

POLICIKLUSOS AROMÁS SZÉNHIIDROGÉNEKKEL SZENNYEZETT TALAJOK KÁRMENTESÍTÉSI MÓDSZEREI

Nagy Kinga^{1,2}, Vértessy G. Beáta^{1,2}

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Vegyésszmérnöki és Biomérnöki Kar,

Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék

²HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont, Enzimológiai Intézet

Összefoglalás

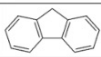
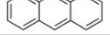
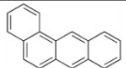
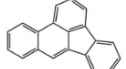
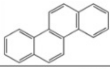
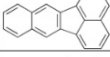
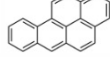
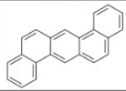
A policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) kondenzált aromás gyűrűkből felépülő, rendkívül lipofil vegyületek, melyek többnyire tökéletlen égési folyamatokban keletkeznek. A környezetben tartósan megmaradnak, és rendkívül káros egészségügyi hatásokat okozhatnak. A PAH-okkal szennyezett talajok helyreállítása kihívást jelent ezen vegyületek toxicitása és mutagenitása miatt. A PAH-szennyezett talajok kezelésére különféle kármentesítési technikákat fejlesztettek ki, beleértve fizikai, kémiai és biológiai elven működő módszereket is. A cikkben részletesen bemutatjuk és értékeljük a jelenleg talajkármentesítésre használt módszereket. A szennyezett talaj kármentesítési technikájának kiválasztásakor több szempontot is figyelembe kell venni. Ilyen például a szennyezés típusa, koncentrációja és eloszlása, a helyszín körülményei, a szabályozási követelmények, a költségek és az időkorlátok. Olyan tényezőket is figyelembe kell venni, mint a technika hatékonysága, a környezeti hatás és a hosszú távú fenntarthatóság. Ezért fontos, hogy a talajmentesítési módszer kiválasztása előtt alapos helyszínértékelést és megvalósíthatósági tanulmányt készítsenek. Ezenkívül gyakran előnyös a különböző módszerek kombinálása vagy egymás utáni alkalmazása a kármentesítési teljesítmény és hatékonyság optimalizálása érdekében.

Bevezetés

A policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) olyan szerves vegyületek csoportja, amelyek több kondenzált aromás gyűrűből állnak. Elsősorban tökéletlen égés során, mint pl. a kőszén, a nyersolaj vagy a benzin pirolízisekor keletkeznek. Az Amerikai Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (US EPA) által felsorolt 16 elsődleges szennyezőként („priority pollutants”) azonosított PAH szerkezetét és néhány fizikai-kémiai tulajdonságát az 1. táblázat foglalja össze. Ezen 16 PAH-referenciavegyület körét a US EPA részint toxicitásuk és az emberre vonatkozó expozíciós potenciáljuk, részint pedig a veszélyes anyagokkal szennyezett területeken tapasztalt előfordulási gyakoriságuk, valamint az egyes kongenerekre rendelkezésre álló ismeretek mennyisége

alapján állította össze. Más, heterociklusos PAH-ok aromás gyűrűik szerkezetében olyan atomokat is tartalmazhatnak, mint a kén, nitrogén és oxigén. Kémiai természetüket tekintve semleges, hidrofób, apoláris molekulák. Fizikai és kémiai jellemzőik, mint például a vízzoldhatóság (a 16 US EPA PAH-ra vonatkozóan $1,9 \times 10^{-7}$ – $1,59 \times 10^{-3}$ g/l) és a hidrofobicitás, függnak a molekulatömegtől, illetve az atomi összetételtől, így ezek a jellemzők eltéréseket okoznak az egyes kongenerek illékonyságában, a különböző oldószerekben mutatott oldhatóságában és a biogeokémiai ciklus során tapasztalható viselkedésében.

1. táblázat. Az Amerikai Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (US EPA) által felsorolt 16 elsődleges szennyezőként („priority pollutants”) azonosított PAH szerkezete és néhány fizikai-kémiai tulajdonsága

Név	Képlet	Szerkezet	Molekulatömeg [g/mol]	Olvadáspont ^a [°C]	Forráspont ^a [°C]	LogK _{ow} ^a	Vízzoldhatóság 25°C (µg/L) ^a
Naftalin	C ₁₀ H ₈		128	81	218	3,00–4,00	$3,17 \times 10^4$
Acenaftilén	C ₁₂ H ₈		152	95	270	3,70	-
Acenaftén	C ₁₂ H ₁₀		154	96,2	279	3,92–5,07	$3,93 \times 10^3$
Fluorén	C ₁₃ H ₁₀		166	115–116	294	4,18	$1,98 \times 10^3$
Antracén	C ₁₄ H ₁₀		178	218	342	4,46–4,76	73
Fenantrén	C ₁₄ H ₁₀		178	100,5	338	4,45	$1,29 \times 10^3$
Fluorantén	C ₁₆ H ₁₀		202	108,8	383	4,90	260
Pirén	C ₁₆ H ₁₀		202	150,4	393	4,90	135
Benzo(a)antracén	C ₁₈ H ₁₂		228	160,7	425	5,61–5,70	14
Krizén	C ₁₈ H ₁₂		228	253,8	431	5,61	2
Benzo(b)fluorantén	C ₂₀ H ₁₂		252	168,3	481	6,57	1,2 ^b
Benzo(k)fluorantén	C ₂₀ H ₁₂		252	215,7	480	6,84	0,76
Benzo(a)pirén	C ₂₀ H ₁₂		252	178,1	496	6,04	3,8
Indeno(1,2,3-cd)pirén	C ₂₂ H ₁₂		276	163	536	7,66	62
Benzo(g,h,i)perilén	C ₂₂ H ₁₂		276	278,3	542	7,23	0,26
Dibenzo(a,h)antracén	C ₂₂ H ₁₄		278	266,6	535	5,80–6,50	2,49 ^b

