anyagok (pl. Biszfenol A), vagy az óceánig tartó transzport során a szennyvízből megkötött anyagok: például nonil-fenolok (mosószer-előanyagok, idegen ösztrogének) vagy a triklozán (fertőtlenítőszer). Az így kibocsátott anyagok veszélyessége különböző: biológiai lebomlásra mérsékelten képesek (Biszfenol A), kis mértékben felhalmozódnak (ftalátok, nonifenolok) vagy bomlásnak erősen ellenállóak (pl. égésgátlók). Legnagyobb veszélyt a halakra és az őket elfogyasztó emberekre jelentik. Fontos észrevétel, hogy a műanyagok bomlása során kiszabaduló káros anyagok a keletkező kisebb szemcsék felületén ugyanolyan mechanizmussal adszorbeálódhatnak, mint a már jelen lévő szennyeződések (Engler 2012).

A felhasználói műanyag darabok megkötő-képessége hasonló, mint az ipari szemcséké. Az észak-csendes-óceáni térség több részéről gyűjtöttek mintákat: urbanizált és lakatlan tengerpartokról, valamint a nyílt óceánról. A helyszíneket

3 A DDE a DDT egyik bomlásterméke, szintén veszélyes anyag.

tekintve: Vietnam, Japán, Kalifornia, Costa Rica partjairól és a hulladékörvény közepéről. Kiegészült még az elemzés egy észak-atlanti-óceáni mintával is a Karib-tengerről. A legnagyobb károsanyag-koncentrációkat (PCB, DDT, PBDE, BPA) a városokhoz közeli partszakaszokon mérték. Ennél kisebb volt a nyílt óceánról és távoli partokról származó minták vegyi anyag tartalma. Kimutatták, hogy az aprózódás során felszabaduló szennyeződések mellett a levegőből vízbe kerülő szennyeződések is megkötötték a szemcsék. Összhangban a hasonló kutatásokkal, a PE típusú szemcsék szorpciós képessége nagyobbak bizonyult, mint a PP összetételűeké. Ami a leglényegesebb eredmény: szoros korrelációt mutatnak ki a felaprózódott fogyasztói műanyagok és az eredendően kis méretű ipari plasztikszemcsék adszorbeáló képessége között. Mindkét típusú műanyag egyformán veszélyes (Hirai *et al.* 2011).

Bebizonyosodott, hogy a műanyag darabok jó indikátorai a partok állapotának: minél nagyobb a felszínükön mérhető szennyezőanyag koncentráció, annál szennyezettebbek a környező vizek, a tengerpartok és az üledékek. Egy globális felmérés eredményeképp 2009-ben (Ogata *et al.* 2009) térkép készült a világ tengerpartjainak szennyezettségéről, melyet később további helyszínekkel bővítettek ki. Hat kontinens 29 országának 56 partjáról vettek mintákat és határozták meg PCB tartalmukat. Az eredményeket egy világtérképen összegezték (Kershaw *et al.* 2011).

A legmagasabb értékeket a centrum országok (USA, Ny-Európa és Japán) partjai mentén mérték. Az iparosodott országok az 1960-as és 1970-es évek gyors gazdasági növekedése során rengeteg PCB-t használtak; például az USA hasznosította a világon előállított PCB mennyiség több mint felét. Hiába tiltották be később, mivel perzisztensek, máig jelen vannak a tengervízben és felhalmozódnak a tengerparti üledékben. Ázsiában két nagy feltörekvő ország, India és Kína vizeinek szennyezettsége mellett a Fülöp-szigeteké is kiugró. Dél-Afrika partjai tekinthetők a legtisztábbnak: a 80-as évek gazdasági növekedésében nélkülözte a PCB használatát, később a tilalom miatt nem is lett volna rá lehetősége (itt viszont a HCH érték kiugróan magas a rovarirtószer használata miatt). Az adatokból kiolvasható, hogy lineáris összefüggés van az ipari fejlettség és a vizek szennyezettsége között (Kershaw *et al.* 2011).

Biológiai hatás

A makro méretű műanyagok fizikailag károsítják a tengeri élőlényeket: külsejüket megsértve, emésztőrendszerüket eltömítve vagy belegabalyodással megölve őket. A mikro méretűek pedig megmérgezik őket: a szemcsékkel együtt szervezetükbe

jutnak a felületükön koncentrált vegyi anyagok is. Tehát kijelenthető, hogy a műanyagok kiemelkedő veszélyforrást jelentenek a tengeri élővilágra. Sorra veszem a legfontosabbakat.

Halálos nyaklánc és szellemhalászat

Több mint 267 nagytetű állatfajról írták le már az 1990-es években, hogy a nagyobb méretű műanyag objektumok károsítják őket külsőleg vagy belsőleg, a táplálkozás során szervezetükbe kerülve (Moore 2008). Néhány példa közülük: teknősök, pingvinek, albatroszok, viharmadarak, rablósirályok, sirályok, alkák, parti madarak, bálnák, delfinek, valódi fókák, oroszlánfókák, medvefókák, tengeritehenek (manátik és dugongok), cápák, tengeri vidrák, halak és rákok. Még szemléletesebb az összesített adat: a tengeri teknősfajok 86%-a, a tengeri madárfajok 44%-a és a tengeri emlősök 43%-a potenciálisan veszélyeztetett a műanyagok által. Mindez valószínűleg erősen alábecsült, mert minden bizonnyal a legtöbb áldozatot nem fedezzük fel a hatalmas óceáni területeken: lesüllyednek vagy megesszik őket a ragadozók (Derraik 2002). A tengeri élőlények belegabalyodhatnak a sodródó hálókba, kötelekbe, horgász-zsinórokba. Több beszámoló szerint a fiatal medvefókák kifejezetten érdeklődnek a műanyag csomagolási hurkok iránt, melyek játék közben testükre tekerednek, olyan szorosan, hogy a húrukba vágnak, végül megfojtják őket: halálos nyakláncnak nevezik a kutatók ezt a jelenséget. Tragikus, hogy amint meghalt a fóka és teteme elbomlott, újabb áldozatokat szedhet ugyanez a hurok. 500 évig is eltarthat a lebomlása, addig sorozatgyilkosként szedi áldozatait (Derraik 2002).

