

SZAKDOLGOZAT

Kiss Gábor János

2025



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Budai Campus

Környezettudományi Intézet

Kertészmérnök alapképzési szak

**A MIKROMŰANYAGOK NÖVÉNYEKRE GYAKOROLT
HATÁSAI ÉS BEKERÜLÉSÜK A TÁPLÁLÉKLÁNCBA**

Belső konzulens: Dr. Kardos Levente
tanszékvezető,
egyetemi docens

Belső konzulens

intézete/tanszéke: Környezettudományi Intézet
Agrárkörnyezettani Tanszék

Készítette: Kiss Gábor János

Budapest

2025

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	2
2. A műanyagok elterjedése.....	3
2.1 A műanyagok rövid története	3
3. Az műanyagok környezetre és élővilágra gyakorolt hatása.....	7
3.1 A makro-, és mikroműanyagok a világtengerekben.....	7
3.2 A mikroműanyagok a talajban.....	12
3.3 A mikroműanyagok növényekre gyakorolt hatásai.....	16
3.4 A városi és forgalmas utak menti mikroműanyagok szennyező hatása.....	20
3.5 A mikroműanyagok eltérő hatásai a növényekre különböző koncentrációk mellett	21
3.6 A mikroműanyagok kimutatásának módszerei növényekben	23
3.7 A mikroműanyagok átörökítése az utódnövényekbe.....	26
4. További nemzetközi kutatások a mikroműanyagok témájában	28
4. 1. A mikroműanyagok szezonális változása a termőföldben	28
4. 2. Mikroműanyagok Franciaország talajában.....	30
4. 3. A mikroműanyagok emberi egészségre gyakorolt hatásai.....	32
4. 4. A mikroműanyagok karakterisztikájának meghatározása szennyvízben	33
4. 5. A nanoműanyagokról röviden	34
5. Kérdések és kihívások a jövőben.....	36
5.1 A jövőbeli kutatási területek iránya.....	36
5.2 A műanyagok kibocsátásának csökkentésére tett törvényi szabályozások	37
6. Összefoglalás	38
7. Köszönetnyilvánítás.....	39
8. Irodalomjegyzék.....	40
9. Ábrajegyzék	45

1. BEVEZETÉS

A társadalmi, technológia és ipari fejlődés eredményeként a XIX. század közepétől újfajta anyagok jelentek meg a mindennapi használatban a műanyagok. Ezek az anyagok aztán észrevétlenül behálózták az élet minden területét, az általuk keletkezett hulladékok pedig kitörölhetetlen nyomot hagytak a környezetben, és ma már kimutathatóan jelen vannak a levegőben, az ivóvizekben, a világtengerekben és a talajban. A műanyag hulladékok nem csupán nagyméretű, úgynevezett makroműanyagok lehetnek, hanem egészen kicsi mikroműanyagok formájában szinte láthatatlanul is jelen vannak a környezetünkben. Ezek lehetnek makroműanyagok bomlástermékei, de éppúgy lehetnek már eleve ilyen kis méretben gyártott műanyag részecskék is.

Az elmúlt évtizedben jelentősen megnőtt azon kutatások száma, amelyek tudományos módszerekkel igyekeztek igazolni a mikroműanyagok növényekre, állatokra és emberekre történő élettani hatásait, és az ebben rejlő egészségügyi kockázatokat, számos esetben igazolva a feltevéseket.

Jelen dolgozatom csupán arra tud kísérletet tenni, hogy felhívja a figyelmet ezeknek a szennyező anyagoknak a jelenlétére, és előrevetítheti annak igényét, hogy több figyelmet szenteljünk a mikroműanyagok, mint környezetkárosító és emberi egészségre kockázatot hordozó anyagok redukálására, valamint egy nemzetközileg egységes vizsgálati módszer kidolgozásának szükségességére, amely összehasonlítható eredményeket adhatna a mikroműanyagok növényekben történő előfordulásának meghatározására. Hasonlóképpen szükséges a műanyagok használatának csökkentése, korlátozása, természetes anyagokkal történő kiváltása, illetve azok a törekvések, amelyek a műanyagok újra hasznosítására irányulnak.

A fentiek mellett arra keresem a választ, hogy a jelenlegi ismereteink alapján adottak-e a feltételek ahhoz, hogy lefektethetők legyenek olyan egészségügyi határértékek mikroműanyagokra vonatkoztatva, amelyek jelenléte esetén egy-egy emberi fogyasztásra termesztett növény a kockázatok miatt fogyasztásra nem lenne javasolt.

2. A MŰANYAGOK ELTERJEDÉSE

2.1 A műanyagok rövid története

Hatalmas utat tettek meg a műanyagok mióta 1838-ban Victor Regnault laboratóriumában PVC-t (Polivinil-kloridot) állított elő. Csupán egy évvel később Goodyear felfedezte, hogy a gumifa tejnedvéből, a latexből kiválasztható nyers kaucsuk kénnel keverve és melegítve vulkanizált kaucsuk, vagyis gumi lesz, ezt az eljárást 1844-ben szabadalmaztatták (invent.org, 2025). Az ő fia 1851-ben jött rá arra, hogy nagyobb kénmennyiséget adva a kaucsukhoz keménygumit (ebonitot) lehet előállítani. Ezeket az első műanyagokat hamarosan követte a többi feltalálása: 1844-ben vált ismertté a linóleum, ezt követte a műbőr, azután a vulkánfiber egy cellulózból (pamut- ill. cellulózzrostokból) készült anyag. 1865-ben lett ismert a celluloid, 1897-ben pedig a galahit, később a XIX. század végén megjelentek az első műselymek (alteo.hu, 2022)

A műanyagok elődjeként a parkezinget szokták megemlíteni, ezt azonban még javarészt természetes eredetű komponensekből állították elő. 1907-ben aztán Dr. Leo Baekeland bemutatta a bakelitet (Mulder és Knot, 2001), ez az anyag már egyáltalán nem tartalmazott a természetben fellelhető molekulákat, így ennek az anyagnak a megjelenése megalapozta a modern szintetikus műanyagipar kezdetét. A bakelit jó szigetelő, hőálló és tömeggyártásra alkalmas anyag volt, így a vegyipari vállalatok nagy mennyiségben kezdték el előállítani az ebből készült termékeiket, lévén remekül formázható anyag is volt (alteo.hu, 2022).

Fritz Klatte 1912-ben lerakta a PVC gyártásának technikai alapjait (Mulder és Knot, 2001), azonban az anyag ipari termelése csak jóval később 1938-ban indult meg, habár a mesterséges anyagok tömeges előállításának igénye az első világháború éveiben merült fel, akkoriban azonban a műanyagok kutatási stádiumai mélyen alatta voltak a felmerülő igényeknek. A felmerülő hatalmas igények azonban óriási lökést adtak a szerves kémiai kutatásoknak. A XX. század húszas éveiben indult el aztán a polimer műanyagok pályafutása. Ezen kutatások keretében fedezte fel Dr. Hermann Staudinger (1885-1965) német kémikus 1922-ben, hogy a szerves anyagok vázát nagyon hosszú molekulalánccok képezik. Ő használta először a "makromolekula" megnevezést. Kutatási eredményeit elismerve, 1953-ban munkáját Nobel-díjjal jutalmazták (nobelprize.org, 2025).

A polimerekkel kapcsolatos felfedezéseknek köszönhetően a vegyipari vállalatok ontani kezdték magukból a különböző funkciójú és célú műanyagokat. Az 1920-as években felfedezték a polisztirolt, amely szivacsos szerkezetével alkalmasnak bizonyult arra, hogy különböző felületeket szigeteljenek vele. Nem sokkal ezt követően feltalálták a polivinilkloridot, közismertebb nevén vinilt, amelynek különlegessége kemény, mégis rugalmas tulajdonságában rejlett. (A köznyelvben elterjedt bakelit hanghordozó lemezek valójában ebből a vinilből készültek nem pedig bakelitból) (alteo.hu, 2022).

Ezt követően aztán rövidesen megjelentek az akrilok. Ezek az anyagok megfelelőek voltak az üveg helyettesítésére is tulajdonságaiknak köszönhetően. Az 1930-as években aztán a nylon is felfedezték, amely elkezdte felváltani a selymet a textiliparban, köszönhetően annak, hogy jóval tartósabb és erősebb anyagnak bizonyult nála, így kiválóan pótolta azt. 1933-ben pedig megjelent a polietilén, ez ma a világon legtöbbször használt műanyag, ebből az anyagból készülnek mindmáig a PET-palackok, a samponos és tusfürdős flakonok, hogy csak a legfontosabbakat említsük (alteo.hu, 2022).

A műanyagok a XX. században terjedtek el tömegesen, és ma már gyakorlatilag az élet minden területén felhasználjuk őket. Igazából sok esetben megkerülhetetlenek és a kiváltásukra sincs lehetőség, így várhatóan -tetszik, vagy sem-, nagyon-nagyon hosszú ideig velünk maradnak még. Természetüknél fogva a műanyagok nagyon sokfélék, rengeteg funkciót töltenek be, változatosak.

Az alábbi lista a leggyakrabban használt hőre lágyuló műanyagokat tartalmazza és felhasználásuk legfőbb területeit (Assist-Trend.hu, 2022):

- **Polipropilén (PP)** élelmiszeripari csomagolás, háztartási eszközök, járműalkatrész (például lökhárító).
- **Polisztirol (PS)** csomagoló anyag, élelmiszer csomagolás, eldobható pohár, tányér, evőeszköz, CD és DVD tartók, porózus anyagok (szivacsok), csomagolóanyagok
- **Ütésálló polisztirol (HIPS)** mélyhűtőzacskó, csomagoló anyag, eldobható pohár.
- **Akrilnitril butaidén sztirol (ABS)** elektronikai eszközök borítása (például monitor, nyomtató, billentyűzet).
- **Polietilén-tereftalát (PET)** üdítőitalos palack, fólia, mikrohullámtűrő csomagolás.

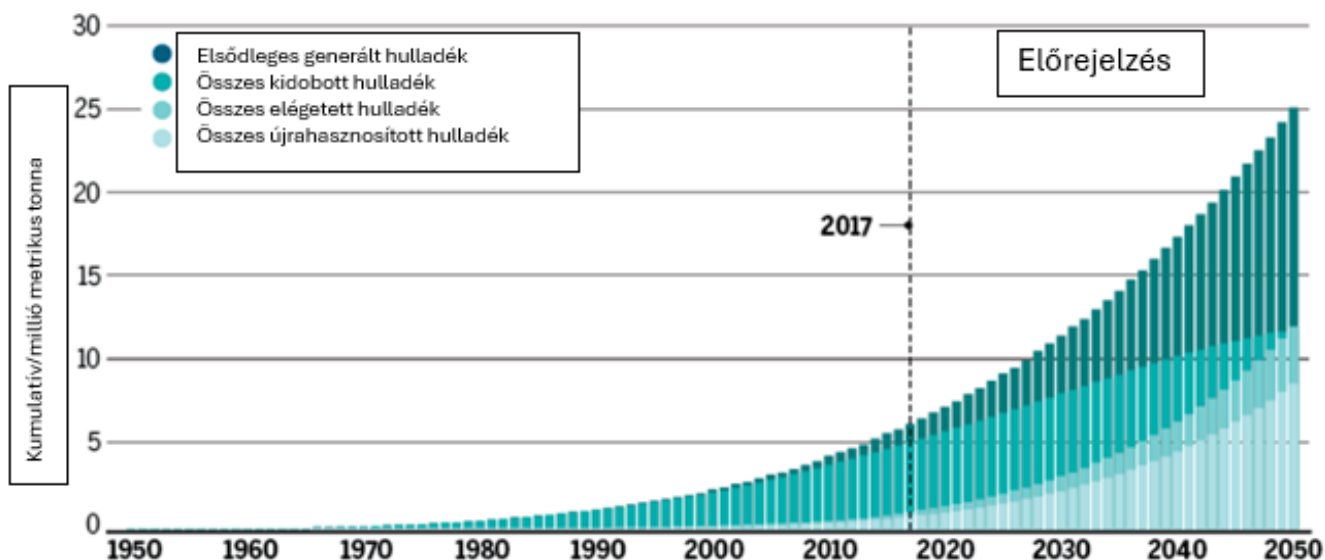
- **Poliamid (PA)** szál gyártás, csapágygolyó, horgászszinór, autóiipari borítások.
- **PoliVinil-Klorid (PVC)** csőgyártás, kábelborítás, zuhanyfüggöny, ablakkeret, padlóburkoló.
- **Poliuretán (PU)** szigetelő hab, tűzvédelmi hab, autóiipar.
- **Polikarbonát (PC)** CD, napszemüveg, pajzsok, biztonsági üveg, jelzőlámpa, lencsék.
- **Polivinilidén-klorid (PVDC)** csomagolóipar (gyógyszer és élelmiszer), folpack.
- **Polietilén (PE)** sátorfólia, szatyor, palack, vízvezeték.

Léteznek hőre keményedő műanyagok is, néhány gyakrabban használt ezek közül:

- **Telítetlen poliészterek**
- **Fenol-formaldehid (PF)**
- **Vinil észterek**
- **Epoxigyanták**

A világ műanyag termelése az 1950-es évekbeli nagyjából 2 millió tonna/évről 2019-ra 368 millió tonna/évre nőtt. Jelenleg (2022-es adat) 400 millió tonna műanyag szemetet bocsátunk ki évente a világban. (Pilapitiya és Ratnayake, 2024). Ebbe beletartoznak természetesen a korábban gyártott műanyagok hulladékai is. Ha a műanyagok gyártását nem kontrolláljuk valamilyen módszerrel a termelés 2040-re eléri 670 millió tonnát. (Delangiz et al., 2022). Ezek a számok elképesztően magasak.

Az előrejelzések pedig azt mutatják, hogy 2050-re négyszer annyi műanyagot fogunk használni, mint az eddig eltelt évtizedek alatt összesen amióta a műanyagok egyáltalán használatossá váltak. A 1. ábráról az is kitűnik, hogy a műanyagok újra hasznosítására az 1980-as évekig gyakorlatilag egyáltalán nem fordított figyelmet senki, gyakorlatilag a teljes mennyiség a szeméttelpekre került. A jövőben még fontosabb szerepe lesz tehát a műanyagok újra hasznosításának, fontosabb, mint bármikor valaha (Guglielmi, science.org, 2017).



1. ábra: Műanyagok használata és újra hasznosítása, múlt, jelen, előrejelzés (Forrás: Guglielmi, science.org, 2017)

A műanyagok újra hasznosítása óriási kihívás jelenleg is és a jövőben is az lesz. A szintetikus műanyagok a kőolajipar származékjai, amely nem megújuló forrásnak számít. Jelenleg a világszerte kitermelt összes kőolaj közel 8%-át a különféle műanyagok előállítására használják fel. A szintetikus műanyagok közül néhány például a polilaktid (PLA), a polibutilén-szukcinát (PBS), a polibutilén-szukcinát-koadipát (PBSA) és a poli-3-hidroxi-butirát-ko-3-hidroxi-valerát (PHBV) a biológiailag lebomló, míg a polietilén (PE), a polietilén-tereftalát (PET), a polipropilén (PP), a polisztirol (PS) és a polivinil-klorid (PVC) a biológiailag nem lebomló műanyagok közé tartozik (Delangiz et al., 2022). Ez utóbbiak jelentik talán a legnagyobb problémát amikor mikroműanyagokról beszélünk, ezek ugyanis a világban a leggyakrabban használt műanyagok, ezeknek az anyagoknak az újra hasznosítására lenne a legnagyobb igény a több százféle egyéb műanyag mellett.