^aLukić B. et al. [29]

^bNCBI [1]

A PAH-ok környezetszennyező anyagok, mivel negatív hatással lehetnek az emberi egészségre és a környezetre egyaránt, károsak lehetnek a vadon élő állatokra, és megzavarhatják az ökoszisztémákat. Toxicitásuk szerkezetüktől, méretüktől és gyűrűszámuktól függ. Egyes PAH-kongenereknek való kitettséget összefüggésbe hozták a rák, légzőszervi és szív-érrendszeri problémák, valamint fejlődési és reprodukciós problémák növekvő kockázatával [1, 2]. A PAH-ok zsírolldható molekulák, ezért gyorsan eloszanak a szövetek között, és a testzsírban halmozódnak fel. Metabolizmusuk a citokróm P450 enzimcsalád által közvetített egyes funkciójú oxidázrendszeren keresztül megy végbe, melynek első lépéseként oxidáció vagy hidroxilezés zajlik le [3]. Sajnálatos módon pont a lebontási folyamat során keletkeznek a PAH-okból azok a reaktív metabolitok (epoxidok, dihidrodiolok), melyek a rákkeltő, DNS károsító hatás kifejtéséért felelősek [4]. Az egyéneknek a PAH-ok káros hatásaira való érzékenységi különbségek részben a lebontásban résztvevő enzimek expressziós szintjei közötti különbségeknek, részben a gének genetikai eltéréseinek tudhatók be [5].

A PAH-okat bár nem szintetizálják kémiai úton ipari célokra, de ezen egészségügyi kockázatok ellenére is szerves intermediereként felhasználják különböző iparágakban. , például színezékek, műanyagok és növényvédő szerek összetevőinek előállításához. Néhány konkrét példa PAH-ok felhasználására:

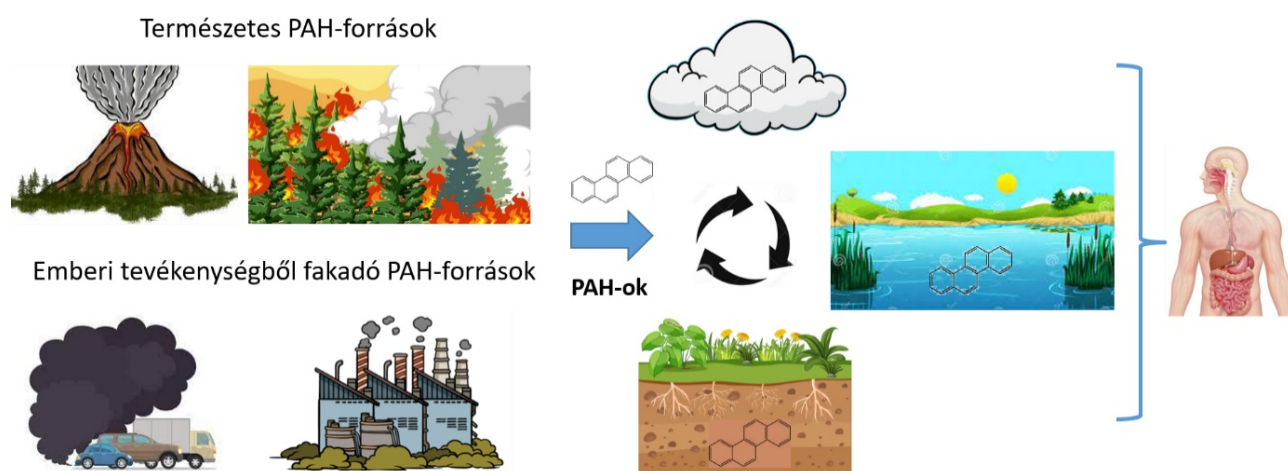
- Acenaftén: pigmentek, színezékek, műanyagok, növényvédő szerek és gyógyszerek gyártása,
- Antracén: hígítószer favédőszerekhez, festékek és pigmentek gyártásához,
- Fluorantén: mezőgazdasági vegyszerek, színezékek és gyógyszerek gyártása,
- Fluorén: gyógyszerek, pigmentek, színezékek, növényvédő szerek és hőre keményedő műanyagok gyártása,
- Fenantrén: gyanták és növényvédő szerek gyártása,
- Pirén: pigmentek gyártása [6].

Ez önmagában nem okoz problémát, azonban fokozottan ügyelni kell rá, hogy a káros anyagok ne jussanak ki a környezetbe. Ezenkívül megtalálhatók az aszfaltban és más építőanyagokban is [3]. A szénhidrogének tökéletlen égetésekor keletkezve és a környezetbe jutva ez a típusú szennyezés gyakran megtalálható a levegőben, vizekben és talajokban [3]. Míg a PAH-ok a természetben is előfordulnak (pl. iszapvulkán), az emberi tevékenységek,

például a fosszilis tüzelőanyagok elégetése, az ipari folyamatok és a hulladékégetés jelentősen megnövelték jelenlétüket a környezetben [7]. Európában a PAH-okkal legszennyezettebb országok közé tartozik Montenegró és Horvátország, ahol a talajban megtalálható szennyező anyagok mintegy 36, illetve 29%-át teszik ki a policiklusos aromás szénhidrogének. Ez a szám Magyarországon 6% (2011-es adatok) [8].