A magára hagyott vagy elvesztett műanyag halászhálók és horgász-zsinórok továbbra is betöltik eredeti funkciójukat: hónapokon, éveken át elkapják és megölik a tengeri állatokat. Teknősök, halak, madarak, fókák esnek áldozatul ennek az úgynevezett szellemhalászatnak (Wurpel *et al.* 2011). Az Élmezési és Mezőgazdasági Világszervezet (FAO) 1991-es jelentésében úgy becsülte, hogy a halászati eszközök 10%-a elveszik, ami 10%-os csökkenést idéz elő a kifogni kívánt halpopulációban (idézi: Moore 2008). Az Új-Zéland és Antarktisz között évente vándorló hosszúzárnyú bálnák vastag köteleket húznak maguk után, melyektől nem tudnak megszabadulni. A tengerfenékre lesüllyedő, sodródó hálók károsítják az ottani élőhelyeket, főleg a korallszirteket, mintegy leradírozva azokat: a korallokba és aljzati növényekbe gabalyodó, áramlatokkal sodródó hálók letörrik és kiszakítják helyükről a gazdag élővilágnak otthont adó élőhelyeket, csupasz síkságot hagyva maguk után. Olyan ez, mint az erdei tarvágás (Gregory 2009).

Érdekes megfigyelés, hogy több ezer méteres mélységben fehér műanyag zacskók fejjel lefelé lebegnek és szabadon sodródhatnak, mintegy szellem benyomását keltve a mélytengerekben. Az ehhez hasonló műanyag darabok gyakran megté-

vesztik a teknősöket, és a tápláléklul szolgáló medúzák helyett ezeket eszik meg, aminek következménye a fulladás vagy bélelzáródás következtében beálló halál. A műanyag szeméttel való találkozás gyakran okoz maradandó vagy akár halálos sérüléseket is: gennyedző sebeket, fekélyes bőrt, elhalt végtagokat. A tengeri műanyag szemét tehát nagymértékben rontja az élőlények életminőségét és növeli halálozásukat (Gregory 2009).

Mérgező hatás és felhalmozódás élőlényekben

Kétféleképpen mérgezhetik meg a tengeri élőlényeket a szervezetükbe jutott műanyagok. Az emésztő szervrendszerükben savakkal, enzimekkel kapcsolatba lépve bomlani kezdenek és felszabadulnak a veszélyes adalékanyagok. Ezzel egyidejűleg a felületükön megkötött PBT vegyületek deszorbeálódnak. Minden szervet, szövetet károsíthatnak: megzavarják a hormonrendszert, mutagének, karcinogének.

Azon optimista véleményeket, hogy a lenyelt szemcsék gyorsan kiürülnek a kiválasztással és nem okoznak súlyos károsodást egy kékkagylókkal (*Mytilus edulis* Linnaeus, 1758) végzett német kutatás cáfolta meg (von Moos *et al.* 2012). A mikrométeres (0-80 μm) műanyag szemcséket a táplálékkal együtt felvették, kopolyúikkal kiszűrték a vízből. A gyomorból felszívódtak és az emésztőmirigyekhez vándoroltak, ahol a sejtekben halmozódtak fel. Tehát az emésztés után nem távoztak el a szervezetükből, hanem szöveteikben feldúsultak: ehhez elég volt 3 óra vizsgálati idő. Szövetteni vizsgálatokkal alátámasztották, hogy a sejtekbe kerülve gyulladási folyamatokat indítottak el. Sőt, képesek voltak már a kopolyúüregben bejutni a sejtekbe. A mérgező hatás a következőképp nyilvánult meg: a műanyag szemcsék és a belőlük felszabaduló mérgek olyannyira ronsolták a sejteket, hogy önlebontó folyamatokat indítottak el, ami szövetelhaláshoz vezetett. A mikroplasztikumok tehát fizikai és kémiai úton is károsították a kékkagylókat. A természetben még erősebb lehet ez a hatás, mert a laborban tiszta műanyag szemcséket használtak, a tengervízben viszont felszínükön POP vegyületeket is koncentrálnak. A kutatók „trójai ló” hatásnak nevezik, amikor a kisméretű plasztikumok bejuttatják az élőlények szervezetébe a veszélyes kémiai anyagokat (Cole *et al.* 2011).

Az állati szövetekben való felhalmozódás kimutatható szinte az összes tengeri élőlénynél: planktonikus szervezetekben (zooplankton, nyílférgek, halivadékok, evezőlábú rákok, krillek, zsákállatok), gerinctelenekben (tengeri férgek, tengeri rákok, tüskésbőrűek, mohaállatok, kagylók) és gerincesekben (fókák, madarak, delfinek, bálnák). Mindez negatívan hat egészségi állapotukra, rontja túlélési és szaporodási esélyeiket. Kisméretű élőlényekre a mikroplasztikumok, míg na-

gyobb termetűekre a mikro- és makroplasztikumok egyaránt veszélyt jelentenek (Cole *et al.* 2013).

A tengeri ökológiai rendszerek állapotának monitorozásához gyakran használják a tengeri madarakat (Ryan *et al.* 2009). Hatékonyan felmérhető velük a környezet állapota, mert nagy területeket járnak be, a tápláléklánc több szintjéről fogyasztanak élőlényeket és a kolóniákban egyszerre nagy számban vizsgálhatók. Ilyen madár az északi sirályhojsza (*Fulmarus glacialis* (Linnaeus, 1761)). Vándorlása során bejárja szinte az egész északi féltekét. Az Atlanti- és Csendes-óceán északi partjainál költ. Egy 2003–2007 közötti kutatásban 1295 sirályhojszát vizsgáltak meg és 95%-uk gyomrában találtak műanyagokat, átlagosan 35 darabot, 0,31 g tömeggel (Van Franeker *et al.* 2011). Az 1980-as évektől figyelik őket, s ez az arány mindig 90% felett volt. Ennek oka, hogy a táplálékuk és a műanyagok egyazon területen dúsulnak fel: az óceánok felszínén. A levegőből könnyen összetévesztik természetes táplálékukat a vízen lebegő, hasonló formájú és színű műanyagokkal. A sirályhojszák esete nem egyedi. Több mint 100 tengeri madárfajról tudják a kutatók, hogy műanyag darabokat halmoznak fel a gyomrukban (Gregory 2009).