3. AZ MŰANYAGOK KÖRNYEZETRE ÉS ÉLŐVILÁGRA GYAKOROLT HATÁSA

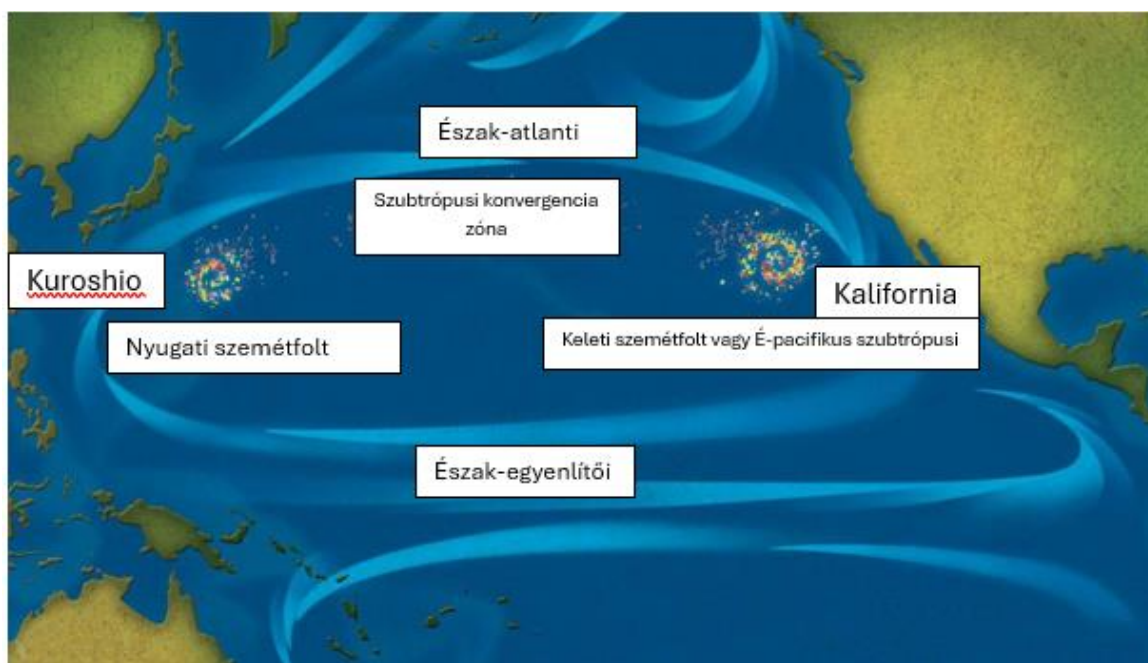
3.1 A makro-, és mikroműanyagok a világtengerekben



2. ábra: Úszó hulladéksziget a Csendes-óceánon (Forrás: Snowden, forbes.com, 2019)

Becslések szerint 1,15 – 2,41 millió tonna műanyag hulladék kerül a tengerekbe minden egyes évben (Snowden, 2019). Ennek a mennyiségnek jelentős része, nem lebomló egyszerhasználatos műanyagból áll. Ez a jelenség olyan méreteket öltött mára, hogy úszó hulladékszigeteket alkotva veszélyezteti a környezetet és a tengeri hajózást is. A legnagyobb méretű ilyen hulladéksziget a csendes-óceáni (2.ábra), amely méretét 700 ezer és 1,5 millió négyzetméter közöttire teszik, ez utóbbi szám egyenlő Oroszország területnek a nagyságával. Ezek a hulladékszigetek ma már hatással vannak az ökoszisztéma egészére. A hulladékszigeteket a világtengerek áramlása alakította ki, persze maga a hulladék az emberiség által került ebbe a körforgásba. Tisztában kell lenni azonban azzal, hogy sem méretük, sem pedig a helyzetük nem állandó ezeknek a hulladékszigeteknek, mint ahogyan a mélységük is állandóan változó. Az is tényszerű, ha egyszer egy műanyag hulladék bekerült ebbe a körforgásba, egészen addig benne is marad, amíg szét nem esik a külső körülmények hatására. A 2. ábrán egy ilyen úszó hulladékszigetről készült légi felvétel látható valahol a Csendes-óceánon (Snowden, forbes.com, 2019).

A 3. ábra a csendes-óceáni hulladék körforgást szemlélteti. Itt kell azonban megjegyezni, hogy a műanyag hulladékok nem korlátozódnak csupán a Csendes-óceánra, az Északi-sarktól az Antarktiszig mindenhol megtalálhatók, és azt is fontos kiemelni, hogy nem csupán felszínen úszó hulladékok formájában vannak jelen. Éppen úgy megtalálhatóak a víz alsóbb rétegeiben, mint a tengerfenéken található üledékek között (Snowden, forbes.com, 2019), találtak már mikroműanyagokat a Mariana-árokban is (Chaudhary et al., 2025), a legmélyebb tengerfenéken.



3. ábra: A csendes-óceáni úszó hulladékok körforgása a tengeráramlatoknak köszönhetően (Forrás: Snowden, forbes.com, 2019)

A világtengerek vizeit látványos módon a makroműanyagok szennyezik. Eredetük szerint a legkülönbébbek ezek a műanyagok. Legtöbbjeit ezeknek ételes és italos dobozok, háztartási cikkek, a csomagolások teszik ki, de a turizmus és az építkezések által hátrahagyott műanyag hulladékok mennyisége is jelentős (Kump, korforras.hu, 2025). Nem meglepő módon jelentős szennyeződést hagy hátra a halászati ágazat a maga elhasznált halászati eszközeivel, mint például az elhagyott, elveszett vagy más módon eldobott halászeszközök, halászhálóik. De szintén jelentős hulladékmennyiség kerül a tengerekbe a tengerjáró utasszállító hajók hajókonyhai hulladékai által is, ugyanúgy, mint a szállítmányozás során rakodás közben elveszett akár konténernyi mennyiségek is szennyező forrást jelentenek (Kump, korforras.hu, 2025).

Nem csupán nagy méretű műanyag hulladékokat találhatunk a világ tengereiben. Kisebb és akár egészen apró méretű szennyeződések formájában is megtalálhatjuk ezeket a partokon, a vízfelszínen és a vízoszlopban, a tengerfenéken, az üledékekben és a biótában. Az egészen kis méretűek pedig, sajnálatos módon ma már kimutathatóan mikroműanyagok formájában bekerültek a táplálékláncba is. Az 5. ábrán azon tengeri fajoknak a száma látható, amelyeknek a szervezetében dokumentálhatóan találtak műanyagokat (Brate et al., 2017).

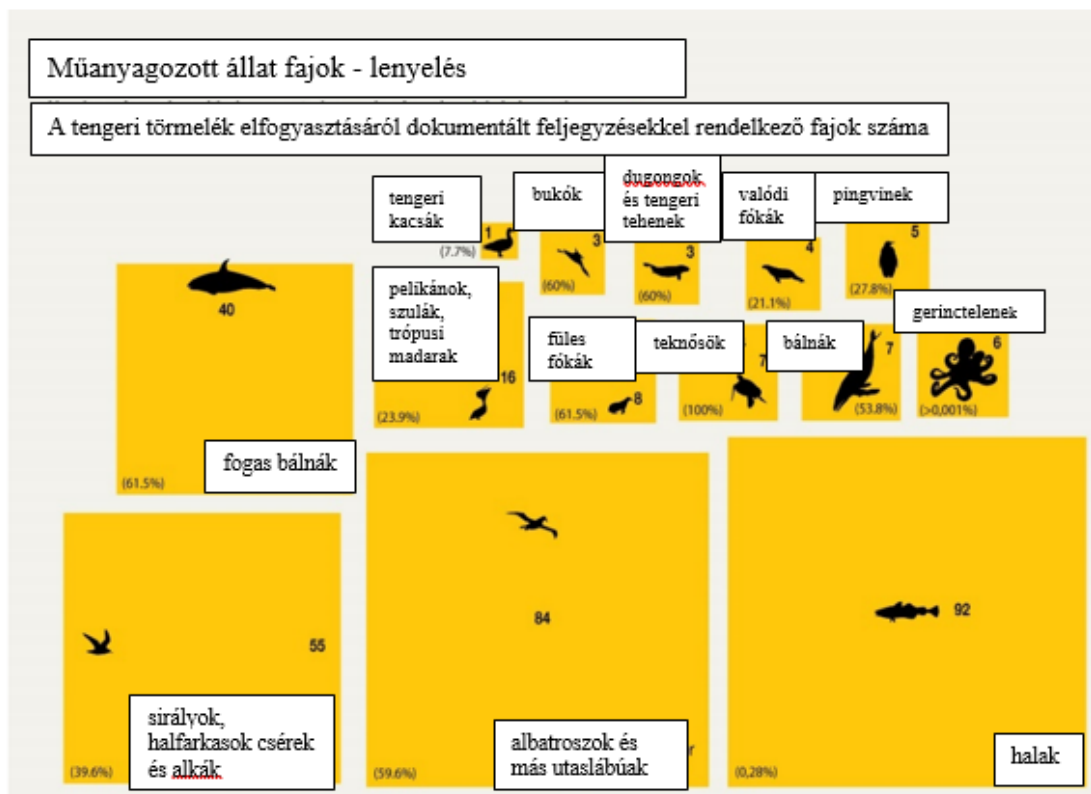
Ezek a mikroműanyagok lehetnek elsődlegesek (jellemzően 1 - 500 µm méretűek), ebbe a csoportba azok tartoznak, amelyeket eleve 5 mm-nél kisebb formában gyártanak és már így jutnak a környezetbe, mint szennyező anyagok, vagy lehetnek másodlagos mikroműanyagok úgy, hogy az eredetileg nagyobb műanyag tárgyakból keletkeznek, például a szétaprózódás, az UV-sugárzás hatására bekövetkező degradáció, oxidáció és a hullámszétválás okozta aprózódás hatására (Rashid et al., 2025). Jelenleg pont ebből kifolyólag úgy kell számolnunk, hogy a mikroműanyagok mennyisége drasztikusan fog nőni az elkövetkezendő években. Szintén nagy mennyiségben lehet kimutatni a tengerekben olyan szintetikus szálakat, amelyek ruhaneműkből származnak, ezeknek a mennyisége akár 100 szál is lehet literenként (Rashid et al., 2025), eredetüket tekintve tehát szárazföldi szennyeződések.

Ahogy az fentebb már említésre került, ezek a mikroműanyagok ma már a tápláléklánc részeivé váltak. Több kísérletet is végeztek, ahol filmre vették (4. ábra), amint a plankton ezeket a mikroműanyagokat eszegeti (Szabó, 2018). Számos példát találni arra is, hogy a korábban mikroműanyagokat fogyasztó planktonnal táplálkozó bálnák is elpusztultak.



4. ábra: Mikroműanyagot fogyasztó plankton (Forrás: Szabó, 2018., juratus.elte.hu)

Nem csupán a plankton fogyaszt azonban műanyagokat. Néhány tanulmány és kutatás arra mutat rá, hogy manapság a tengeri madarak 90%-a fogyaszt műanyag szemetet és 2050-re gyakorlatilag minden madárfaj fogyasztani fog (Parker, 2015). Az 1960-as években még csak a madárfajok alig 5%-ának a szervezetében volt kimutatható bármiféle műanyag szemét, ez a szám aztán a műanyagok terjedésével rohamosan nőtt, és ahogyan az előbbi becslés mutatja a trend gyakorlatilag visszafordíthatatlan. Találtak műanyag reklámszatyrot madarak gyomrában, de a rizsszemnyi nagyságtól egész széles skálán mozog az, hogy mekkora műanyagokat esznek meg a tengeri madarak. Az általuk elfogyasztott műanyag mennyiségileg is nagyon változó képet mutat. Akadt olyan megvizsgált madár, amelynek a gyomrában több mint 200 db műanyag részecskét találtak. Mivel ezek a darabkák nem természetes táplálékai ezeknek a madaraknak, következésképpen nem is ürülnek ki a gyomrukából teljes mértékben, ezáltal kevesebb hely marad a valódi táplálék számára a szervezetünkben. De nem csupán arról van azonban szó, hogy ezek a műanyagdarabkák emészthetetlenek. Ezeknek a műanyag darabkáknak az éles peremei belső sérüléseket okoznak a madaraknak felsértve belső szerveiket, ami a pusztulásukat okozza (Parker, 2015).



5. ábra: Műanyagfogyasztó tengeri állatfajok száma (Forrás: Brate et al., 2017)

A műanyag hulladékok a nagyobb testű állatokra is veszélyeket hordoznak, főként a fókák, zacskók. Ezek lenyelés után gyakran elzáródást okoznak a bélrendszerükben különösen a cetfélék és teknősök esetében mutatta ki ezt egy tanulmány (The Journalistic, 2020), ahol 80 állatfaj 1328 egyedét vizsgálták a tekintetben, hogy milyen lenyelt tárgyak okozták a legtöbb egyedpusztulást, valamint, hogy melyik tárgy a leghalálosabb, azaz, hogy az állati szervezetbe jutva mely hulladék öli meg az állatokat a legnagyobb valószínűséggel. A cetfélékkel és a teknősökkel ellentétben a fókáknál és oroslánfókáknál a halászattal járó hulladékok okozták a legnagyobb pusztítást úgy mint, hálódarabok, horgászsinórok és a horgászfelszerelések egyéb darabjai. Jellemzően ezek az állatok úszás közben gabalyodtak bele ezekbe az anyagokba, ez okozta aztán a pusztulásukat. (Qubit.hu, 2020)

3.2 A mikroműanyagok a talajban

A műanyagok jelenléte azonban nem korlátozódik kizárólagosan a világtengerekre, bizonyítottan a talajban is jelen vannak, beleértve az urbanizálódott területeket és a mezőgazdasági művelés alatt állókat is, és bármilyen meglepő is lehet, jelen vannak a bolygónk minden szegmensében, minden területén még a legtávolabbi érintetlennek tűnő részein is. Lebomlási idejüket tekintve a műanyagok nagyon lassan bomlanak a talajban, a polietilén például mindössze 0,1-0,4%-ot veszít a tömegéből 800 nap után, a polipropilén 0,4%-ot egy év után, míg a PVC 35 év után sem mutatja a lebomlás legkisebb jelét sem, így a műanyagok hosszú évtizedekig kockázati tényezőt jelentenek, különösen a nem megművelt területeken (Chaudhary et al., 2025). Egy tanulmány szerint a mikroműanyagok mennyisége 4-23-szor nagyobb a szárazföldi területeken, mint az óceánokban (Ullah et al., 2020), ugyanez a tanulmány azt is megállapította, hogy ezek a szennyeződések hatással vannak a talaj kémiai és fizikai összetételére, ezáltal a talaj funkcióját és biodiverzitását is megváltoztatva, így a táplálékláncba is bekerülve az emberi táplálékban is kimutathatóak (Ullah et al., 2020). Egy másik tanulmány úgy becsüli, hogy a globális műanyag hulladék körülbelül 32%-a szárazföldi ökoszisztémákba kerülhet, beleértve az édesvizet is (de Souza Machado et al., 2018), valójában a becslések szerint 6300 millió tonna megtermelt műanyagból nagyjából 4977 millió tonna lerakóhelyekre és a természetbe kerül. Éppen ezért fontos, hogy a mikro-, és nanoműanyagok mennyisége detektálható, kimutatható legyen egységes módszerekkel történő mérések által.

A mikroműanyagok kifejezést először 2004-ben használták a tengeri környezetben található műanyag törmelék (20 μm kisebb átmérőjű) leírására. Napjainkban a műanyag hulladékot méret szerint makroműanyagokra (>25 mm), mezoműanyagokra (25 mm–5 mm), mikroműanyagokra (1 μm -5 mm) és nanoműanyagokra (<1 μm) osztják, minden környezeti szegmensben ezeket alkalmazzák. A talajban történő kimutatásukra több módszert is alkalmaznak. A jelenlegi módszerek, -beleértve a szitálást, a szűrést, a sűrűség szerinti elválasztást, a kémiai feltárást és a spektroszkópiai elemzést (pl. FTIR - Fourier infravörös spektroszkópia, Raman spektroszkópia, SEM) -, hatékonysága, megbízhatósága és alkalmazhatósága azonban nagyon eltérő, a minták mennyiségi és minőségi kivonása a talajból és adott esetben a kivont műanyagok fajtájának megállapítása komplex, és

időigényes (Gündogdu et al., 2025). Szükséges lenne standardizált egységes és megbízható mérési protokoll kialakítására, minőségbiztosításra és minőségügyi mérések bevezetésére. Várható tehát, hogy a jövőben újfajta módszerek fognak megjelenni a mikroműanyagok talajban történő minőségi és mennyiségi meghatározására. A jelenlegi egységes és kidolgozott vizsgálati módszer hiánya, így a különböző metódusokkal és mérőeszközökkel történő meghatározások eltérő eredményeket mutathatnak, ezáltal az eredmények összehasonlíthatósága is nehézkes. Ezen módszerek alkalmazása esetében egyúttal minden egyes műanyagdarabkát meg kell számolni és külön meghatározni az anyagukat, ez tovább nehezíti a vizsgálatokat (Li et al., 2020).