A PAH-ok talajba jutása történhet közvetlenül is, de a levegőbe kerülve is átterjedhetnek a talajokba és a vizekbe (1. ábra). A talajokban megtalálhatóak mind kicsi, mind pedig nagy molekulatömegű PAH-ok. Ezek a szennyező anyagok hosszú időn keresztül is megmaradhatnak a talajokban, mivel felezési idejük igen hosszú, akár 8 év is lehet [9]. Talajok esetében a szennyezettség mértékét tekintve négy szintet különböztetnek meg: nem szennyezett ($< 0,200$ mg/kg), enyhén szennyezett ($0,200\text{--}0,600$ mg/kg), közepesen szennyezett ($0,600\text{--}1,000$ mg/kg) és erősen szennyezett ($> 1,000$ mg/kg) [10].

Folyamatos erőfeszítések folynak a PAH-szennyezés csökkentését célzó és az emberi egészségre és a környezetre gyakorolt hatásának csökkentésére szolgáló új technológiák és eljárások kifejlesztésére. A tisztítási technológia megválasztásánál szempont lehet, hogy az adott szennyezésre milyen technológia alkalmazható jó hatásfokkal, ami függhet a szennyezett talaj tulajdonságaitól (pl. permeabilitás, pórustérfogat, hőmérséklet, szemcseméret, vízkapacitás, talajvízszint stb.), illetve az adott technológia költségigényétől [11].



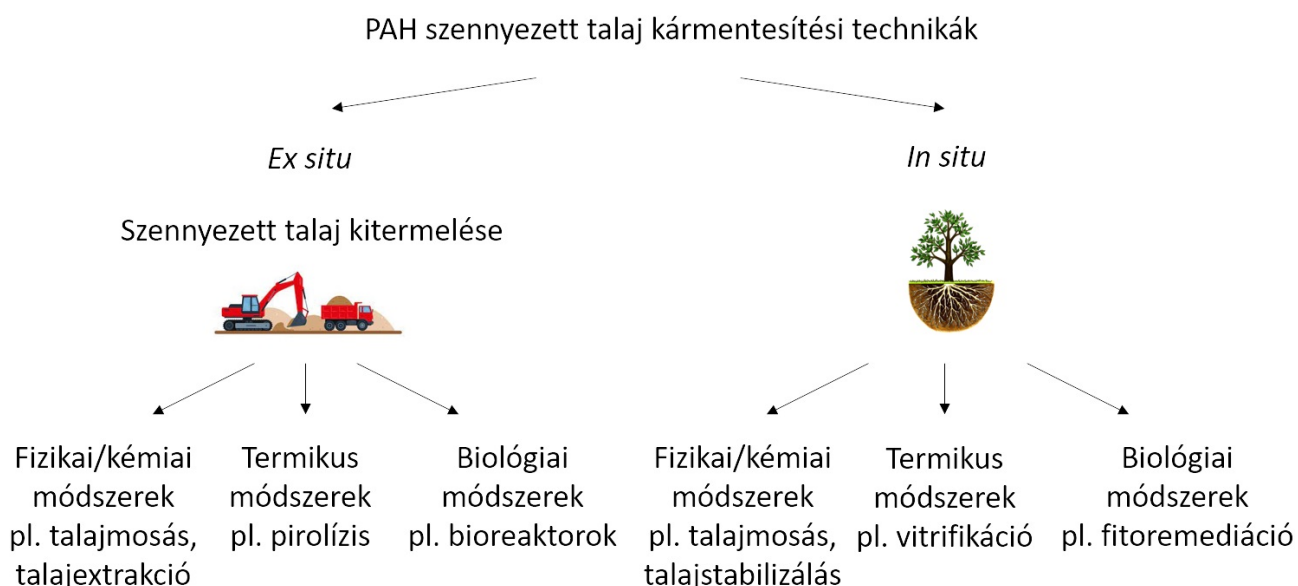
1. ábra. A PAH-ok forrásai és körforgásuk a természetben. A PAH-oknak vannak természetes forrásaik is, azonban az emberi tevékenységek által is bekerülhetnek a környezetbe, ahol természetes körforgásban vesznek részt. Az emberi szervezetbe bekerülhetnek mind a levegőből (pl. belélegezve), vízből (pl. szennyezett vízi élőlényeket fogyasztva), mind pedig a talajból (pl. szennyezett növény elfogyasztásával).

PAH-szennyezett talajok kármentesítési technológiái

A kármentesítési technikákat csoportosíthatjuk aszerint, hogy szükség van-e a szennyezett talaj kitermelésére és elszállítására. Eszerint megkülönböztetünk *in situ* (a szennyezett talaj kezelése helyben történik) és *ex situ* (a szennyezett talaj feltárását igénylik) technológiákat (2. ábra) [10, 11].