Biológiai nemváltozás és kiszáradás

A műanyagok jelenléte a tengerpartokon drámaian megváltoztatja a homokos üledék fizikai-kémiai tulajdonságait. Ezt egy Hawaii-on végzett vizsgálat derítette ki. A hőelnyelő képessége lecsökkent a plasztikszemcsés-homokos üledéknek, ami azt jelenti, hogy kevésbé tud felmelegedni napsütéses időben. Ez kihathat a tengeri teknősök ivararányára: a tojásokból kikelő teknősök nemét a környező hőmérséklet határozza meg. Magasabb hőmérsékleten nőstények, alacsonyabban hímek születnek. Amennyiben lehűl környezetük, megnövekszik a hím egyedek aránya, ami veszélybe sodorhatja a fennmaradásukat. Ezzel szemben az áteresztőképességet növelik a műanyag szemcsék, így a nedvességmegtartó képesség csökken, ami az üledéklakó élőlények kiszáradását okozhatja, például árapálykor (Cole *et al.* 2011).

Ökológiai hatás

Az élőlénytársulások kétféle veszélynek vannak kitéve. Egyrészt a mindenholva eljutó műanyagok felületén agresszív, inváziós fajok érkehetnek a különféle tengeri élőhelyekre, így kiszorítják a helyi fajokat, csökkentik a biológiai sokféleséget. Másrészt az élőlényekben feldúsult műanyag szemcsék a táplálékláncban horizontálisan és vertikálisan haladva szétterjednek: minden tengeri élőlény szervezetébe bejuthatnak. A következőkben e hatásokat fejtem ki részletesen.

Invazív fajok terjedése

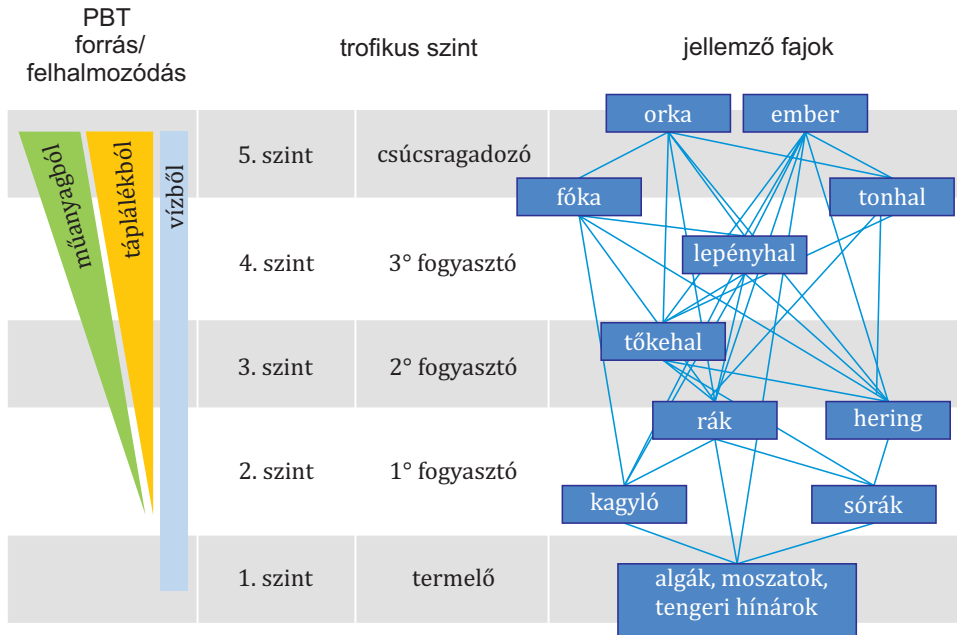
A tengerben sodródó törmelékkel korábban is eljutottak különböző fajok távolabbi helyekre. A természetes tengeri szállítórendszert leggyakrabban lebegő hínárok, habkövek (porózus, vízen úszó vulkanikus kőzet) és fadarabok alkotják. Ez eddig egy lassú és erősen korlátozott folyamat volt: a szállító anyagból viszonylag kevés fordult elő, illetve hamar lebomlott vagy táplálék lett belőle. A műanyagok megjelenése teljesen megváltoztatta ezt a helyzetet. Nagy mennyiségük és ellenálló, stabil felületük szinte korlátlan lehetőséget teremtett az opportunistá⁴ kolonizáló fajok szétterjedése előtt. Az utazások gyakoribbá és hosszabb idejűvé váltak, nagyobb távolságokat lehetett leküzdeni (Barnes 2002). Lényegét tekintve tehát felgyorsult az idegen, gyakran invazív fajok világméretű diszperziója. Mindez komoly veszélyt jelent a biodiverzitásra nézve. A megjelenő új fajoknak nincs, vagy csak kevés a természetes ellensége, a zsákmányállatok és paraziták nem ismerik fel őket a koevolúció hiánya miatt. A helyi ökoszisztéma nem tud hatékonyan védekezni ellenük: ez teszi lehetővé hirtelen és tömeges elszaporodásukat. Becslések szerint 58%-al csökkenne a globális tengeri fajgazdagság, ha megvalósulna az élőlények teljes keveredése (Derraik 2002).

A lebegő műanyag objektumokon (bójákkal, kötelekkel) vagy a mikroplasztikumokon bevonatot képezve baktériumok, kovamoszatok, algák, zsákkállatok, hidraállatok, mohaállatok, tengeri makkok (apró rákfélék), kagylók, tengeri csigák, tengeri csőférgék és eukarióta egysejtűek juthatnak el olyan élőhelyekre, melyen azelőtt sose fordultak elő. Tengerpartok, árapály zónák, sekély tengerek és távoli óceáni szigetek sérülékeny ökológiai rendszereire nézve jelenti a legnagyobb fenyegetést az invazívvá váló idegenhonos fajok megjelenése (Gregory 2009).

Néhány konkrét esetet is dokumentáltak. Egy mohaállat (*Membranipora tuberculata* (Bosc, 1802)) átszelve a Tasmán-tengert Ausztráliából Új-Zélandra jutott műgyanta-szemcséken utazva. Egy másik mohaállat (*Electra tenella* (Hincks, 1880)) a Karib-tengerről érkezett az USA partjaihoz műanyag darabokon. Leírták azt is, hogy tengeri makkok egy csoportja műanyagokhoz tapadva átszelte az egész Atlanti-óceánt (Derraik 2002).