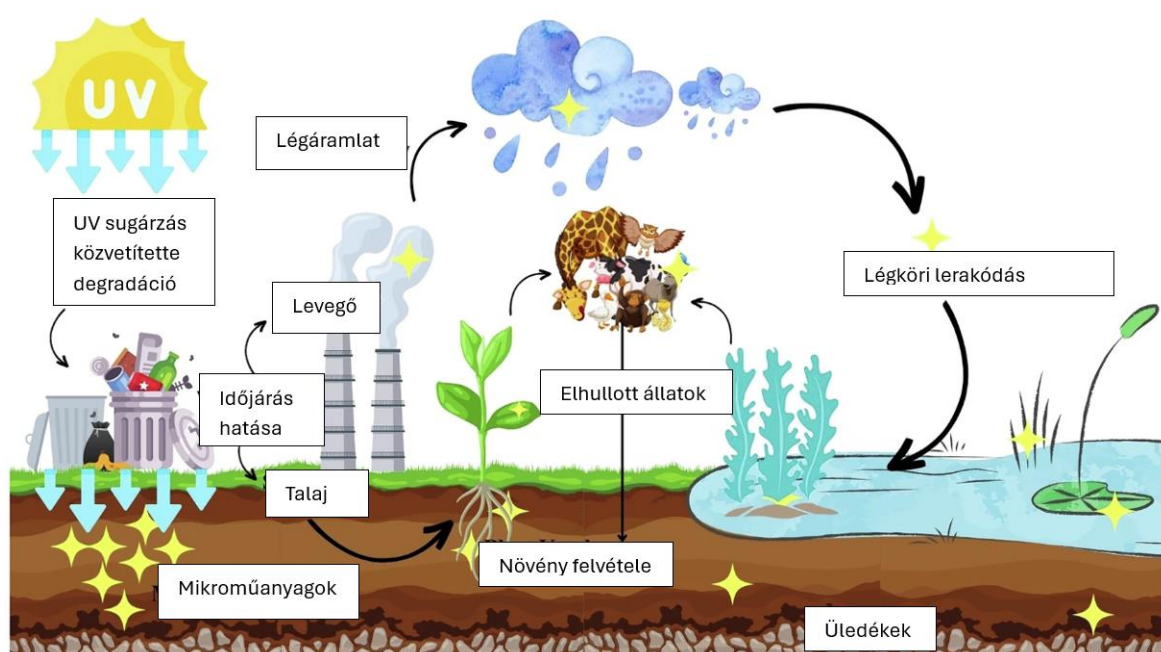
Érdeemes azt is megvizsgálni, hogy mi a talajban található mikroműanyagok eredete és hogyan is kerülnek a talajba. Ezeknek a legfőbb forrása a szennyvíziszap (úgyis mint trágyázás, ami alapvetően talajjavítási célzattal kerül a földekre), a talajmódosítása komposzttal (alapvetően szintén talajjavítás lenne a célja), a mikroműanyaggal szennyezett vízzel történő öntözés, a műanyagokkal történő mulcsolás (beleértve a fóliasátrak takarására használt műanyagokat is épp úgy, mint a fátyolfóliákat), az atmoszférából (levegőből történő) lerakódás következtében és egyszerűen a szemetelés által (ideértve a szemétkerékekben felhalmozódott műanyag hulladékokat is, legyen szó akár legális, akár illegális lerakóhelyekről) (Chaudhary et al., 2025). Nem megkerülendőek az ipari területek és egyes iparágak által okozott szennyezések, például jelentős szennyező a textilipar, a gyógyszeripar, a vegyipar, de számottevő mennyiségű mikroműanyag található a városokban és az országutak, autópályák mentén a gumiabroncsok kopásából kifolyólag. Kicsit ellentmondásos kép alakulhat ki bennünk azáltal a földműveléssel szemben, ha megemlítjük, hogy óriási mennyiségű műanyag hulladék kerül a termőföldekre például a műtrágyázás során. Egy tanulmány szerint (Chaudhary et al., 2025), például a műtrágyázott területek parcelláin körülbelül tízszer annyi mikroműanyag részecske volt megtalálható (6796 darab/m^2), mint a nem trágyázott területek parcelláin (653 darab/m^2). Ezenfelül a mikroműanyag részecskék mennyisége körülbelül kétszer olyan magas volt a műtrágyázott parcellákon ($3,7 \text{ millió részecske/kg talaj}$), mint a nem műtrágyázott parcellákon ($2,2 \text{ millió részecske/kg talaj}$). Ez a megnövekedett mennyiség pedig annak tulajdonítható, hogy a műanyag részecskék és szálak belegabalyodtak a növények gyökereibe és száraiba megnehezítve az eltávolításukat (Chaudhary et al., 2025).

A mikroműanyagok közvetítő szerepet játszhatnak más szennyeződések közvetítésében is, úgy is mint nehézfémek, antibiotikumok, agrokemikáliák és más szerves szennyeződések szállítói, ezek ugyanis felszívódhatnak a mikroműanyagok felszínén keresztül (Ullah et al., 2021). A Web of Science adatbázisában nagyjából 50 publikált cikk volt megtalálható a témában 2018 és 2019, ami a mikroműanyagok kémiai szennyeződés szorpciójáról szólt, főként abban a témában, hogy azoknak a biológiailag szilárd anyagoknak a kadmium (Cd) felszívó kapacitása sokkal nagyobbak bizonyult, amelyek a hulladékkezelési szisztéma melléktermékei voltak, mint azoknak, amelyek még nem mentek keresztül azon a rendszeren (Ullah et al., 2021). Emellett a szennyvízben szintén jelentős mennyiségű gyógyszermaradvány, hormon, szteroid, peszticid, herbicid és egyéb kemikália található, ezek szintén jelen lehetnek a bioszolid anyagokban. Ezek mindegyike negatívan befolyásolhatja a növények fejlődését és a talaj mikrobiális közösségét (Ullah et al., 2021).

A talaj általános szennyezettsége a mikroműanyagok által nem csupán azért különösen aggasztó jelenség, mert a műanyagok megváltoztatják a talaj mikrobiológiai szerkezetét, hanem mert egyúttal hatással vannak a növények víz és tápanyagfelvételére. Kísérletekkel bizonyított tény, hogy a mikroműanyagok mintegy antropogén határként viselkednek a talajrétegekben, ezáltal gátolják a víz függőleges irányú áramlását, mozgását a rétegek között (Kim SW. et al., 2021). Egyes tanulmányok arra is rámutatnak, hogy a mikroműanyagok jelenléte befolyásolja a talajhőmérsékletet, módosíthatják a termesztett növények esetében a gyomszabályozást, csökkentik az evapotranspirációt (Zhang, S et al., 2023).

Az is ismert, hogy ezek a szennyeződések méretüktől függően be is kerülnek a növények szervezetébe. Miután a növények szervezetébe kerülnek a mikroműanyagok számtalan problémát okozhatnak, úgyis mint mechanikai változásokat, fejlődési rendellenességet (Chaudhary et al., 2025), (jellemzően visszamaradott fejlődésben megnyilvánuló növekedési problémák merülnek fel), megemelik az oxidatív stresszt, genotoxicitást okozhatnak ezáltal pedig kedvezőtlen hatást gyakorolnak morfológiai, fiziológiai, biokémiai és molekuláris szinten egyaránt. Megnövelik a reaktív oxigén gyökök termelését (Reactive Oxygen Species -ROS), gátolják a fotoszintézist, a lipid membrán oxidálódik, a metabolikus folyamatok megváltoznak végül, de nem utolsósorban, pedig a táplálékláncba bekerülve az emberi szervezetbe is bekerülnek, ezáltal egészségügyi kockázatokat hordozva magukban (Chaudhary et al., 2025).

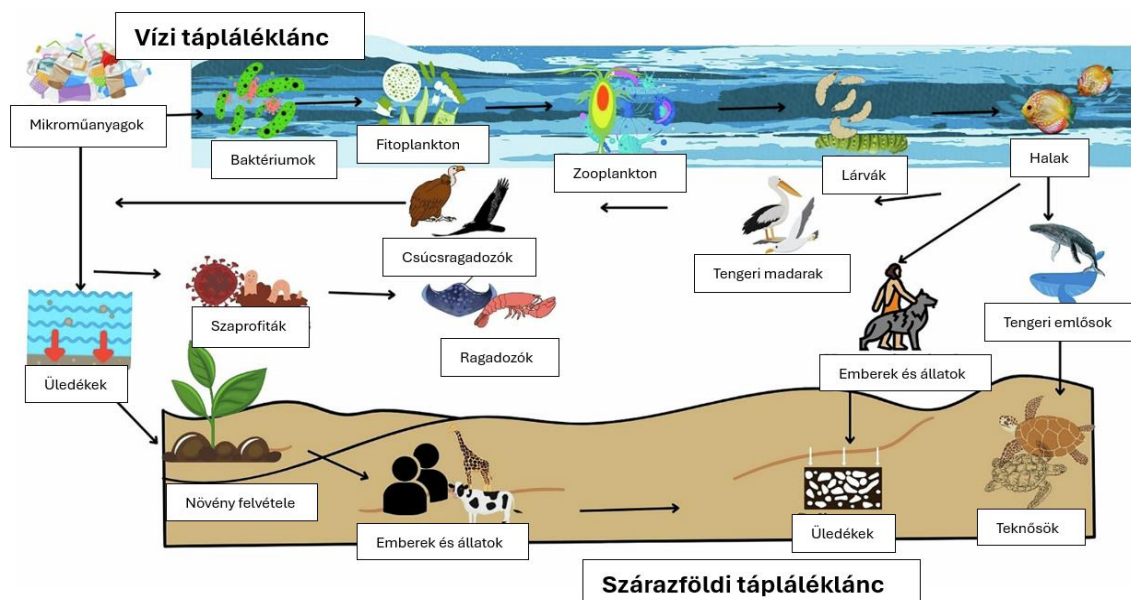
A 6. ábra a sematikus bemutatása annak a folyamatnak, ahogyan a mikroműanyagok bekerülhetnek a szárazföldi és vízi ökoszisztémába, ahonnan végeredményben a táplálékláncba is eljutnak. Kulcsszerepet játszik ebben a folyamatban a műanyag hulladékok UV-sugárzás hatására történő és az időjárás okozta lebomlása, az az aprózódás, ami által a mikroműanyagok közvetlenül bekerülnek a talajba. A mikroműanyagok azonban nem csupán a közvetlen környezetükre jelentenek veszélyeket, a légáramotokkal és a folyóvizekkel nagy távolságokra is eljutnak, az atmoszférába kerülve a nagy földi légkörzésen keresztül a kontinenseken átível a hatásuk. A mikroműanyagok a növények gyökerein keresztül jutnak be a növények szervezetébe, de ugyanúgy bekerülnek a növényeket elfogyasztó állatok szervezetébe, azok elpusztulása és testük lebomlása után pedig újra visszakerülnek a talajba ezáltal egy ciklikus folyamat alakul ki és marad fenn (Chaudhary et al. 2025).



6. ábra: A mikroműanyagok szárazföldi és vízi ökoszisztémába kerülésének egyszerűsített bemutatása (Forrás: Chaudhary et al., 2025)

A 7. ábra szintén egy hasonló megközelítést tartalmaz, itt viszont az látható, hogy milyen módon kerülnek be a mikroműanyagok a vízi és szárazföldi táplálékláncba. A mikroműanyagokat a fitoplankton és baktériumok elfogyasztják következésképpen ezek az anyagok bekerülnek magasabb rendű szervezetek testébe úgy, mint a zooplankton lárvák, majd halak, emlősök, tengeri madarak és végeredményben a csúcsragadozók szervezetébe. A mikroműanyagok egyúttal a tengerfenéken az üledékbe is bekerülnek, ahol az üledéket fogyasztó élőlényekbe kerülnek tovább, növelve annak lehetőségét, hogy táplálékláncba

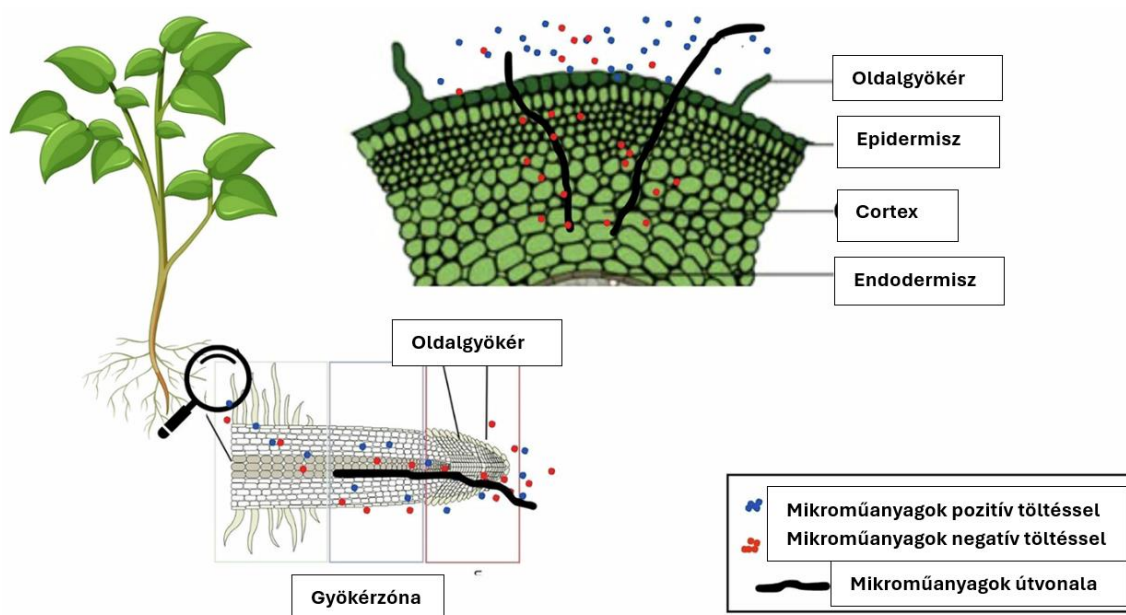
jussanak. Az 7. ábrán szintén látható, ahogy a szárazföldi növényekbe jutva az emberekre is hatást gyakorolnak. Ebből az is kikövetkeztethető, hogy az ökoszisztémák nem különíthetők el egymástól élesen és egyik szisztéma végeredményben hatással van a másikra, gyakorlatilag összefüggő rendszert alkotva (Chaudhary et al., 2025).



7. ábra: A mikroműanyagok bekerülése a vízi és szárazföldi táplálékláncba (Forrás: Chaudhary et al., 2025)

3.3 A mikroműanyagok növényekre gyakorolt hatásai

Ahogy arra már korábban kitértem a mikroműanyagok bekerülhetnek a gyökrézónán keresztül a növények szervezetébe, ahol vándorolnak melynek során elérik a növény többi szervét is. A 8. ábra azt a folyamatot szemlélteti, hogyan a pozitív és negatív töltésű mikroműanyag részecskék belépnek a gyökrézónába, ahol interakcióba lépnek a gyökérszövetekkel. A mikroműanyagok áthatolnak az epidermiszen és a cortexen, az oldalgyökereken keresztül pedig elérik az endodermiszt és a vaszkuláris szöveteket. Így kerülnek be a mikroműanyagok a talajból a gyökérrendszeren keresztül a növénybe, ezáltal pedig a szárazföldi táplálékláncba (Chaudhary et al., 2025).