Az *ex situ* módszerek fő előnye, hogy magas eltávolítási arányt érhetünk el, szabályozni lehet a kezelési feltételeket, és sokféle szennyeződéssel kezelhető ilyen módon. Általában rövidebb időtartamot igényelnek, mint az *in situ* kezelések. Az *ex situ* módszerek hátrányai azonban, például a magas költségek, a nagy energiafogyasztás, nagy mennyiségű hulladék, valamint a szállítás és ártalmatlanítás jelentette környezeti teher [11, 12].

Az *in situ* módszerek fő előnye, hogy csökkentik az expozíció és a másodlagos szennyeződés kockázatát, minimalizálják a terület zavarását, valamint csökkentik a kármentesítés költségeit. Az *in situ* módszerek hátrányai például a korlátozott alkalmazhatóság, az alacsony hatékonyság, a monitorozás nehézségei, valamint a talaj minőségére és a mikroorganizmusokra gyakorolt esetleges káros hatások [9, 12].



2. ábra. PAH szennyezett talajok lehetséges kármentesítési technikái.

A módszerválasztás során számos szempontot kell figyelembe venni. Ilyen lehet például a szennyezett terület mérete. A méret növekedésével inkább az *in situ* technológiák a kedvezőbbek. Emellett fontos szempont még a szennyezett terület környezetvédelmi besorolása. Védett területen szintén az *in situ*

technológiákat részesítik előnyben. A szennyezés súlyosságának és toxicitásának növekedése, a szennyezés inhomogenitása, valamint a beavatkozás sürgőssége pedig az *ex situ* módszerek alkalmazását indokolják [16].

A PAH-szennyezett talajok kezelésére számos fizikai és/vagy kémiai, illetve biológiai lehetőség áll rendelkezésre. Ezek előnyeit, illetve hátrányait foglaljuk össze a következőkben.

I. Ex situ módszerek

Az *ex situ* eljárások lényege, hogy a szennyezett talajt nem az eredeti helyén kezelik, hanem megfelelő berendezésekkel kitermelik, és vagy a helyszínen, vagy szállítás után egy központi lerakóhelyen kezelik, ártalmatlanítják. Ezen módszerek előnye, hogy kevésbé érzékenyek a geológiai szerkezet inhomogenitására, a talaj áteresztőképességére és a szennyező anyagok talajban való eloszlásának egyenletességére.

A kitermeléssel történő kármentesítés hátránya – a nagy helyigény, valamint a magasabb kezelési költségek – a legközelebbi alkalmas lerakóhely távolsága a mentesítendő területtől nagymértékben befolyásolja a költségeket. A szennyezett terület kitermelésekor szigorú munkavédelmi szabályokat kell betartani, a dolgozók fokozott veszélynek vannak kitéve, továbbá fennáll a terület további szennyeződésének kockázata [14].

1) Fizikai/kémiai eljárások

A fizikai/kémiai eljárások előnye, hogy nagyfokú szennyezés is kezelhető velük, azonban a felhasznált vegyszerek miatt nagy az ökológiai lábnyomuk.

a. Talajmosás/talajextrakció

A PAH-ok talajból való eltávolítására a talajmosás előnyös módszer, mivel egy egyszerű, alacsony költségű és enyhe működési körülmények mellett működő eljárás. Nagyfokú szennyezés is kezelhető ezzel a módszerrel, így akár más (pl. biológiai) eljárások előkezeléseként is alkalmazható [10, 14].

A szennyező anyagokat vízzel vagy valamilyen szerves oldószerrel leoldják a talajrészecskékről, vagy mechanikai erővel távolítják el. Ez lehet erős vízszugár vagy különböző berendezésekben létrehozott nyírófeszültség (pl. forgódob) [18]. Nem vízzel oldható szennyezők esetében a megfelelő vegyszerek használata (pl. felületaktív anyagok – nátrium-dodecil-szulfát) ugyan fokozza a mosási

hatékonyságot, azonban növeli a módszer ökológiai lábnyomát, tönkretelheti a talajszerkezetet és megváltoztathatja a fizikai/kémiai tulajdonságait is [16, 17]. A talaj intenzív mosása (más szerves anyag hozzáadása nélkül is) mindenképpen talajkárosodáshoz vezethet, hiszen a szennyező anyag mellett a hasznos talajalkotók is kimosódnak a talajból, így a mosást követően általában szükség van a talaj revitalizációjára [21]. A folyamat során a mosófolyadékot minden esetben valamilyen eljárással meg kell tisztítani a szennyező anyagoktól, amely költségessé teszi az eljárást.

b. Oxidáció

Az oxidációs technikák kifejezetten hatékonyak bizonyulnak a nagy molekulatömegű PAH-ok eltávolításában. *Ex situ* és *in situ* is alkalmazható technika. Hagyományosan hidrogén-peroxid, ózon (vizes vagy gáz formában befecskendezve) vagy permanganát adagolásával érik el a PAH-ok oxidációs folyamat által való lebontását. A modernebb megközelítés során két vagy több reagenst alkalmaznak, amely során erősen reaktív gyökök keletkeznek. Ilyen például a Fenton-reagens, amely hidrogén-peroxid és vas(II)-szulfát keveréke, vagy a Perozone™ rendszer, amely ózon és hidrogén-peroxid keveréke. A kémiai oxidáció elősegíti a biológiai lebontó folyamatokat, így a két technika jól kombinálható. A módszer előnyei közé tartozik a nagy hatékonyság a szennyezők széles spektrumán, a körülmények dinamikus változtathatósága, a kezelés rövid ideje, illetve az, hogy más technikákkal jól kombinálható. Hátránya a nagy vegyszerigény, melyek nagy része erősen korrozív és mérgező [22–24].