A veszélyt tovább fokozza, hogy egy-egy műanyag szemcsén nemcsak néhány élőlény, hanem több száz különféle faj is előfordulhat, melyekből több is veszélyes lehet. Az Észak-Atlanti-óceán szubtrópusi örvényéből vett PP és PE szemcséket megvizsgálva gazdag mikrobiális élővilágot fedeztek fel, melyet a kutatók plasztikszférának neveztek el (Zettler *et al.* 2013). Találtak fényhasznosító, szerves anyagot fogyasztó, bekebelező, együttélő és kórokozó baktériumokat is, vagyis egy egész kis közösséget. Mintát vettek a környező tengervízből is, hogy

4 Olyan fajok, amelyek a változékony környezetek elviseléséhez alkalmazkodtak, és jellemzően gyors a növekedésük és a terjedési sebességük.



2. ábra. A PBT vegyületek három forrásból eredő felhalmozódása egy ötszintű tengeri táplálékhálóban (ábra forrás: Engler 2012).

összehasonlítsák a diverzitási mintázatokat. Két lényeges különbség vehető észre. A környező vízben sokkal magasabb volt a fajgazdagság, de a műanyag szemcsék élővilága ettől alapvetően eltért, viszont ezek egymással nagy hasonlóságot mutattak. Egyértelműen látszik, hogy távolról utaztak ide a szemcsék, nem helyben történt meg a kolonizáció, és vannak olyan biofilm alkotó baktériumok, melyeknek ideális élőhelyet jelent ez az új környezet. Egy új ökológiai fülke jött létre.

Az idegenhonos fajok földközi elterjedéséhez tehát minden feltétel adott. Egyedül az Arktisz és Antarktisz élvez védeltséget: a 60. szélességi fok felett műanyagokon nem figyelhető meg fauna. Az alacsony hőmérséklet és a magasabb UV-sugárzás nem kedvez a vándoroknak. Ez azonban nem lesz sokáig így. A legvalószínűbb modell szerint a század közepére regenerálódik az ózonpajzs az ózonfáló vegyületek használatának korlátozása miatt, a globális éghajlatváltozás következtében pedig a számítások szerint több mint 2°C-ot nő a hőmérséklet a Déli-Óceán térségében. Az Antarktisz körüli vizek 25 millió éve jól el vannak szigetelve a környező vizektől a cirkumpoláris áramlattal⁵, így nagyon sok őshonos faj otthonát képezik. Ha a térségben már felfedezett műanyag szemcsék mellett

⁵ Az óramutató járásával megegyező irányban forgó, Ny-ról K-re örvénylő víztömegek.

megjelennek az idegen fajok is, az drámaian károsítani fogja a térség ökológiai rendszerét (Barnes 2002).

Felhalmozódás táplálékláncban

A PBT-k táplálékláncban történő felhalmozódása három forrásból ered: magából az életközegből (tengervízből), az elfogyasztott élelemből (szűrőgetés, predáció, dögevés) és a szervezetbe került műanyag darabokból. A folyamat jól szemléltethető egy jellegzetes tengeri hálózat elemzésével (2. ábra).

Az erőteljesen szennyezett Tokiói-öböl vizében 0,93–1,02 ppb⁶ a PCB háttérkoncentrációja. Minden tengeri élőlény ebben a közegben él. A kopoltyújukon, emésztőrendszerükön vagy szervezetükön átáramló vízből a szöveteikben megkötődik a szennyezés egy része, ez a biokoncentráció jelensége. A tápláléklánc legalján helyet foglaló elsődleges termelő szervezetekben (algák, moszatok, tengeri hínárok) kialakul egy, a környezetnél magasabb szennyezőanyag koncentráció. Ezen a szinten ez az egyedüli forrás.

Az aljazaton táplálkozó, üledékező élőlények (férgek, rákok) bélrendszerében a lenyelt homokszemcsékből és parányi műanyag szemcsékből mobilizálódnak a megkötött mérgezőanyagok. Hasonló a helyzet a szűrőgető módon táplálkozó kagylókkal és tengeri uborkákkal. A táplálékszemcsék mellett műanyag szemcséket is felvesznek, melyek hetekig, hónapokig a szervezetükben maradnak, eközben kioldódnak a káros anyagok. A lebegő életmódot folytató apró termetű sórákok (*Artemia salina* (Linnaeus, 1758)) a fotoszintetizáló szervezetek elfogyasztásával jutnak hozzá ezekhez a vegyületekhez. A tápláléklánc második szintjén tehát két új forrás jelenik meg: az elfogyasztott élelem és a műanyag szemcsék. Ez a folyamat a bioakkumuláció.

Ahogy haladunk felfelé a táplálékláncban, úgy növekszik a táplálékkal és műanyagokkal bejuttatott PBT mennyiség, a vízből történő közvetlen adszorpció viszont egyre kevésbé lesz meghatározó. Az élőlények mérete növekszik, számuk viszont csökken. A több zsírszövet több víztaszító vegyületet képes megkötni. A biomagnifikáció során minden szintlépéskor egy nagyságrenddel növekszik a szervezetben felhalmozott mennyiség, amit egy japán vizsgálat is kimutatott. Az átlagos PCB koncentráció növekedése a következő volt: tengervízben 0,98 ppb, tengeri csigákban 48 ppb rákokban és halakban 240 ppb. Az USA atlanti-óceáni partvidékén lepényhalakban (2–3. szint között) 1000–6000 ppb értéket mértek (hozzá kell tenni, hogy egy fokozottan szennyezett területről van szó). Ez még csak a tápláléklánc közepe. A felhalmozódás könnyen észrevehető, ahogy szintről szintre haladunk felfelé. Egy 3–4. szint közötti tőkehal korábban ehetett olyan tarisznyarákokat és heringeket a 2–3. szintről, melyek kagylókat és sórákokat fo-

6 PPB = parts per billion = db/mrd = µg/l = ng/g

gyaszthattak az 1–2. szintről, ezek pedig algákból és hínárokból lakhattak jól. Így a plasztikszemcsék a táplálékból vagy a táplálékkal együtt jutnak egyre feljebb és feljebb a 2. szinttől kezdve.