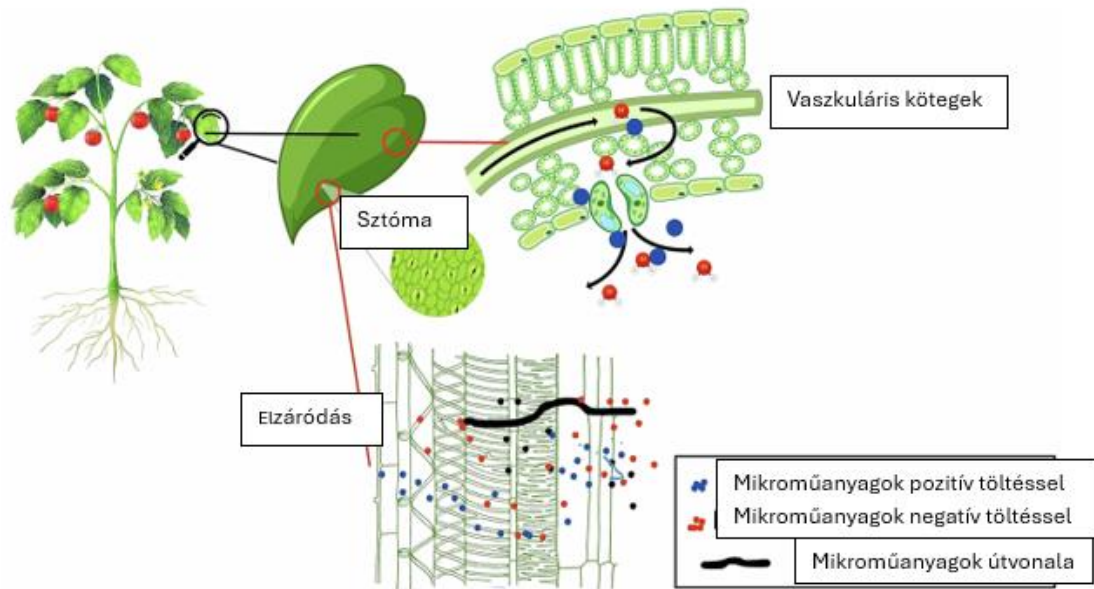
8. ábra: A mikroműanyagok bekerülése a növényekbe a gyökérszónán keresztül (Forrás: Chaudhary et al., 2025)

Számos kísérlet igazolta, hogy a mikroműanyagok felhalmozódása a gyökerekben többféle hatást gyakorol a gyökerekre magukra növekedési és fejlődési rendellenességeket okozva, akár a gyökérhosszra, a relatív gyökérnövekedésre vagy a gyökéraktivitásra gondolunk. Egy kísérletben például babot (*Phaseolus vulgaris* L.) kezeltek bio-mikroműanyagokkal cserépben, ahol a növények kevesebb gyökérbiomasszát fejlesztettek mint a kontroll csoport növényei. Ez az inhibitor hatás a gyökérnövekedésre különféle más növényekben is megfigyelhető volt, így például a közönséges búza (*Triticum aestivum*) esetében, amely 1% (w/w) LDPE (alacsony sűrűségű polietilén) oldatnak volt kitéve, a lúdfű (*Arabidopsis thaliana*) esetében, amely PS-SO₃H (55 +/- 7 nm) és az árpa (*Hordeum vulgare*) esetében, amely PS (polisztirol) oldatnak volt kitéve. A növények, amelyek műanyagokkal találkoznak talán érzékelik azok bejutását a gyökerekbe, amivel növekvő ROS termeléssel válaszolnak ez viszont felülmúlja az antioxidáns rendszert, hogy semlegesítse azokat. Ezáltal létrejön egy egyenlőtlenség, ami lipid membrán peroxidációhoz vezet, ami veszélyezteti a membrán integritását, mitotikus sejtosztódás csökkenést okoz, végeredményben pedig a gyökér kialakulásának és növekedésének csökkenését okozza (Chaudhary et al., 2025).

Továbbá a mikroműanyagokkal történő érintkezés gátolja a tápanyagok sejtek közötti átjutását és ezáltal akadályozva a hajtások növekedését. létfontosságú enzimek, amik a glükóz metabolizmusban is szerepet játszanak csökkenő aktivitást mutatnak mikroműanyagok jelenlétében, így negatív hatással vannak a növények növekedéssel kapcsolatos génkifejeződésére. Ezek a sokrétű hatások pedig mind nagy mértékben befolyásolják a növények növekedését (Chaudhary et al., 2025).

Nem minden esetben csökkent azonban a gyökérnövekedés a mikroműanyagok hatására, egyes növényeknél, bizonyos koncentrációk mellett épphogy stimulálta azt. Például a kerti zsázsa (*Lepidium sativum*) növekvő gyökérnövekedés jeleit mutatta amikor 103-107 mg L⁻¹ 50 nm-méretű mikroműanyag részecske koncentrációnak volt kitéve. Hasonlóan a rizs (*Oryza Sativa*) szintén gyökérnövekedést mutatott egy hasonló kísérletben, míg a saláta (*Lactuca sativa* L.) gyökérbiomassza növekedéssel reagált mikroműanyag jelenlétére (Chaudhary et al., 2025). Ezek a kísérletek igazolták, hogy a különböző mikroműanyagok és az eltérő koncentrációk komplex módon hatnak a növények növekedésére eltérő körülmények hatására.

Mikroműanyagok azonban nem csupán a gyökérszónán keresztül juthatnak be a növények szerkezetébe. Hasonló folyamat játszódik le a növények levelein is, bizonyított ugyanis, hogy a növények a sztómákon keresztül szintén vesznek fel mikroműanyagokat a környezetükből (9. ábra). Az ábrán a kék színnel jelölt pozitív és a piros színnel jelölt negatív töltésű mikroműanyag részecskék a nyitott sztómákon keresztül belépnek a növény levelébe és felhalmozódnak az epidermikus és mezofil rétegekben. Mozgásukkal pedig eljutnak a vaszkuláris rendszerbe, ezeknek akár az elzáródását is okozhatják, ami által befolyásolhatják a növények fiziológia folyamatait. Ez egy példa arra, hogy a légkörben szállított és aztán a növények levelein lerakódott mikroműanyag részecskék hogyan mérgezik a növényeket, miközben bekerülnek a szárazföldi táplálékláncba (Chaudhary et al., 2025).



9. ábra: A mikroműanyagok bekerülése a növényekbe a leveleken keresztül (Forrás: Chaudhary et al., 2025)

A mikroműanyagok szintén hatással vannak a növények fotoszintézisére, ez pedig mint tudjuk létfontosságú folyamat, szükséges tehát, hogy zavartalanul funkcionáljon. Azt tudjuk, hogy a szárazság, a sók, a nehézfémek, a fagy és a hőstressz negatív hatással van a fotoszintézisre, a mikroműanyagok jelenléte azonban némely esetben gátolja, némely esetben pedig fokozza is azt. Gátolja azzal, hogy a PSII reakcióhelyeken csökkenti a kvantum mezőt, vagy a lehetséges fotoszintetikus aktivitást, ezáltal csökkenti a növény fotoszintetikus képességét. Vannak azonban olyan eredmények is, amelyek azt mutatják, hogy a szár a mikroműanyagok jelenléte miatt fokozza a tápanyagfelvételt és tápanyagátalakítást, ezáltal pedig növeli a fotoszintetikus szén reakciójának arányát. Számít az is, hogy milyen dózisú mikroműanyag van egy növény kitéve. A búza (*Triticum aestivum* L.) kismennyiségű polisztirol mikroműanyag hatására 0,01-0,1 mg L⁻¹ növelte a fotoszintézisét, míg nagy mennyiség hatására 1,0- 10 mg L⁻¹ csökkentette (Chaudhary et al., 2025). Ugyanazon anyag tehát, ugyanarra a növényre eltérő koncentráció esetén más-más hatást gyakorolt.

Zhang és társai (2021) például egy laboratóriumi (beltéri hidroponikus) kísérletben leírják hogyan hatnak a rizs (*Oryza sativa* L.) csírázására, gyökérnövekedésére, antioxidáns enzim aktivitására és az RNS átírásra a mikroműanyagok ebben az esetben a polisztirol különböző koncentrációi. Arra az eredményre jutottak, hogy a rizsmag csírázására a polisztirol nem gyakorolt szignifikáns hatást, mindeközben viszont serkentette a gyökérnövekedést és

jelentősen csökkentette az antioxidáns enzim aktivitást. Jelentős reaktív oxigén gyökök felhalmozódását mutatták ki azokban a gyökerekben, amelyeket polisztirollal kezeltek. Mindemellett a transzkripció adatokat elemezve megállapítható volt, hogy a polisztirol (mikroműanyag formájában) elősegítette az antioxidáns enzimekkel kapcsolatos gének kifejeződését a növények gyökereiben. Különösképpen a flavonoid és a flavonol bioszintézisei felülszabályozottak, míg a linolénsavval és a nitrogén metabolizmussal kapcsolatosak alulszabályozottak voltak. Ez a kísérlet előmozdíthatja a mikroműanyagok mérgező hatásainak megértését az agráriumban termesztett növények esetében. Fontos azonban kiemelni, hogy ez idáig csak nagyon kevés tanulmány foglalkozott a rizs által felvett mikroműanyagok hatásaival, annak ellenére, hogy a rizsföldeken található mikroműanyagokról számtalan kutatás létezik, amelyek elég pontosan dokumentáltak. Érdeemes további kutatásokat végezni ezen a területen, főként annak tükrében, hogy egy világszerte fogyasztott és kiemelkedően fontos élelmiszernövényről van szó (Zhang et al., 2021).

A fentiekből tehát látható, hogy ismert a mikroműanyagok citológiai, valamint a génkifejeződésre gyakorolt hatása is, emellett az is igazolt, hogy szerepet játszanak a nehézfémek és patogének közvetítésében is, olyan vírusokat is beleértve, mint a *Bacillus cereus* vagy épp az *Escherichia coli* (Zhang et al., 2021).

3.4 A városi és forgalmas utak menti mikroműanyagok szennyező hatása

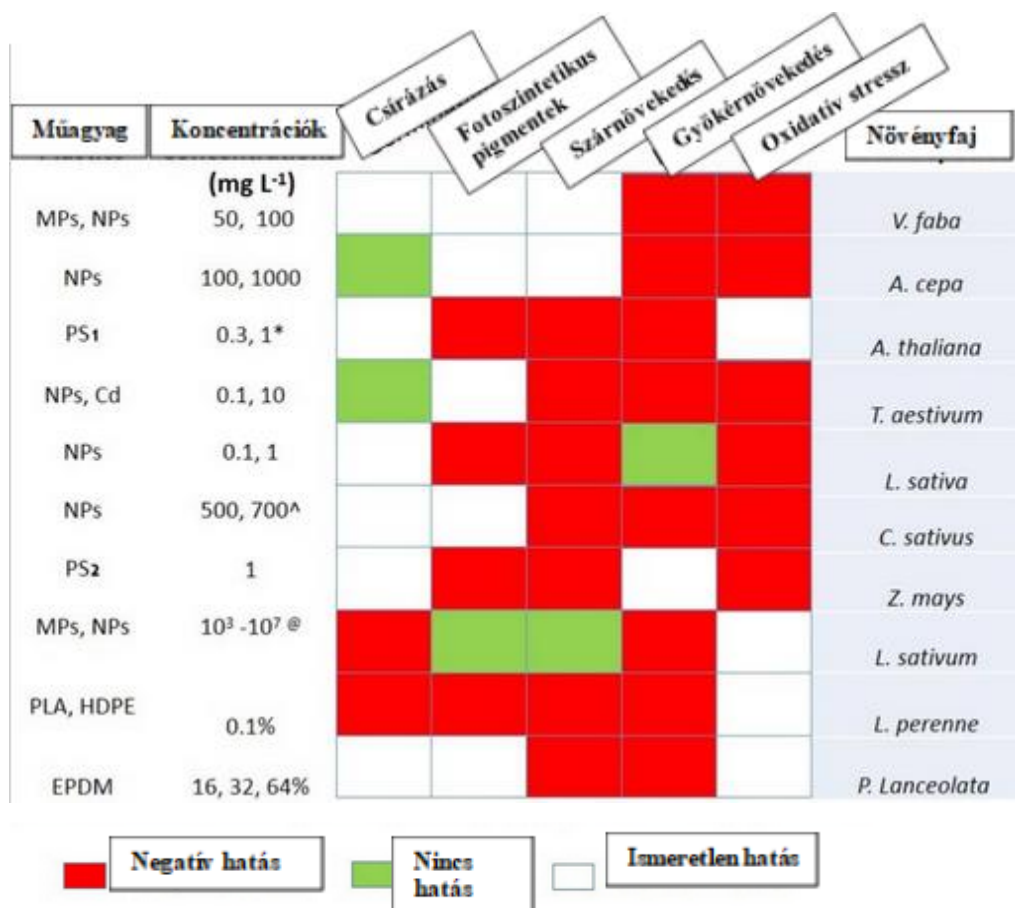
Egy Portugáliában zajlott kísérletben arra keresték a választ, hogy a mostanában elterjedt és divatos gyakorlatot követő városi közösségi kertekben termesztett, esetünkben *Lactuca sativa* L. milyen mennyiségben tartalmaznak mikroműanyagokat (Canha et al., 2023). Ez volt az első olyan jellegű kísérlet, amely erre irányult. A kísérlet végeredménye azt mutatta ki, hogy a városi közösségi kertekben termesztett saláták 70%-kal több mikroműanyagot tartalmaztak, mint a szupermarketekben vásároltak. Szintén megállapították, hogy a vidéki és a városi zöldségeskertekben (kertvárosokban és nem a közösségi kertekben) termesztett saláták hasonló mennyiségben tartalmaztak mikroműanyagokat, ugyanakkor a városi és forgalmas utak mentén találhatóokban nagyobb mennyiséget mutattak Cu és S tartalomról, ez pedig összefüggésben áll a közúti forgalom nagyságával. A kísérlet egyúttal azt is igazolta, hogy azok a saláták, amelyeket vízben

megmostak kevesebb szennyező anyagot tartalmaztak. A kísérletben néhány esetben kétfajta salátát vizsgáltak, fodros és simalevelűt is, szennyezettségükben ezek is eltérő eredményeket mutattak, de egyértelműen nem lehetett kijelenteni, hogy melyik fajta volt a szennyezettebb. A kísérlet ugyanakkor csak korlátozott számú mintát vizsgált, így pontosabb eredmények egy nagyobb volumenű kutatást igényelnek a későbbiekben. (Canha et al., 2023).

Ez a kísérlet rávilágít arra, hogy mennyire bonyolult egy-egy mérés eredményének a kiértékelése és milyen sok tényezőt kell figyelembe venni. Kétségtől fontos lenne azonban ezeket a vizsgálatokat folytatni és más növényekre is kiterjeszteni, a saláta ugyanis egy olyan növény, ami táplálkozás szempontból kiemelkedően fontos, köszönhetően annak, hogy nagy mennyiségben fogyasztják a világ minden táján.

3.5 A mikroműanyagok eltérő hatásai a növényekre különböző koncentrációk mellett

Igazolt az is, hogy a különböző koncentrációjú mikroműanyagok, az egyes növényfajokra nagyon eltérő hatást gyakorolnak, ezek többnyire negatív hatást fejtenek ki egy-egy növényre, amely lehet morfológiai, vagy adott esetben biokémiai. Az is bizonyos azonban, hogy vannak esetek, ahol nincs kimutatható hatásuk. A 10. ábrán egy összefoglaló táblázat látható néhány kultúrnövényen és pár gyomnövényen elvégzett kísérlet eredményeiről, ahol a különböző mikroműanyag koncentrációk hatását vizsgálták meg a csírázásra, a fotoszintetikus pigmentekre, a hajtásnövekedésre, a gyökérnövekedésre és az oxidatív stresszre vonatkozólag (Azeem et al., 2021). A változatos eredményekből nem lehet egyértelmű hatásra következtetni egy-egy vizsgált jellemző esetében, tekintve azt is, hogy az eredmények több mint egyharmadában ismeretlen hatásról beszélünk.



10. ábra: A mikro-, és nanoműanyagok hatása a növények élettani funkcióira és biokémiai folyamataira.

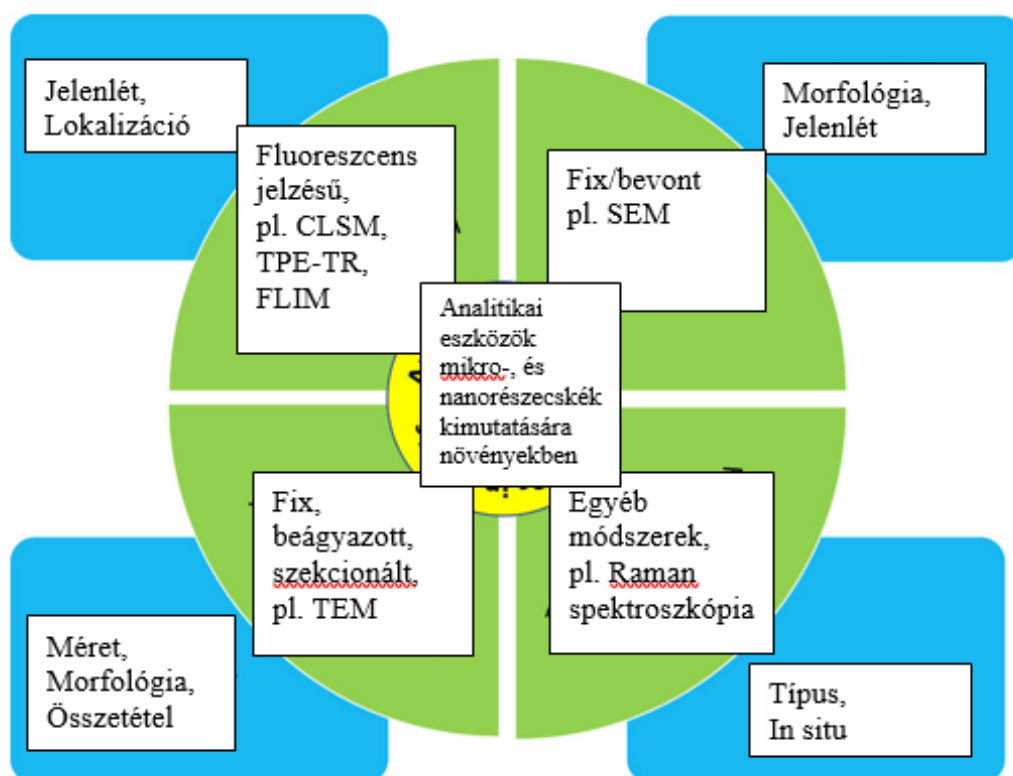
PS₁ jelölés: PS (SO₃ and NH₂), PS₂ jelölés: (COOH and NH₂), * jelölés: g Kg⁻¹, ^ jelölés: nm, és @ jelölés: részecskék L⁻¹. MPs – mikroműanyagok, NPs - nanoműanyagok, Cd - kadmium, PLA - Politejsav, HDPE – Nagy sűrűségű polietilén, EPDM - etilén-propilén dién-monomer (Forrás: Azeem et al., 2021)

Más kísérletben is igazolták a mikroműanyagok jelenlétének hatását a csírázásra (Jia et al., 2023). A mikroműanyagok okozta stressz következtében csökkent a csírázási arány azáltal, hogy a parányi részecskék eltömítették a magok pórusait a magházon, így csökkentve a vízfelvételét a magoknak. Három faj esetében igazolták ezt a hatást polisztirol mikroműanyag esetében: fehér here (*Trifolium repens*), kínai ibolyaszászsa, (*Orychophragmus violaceus*), kerti nebáncsvirág (*Impatiens balsamina*). Más esetekben, más növényeknél azonban a hatás pont ellenkező volt, és csírázást serkentő hatás tapasztaltak például a búza (*Triticum aestivum* L.) esetében.