c. Adszorpció/deszorpció

Az adszorpció a szennyezőanyag porózus közeg nagy fajlagos felületén történő reverzibilis megkötődését jelenti. A szorbciós mechanizmusok a szorbátum-szorbens kötés jellegétől függően három csoportba sorolhatók, ezek a szorpció, a kémiai és az elektrosztatikus szorpció. Az adszorpcióra használt szorbensek lehetnek természetes vagy szintetikus, illetve szerves vagy szervetlen anyagok. A szorbció széles körben alkalmazható remediációs technika szerves szennyező anyagok (növényvédő szerek és különböző szénhidrogének) eltávolítására [22, 23]. Az eljárás végrehajtása egyszerű és rugalmas, és *in situ* vagy *ex situ* is elvégezhető. Az *ex situ* eljárás alkalmazása lehetővé teszi a szorbens egymást követő felhasználását, regenerálását és a regenerátum hasznosítását. Amennyiben a szorbens nem regenerálható, akkor megfelelően ártalmatlanítani kell, ami ennek az eljárásnak a hátránya. Általánosságban elmondható, hogy a technika előnye abban rejlik, hogy nagyszámú különböző, rendelkezésre álló és

olcsó természetes szorbens, valamint a szennyező anyagok célcsoportjaira nagy szelektivitású szintetizált szorbensek állnak rendelkezésre, bár a célzott szorbensek szintézise megdrágíthatja a szorpció eljárás megvalósítását [25].

Deszorpción alapuló remediációs technológia a talajt szennyező szénhidrogének termikus deszorpciója, amikor a hő hatására mozgékonyvá vált szennyezőanyag gőz formájában leválik a talajszemcsék felületéről és a gőzfázisból kinyerhető, összegyűjthető lesz [21]. A termikus eljárásokkal részletesebben a 2) pontban foglalkozunk.

2) Termikus eljárások

a. Égetés/Pirolízis

Az égetés és a pirolízis közötti legnagyobb különbség az oxigén jelenléte vagy hiánya. Égetés során a 900-1200 °C-on történik a szerves alkotók elpárolgatása és égetése. A folyamat során a szerves szennyező anyagokból CO₂ és víz képződik. Általában a nehezen lebomló, toxikus szerves anyagokkal nagy koncentrációban szennyezett talajok tisztítására alkalmazott technika. A gőzök és a füstgázok kezeléséről természetesen gondoskodni kell [10, 24].

Pirolíziskor a szerves szennyezők lebontása magas hőfokon (> 400 °C) oxigén jelenléte nélkül történik. A szerves anyagok különböző gázokra és szilárd anyagokra bomlanak. Ez megbízható technológia, amely nagy rugalmasságot biztosít a tervezésben és a működtetésben, emellett magas szennyezőanyag-tisztítási hatékonyságot lehet elérni. Itt lehet egy látszólagos ellentmondás, miszerint a PAH-ok maguk is pirolíziskor keletkeznek, azonban e vegyületek további hőkezelése már a lebomlásukhoz vezet. Az égetéssel szembeni előnye, hogy a folyamat során nem termelődik CO₂. Alacsony üzemeltetési és karbantartási költség jellemzi, valamint energiatermelési lehetőséget is ad. A módszer korlátai közé tartozik, hogy a talaj megnövekedett nedvességtartalma növeli a kezelés költségeit, és bizonyos gázok, mint például a CO, H₂, CH₄, amelyek a művelet során felszabadulnak, szintén aggodalomra adnak okot [28]. A termikus módszerek talán legnagyobb hátránya, hogy a talajt élettelen anyaggá változtatják [25].

3) Biológiai eljárások

Az *ex situ* biológiai eljárások során a szennyezőanyagok lebontását mikrobák végzik. Minden esetben törekednek a mikrobiális aktivitás fokozására, amely

egyrészt lehet a talaj természetes mikrobanépsége, de ez kiegészülhet a lebontásra szelektált mikrobák hozzáadásával is.

a. Agrotechnikai eljárás/talajműveléses kezelés (landfarming)

Az egyik legegyszerűbb bioremediációs technikának számít. Könnyen tervezhető és kivitelezhető, valamint lehetővé teszi nagy mennyiségű szennyezett talaj kezelését alacsony környezeti és energiaköltséggel. Az eljárás során a szennyezett talajt vékony (~ 40 cm) rétegben helyezik el, majd többszöri átforgatással, optimális levegőztetéssel, tápanyagok hozzáadásával és öntözéssel fokozzák a mikroorganizmusok aktivitását, ami elősegíti a szennyező anyagok aerob biológiai lebontását. A szennyezés tovaterjedésének megakadályozása céljából a kezelt területet valamilyen jól záró (pl. műanyag) fóliával fedik le. Az eljárás hátránya, hogy viszonylag lassú lebontást tesz lehetővé (7-12 hónap, de kedvezőtlen időjárási körülmények között lehet több is), nagy helyigényű, valamint erős kitettség jellemzi az időjárási viszonyoknak (pl. fagyban vagy szárazságban szinte teljesen leáll a lebontás). Emellett az illékony szennyező anyagok még a biodegradációt megelőzően távozhatnak a közegből, ami a szennyezés lebontása helyett csak a szennyezés kihígulását és levegőbe való áttevődését eredményezi [26, 27].