A 4–5. szint között (a tápláléklánc magasabb szintjein) megjelennek a gerincesek. Tengeri teknősökben és tojásaikban is magas a szennyeződés mértéke. A fókák zsírszövetében 1370 ppb PCB felhalmozódást találtak. 13 megvizsgált tengeri madárfaj 30 egyede közül volt, amelyekben 10 000 ppb-nél is többet mértek. Megállapították, hogy ez elsősorban nem a halfogyasztásból származik, ugyanis gyakran csipegetnek fel számukra vonzó, vízen lebegő, színes műanyag darabokat. Egy gramm műanyagból hatszor több PCB oldódik ki bélrendszerükben, mint az egy napon megevett halmennyiségből. Ez világosan megmutatja, hogy kis mennyiségű lenyelt szennyezett műanyag is jelentős veszélyt jelent rájuk nézve. Egyes fajokat tekintve tehát nagyobb a közvetlen, mint a közvetett PBT felhalmozás. Nagyobb fenyegetettségnek vannak kitéve azok a madarak, melyek olyan területek felett repülnek, ahol magasabb a vízen lebegő műanyag darabok PCB koncentrációja (néhány ilyen térség: ÉK-USA, New-England (max. 5000 ppb), Japán (max. 2300 ppb), Észak-Csendes-óceán (max. 980 ppb), Észak-Atlanti-óceán (300-600 ppb), Dél-Csendes-óceán, Brazília (243-491 ppb). A kutatók azonban tudják, hogy egy-egy kiugró koncentrációjú szemcse bárhol felbukkanhat, hiszen könnyen átszelhetik az óceánokat. Gyakorlatilag nincs biztonságban egyetlen tengeri madár sem. A tengerek csúcsragadózóiban, a kardszárnyú delfinekben – más néven orkáknak – közel 1 000 000 ppb értékeket mértek (Engler 2012).

Megvizsgálva a teljes láncolatot tehát drámai mértékű feldúsulást lehet tapasztalni: a kezdeti, 1 ng/g nagyságrendről (1. szint) 1 000 000 ng/g (1 mg/g) nagyságrendre (5. szint) nőtt az élőlényekben koncentrált PBT vegyületek mennyisége. Ez hat nagyságrendű, milliószeres dúsulást jelent. A tengeri eredetű élelmek fogyasztása ezért válik egyre veszélyesebbé, főként a szennyezettebb vizekben halászó szegényebb országok halászáinak számára.

Az emberi egészségre kifejtett hatás

A tengeri környezet műanyag szennyezése az ember egészségére is potenciális, közvetett veszélyforrást jelent, ugyanis az ember többféle tengeri élőlényt fogyaszt a tápláléklánc magasabb szintjeiről – főképpen halakat, kagylókat és rákokat –, melyek közvetítésével visszajutnak szervezetünkbe a korábban szennyezésként kibocsátott, és a tengeri élőlényekben felhalmozódott mérgező anyagok.

A POP vegyületcsalád tagjai (PCB, PBDE, PAH, DDT, DDE, HCH és egyéb PBT vegyületek) egyértelmű mutagénnek és karcinogénnek bizonyultak állatkí-

sérletekben (egerek, patkányok, rhesus majmok), és ez a hatás valószínűsíthető emberekben is. Testidegen anyagok – szerkezetük a hormonokéhoz hasonló (xenoösztrogének) –, így képesek megzavarni a hormonális rendszer működését (endokrin diszruptorok). Csökkentik a nők és a férfiak termékenységét, csecsemőknél születési és fejlődési rendellenességet okozhatnak. Mérgező hatásukat szintén állatkísérletek támasztják alá: májkárosítók és idegrendszer károsítók (Faroon *et al.* 2002).

Japánban 2005-ben megjelent egy epidemiológiai tanulmány, mely összegezte a PCB-k egészségre gyakorolt hatásait (Arisawa *et al.* 2005). A poliklórozott-bifenilek – hasonlóan a PBT vegyületcsalád többi tagjához – xenobiotikumok, szervezeteidegen anyagok, fokozottan károsak az egészségre. Hiába tiltották be, illetve korlátozták használatukat a hetvenes évektől kezdve, mivel nehezen bomlanak le és zsírolédékonyak, felhalmozódtak, és továbbra is felhalmozódnak a környezetben, valamint az élőlényekben.

Az emberi szervezetbe kerülve tehát tartósan, hosszú időn keresztül fejtik ki hatásukat. Anyagcsere zavart okoznak, melyek leginkább az idegrendszer működésének romlását eredményezik. Legnagyobb veszélyben a magzatok vannak. A terhes anyák megnövekedett PCB szintje csökkentette a megszületett csecsemők testsúlyát, lassította növekedésüket és negatívan hatott a mozgási és megismerő képességeik fejlődésére. Ezt a hatást fokozta, ha szoptatás alatt is magas volt az anyukák PCB szintje, ugyanis az anyatejjel is átjutottak a gyerekek szervezetébe (Faroon *et al.* 2002).

A veszélyes kémiai anyagok mellett káros algamérgek és patogén baktériumok is a szervezetünkbe kerülhetnek tengeri eredetű élelem fogyasztásakor. A mikroplasztikumok felületén mérgező algák is megtelepedhetnek, például dinoflagellata fajok, melyek dinotoxinokat termelnek. Az elsődleges fogyasztó szervezetekbe (kagylókba, rákokba és halakba) kerülve folyamatosan felhalmozódnak ezek az algákban lévő méreganyagok, emberi fogyasztás esetén pedig mérgezési tüneteket is okozhatnak. A felhalmozódás olyan mértékű is lehet, hogy a halak belepusztulhatnak. A műanyag-szemcsék bakteriális élővilágát elemezve emberi kórokozókat is találtak a *Vibrio* nemzetségből (Zettler *et al.* 2013). A *Vibrio* sp. baktériumok gyomor- és bélrendszeri tüneteket, valamint vérmérgezést okoznak.