3.6 A mikroműanyagok kimutatásának módszerei növényekben

A növényekben jelenlévő mikroműanyagok kimutatására jelenleg nem létezik egységes nemzetközi szabvány, így többféle kísérlettel próbálták eddig igazolni a jelenlétüket. Többségük ezen kísérleteknek laboratóriumi körülmények között zajlott kis mintákat használva, így csupán ezeknek az eredményeire támaszkodhatunk amikor megpróbáljuk megérteni, hogy milyen hatással vannak a mikroműanyagok a növények életfolyamataira.

Megjegyzendő az is, hogy az azonosított 200 000 szárazföldi növényfajból csak nagyon korlátozott a száma azoknak, amelyet mikroműanyagokkal történő interakciókkal összefüggésben vizsgáltak. A legelterjedtebb analitikai módszereket a növényekből történő mikroműanyagok kimutatására a 11. ábra szemlélteti. (Ullah et al., 2021).



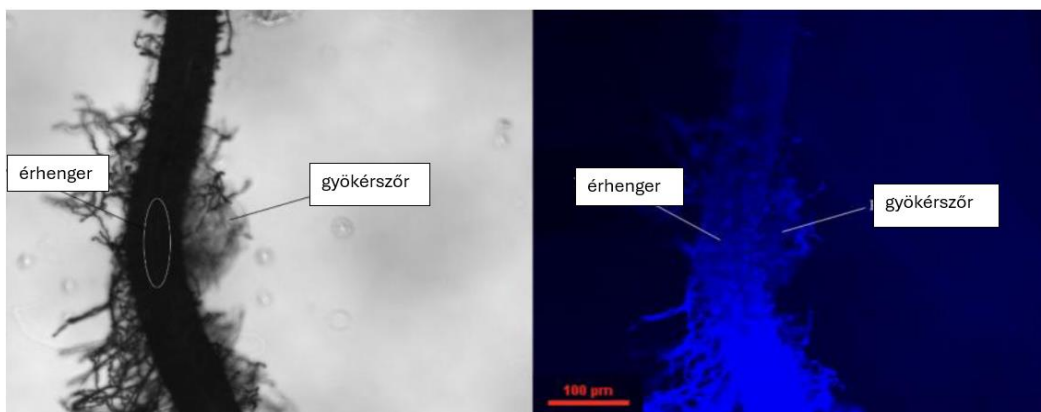
11. ábra: Konceptcionális ábra, amely bemutatja a haszonnövényekben található mikroműanyagok kimutatására szolgáló különféle eszközöket/technikákat.

A rövidítések a következőket jelölik: CLSM, confocal laser scanning microscopy - konfokális lézer pásztázó mikroszkóp; SEM, scanning electron microscopy - pásztázó elektronmikroszkópia; TEM, transmission electron microscopy - transzmissziós elektronmikroszkópia; TPE-TR, two-photon excitation and time-resolved microscopy - kétfotonos gerjesztéses és időfelbontásos mikroszkópia (Forrás: Ullah et al., 2021)

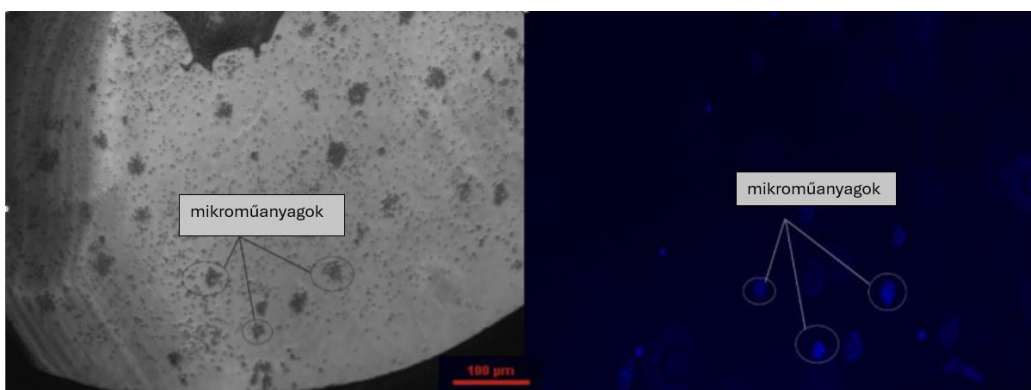
Megnehezíti a kutatásokat az is, hogy abból a 10 000 hozzáadott kemikáliából, amit a mikroműanyagok tartalmaznak úgy 2400 káros hatásúnak becsülnék. Néhányuk az emberi szervezetre káros, például idegrendszeri zavarokat okozhat, de az elhízásban, csontsűrűségben is szerepet játszhatnak és számos rákos megbetegedés okozói is lehetnek (Kochar és Gomes, 2024). A nagyszámú variációk miatt a növényekre gyakorolt hatásaik is nagyon eltérőek lehetnek. Az azonban egészen bizonyos, hogy károsítják a környezetet, például a poliuretán, ami egy hab alapú termék a polimerjei pedig mérgező monomerekké bomlanak. A mikroműanyagok kimutatására a legelterjedtebb módszer a fluoreszcencia. A természetben azonban a mikroműanyagok nem fluoreszkálnak, így a kísérletek során gyakran meg kell őket jelölni, hogy azután azonosíthatóak és kimutathatók legyenek (Kochar és Gomes, 2024).

Egy ilyen kísérlet képei láthatóak a 12. és 13. ábrán, azonban ennél a két esetenél az látható, hogy a *L. sativa* nem vette fel a mikroműanyagokat, a kísérlet elvégzői szerint valószínűleg azok nagy mérete miatt. A kísérletet agar közegben végezték laboratóriumi körülmények között. A kísérlet eredményeként azt a következtetést vonták le, hogy valószínűleg túl nagy méretű mikroműanyagokat használtak, a kísérletet megismételték úgy is, hogy vágást ejtettek a gyökereken, azonban ezekben az esetekben sem történt mikroműanyag felvétel. Ebből pedig azt lehet leszűrni, hogy ebben az esetben az, hogy a gyökérzet ép volt vagy sérült nem játszott szerepet a növény általi mikroműanyag felvételben. Ez természetesen nem jelenti azt, hogy más növények esetében ez a folyamat ugyanígy játszódna le (Kochar és Gomes, 2024).

Fontos azonban hangsúlyozni, hogy ez a kísérlet csupán arra irányult, hogy történik-e mikroműanyag felvétel, arra nem irányult, hogy a mikroműanyagok jelenléte okozott-e bármiféle változást a növények életfolyamataiban. Szintén fontos kiemelni, hogy 10 µm méretű mikroműanyagokat vizsgáltak minden esetben és elképzelhető, hogy az ilyen méretű mikroműanyagokat a saláta már valóban nem képes felvenni a gyökérzeten keresztül (Kochar és Gomes, 2024). Annak ellenére, hogy a kísérlet nem hozta a várt eredményt, magát a módszert jól szemlélteti, amelyet meglehetősen gyakran használnak mikroműanyagok kimutatására.



12. ábra: Saláta növény gyökere megfestve (Forrás: Kochar és Gomes, 2024)

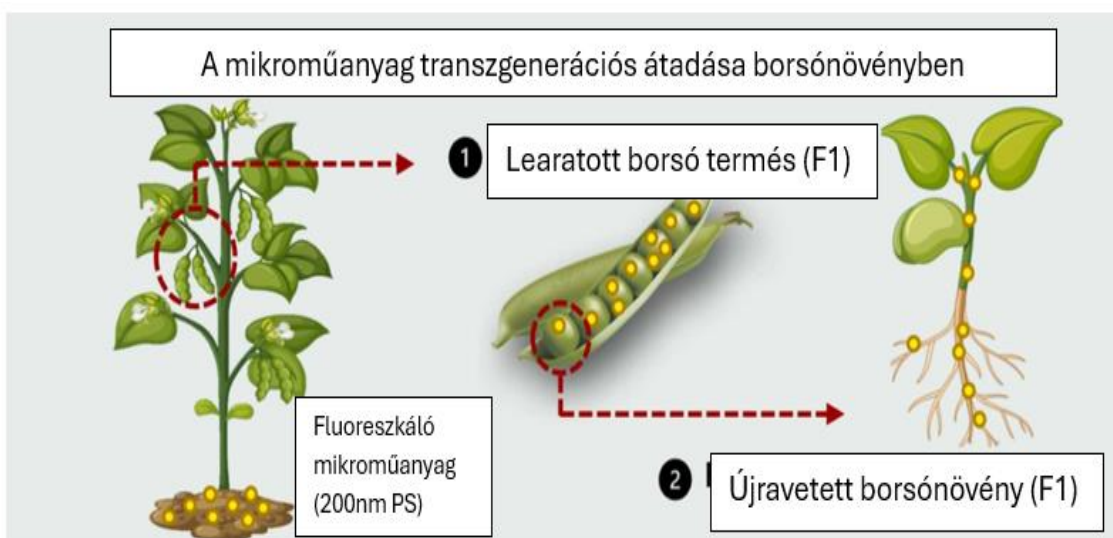


13. ábra: A saláta által fel nem vett mikroműanyag részecskék (Forrás: Kochar és Gomes, 2024)

Kevésbé elterjedt módszer a pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) módszer, amely elektron-nyalábokkal bombázza a növényi rész felületét, azonban ezzel a módszerrel sokkal nehezebben kimutathatóak a mikroműanyagok és az azonosításuk is nehéz azon okból kifolyólag, hogy nehéz őket megkülönböztetni egymástól (Kochar és Gomes, 2024). A módszernek az lehet a hátránya, hogy túlságosan terjedelmes a minta előkészítés és nagyon korlátozott a látómező. Szintén a SEM módszer nehézségeit említi meg egy korábbi tanulmány, amely a fluoreszkáló festést és a konfokális lézer szkennert mikroszkópiát (CLSM) preferálja, mint metódus a mikroműanyagok növényekben történő kimutatására. Előnyként sorolják fel, hogy a módszer egyszerű és alkalmas gyors képek készítésére a mikroműanyagokról a növényekben. További előnyként megemlítik, hogy a fluoreszkáló festés világos és stabil fényt bocsát ki, amely elkülöníthető az önmagukban is fluoreszkáló háttérben lévő növényi szövetektől. Egyúttal elhanyagolható az a tény, hogy a fluoreszkáló folyadék vizes fázisban kifolyjon. (Li et al., 2021)

3.7 A mikroműanyagok átörökítése az utódnövényekbe

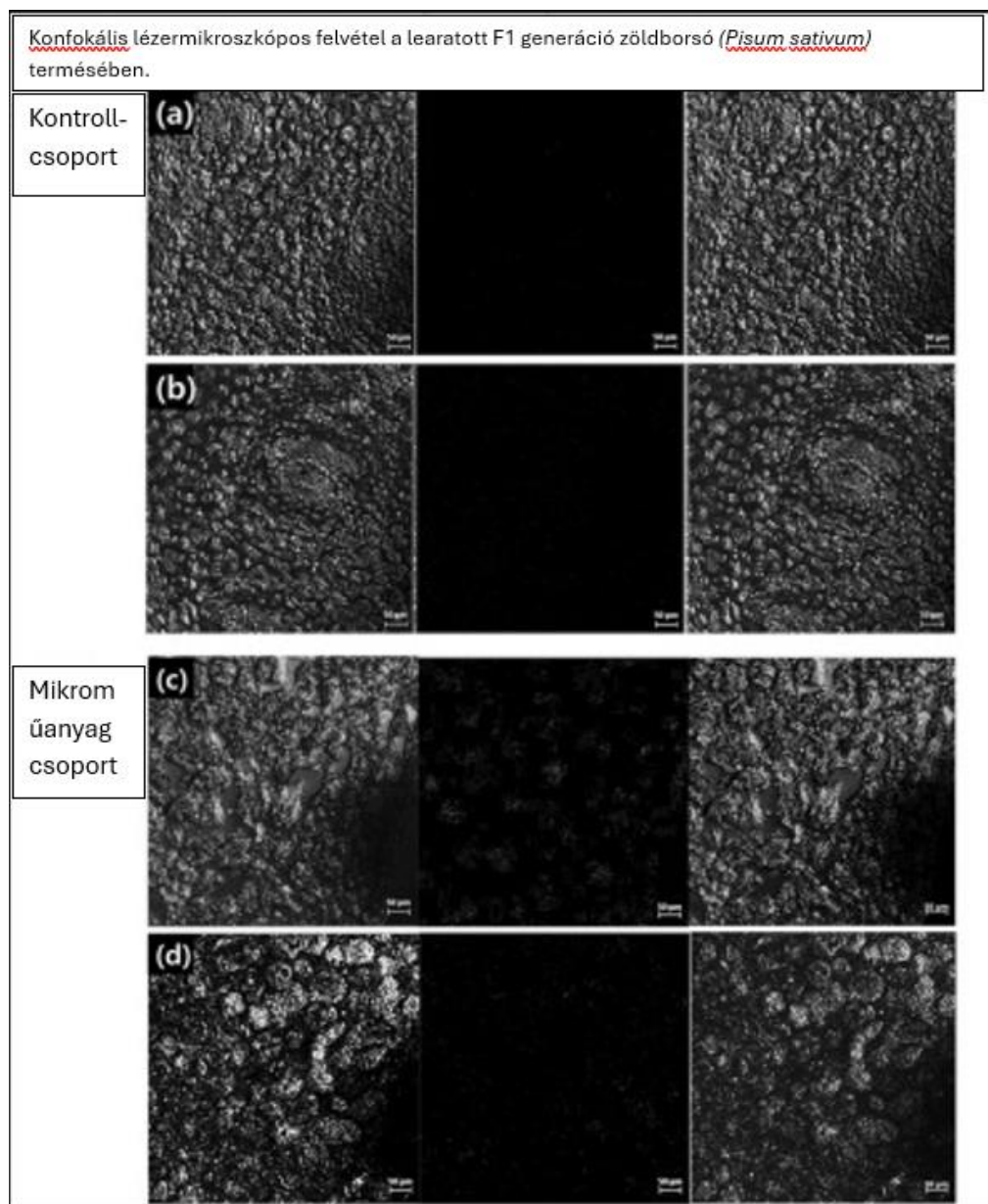
Egy laboratóriumi kísérletben arra keresték a választ, hogy a talajból felvett mikroműanyagokat az anyanövényből származó magok átörökíthetik-e az utódnövényekbe és arra az eredményre jutottak, hogy ez lehetséges (Kim et al., 2024). Fluoreszkáló folyadékkal megfestett mikroműanyagokat tettek zöldborsó (*Pisum sativum*) talajába majd a növényt növesztették, és a magjait olyan talajba vetették, amely nem tartalmazott mikroműanyagokat. Konfokális lézermikroszkóppal vizsgálva a növényeket azt tapasztalták, hogy a szülő növény magjaiban található mikroműanyag szennyeződések az utódnövény gyökereiben és száraiban is kimutathatóak voltak, ott is a vaszkuláris kötegekben nem az epidermiszben, így kizárható volt, hogy külső behatás eredményeként szennyeződött az utódnövény mikroműanyagokkal, ezt azt jelentette, hogy a szülőtől származtak az utódnövényben található mikroműanyagok, amelyet a magokkal továbbított az utódnemzedéknek (Kim et al., 2024).