b. Biágyas kezelés

A kitermelt szennyezett talajt először 2-4 m magas halmokba gyűjtik és lefedik, majd a kezelés célja a mikrobiális aktivitás elősegítése költséghatékony módon, ellenőrzött tápanyag-utánpótlás, levegőztetés és öntözési gyakorlatok révén. A kezelési idő átlagosan 4-6 hónap. Előnye, hogy egy kisebb területen nagy mennyiségű szennyezett talaj kezelhető, valamint hidegebb területeken is hatékonyabb lebontást tesz lehetővé, mint a talajműveléses eljárás [28, 29]. Hátránya, hogy *ex situ* technológia, vagyis a szennyezett talajt ki kell termelni, ami költséges lehet, valamint a talajkondicionálás költségei sem elhanyagolhatóak. Emellett a nagy szennyezőanyag-koncentráció toxikus lehet a mikrobák számára, ami gátolhatja a lebontást [33].

c. Bioreaktoros kezelés

A szennyezett talaj kezelése ebben az esetben zárt tartályban, reaktorban történik. A talajból ebben az esetben először vízzel elkeverve iszapot készítenek, majd ezt a híg iszapot kevertetik a reaktorban oxigén és tápanyagok hozzáadása mellett, ami kiegészülhet szelektált kultúrák hozzáadásával is. Nagy előnye, hogy jól kontrollálhatók a körülmények, például a koncentrációk, pH,

hőmérséklet, a keverés és a levegőztetés mértéke. Illékony szennyező anyagok is kezelhetők ezzel a módszerrel, valamint rövidebb kezelési idő is jellemzi a többi *ex situ* biológiai eljáráshoz képest. Ennél a technikánál viszonylag kis kockázattal alkalmazhatóak génmódosított mikrobák is, mivel a tisztított talaj természetbe való visszajuttatását megelőzően el lehet őket pusztítani. Hátránya, hogy egyszerre csak kevesebb mennyiségű talaj kezelhető ezzel a módszerrel, valamint költségesebb, mint az előzőekben tárgyalt eljárások [9, 31, 32].

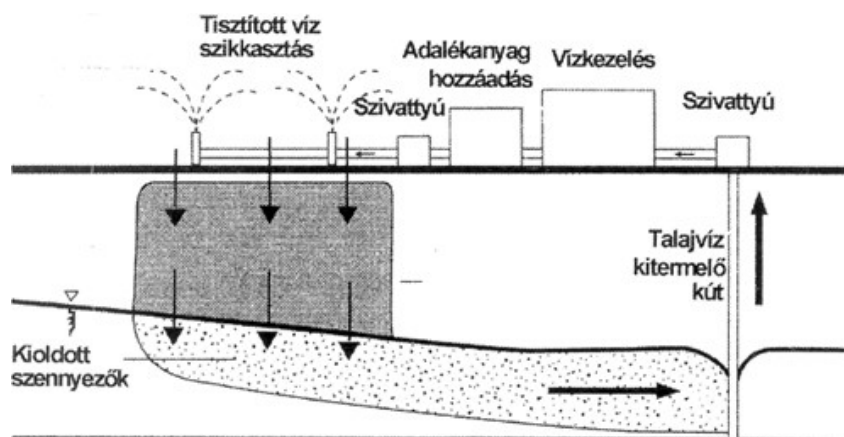
II. *In situ* módszerek

In situ remediáció alkalmazásakor a szennyezett talajt természetes, heterogén és kevésbé ellenőrzött környezetben kell kezelni. Emiatt a kezelési idő jellemzően hosszabb az *ex situ* alkalmazásokhoz képest, valamint a kezelés egyenletességét nehéz biztosítani. A kármentesítés nyomon követése is nehézkes lehet. Ugyanakkor költséghatékonyabban, nagyobb technológiai felszerelések nélkül megvalósíthatóak, illetve a szennyező anyagok terjedése is kiküszöbölhető, mivel nem kell a szennyezett talajt szállítani [16]. *In situ* kezelés alkalmazásakor a biológiai módszerek alkalmazása célszerű a környezeti kockázat és az ökoszisztéma megóvása érdekében [36], de használatosak fizikai/kémiai és termikus módszerek is.

1) Fizikai/Kémiai módszerek

a) Talajmosás

A talajöblítés során a szennyezett zónát a megfelelő oldattal árasztják el a szennyeződés eltávolítása érdekében. A mosófolyadék víz, amely a hatékonyságnövelés érdekében kiegészülhet adalékanyagokkal (pl. savak, felületaktív anyagok, komplexképzők, oxidáló és redukáló szerek).



3. ábra. *In vitro* talajmosás sematikus ábrája. (Forrás: [39])

A mosófolyadékot befecskendezik vagy beszivárogtatják a szennyezett területre. A szennyező anyagok szolubilizáció, emulzióképződés vagy kémiai reakció révén mobilizálódnak. Miután áthaladt a szennyeződési zónán, a szennyező anyagot tartalmazó folyadékot összegyűjtik és a felszínre hozzák, mivel azt további kezelések révén ártalmatlanítani kell [34, 35] (3. ábra).