Társadalmi és gazdasági hatás

Leginkább a tengerparti közösségeket érintik a tengeri műanyagszennyezés okozta költségek, pedig elsősorban nem ők okozzák a problémát, így nem érvényesül a szennyező fizet elv. A halászat, hajózás, turizmus és akvakultúra gazdasági

szektorok – melyek munkát és megélhetést adnak több millió embernek – komoly károkat szenvednek el.

A legkézzelfoghatóbb gazdasági hatás a halászati lehetőségek csökkenése. Rengeteg időt és energiát vesz igénybe a halászháló és hajócsavarok megtisztítása, a hajózhatatlan területek kikerülése. A hálókba nemcsak hal kerül, hanem szemét is, így a fogás egy része elveszik. Mindezt jól mutatja a skót halászok körében végzett felmérés: a halászhajók 86%-ának munkáját korlátozta a tengeri szemét, a fogás 82%-a tartalmazott valamilyen hulladékot, s 95%-uk halója akadt el valamilyen tengerfenéki mesterséges tárgyban. Mindez a skót halászati iparnak évi 16 millió dollár kárt okoz. Ez 5% kiesést jelent a halászok jövedelméből. Indonéziában a hálókba akadt műanyag zacskók jelentős mértékben csökkentik a halfogást. Nagy-Britanniában 2008-ban 2,8 millió dolláros költséget jelentett az elakadt propellerű halászhajók kimentése. Figyelembe véve, hogy a világ halászati ipara évi 94 milliárd dolláros forgalommal rendelkezik, több milliárd dolláros a veszteség csak ebben a szektorban (Wurpel *et al.* 2011). A FAO 1991-es becslése szerint 10% veszteséget okoz a szellemhalászat a kifogható halállományban, a sodródó halász eszközök eltávolításainak költségei pedig rontják a kereskedelmi halászat jövedelmezőségét.

A homokos tengerpartok megtisztítása óriási költségeket emészt fel. Hollandiában és Belgiumban évi 13,65 millió dollárt kell erre a célra fordítani és ezek a költségek rohamosan nőnek. Nagy-Britanniában az elmúlt 10 évben 38%-al nőttek a tisztítás költségei: 23,62 millió dollárra. A kaliforniai Long Beach városa 2,2 millió dolláros ráfordítással tudja csak tisztán tartani partját a Csendes-óceánból érkező szemét eltakarításával. Globálisan, a 34 millió kilométernyi tengerpart tisztán tartására a becslések szerint 60 milliárd dollárt kellene költeni évente (Wurpel *et al.* 2011).

A tengerpartok és partközeli vizek állapotának romlása a turizmust is csökkenti. Ez azokon a helyeken jelenti a legnagyobb gondot, ahol ez az egyik fő bevételi forrás, például az északkelet-kínai kikötővárosban, Dalianban, ahol több tízmillió dollárt kellene ráfordítani a tengerpartok állagmegóvására, hogy továbbra is vonzó legyen a Japánból, Dél-Koreából és Oroszországból érkező turisták számára (STAP 2011).

Az APEC régióban (az Ázsiai és Csendes-óceáni Gazdasági Együttműködés térségében), mely magában foglalja Kínát, USA-t, Kanadát, Mexikót, Oroszországot, Ausztráliát, Új-Zélandot és még másik 14 óceánparti államot, évi 1265 millió dollár kiesést jelent a halászat, hajózás és turizmus iparának visszaesése. Tehát a tengeri hulladék által okozott gazdasági károk már most számottevőek és egyre csak növekednek, újabb és újabb szektorokat érnek el.

Az idegenhonos fajok terjedése a műanyag felszínén utazva nemcsak a tengeri ökoszisztémákra jelent veszélyt, hanem az akvakultúrákban tenyésztett, gazdasági szempontból jelentős fajokra is. Az akvakultúrák olyan mesterségesen létrehozott vízi környezetet jelentenek, ahol tengeri és édesvízi növényeket, állatokat (például halakat, rákokat, kagylókat és moszatokat) tenyésztnek valamilyen céllal, ami lehet ipari felhasználás, élelmiszertermelés vagy állománymegőrzés. A chilei vörös alga (*Gracilaria chilensis* C. J. Bird, McLachlan & E. C. Oliveira, 1986) farmokon 1998-ban moszatinvázió kezdődött egy invazív zöld alga (*Codium fragile* Hariot, 1889) megjelenésével, ami rohamosan szétterjedt mind az északi, mind a déli farmokon. Agresszív, gyors szaporodása miatt nem tudott megbirkózni vele a helyi ökoszisztéma, ráadásul ahol megjelent, ott alkalmatlanná vált a terület a művelésre, vagy a művelés csak komoly költségek árán folytatódhatott (kémi-ai védekezés, kézi eltávolítás munkásokkal, elszállítás), ezért több farmot is be kellett zárni. A gazdák megélhetése veszélybe került. A *Gracilaria* fajok komoly gazdasági jelentőséggel bírnak: élelmiszeripari és kozmetikai alapanyagok. Vörös algából készül az agaragar is, mely világszerte elterjedt mikrobiológiai táptalaj. Az ezt kiszorító *Codium* alga igen veszélyes: 113 vizsgált európai algafaj közül a legkockázatosabbnak minősítették terjedési képessége és ökológiai hatása miatt. A kanadai akvakultúrákban is óriási, évi 1,2 millió dolláros károkat okoz a *Codium* invázió a hálók benövésével és a halak táplálékául szolgáló apró kis rákok mozgásának akadályozásával. A Chilét elárasztó *Codium* meglepő módon Japánból érkezett. De nemcsak Dél-Amerika csendes-óceáni partvonalát érte el, hanem eljutott Észak-Amerikába, Európába, Ausztráliába és Új-Zélandra is. Ahol megjelenik, ott mindent beborít: sziklákat, korallokat, rákokat, kagylókat, mesterséges tárgyakat, például köteleket vagy hullámtörő gátakat is. Sok helyen képes megélni, mivel széles tűrőképességű a hőmérséklet, sótartalom, fényviszonyok és tápanyag-elérhetőség tekintetében. Képes ivaroson és ivartalanul is szaporodni. Egy igazi inváziós faj. Azért tudott évek alatt ilyen gyorsan és ilyen távoli helyekre is eljutni, mert terjedését a tengeri műanyagok segítették. Műanyag bójákhoz tapadva 10 év alatt 1200 km-t is képes volt megtenni, így szelte át az óceánokat. A természetes anyagok (például fadarabok, madártollak, termések) ilyen hosszú idő alatt lebomlottak volna. Tehát a mesterséges objektumok új folyosót nyitnak meg az egymástól távoli tengeri élőhelyek között, s közvetítik az olyan invazívá váló fajok terjedését is, melyek hatalmas gazdasági károkat okoznak (Neill *et al.* 2006).