14. ábra: A mikroműanyag transzgenerációs átadása borsónövényben (Forrás: Kim et al., 2024)

A kísérletben résztvevő F0 nemzedék magjait elvetették, azokból fejlődött ki F1 nemzedék, amelynek a magjait ismét elvetették. (14. ábra). Ez a kísérlet azt is igazolta, hogy a mikroműanyagok ezen krónikus hatása kockázattal járhat az élelmiszerellátásra, és ezáltal az élelmiszerbiztonságra is (Kim et al., 2024). Ugyanennek a kísérletnek a konfokális lézer

mikroszkóppal készített felvételein megfigyelhetők a mikroműanyag részecskék a learatott zöldborsó F1 nemzedék termésében a 15. ábra c, és d részében, míg az a, és b, része az ábrának a kontrollcsoportról készített felvételeit mutatja. Látható, hogy a mikroműanyagok kis csoportokban halmozódtak fel a növény termésében (Kim et al., 2024).



15. ábra: Konfokális lézermikroszkóp felvételek a learatott F1 generációs zöldborsónövény terméséről.

A felső két felvétel a kontroll csoport képei, nem tartalmaznak mikroműanyagokat, az alsó két kép a mikroműanyag csoport képei, jelentős mikroműanyag felhalmozódást mutatnak a magban. (Forrás: Kim et al., 2024)

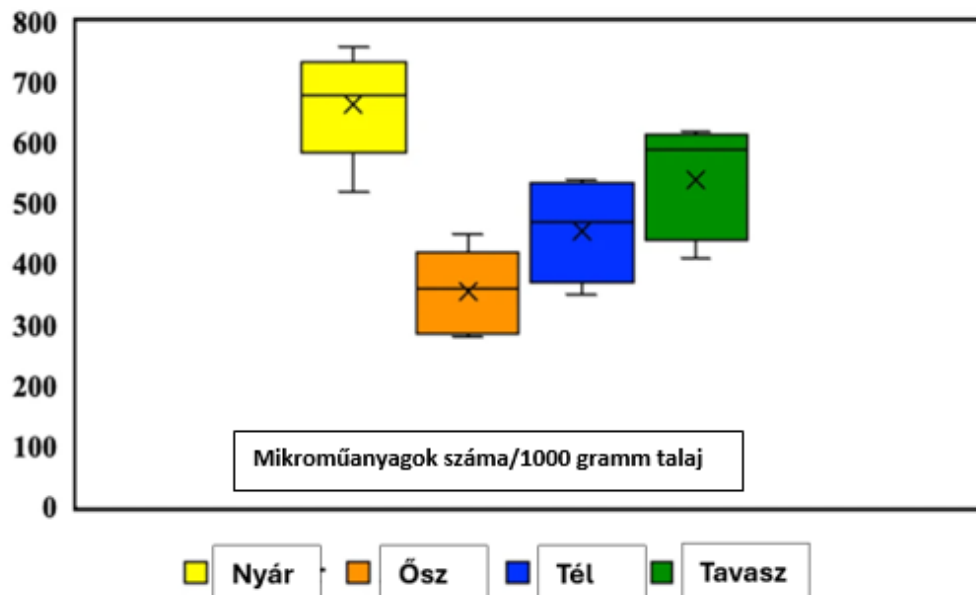
4. TOVÁBBI NEMZETKÖZI KUTATÁSOK A MIKORMŰANYAGOK TÉMÁJÁBAN

4. 1. A mikroműanyagok szezonális változása a termőföldben

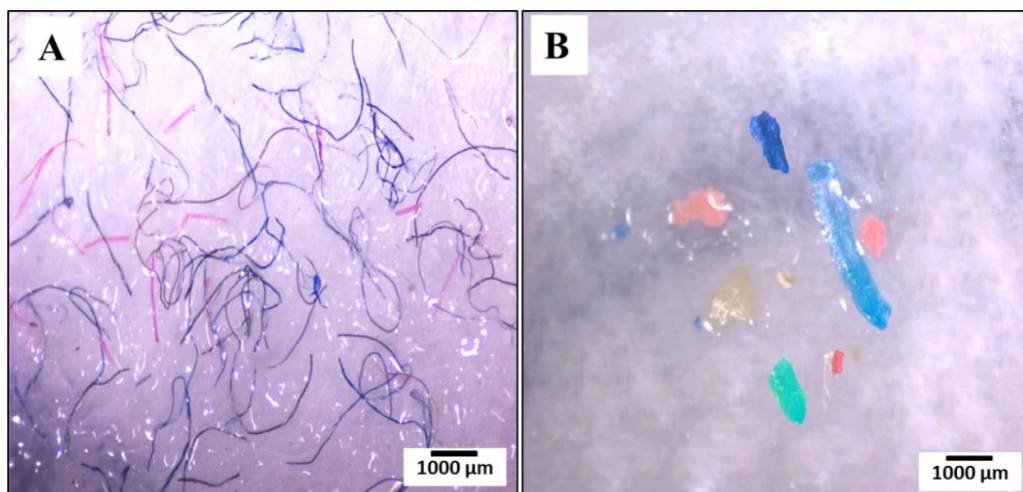
Egyiptomban zajlott egy friss kísérlet, nem mellesleg ez volt az az első szabadföldi kísérlet, amelyben azt kutatták, hogy miként tér el a műanyagok mennyisége a talajban az év egyes időszakában évszakonként egy citrom (*Citrus sinensis*) ültetvényben. A vizsgálat tárgyában két gerinctelen faj táplálkozását is megfigyelték aszerint, hogy milyen táplálkozási stratégiát követtek. A két faj közül az egyik egy földigiliszta (*Aporrectodea caliginosa*), a másik egy fülbemászó faj volt (*Anisolabis maritima*). A kísérlet azt mutatta ki, hogy habár a kísérlet helyszínéül választott citromültetvényben soha nem használtak műanyag alapú anyagokat, mégis minden egyes minta, amit vettek a talajból nagyszámban tartalmazott ilyen részecskéket egészen 280 db/kg-tól 760 db/kg-ig, azaz 504 +/- 140 db/kg-ot a vizsgálat időtartama alatt, amely egy évig zajlott 2022. június és 2023. május között. Ebből azt a következtetést lehet levonni, hogy maga a műanyag mulcs, fóliák vagy egyéb hálók használata egy adott megművelt területen nem az egyedüli mikroműanyag forrás, valahonnan a területen kívülről kell érkezniük ezeknek a szennyeződéseknek. Egyiptomban kiváltképpen azon a területen, ahol a kutatás zajlott Sohag kormányzóságban a legtöbb mezőgazdasági területen a Nílus a fő forrása az öntözővíznek. Így ez valószínűleg a közvetlen forrása az ültetvényen talált mikroműanyagoknak is. Ez is azt támasztja alá, hogy az öntözés befolyásolja a termőföld szennyezettségét. Másik lehetséges forrásként az atmoszférikus lerakódást említi meg a tanulmány, mint lehetséges szennyeződéshelyet, ahol is kiemeli a főutaktól és a városias területektől való távolság szerepét. Tekintve, hogy a mintavételek helye kevesebb, mint 50 méterre volt egy főúttól, ez pedig nyilvánvalóan hatással van a talajban lévő mikroműanyagok számára ezt második lehetséges forrásként definiálja a tanulmány (El-Masry et al., 2025).

A kutatás azt is megállapította, hogy a mikroműanyagok mennyisége a talajban nyáron volt a legnagyobb (664 +/- 90,20 db/kg), míg ősszel a legkisebb (354 +/- 70,92 db/kg) (16. ábra). A vizsgálatot FTIR spektroszkópiával végezték, az analizált részecskék 98,22%-a műanyag polimer volt, míg a maradék 1,78% cellulóz alapú anyag, ez utóbbiakat természetesen nem számolták bele az eredmények kiértékelésébe. A vizsgálat során egészen sokféle formájú mikroműanyag darabkát találtak mind a talajban, mind pedig a két

gerinctelen faj szervezetében. (17. ábra) A két vizsgált állatfaj közül a földigiliszták fogyasztottak több mikroműanyagot, azonban ez valószínűleg a testméretük miatt volt, míg a fölbemászók szervezetében sokkal nagyobb koncentrációban voltak jelen a részecskék. (El-Masry et al., 2025).

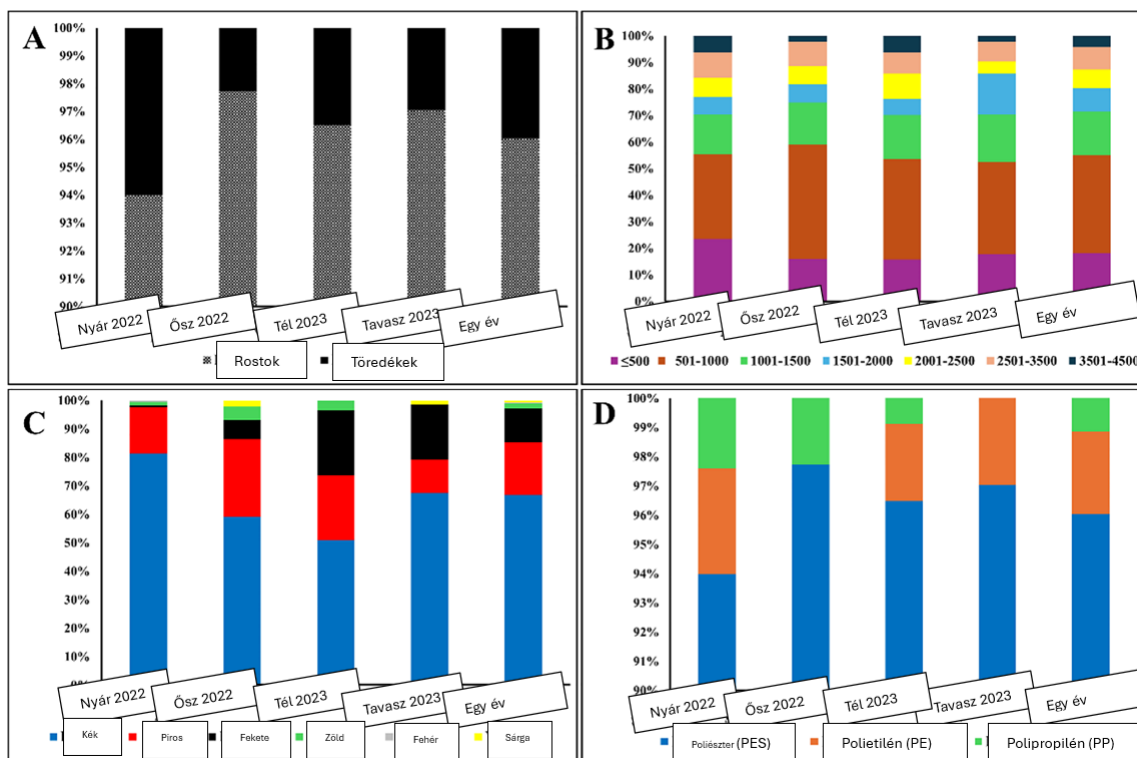


16. ábra: A mikroműanyagok átlagos szezonális mennyisége talajkilogrammonként. (Forrás: El-Masry et al., 2025)



17. ábra: Különböző formájú, talajból és makroszkopikus gerinctelenekből származó mikroműanyagokat bemutató fényképek. (A) Rostok és (B) töredékek. (lépték = 1000 µm) (Forrás: El-Masry et al., 2025)

Az azonosított részecskék nem csupán formájukban, hanem színeikben és kémiai összetételükben is nagy változatosságot mutattak. (18. ábra) (El-Masry et al., 2025)



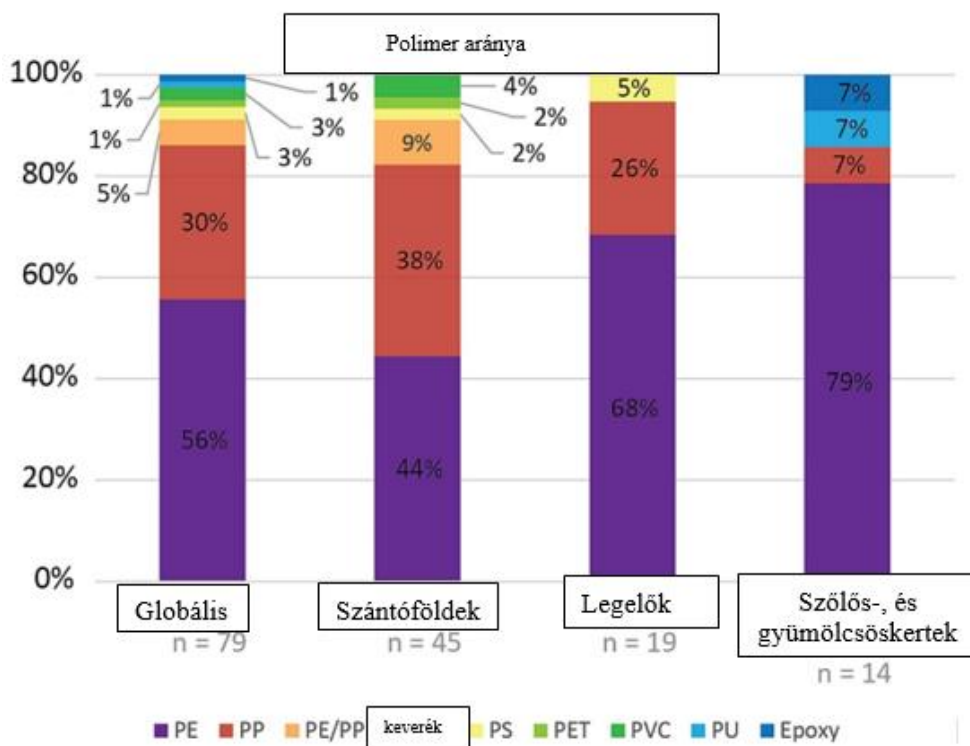
18. ábra: A talajból gyűjtött különböző mikroműanyag-formák százalékos aránya (A), hosszúságuk μm -ben (B), színek (C) és kémiai összetétel (D) (Forrás: El-Masry et al., 2025).

Ez a kísérlet rávilágít arra, hogy mennyire komplex és összetett annak megértése, hogy a termőföldben található mikroműanyagok eredetét felkutassuk, arra is kiváló példa, hogy szemléltesse a mikroműanyagok nagy távolságokra való eljutását a folyóvizek által.

4. 2. Mikroműanyagok Franciaország talajában

Egy friss Franciaországban végzett kutatás annyiban hasonló a korábban említett egyiptomihoz, hogy az első a maga nemében, valamint szintén rávilágít arra, hogy mennyire nehéz is pontosan meghatározni a termőföldben található műanyagok eredetét. A kutatásban 33 véletlenszerűen kiválasztott helyszínről gyűjtöttek be talajmintákat Franciaország területéről. Adatokat gyűjtöttek az ezekben a talajmintákban található mikroműanyagokról a 315-5000 μm közöttieket beleértve, méreteiket, kémiai összetételüket elemezték ki és egyéb releváns információkat gyűjtöttek. A legtöbb minta termőföldről,

legelőkről (gyepekről), szőlőültetvényekről és gyümölcsöskertekből származott, míg egy mintát egy erdőből vettek, amely mikroműanyagokkal volt szennyezve. A 33 mintából 25 mintában találtak szennyeződések, ez 76%. A legtöbb megművelt területről származó mintában találtak mikroműanyagokat, főként polietilén és polipropilén származékokat. Koncentrációjukat tekintve a szennyezettség hasonló volt, mint a hasonló kutatások eredménye bárhol másutt a világon. Szintén megállapították, hogy a francia talajok nem jelentenek azonnali kockázati tényezőt (Palazot et al., 2024).



19. ábra: A különböző polimerek arányai (részecske nagyság [315 µm; 5 mm]) a földhasználat függvényében: szántóföldek, gyepes, szőlőültetvények és gyümölcsösök. Az erdei minták nem szerepelnek a mikroműanyagok alacsony száma miatt. n: a mikroműanyagok mennyisége, PE: polietilén, PP: polipropilén PS: polisztirol, PET: polietilén-tereftalát, PVC: polivinil klorid, PU: poliuretán. (Forrás: Palazot et al., 2024).