Viszonylag egyenletes és vízáteresztő talajban az öblítés az egyik leghatékonyabb módszer [40]. A módszer fő hátránya a szennyeződések nem szennyezett területekre való terjedésének potenciális veszélye, valamint, hogy a szennyezett mosófolyadékot valahogy vissza kell nyerni, és utána kezelni és ártalmatlanítani kell [15].

b) Talajstabilizálás, talajszilárdítás

A szilárdítás és stabilizálás, más néven hulladékrogzítás, fizikai és kémiai módszerekkel is működik. *Ex situ* és *in situ* is alkalmazható. A szilárdítási technológiák a hulladékot szilárd anyaggá kapszulázzák, vagyis fizikailag megkötik a szennyező anyagot és stabilizált tömbbe zárják. Szilárdítás során a legelterjedtebben alkalmazott anyagok a különböző cementalapú mátrixok, azonban ezek alkalmazhatósága szerves szennyezők esetén korlátozott. Szerves szennyezők esetén alkalmazható pl. aszfalt, illetve cement alkalmazása esetén a kötődés elősegítésére/fokozására megoldás lehet felületaktív anyagok használata, melyek közvetítésével már a szerves szennyezők is hozzákötethetők a cementek alkotórészeihez, melyek ezután megszilárdíthatók [12, 38, 39].

A stabilizációs technológiák csökkentik a hulladék veszélyességi potenciálját azáltal, hogy a szennyező anyagokat kevésbé vízdékony, kevésbé mozgékony, illetve kevésbé mérgező formává alakítják. Stabilizáció során a legelterjedtebben alkalmazott anyagok közé tartozik az aktív szén és különböző agyagásványok. Agyagásványok esetében, amennyiben azok fémionjait kvaterner ammóniumionokkal cseréljük ki, a hidrofób jellegű szerves szennyező anyagok megkötődése elősegíthető. Egyes stabilizálószer (pl. bioszén) javíthatják a talaj egészségét a talaj szerkezetének javításával, tápanyagok (N, P és K) hozzáadásával, az ásványi műtrágyák okozta savasodás mérséklésével és a vízmegtartó képesség növelésével. A stabilizáló anyagok szabályozott felszabadulású reagenseket/mikrobákat is tartalmazhatnak a hosszabb távú helyreállítás javítása érdekében. A technológia fő előnye, hogy olcsó és nagyon gyors, azonban a hatékonysága korlátozott, hosszú távon az időjárás hatásai és a víz beszivárgása befolyásolhatja a stabilizált tömeg integritását, ami a

szennyeződés mobilizálódását eredményezheti [12, 38, 39].

c) Elektrokinetikai eljárások

Ez innovatív *in situ* technika a fémekkel, anionokkal és szerves anyagokkal szennyezett talajok kezelésére. A földbe elektródokat helyeznek (anód és katód), melyekre alacsony intenzitású egyenáramot kapcsolnak. Ekkor az elektródok között a talajban elektrooszmózis, elektroforézis és elektrolízis játszódik le. Az apoláris szerves vegyületeket az elektrooszmózis által kiváltott vízáramlás szállítja. A hatékonyságnövelés érdekében megfontolandó felületaktív anyagok adagolása, hogy megnöveljék ezen szennyezők oldhatóságát. Ezenkívül más elektrolízishatások, mint például a diffúzió, az adszorpció, a komplexképződés és a kicsapódási reakciók szintén hozzájárulnak a folyamathoz. A szennyező anyagokat folyamatosan el kell távolítani az elektródokról, hogy a folyamat ne álljon le [12, 40]. Az elektrokinetikai eljárások fő előnye, hogy hatékonyan kezelhetők finomszemcsés, kis áteresztőképességű talajok, amelyek más módszerekkel nehezen kezelhetők lennének. Elsősorban olyan területeken érdemes alkalmazni, ahol az elektromos energia könnyen és olcsón hozzáférhető [12, 37]. A módszernek azonban korlátai is vannak. Az elektródák közelében zajló elektrolízisreakciók megváltoztatják a talaj pH-ját, amely negatív hatással lehet a mikrobaközösségre, valamint az elektródák között lehetnek stagnáló zónák, ahol a migráció nagyon lassú [44].

2) Termikus eljárások

Az *in situ* termikus eljárások középpontjában a hőmérséklet növelésével csökkentik a viszkozitást, valamint a szennyezők adszorpcióját a talajrészecskékhez, valamint növelik az oldhatóságot. Bizonyos működési paraméterek, mint pl. a kezelés ideje, a fűtés és a hőmérséklet szabályozható a hőkezelés során. Ezeket a kezeléseket leggyakrabban gyors talajtisztításra használják:

- szennyező anyagok mobilitásának fokozásával (forró levegő/gőz befecskendezési eljárás),
- a szennyező anyagokat kevésbé mérgező maradványokká való átalakításával (pirolíziseljárás),
- a szennyező anyagok talajtól való elválasztásával (mikrohullámú fűtés/termikus deszorpció eljárás),
- a szennyező anyagok immobilizálásával (vitifikációs eljárás),
- a szennyező anyagok megsemmisítésével (égetési eljárás).

A melegítés nem távolítja el a szennyeződések, hanem megváltoztatja azok biológiai, kémiai és fizikai tulajdonságait, valamint a talaj és a talajvíz tulajdonságait. Összességében a fűtés javítja más technológiák teljesítményét, ami végső soron csökkenti a helyreállítási időkereteket és költségeket [35, 37]. A termikus eljárások *in situ* alkalmazásának a fő hátránya a körülmények, mint pl. a pontos hőmérséklet, oxigénszint, a talajinhomogenitás nehezen szabályozható volta, valamint a magas kezelési hőmérséklet negatív hatásai a talaj szerkezetére és a mikroflórára [42, 43].