Konklúzió

A cikk első részében részletes képet kaphattunk a műanyagok okozta szerteágazó környezeti problémáról. Egyértelmű, hogy a helyzetet nem lehet kezelni kizárólag természettudományos módszerekkel (pl. természetvédelmi biológia), de még műszaki tudományokkal (pl. óceántisztító berendezések) sem. Fel kell ismerni, hogy mélyreható társadalmi, gazdasági és politikai változások nélkül nem lehet eredményeket elérni. Nem szűkíthetjük le a problémával való foglalkozást deskriptív megközelítésre, szükség van a normatív iránymutatásra is. A folytatásban erről fogok írni.

Irodalomjegyzék

- Andrady, A. L. (2011): Microplastics in the marine environment. – *Mar. Pollut. Bull.* **62**(8): 1596–1605. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Arisawa, K., Takeda, H. & Mikasa, H. (2005): Background exposure to PCDDs / PCDFs / PCBs and its potential health effects: a review of epidemiologic studies. – *J. Med. Invest.* **52**(1–2): 10–21. <http://dx.doi.org/10.2152/jmi.52.10>
- Barnes, D. K. (2002): Biodiversity: invasions by marine life on plastic debris. – *Nature* **416**(6883): 808–809. <http://dx.doi.org/10.1038/416808a>
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. (2009): Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. – *Philos. T. R. Soc. B: Biological Sciences.* **364**(1526): 1985–1998. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. & Thompson, R. (2011): Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. – *Environ. Sci. Technol.* **45**(21): 9175–9179. <http://dx.doi.org/10.1021/es201811s>
- Carson, H. S., Lamson, M. R., Nakashima, D., Toloumu, D., Hafner, J., Maximenko, N., & McDermid, K. J. (2012): Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawaii, i. – *Mar. Environ. Res.* **84**: 76–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.12.002>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. & Galloway, T. S. (2011): Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. – *Mar. Pollut. Bull.* **62**(12): 2588–2597. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C. & Goodhead, R. M., Moger, J., Galloway, T. (2013): Microplastic ingestion by zooplankton. – *Environmenta science & technology.* **47**(12): 6646–6655.
- Derraik, J. G. (2002): The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. – *Mar. Pollut. Bull.* **44**(9): 842–852. [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Do Sul, I. J. A. & Costa, M. F. (2014): The present and future of microplastic pollution in the marine environment. – *Environ. Pollut.* **185**: 352–364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>
- Engler, R. E. (2012): The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. – *Environ. Sci. Technol.* **46**(22): 12302–12315. <http://dx.doi.org/10.1021/es3027105>
- Eriksen, M., Maximenko, N., Thiel, M., Cummins, A., Lattin, G., Wilson, S., Hafner, J., Zelleres, A. & Rifman, S. (2013): Plastic pollution in the South Pacific subtropical gyre. – *Mar. pollut. Bull.* **68**(1–2): 71–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.021>

- Fendall, L. S. & Sewell, M. A. (2009): Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. – *Mar. Pollut. Bull.* **58**(8): 1225–1228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025>
- Gregory, M. R. (2009): Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. – *Philos. T. R. Soc. B: Biological Sciences.* **364**(1526): 2013–2025. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
- Faroon, O., Harris, M. O., Lladós, F., Swarts, S., Sage, G., Citra, M., & Gefell, D. (2002): *Toxicological profile for DDT, DDE, and DDD*. – US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp35.pdf>) Letöltés ideje: 2014.05.01.
- Hirai, H., Takada, H., Ogata, Y., Yamashita, R., Mizukawa, K., Saha, M., Kwan, C., Moore, C., Gray, H., Laursen, D., Zettler, E. R., Farrington, J. W., Reddy, C. M., Peacock, E. E. & Ward, M. W. (2011): Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. – *Mar. Pollut. Bull.* **62**(8): 1683–1692. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.004>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. & Law, K. L. (2015): Plastic waste inputs from land into the ocean. – *Science.* **347**(6223): 768–771. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1260352>
- Kaposi, K. L., Mos, B., Kelaher, B. & Dworjanyn, S. A. (2013): Ingestion of microplastic has limited impact on a marine larva. – *Environ. Science Technol.* **48**(3): 1638–1645. <http://dx.doi.org/10.1021/es404295e>
- Kershaw, P., Katsuhiko, S., Lee, S., Samseth, J., Woodring, D. & Smith, J. (2011): *Plastic debris in the ocean*. – United Nations Environment Programme (UNEP) Year Book. pp. 20–33.
- Krause, J. C., von Nordheimen, H. & Brager, S. (2006): *Marine Nature Conservation in Europe*. (https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/meeresundkuestenschutz/downloads/Fachtagungen/Marine-Nature-Conservation-2006/Proceedings-Marine_Nature_Conservation_in_Europe_2006.pdf) Letöltés ideje: 2016.08.04.
- Laist, D. W. (1987): Overview of the biological effects of lost and discarded plastic debris in the marine environment. – *Mar. Pollut. Bull.* **18**(6): 319–326. [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X\(87\)80019-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X(87)80019-X)
- Law, K. L., Morét-Ferguson, S., Maximenko, N. A., Proskurowski, G., Peacock, E. E., Hafner, J. & Reddy, C. M. (2010): Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre. – *Science.* **329**(5996): 1185–1188. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1192321>
- Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., Glas, M. & Schludermann, E. (2014): The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumber fish larvae in Europe's second largest river. – *Environ. Pollut.* **188**: 177–181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006>
- Martinez, E., Maamaatuaiahutapu, K., Taillandier, V. (2009): Floating marine debris surface drift: convergence and accumulation toward the South Pacific subtropical gyre. – *Mar. Pollut. Bull.* **58**(9): 1347–1355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.022>
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C. & Kaminuma, T. (2001): Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. – *Environ. Sci. Technol.* **35**(2): 318–324. <http://dx.doi.org/10.1021/es0010498>
- McNeill, J. R. (2011): *Válemi új a nap alatt*. – Ursus Libris, Budapest. 303 p., 349 p.
- Moore, C. J. (2008): Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat. – *Environ. Res.* **108**(2): 131–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>

- Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. (2001): A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. – *Mar. Pollut. Bull.* **42**(12): 1297–1300. [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
- Morét-Ferguson, S., Law, K. L., Proskurowski, G., Murphy, E. K., Peacock, E. E. & Reddy, C. M. (2010): The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. – *Mar. Pollut. Bull.* **60**(10): 1873–1878. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.020>
- Neill, P. E., Alcalde, O., Faugeton, S., Navarrete, S. A. & Correa, J. A. (2006): Invasion of *Codium fragile* ssp. *Tomentosoides* in northern Chile: A new threat for *Gracilaria* farming. – *Aquaculture*. **259**(1–4): 202–210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.05.009>
- Ogata, Y., Takada, H., Mizukawa, K., Hirai, H., Iwasa, S., Endo, S., Mato, Y., Saha, M., Okuda, K., Nakashima, A., Murakami, M., Zurcher, C., Booyatumanondo, R., Zakaria, M. P., Dung, L. Q., Gordon, M., Miguez, C., Suzuki, S., Moore, C., Karapanagioti, H. K., Weerts, S., McClurg, T., Burrell, E., Smith, W., Van Velkenburg, M., Lang, J.S., Lang, R. C., Laursen, D., Danner, B., Stewardson, N. & Thompson, R. C. (2009): International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs. – *Mar. Pollut. Bull.* **58**(10): 1437–1446. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.06.014>
- PlasticsEurope (2013): *Plastic - the Facts 2013*. (<http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2013.aspx?FolID=2>) Letöltés ideje: 2014.05.01.
- Rochman, C. M., Manzano, C., Hentschel, B. T., Simonich, S. L. M. & Hoh, E. (2013): Polystyrene Plastic: A Source and Sink for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Marine Environment. – *Environ. Sci. Technol.* **47**(24): 13976–13984. <http://dx.doi.org/10.1021/es403605f>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Synder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J. A. (2009): A safe operating space for humanity. – *Nature* **461**(7263): 472–475. <http://dx.doi.org/10.1038/461472a>
- Ryan, P. G., Moore, C. J., van Franeker, J. A. & Moloney, C. L. (2009): Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. – *Philos. T. R. Soc. B: Biological Sciences*. **364**(1526): 1999–2012. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2008.0207>
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V. & Lehtiniemi, M. (2014): Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. – *Environ. Pollut.* **185**: 77–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013>
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A. & Ahmed, S. (2008): Biological degradation of plastics: a comprehensive review. – *Biotechnol. Advances* **26**(3): 246–265. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- STAP (2011): *Marine Debris as a Global Environmental Problem: Introducing a solutions based framework focused on plastic*. – A STAP Information Document. Global Environment Facility, Washington, DC. (<http://www.thegef.org/gef/sites/thegef.org/files/publication/STAP%20MarineDebris%20-%20website.pdf>) Letöltés ideje: 2014.01.14.
- Thiel, M., Bravo, M., Hinojosa, I. A., Luna, G., Miranda, L., Núñez, P., Aldo S. P. & Vásquez, N. (2011): Anthropogenic litter in the SE Pacific: an overview of the problem and possible solutions. – *RGCI-Revista de Gestão Costeira Integrada* **11**(1): 115–134. <http://dx.doi.org/10.5894/rgci207>
- Van Franeker, J. A., Blaize, C., Danielsen, J., Fairclough, K., Gollan, J., Guse, N., Turner, D. M., Hansen, P-L., Heubeck, M., Jensen, J-K., Guilloum G. L., Olsen, B., Olsen, K-O., Pedersen, J., Stienen, E. W. M. & Turner, D. M. (2011): Monitoring plastic ingestion by the northern

- fulmar *Fulmarus glacialis* in the North Sea. – *Environ. Poll.* **159**(10): 2609–2615. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.008>
- von Moos, N., Burkhardt–Holm, P. & Köhler, A. (2012): Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. – *Environ. Sci. Technol.* **46**(20): 11327–11335. <http://dx.doi.org/10.1021/es302332w>
- WEF, World Economic Forum (2016): The New Plastics Economy. Rethinking the future of plastics. (http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf) Letöltés ideje: 2016.06.01.
- Wright, S. L., Thompson, R. C. & Galloway, T. S. (2013): The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. – *Environ. Poll.* **178**: 483–492. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
- Wurpel, G., Van den Akker, J., Pors, J. & Ten Wolde, A. (2011): Plastics do not belong in the ocean. Towards a roadmap for a clean North Sea. – IMSA Amsterdam. (http://www.plasticmarinelitter.eu/wp-content/uploads/2011/10/PML100_report-plastics-do-not-belong-in-the-ocean-DEF.pdf) Letöltés ideje: 2014.01.16.
- Zettler, E. R., Mincer, T. J. & Amaral–Zettler, L. A. (2013): Life in the ‚Plastisphere‘: Microbial communities on plastic marine debris. – *Environ. Sci. Technol.* **47**(13): 7137–7146. <http://dx.doi.org/10.1021/es401288x>

The complex impact of the plastic pollution in the seas and the oceans – part 1: Introduction

István Gubek

*Eötvös Loránd University, Humanecology MA,
H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, Hungary
e-mail: istvan.elte@gmail.com*

The plastic pollution of seas and oceans is a more and more important search field in the recently years. It's a similar global environmental problem like climate change or the losses of biodiversity, nevertheless the publicity has much less information about it because this is a brand new area and it has not got a Hungarian literature yet. This is the first comprehensive article which was made by the detailed study of the international literature. In the first part I examine the complex impacts of plastics in the marine environment based on physical, chemical, biological, ecological, economical and social aspects. Later, in the second, ending part I will expound the already exist possible solutions.

Keywords: seas, oceans, plastics, environmental pollution, garbage patches, biodiversity, ecosystems, food chain