Azt azonban szinte lehetetlen volt megállapítani, hogy mik is lehettek a mikroműanyagok származási helyei. Egyrészt a fizikokémiai karakterisztikájuk ezeknek az részecskéknek túl általános volt, és a helyi viszonyok sem voltak minden esetben ismertek, bár egy-egy legelőről származó minta esetében például feltételezték, hogy a szénabála kötözésére használt műanyagból származhatott, vagy tudott volt, hogy út mellett gyűjtötték, azonban többnyire az sem volt megállapítható, hogy mi lehetett a kiindulási forrás, amiktől a szennyeződés származhatott. Ha találtak is nagyobb műanyagdarabokat a mintákban, amiket

azonosítani tudtak, azt akkor sem tudták megállapítani, hogy a mikroműanyag részek ezekből a felismert darabkából származtak-e. A talált mikroműanyagok anyagszerinti eloszlása a 19. ábrán látható. (Palazot et al., 2024)

4. 3. A mikroműanyagok emberi egészségre gyakorolt hatásai

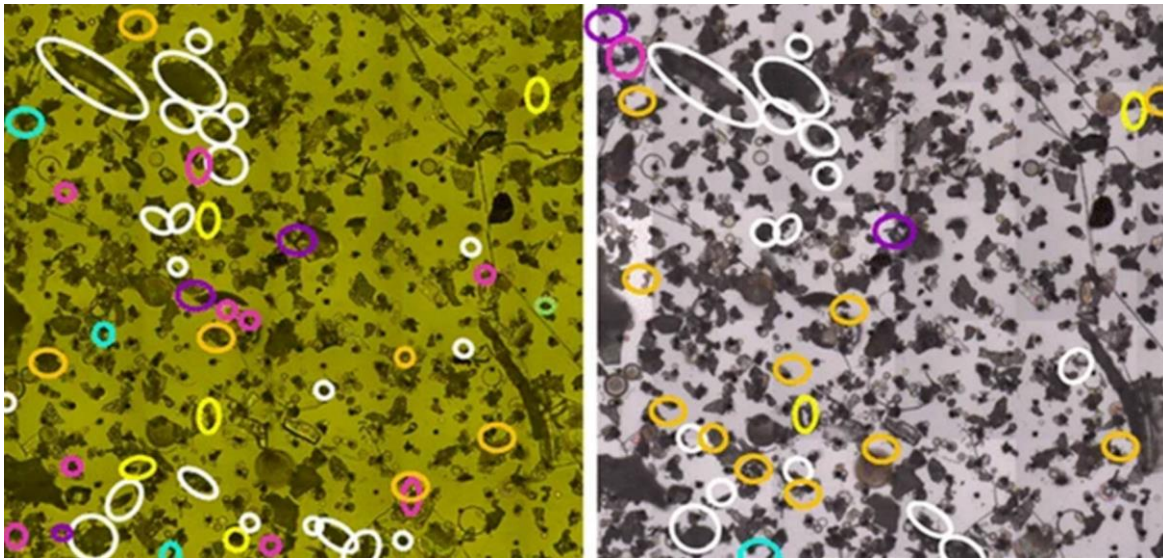
Nem csupán a növényekre és a magasabb rendű élőlényekre jelentenek azonban veszélyt a mikroműanyagok, hanem az emberekre is. Az emberek gyakorlatilag folyamatosan ki vannak téve a mikroműanyagokkal való érintkezésnek, beleértve az élelmiszereket, gyógyszereket, ruházkodást, port és kozmetikumokat. Három elsődleges útja van a mikroműanyagoknak abban a tekintetben ahogy bejutnak az emberi szervezetbe: nyelés, belégzés és bőrön át történő. A lenyelés által a leggyakrabban szervezetbe kerülő műanyagok a PET, PS és PP. Az elfogyasztott élelmiszerek révén nagyjából 39 000 és 52 000, az italok által pedig körülbelül 90 000 palackozott vizek által, míg 40 000 részecske a csapvíz elfogyasztásának következtében kerül az emberi szervezetbe. 11 megvizsgált palackozott ásványvízből 9 tartalmazott mikroműanyagokat különböző mennyiségekben. Ezáltal a mikroműanyagok az emésztőrendszerbe juthatnak, ahol a toxikus részecskék számtalan betegség okozói lehetnek többek között rákos megbetegedéseké. A belégzéssel bejutott részecskék pedig karcinogén hatásuk mellett oxidatív stresszt okozhatnak (Cárdenas-Alcaide et al., 2022).

A három szervezetbe történő bejutási mód közül a bőrön át történő a legkisebb kockázattal járó, főként akkor okozhatnak a mikroműanyagok problémát, ha folyamatosan érintkeznek a bőrrel, például kozmetikumok formájában. A tanulmány szintén kitér arra, hogy a COVID-19 okozta pandémia következtében jelentősen megnövekedett azon műanyagalapú hulladékok száma, amelyet a járvány elleni védekezéshez használtak a világban, ezek jellemzően orvosi eszközök, csomagolóanyagok, egyszerhasználatos maszkok voltak (Cárdenas-Alcaide et al., 2022). Sok esetben ezek az egyszerhasználatos személyi védőeszközök illegális hulladéklerakóhelyekre kerültek. Becslések szerint a COVID-19 pandémia ideje alatt naponta 1,6 millió tonna műanyag hulladék termelődött, és 3,5 milliárd egyszerhasználatos maszk és arctakaró került kidobásra. Ezek anyagai főként polipropilénből és poliuretánból álltak és szignifikánsan hozzájárultak a mikroműanyag szennyezés növekedéséhez a világban (Chaudhary et al., 2025).

4. 4. A mikroműanyagok karakterisztikájának meghatározása szennyvízben

A korábban leírtak alapján egyértelmű, hogy a mikroműanyagok az élet minden szegmensében megtalálhatóak, és mint problémaforrás a szennyvíztisztításban is megjelennek. A fő kihívást ezen a területen a mintavételi, a minta kinyerési és analitikai módszerek sztenderdjeinek hiánya jelenti, hasonlóképpen a talajból és a növényekből kinyert mintavételezésekhez. Ezeknek a sztenderdjei pedig szükségesek lennének ahhoz, hogy a különböző helyekről származó mintákon végzett kísérletek eredményei összehasonlíthatóak legyenek. Az elsődleges mikroműanyag szennyeződés forrása a szennyvízben a poliészter (PES), ez az anyag a ruhák anyagából a mosás után kerül a szennyvízbe, átlagosan 1900 részecske minden egyes mosás alkalmával. Természetesen ez a szám nagyságrendileg változhat és több tényezőtől is függ. Befolyásolhatja ezt az öblítő, vagy a mosáskönnyítők milyensége (Maleka et al., 2024).

A tanulmány főként arra próbál meg javaslatot tenni, hogy a jelenleg használt analitikai módszerek közül SEM, FTIR és Raman spektroszkópia közül melyik a legpontosabb annak meghatározására, hogy a mikroműanyagok kimutathatóak legyenek a szennyvízből, a jelenlegi módszerekkel ugyanis ugyanazon mintából a különböző módszerekkel különböző eredményeket kaptak. A 20. ábrán a Raman mikroszkopikus kép mellett egy FTIR mikroszkopikus kép látható két eredmény közötti eltérés pedig szemmel is jól látható (Maleka et al., 2024).



20. ábra: Két analitikai módszer eredményeinek összehasonlítása. Raman mikroszkopikus optikai kép (bal) és FTIR mikroszkopikus optikai kép (jobb) mindkettő tengeri mintákból származik a vizsgált terület megegyezik (1000×1000 μm), amelynek mérete kisebb volt, mint 400 μm (Forrás: Káppler et al., 2016 nyomán Maleka et al., 2024)

4. 5. A nanoműanyagokról röviden

Pár gondolat erejéig érdemes szót ejteni a nanoműanyagokról is, amelyeket gyakran együtt említenek a mikroműanyagokkal bár alapvetően másképp hatnak a növényekre, mint a mikroműanyagok, meg kell azonban jegyezni, hogy a tudásunk hiányos ezen a területen és nagyon kevés kutatás áll rendelkezésre a témát illetően. A mikroműanyagok alapvetően mesterségesen előállított anyagok is lehetnek, például festékek, orvosi alkalmazások, elektronikai eszközök, bevonatok, ragasztók, ezek az úgynevezett elsődleges nanoműanyagok, míg lehetnek másodlagosak is nagyobb műanyag darabok további degradációját követően. A nanoműanyagok jelenléte a természetben jelenleg kevésbé ismert, az már jól dokumentált, hogy sejtszinten és molekuláris szinten állatokban és más élőlényekben is kimutatták a hatásukat, de növényekben csak egy 2019-ben publikált tanulmány tesz említést ilyen kutatásról, ahol a faba babot (*Vicia faba*) vizsgálták oxidatív potenciál, citototoxicitás és genotoxicitás tekintetében polisztirol különböző méreteivel (10 nm és 5 μm) és koncentrációival (10, 50, és 100 mg ml⁻¹), azt találták hogy a nanoműanyagok a gyökércsúcsokon jobban felhalmozódnak, mint a mikroműanyagok (Masson et al., 2023).

Az is bizonyos, hogy kicsiny méretük miatt ezek a parányi részecskék be tudnak hatolni a növényi sejtekbe és molekuláris szintekre, azonban toxikus hatásukat nagyon komplex vizsgálni. Egészen mostanáig a nanoműanyagok vizsgálata csak standard polimereken (elsődleges nanoműanyagokon) történt, in vitro körülmények között, így terepen végzett kutatási eredmény egyáltalán nem áll rendelkezésre. Ami tovább nehezíti a kutatást ezen a területen, hogy nem létezik megfelelő analitikai eszköz, amellyel ezek a nanorészecskék kimutathatóak lennének növényekből (Masson et al., 2023).

5. KÉRDÉSEK ÉS KIHÍVÁSOK A JÖVŐBEN

5.1 A jövőbeli kutatási területek iránya

Jövőbeli kutatások fókuszpontja kell, hogy legyen annak tisztázása, hogy milyen mikroműanyagok jutnak be a növények szervezetébe a gyökereken keresztül és jutnak el a növény többi részébe. Ehhez szükséges annak a tisztázása is, hogy a részecskék mérete, alakja és a műanyag típusa hogyan befolyásolja a biohasznosulást és mobilitást a növényi szervezeten belül. Egy másik kutatási terület, hogy megtudjuk hogyan változnak a növények és a talajmikrobák közötti kapcsolatok a mikroműanyagok okozta stressz hatására, hogyan változik meg a talaj mikrobiomja. Itt kiemelten fontos lenne a rizoszféra dinamikáját kutatni, a tápanyag ciklust, a szimbiotikus kapcsolatokat, így például a mikorrhiza és növények közöttit, amelyek a növények egészségének és a talaj termékenységének szempontjából kritikusak (Chaudhary et al., 2025).

Szükséges lenne olyan analitikai eszközök, technikák fejlesztésére, amelyek nagy pontossággal kimutatják és mennyiségileg meghatározzák a mikroműanyagok számát a növényekben és a talajban, úgy, mint spektroszkópia, képalkotás, izotópos vizsgálatok.

Hosszútávú terepkiérletekre is szükség lenne a mezőgazdasági területeken, ennek oka, hogy a jelenlegi kísérletek laboratóriumban zajlanak, így szükségszerű lenne, hogy ezeket a kísérleteket valós körülmények között is elvégezzék. Ezáltal ismertté válna, hogy hosszú távon a mikroműanyagok jelenléte milyen hatást gyakorol a termőföldre, az élelmiszerbiztonságra, a talajminőségre és az ökoszisztémára (Chaudhary et al., 2025).

Az is jövőbeli kutatási terület kell legyen, hogy a növények hogyan reagálnak a mikroműanyagok általi kitettségre transzkriptomikus, proteomikus és metabolikus (anyagcsere) szintjén. Ez segítene meghatározni a műanyag stressz biomarkereket, ezáltal a nemesítő programok olyan információkhoz juthatnának, hogy ellenállóbb növény fajtákat tudnának szaporítani (Chaudhary et al., 2025).

Szükséges egyúttal innovatív kármentesítési stratégiák megalkotására is, környezetbarát és költséghatékony technológiákra fókuszálva, amelyek alkalmazhatóak a mikroműanyagok eltávolítására és lebontására terepen (Chaudhary et al., 2025), mint például megtervezett mikrobák, vagy a biológiailag lebomló műanyagok. Ide tartoznak az enzimek használata, eddig 90 olyan mikroorganizmust találtak, amelyek képesek lebontani a mikroműanyagokat természetes úton az enzimeik segítségével. Ezek megtalálhatóak

gombákban és baktériumokban, habár eddig csupán *in vitro* körülmények között zajlottak ilyen jellegű megfigyelések (Cárdenas-Alcaide et. al, 2022).

5.2 A műanyagok kibocsátásának csökkentésére tett törvényi szabályozások

A műanyagok használatának visszaszorítása egy társadalmilag is fontos feladat, amely nem nélkülözheti a beavatkozást jogalkotói szinten sem. Az Európai Unió 2018. januárjában elfogadta Európai műanyag stratégiát, amely a körforgásos gazdaság akcióterv része és valós méréseken alapul a műanyagkibocsátás csökkentésére (European Comission, 2025). Ennek részeként szabályozás alá került a műanyag termékek tervezése, gyártása, használata és újrahasznosítás. Ezen intézkedések részletezése azonban nem célja a jelenlegi dolgozatotnak. Fontos látni azonban azt, hogy a műanyagok, mint problémaforrások globális szinten is megjelennek és vannak törekvések jogalkotói szinten is keresni a valódi megoldásokat.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Számos kísérlet igazolta világszerte, hogy a mikroműanyagok nem csupán bejuthatnak a növényekbe, hanem onnan bekerülhetnek a táplálékláncba és mintegy ciklikusan akár tovább is adhatóak és örökíthetőek. A bemutatott kísérletek ismeretében kijelenthető, hogy habár előzetesen úgy vélekedtem, hogy szükséges lenne lépéseket tenni egy nemzetközileg egységes protokollokat tartalmazó vizsgálati módszer kidolgozása felé, hiszen egyértelműnek látszik, hogy a növények által biológiai úton felvett mikroműanyagok komoly egészségügyi kockázatokat hordoznak magukban, amelyek mellett, hogy befolyásolják a növények fejlődését és életfolyamatait, és tagadhatatlan hatással lehetnek az emberi egészségre a növények elfogyasztását követően, a pontos protokoll kidolgozásáig még nagyon sok kutatást kell végezni.

A mikroműanyagok hatásmechanizmusa még nem pontosan ismert, nem kutatott, vagy nem pontosan dokumentált, kísérletekkel nem igazolt, de mind tudományos szinten, mind pedig jogalkotói szinten a közeljövőben szükséges lesz egy keretrendszer kidolgozása, és olyan egészségügyi határértékek megállapítása, amelyekről a növényeket vásárlók és fogyasztók tájékozódhatnak. Elképzelhetőnek tartom azt is, hogy bizonyos megengedett határérték feletti mikroműanyagot tartalmazó növény árusítása és forgalmazása sem lenne megengedett.

Ettől valószínűleg azonban még hosszú évekre vagyunk és számtalan kutatás szükséges még annak tisztázására, hogy mi az a mennyiség, és mely anyagból, amelynek a jelenléte egy növényben már károsnak tekinthető, vagy minősíthető az emberi egészség szempontjából. Jelenleg azonban nem áll rendelkezésre olyan precíz módszer, amellyel a mikroműanyagok pontos kimutatása a növényekben lehetséges lenne, így egészségügyi határérték megállapításáról korai lenne beszélni.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném kifejezni köszönetemet konzulensemnek, Dr. Kardos Leventének, hogy szakmailag támogatta munkámat, meglátásaival mindvégig támogatott és hozzájárult a szakdolgozatom sikeres befejezéséhez.

8. IRODALOMJEGYZÉK

1. AZEEM I, ADEEL M, AHMAD MA, SHAKOOR N, JIANGCUO GD, AZEEM K, ISHFAQ M, SHAKOOR A, AYAZ M, XU M, RUI Y. (2021) Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* (Basel). 2021 Nov 2;11(11):2935. [https://doi: 10.3390/nano11112935](https://doi.org/10.3390/nano11112935) oldalak: 11-15
2. CANHA, N., JAFAROVA, M., GRIFONI, L., GAMELAS, C.A., ALVES, L.C., ALMEIDA, S.M., LOPPI, S., (2023): Microplastic contamination of lettuces grown in urban vegetable gardens in Lisbon (Portugal), *Scientific Reports*, 2023. augusztus 31., volume 13, Article number: 14278. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40840-z> oldalak: 1-4
3. CÁRDENAS-ALCAIDE, M.F., GODÍNEZ-ALEMÁNA, J.A., GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, R.B., IQBAL, H. M.N., PARRA-SALDÍVAR, R., (2022), Environmental impact and mitigation of micro(nano)plastics pollution using green catalytic tools and green analytical methods, *Green Analytical Chemistry* 3 (2022) 100031, <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100031> oldalak: 4-7
4. CHAUDHARY, H.D., SHAH, G., BHATT, U., SINGH, H., SONI, V., (2025) Microplastics and plant health: a comprehensive review of sources, distribution, toxicity, and remediation, *Journal of Environmental Quality, Emerging Contaminants* 1, 8 2025. augusztus 12. <https://doi.org/10.1038/s44454-025-00007-z> oldalak: 1-8, 13-17
5. DE SOUZA MACHADO AA, KLOAS W, ZARFL C, HEMPEL S, RILLIG MC., (2018), Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob Chang Biol.* 2018 Apr; 24(4):1405-1416., <https://doi: 10.1111/gcb.14020> oldal: 2
6. DELANGIZ, N., ALIYAR, S., PASHAPOOR, N., NOBAHARAN, K., LAJAYER, B.A., RODRÍGUEZ-COUTO, S., (2022), Can polymer-degrading microorganisms solve the bottleneck of plastics' environmental challenges? *Chemosphere*, Volume 294, 2022, 133709, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133709> oldalak: 1-2, 15
7. EL-MASRY, S.M., KHEDRE, A.M. & MUSTAFA, A.N., (2025), Seasonal variations and risk assessment of microplastic contamination in agricultural soil and associated macroinvertebrates in Egypt. *Scientific Reports* 15, 6590, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88715-9> oldalak: 6-10,
8. GÜNDOĞDU, S., AKCA, MO., GURSOY, M., YILMAZ, M., ZHANG, X., RODRÍGUEZ-SEIJO, A., BIBI, A., DI GIOIA, ML. AND VELIMIROVIC, M. (2025) Microplastics in soil: a comprehensive review

- of analytical techniques, *Frontiers Soil Sci.*, 09 July 2025 Sec. Soil Pollution & Remediation Volume 5 <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1614075> oldalak: 1
9. JIA L., LIU L., ZHANG, Y., FU W., LIU X., WANG Q., TANVEER M., HUANG L., (2023), Microplastic stress in plants: effects on plant growth and their remediations. *Frontiers in Plant Sci.*, 2023. augusztus 11. Sec. Plant Abiotic Stress Volume 14., <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1226484> oldal: 4,
 10. KIM, D., KIM, H., LEE, J., CHOI, M-J., KWEON, H-S., AN Y-J., (2024): Evidence of parental transfer of nanoplastics in pea (*Pisum sativum*) plants, Elsevier, *Journal of Hazardous Materials* Volume 465, 2024. március 05., 133516, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133516> oldalak: 1-4, 6
 11. KIM, SW., LIANG, Y., ZHAO, T. AND RILLIG, MC., (2021) Indirect Effects of Microplastic-Contaminated Soils on Adjacent Soil Layers: Vertical Changes in Soil Physical Structure and Water Flow. *Frontiers in Environmental Sciences* 9:681934. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.681934> oldalak: 1, 7-8
 12. KOCHAR, P., AND GOMES, G., (2024): Letucce seed germination in the presence of microplastic contamination, *Journal of Emerging Investigators*, 2024. december 9., vol 7. <https://doi.org/10.59720/24-005> oldalak: 2-4
 13. LI, L., YONGMING LUO, Y., PEIJENBURGC, W.J.G.M., LIA, R., YANGB, J., ZHOUA, Q., (2020), Confocal measurement of microplastics uptake by plants, Elsevier, *MethodsX* volume 7 (2020) 100750, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.023> oldalak 1-2
 14. LI, Y., YAO, J., NIE, P., FENG, X., LIU, J., (2021), An effective method for the rapid detection of microplastics in soil *Chemosphere* Volume 276, August 2021, 128696, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128696> oldalak: 1-2,
 15. MALEKA, T., GREENFIELD, R., MUNIYASAMY, S., MODLEY, L-A., (2024), An overview on the characterization of microplastics (MPs) in waste water treatment plants (WWTPs). *Sustain. Water Resour. Manag.* 10, 182 2024, <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01157-5> oldalak 3-9
 16. MASSON, D., PÉDROT, M., DAVRANCHE, M., CABELLO-HURTADO, F., RYZHENKO, N., EL AMRANI, A., WAHL, A., GIGAULT, J., (2023), Are nanoplastics potentially toxic for plants and rhizobiota? Current knowledge and recommendations, *NanoImpact*, Volume 31, 2023, 100473, <https://doi.org/10.1016/j.impact.2023.100473> oldalak: 1-2, 7-8
 17. MULDER, KAREL & KNOT, J.MARJOLIJN, (2001) PVC plastic: a history of systems

- development and entrenchment. *Technology in Society*. 23. 265-286.
[https://doi.org/10.1016/S0160-791X\(01\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0160-791X(01)00013-6) oldalak: 2-3
18. PALAZOT, M., SOCCALINGAME, L., FROGER, C., JOLIVET, C., ANTONIO BISPO, MIKAËL KEDZIERSKI, STÉPHANE BRUZAUD, (2024) First national reference of microplastic contamination of French soils, *Science of The Total Environment*, Volume 918, 2024, 170564, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170564> oldalak: 1-3, 6
19. PILAPITIYA, P.G.C. N.T., RATNAYAKE, A.S., (2024) The world of plastic waste: A review, *Cleaner Materials*, Volume 11, 2024, 100220, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220> oldal: 1
20. ULLAH, R., TSUI T-K. M., CHEN, H., CHOW, A., WILLIAMS, C., LIGABA-OSENA A., (2021), Microplastics interaction with terrestrial plants and their impacts on agriculture, *Journal of Environmental Quality*, 2021. július 10. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20264> oldalak: 1025, 1029, 1034,
21. ZHANG, Q., ZHAO, M., MENG, F., XIAO, Y., DAI, W., LUAN, Y., (2021) Effect of Polystyrene Microplastics on Rice Seed Germination and Antioxidant Enzyme Activity., *Toxics*, 2021, 9, 179., <https://doi.org/10.3390/toxics9080179> oldalak: 1-2, 15
22. RASHID, E., HUSSAIN, S.M., SHAFQAAT ALI, MUNIR, M., GHAFOR, A., YILMAZ, E., ALSHEHRI, M.A., RIAZ, D., NAEEM, A., NAEEM, E., (2025) Impacts of microplastic accumulation in aquatic environment: Physiological, eco-toxicological, immunological, and neurotoxic effects, *Toxics, Aquatic Toxicology*, 2025, Volume 279, 107232, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107232> oldalak: 1-2
23. ZHANG, S., WANG, J., YAN, P., AURANGZEIB, M., (2023) Middle concentration of microplastics decreasing soil moisture-temperature and the germination rate and early height of lettuce (*Lactuca sativa* var. *ramosa* Hort.) in Mollisols, *Toxics, Science of The Total Environment*, Volume 905, 2023, 167184, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167184> oldal: 2

INTERNETES HIVATKOZÁSOK

- 1 A műanyag története – 2.rész, (2022) [alteo.hu](https://alteo.hu/chikansplanet/a-muanyag-tortenete-2-resz), 2022. május 20.,
<https://alteo.hu/chikansplanet/a-muanyag-tortenete-2-resz>
Letöltés ideje: 2025. október 11.

- 2 Bråte, I.Li.N., Huwer, B., Thomas, K.V., Eidsvoll, D.P., Halsband, C., Almroth, B.C. and Lusher, A., Micro-and macro-plastics in marine species from Nordic waters, TemaNord 2017:549,
<https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1141513/FULLTEXT02.pdf>
<http://dx.doi.org/10.6027/TN2017-549>
oldal: 34,
Letöltés ideje: 2025. 10. 14.
- 3 European Commission, Energy, Climate change, environment, Plastic strategy, (2025) environment.ec.europa.eu 2025. március 10.
https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy_en
Letöltés ideje: 2025. október 11.
- 4 Ezek a műanyagtárgyak pusztítják el a legtöbb delfint, bálnát, teknőst és tengeri madarat, Qubit.hu 2020. december 15. Tudomány
<https://qubit.hu/2020/12/15/ezek-a-muanyagtargyak-pusztitjak-el-a-legtobb-delfint-balnat-teknost-es-tengeri-madarat>
Letöltés ideje: 2025. október 11.
- 5 Guglielmi, G., (2017) In the next 30 years, we'll make four times more plastic waste than we ever have, Science.org, 2017. július 19.
<https://www.science.org/content/article/next-30-years-we-ll-make-four-times-more-plastic-waste-we-ever-have>
Letöltés ideje: 2025. október 11.
- 6 Hermann Staudinger – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach 2025. Mon. 13 Oct 2025.
<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1953/staudinger/biographical/>
Letöltés ideje: 2025. október 13.
- 7 Kump, E., Műanyagok: a tengerek szennyezői
<https://korforras.hu/2018/12/11/muanyagok-a-tengerek-szennyezoi/>
Letöltés ideje: 2025. október 14.
- 8 Műanyag felület, (2025) Assist-Trend.hu,
https://www.assist-trend.hu/muanyag_felulet_357
Letöltés ideje: 2025. október 11.

- 9 National Hall of Fame, Charles Goodyear, Vulcanization of Rubber,
<https://www.invent.org/inductees/charles-goodyear>
Letöltés ideje: 2025. október 13.
- 10 Nyaralás a műanyagtengerben? (2019), hasznosítsd.hu, 2019. június 07.
<https://hasznositsd.hu/nagyvilag/nyaralas-a-muanyagtengerben>
Letöltés ideje: 2025. október 11.
- 11 Parker L., Nearly Every Seabird on Earth Is Eating Plastic, (2015) National Geographic, 2015. szeptember 02.
<https://www.nationalgeographic.com/science/article/15092-plastic-seabirds-albatross-australia>
Letöltés ideje: 2025. október 11.
- 12 Snowden S., 300-Mile Swim Through The Great Pacific Garbage Patch Will Collect Data On Plastic Pollution (2019) forbes.com, 2019. május 30.
<https://www.forbes.com/sites/scottsnowden/2019/05/30/300-mile-swim-through-the-great-pacific-garbage-patch-will-collect-data-on-plastic-pollution/>
Letöltés ideje: 2025. október 11.
- 13 Szabó I. (2018): A mikroműanyagok köztünk élnek, 2018. december 07.
<https://juratus.elte.hu/a-mikromuanyagok-koztunk-elnek/>
Letöltés ideje: 2025. október 11.
- 14 These are the plastic items that most kill whales, dolphins, turtles and seabirds The Journalistic (2020) Theconversation.com, 2020. december 13.
<https://theconversation.com/these-are-the-plastic-items-that-most-kill-whales-dolphins-turtles-and-seabirds-151200>
Letöltés ideje: 2025. október 11.

9. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Műanyagok használata és újra hasznosítása, múlt, jelen, előrejelzés (Forrás: Guglielmi, science.org, 2017).....	6
2. ábra: Úszó hulladéksziget a Csendes-óceánon (Forrás: Snowden, forbes.com, 2019)	7
3. ábra: A csendes-óceáni úszó hulladékok körforgása a tengeráramlatoknak köszönhetően (Forrás: Snowden, forbes.com, 2019).....	8
4. ábra: Mikroműanyagot fogyasztó plankton (Forrás: Szabó, 2018., juratus.elte.hu).....	10
5. ábra: Műanyagfogyasztó tengeri állatfajok száma (Forrás: Brate et al., 2017).....	11
6. ábra: A mikroműanyagok szárazföldi és vízi ökoszisztémába kerülésének egyszerűsített bemutatása (Forrás: Chaudhary et al., 2025)	15
7. ábra: A mikroműanyagok bekerülése a vízi és szárazföldi táplálékláncba (Forrás: Chaudhary et al., 2025).....	16
8. ábra: A mikroműanyagok bekerülése a növényekbe a gyökérszinten keresztül (Forrás: Chaudhary et al., 2025).....	17
9. ábra: A mikroműanyagok bekerülése a növényekbe a leveleken keresztül (Forrás: Chaudhary et al., 2025).....	19
10. ábra: A mikro-, és nanoműanyagok hatása a növények élettani funkcióira és biokémiai folyamataira.....	22
11. ábra: Konceptcionális ábra, amely bemutatja a haszonnövényekben található mikroműanyagok kimutatására szolgáló különféle eszközöket/technikákat.....	23
12. ábra: Saláta növény gyökere megfestve (Forrás: Kochar és Gomes, 2024)	25
13. ábra: A saláta által fel nem vett mikroműanyag részecskék (Forrás: Kochar és Gomes, 2024)	25
14. ábra: A mikroműanyag transzgenerációs átadása borsónövényben (Forrás: Kim et al., 2024)	26
15. ábra: Konfokális lézermikroszkóp felvételek a learatott F1 generációs zöldborsónövény terméséről.....	27
16. ábra: A mikroműanyagok átlagos szezonális mennyisége talajkilogrammonként. (Forrás: El-Masry et al., 2025)	29

17. ábra: Különböző formájú, talajból és makroszkopikus gerinctelenekből származó mikroműanyagokat bemutató fényképek. (A) Rostok és (B) töredékek. (lépték = 1000 µm) (Forrás: El-Masry et al., 2025).....	29
18. ábra: A talajból gyűjtött különböző mikroműanyag-formák százalékos aránya (A), hosszúságuk µm-ben (B), színek (C) és kémiai összetétel (D) (Forrás: El-Masry et al., 2025)..	30
19. ábra: A különböző polimerek arányai (részecske nagyság [315 µm; 5 mm]) a földhasználat függvényében: szántóföldek, gyepek, szőlőültetvények és gyümölcsösök. Az erdei minták nem szerepelnek a mikroműanyagok alacsony száma miatt. n: a mikroműanyagok mennyisége, PE: polietilén), PP: polipropilén PS: polisztirol, PET: polietilén-tereftalát, PVC: polivinil klorid, PU: poliuretán. (Forrás: Palazot et al., 2024).....	31
20. ábra: Két analitikai módszer eredményeinek összehasonlítása. Raman mikroszkopikus optikai kép (bal) és FTIR mikroszkopikus optikai kép (jobb) mindkettő tengeri mintákból származik a vizsgált terület megegyezik (1000×1000 µm), amelynek mérete kisebb volt, mint 400 µm (Forrás: Käßler et al., 2016 nyomán Maleka et al., 2024)	34

SZAKDOLGOZAT LEADÁSI NYILATKOZAT

Alulírott **Kiss Gábor János** (Neptun-kód: NUEAM0) nyilatkozom, hogy „**A mikroműanyagok növényekre gyakorolt hatásai és bekerülésük a táplálékláncba**” címen benyújtott szakdolgozatom/diplomamunkám saját szellemi termékem. Tudomásul veszem, hogy a Dékáni Hivatalban határidőben történő bemutatás nem jelenti dolgozatom szakmai és tartalmi elfogadását.

Budapest, 2025. október 15.



Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Kiss Gábor János
A Hallgató Neptun kódja: NUEAMO
A dolgozat címe: A mikroműanyagok növényekre gyakorolt hatásai és bekerülésük a táplálékláncba
A megjelenés éve: 2025
A konzulens intézetének neve: Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
A konzulens tanszékének a neve: Környezettudományi Intézet
Agrárkörnyezettani Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem. Továbbá kijelentem, hogy a dolgozat elkészítése során alkalmazott mesterséges intelligencia-eszközök (pl. szöveggenerálás, nyelvi javítás, fordítás, adatelemzés) használata nem helyettesítette a saját kutatási és alkotói munkámat, azok alkalmazását a források között vagy a módszertani részben feltüntettem, és a szakmai-etikai elvárásoknak megfelelően jártam el.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: Budapest, 2025. év október hó 20. nap



Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Kiss Gábor János (hallgató Neptun azonosítója: **NUEAM0**) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védeésre

javaslom / nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: Budapest, 2025. október 20.



belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.

Hallgatók nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Kiss Gábor János
Neptun-kódja:	NUEAM0
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	<input checked="" type="checkbox"/> BSc/BA <input type="checkbox"/> MSc/MA <input type="checkbox"/> Doktori (PhD) <input type="checkbox"/> Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	Szakdolgozat készítés 2. / KERTU077L
A munka címe:	A mikroműanyagok növényekre gyakorolt hatásai és bekerülésük a táplálékláncba

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztensi vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrektúra, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka mellékletében való csatolása szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve, verziója, elérhetősége	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet bejegyzésének sorszáma

--	--	--	--

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

.....
.....
.....
.....

4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: Budapest, 2025. október hó 27. nap



Hallgató aláírása



Konzulens/Témavezető aláírása