3) Biológiai módszerek

A biológiai szennyezőanyag *in situ* lebontása egyrészt történhet a talajban természetesen jelen lévő mikrobák, növények és gombák által úgy, hogy a folyamatba kívülről nem avatkozunk be. Ez azonban nagyon lassan lejáró folyamat, melyet nagyban gyorsíthatunk a körülmények optimalizálásával, tápanyagok, enzimek, kitenyésztett mikrobák hozzáadásával. A biológiai kezeléseket ma már széles körben alkalmazzák alacsony költségük és környezeti előnyeik miatt [12, 37].

A biológiai módszerek két nagy csoportra oszthatók:

a) Bioremediáció

A bioremediáció során a talajba jutott szerves szennyezőanyagokat mikroorganizmusok segítségével bontják le. Két általános megközelítést használnak általában: a biostimuláció és a bioaugmentáció. A legszélesebb körben használt bioremediációs eljárás a biostimuláció. Ekkor az őshonos mikroorganizmusok fejlődésének helyszíni feltételeit optimalizálják, mint például a levegőztetés, a tápanyagok hozzáadása, a pH és a hőmérséklet. Bioaugmentációkor az autochton mikroorganizmusok stimulálása mellett, a szennyező anyagokra adaptált specifikus mikrobákat vagy mikrobiális lebontó szereket (pl. enzimek) is adnak a talajhoz [12, 37, 44].

Számos mikrobáról leírták, hogy hatékony PAH-ok lebontásában. Ilyen mikobafajok többek között: *Pseudomonas*, *Sphingomonas*, *Micrococcus*, *Xanthomonas*, *Corynebacterium*, *Enterobacter*, *Paenibacillus*, *Bacillus*, *Aeromonas*, *Microbulbifer*, *Mycobacteria*, *Acinetobacter*, *Aspergillus*. A mikrobák általi lebontás is valamilyen oxidációs reakcióval kezdődik. Ezt a reakciót mikrobatípustól függően katalizálhatják mono- vagy dioxigenázok, peroxidázok vagy lakkázok [4, 48].

A bioremediáció korlátai közé tartozik, hogy hideg időben nagyon lelassul a lebontás. A talaj oxigénhiányos részein, anaerob körülmények között szintén lelassul vagy teljesen lehetetlen egyes szennyező anyagok lebontása. Emellett előfordulhat, hogy a szennyezés a mikrobák számára nem elérhető helyen vagy formában van jelen, illetve egyes szennyezők (pl. nehézfémek) jelenléte gátolhatja a biológiai aktivitást [33, 45].

b) Fitoremediáció

A fitoremediáció a zöld növények és azok társult mikrobiális közösségének felhasználása a szennyeződés csökkentése érdekében. A növények általi kármentesítés többféleképpen is megvalósulhat:

- A talajban egyes növények stabilizálhatnak bizonyos környezetszennyező anyagokat (fitostabilizáció).
- Felvehetik a szennyező anyagokat, melyet lebontanak vagy átalakulhatnak ártalmatlan metabolitokká (fitodegradáció).
- A szennyezők el is raktározódhatnak a növény szöveiben (fitoakkumuláció),
- vagy kipárologhatnak a légkörbe (fitovolatilizáció).
- Emellett a növények gyökerei egy sor szerves vegyületet szabadítanak fel, amelyek serkentik a mikroorganizmusok aktivitását a rizoszférában, növelve a biológiai lebomlás hatékonyságát (rizoszférikus degradáció).

Számos növény esetében leírták, hogy hatékony a talaj PAH-szennyezett-ségének csökkentésében, ezek általában valamilyen fűfélék (többek között pl. indiánfű, vesszős köles, lucerna). A fitoremediáció a szennyeződések eltávolítása mellett javítja a talaj általános minőségét és állagát [12, 37, 46, 47]. A rengeteg előny mellett azonban ennek a módszernek is megvannak a maga korlátai. A talaj minőségének (pH, tápanyagok, nedvesség, textúra) és az éghajlatnak megfelelőnek kell lennie a növények növekedéséhez. Túl magas szennyezőanyag-koncentráció szintén negatív hatással lehet a növények életképességére. A növények általi lebontás csak bizonyos talajmélységig megvalósítható, a mélyebben lévő szennyeződések a növények számára nem hozzáférhetőek [49].

III. Feltörekvő technológiák

Ezek a fejlődés alatt álló technológiák többnyire biológiaiak, és várhatóan előre mozdulást hoznak a „zöld biotechnológia” irányába. Ilyen technológiák pl.:

1) Nanoremediáció

Az utóbbi időben a nanoremediáció a kutatás és fejlesztés egyik fő fókuszává vált: 1,0-100 nm méretű reaktív felülettel bevont részecskéket alkalmaznak, amelyek a szennyező anyagok méregtelenítését, átalakulását eredményezik. A nanorészecskék maximális felület/tömeg-aránya maximalizálja a hasznos felületet, amelyen a remediációs folyamatok végbemehetnek, ezzel csökkentve a kezelési időt és költségeket. Ezenkívül lehetővé teszi a mélyebb talajrétegek helyreállítását is, amelyek más módszerekkel nem elérhetőek [40].

A nanoanyagok használata segíthet csökkenteni a szennyező anyagok mikroorganizmusokra gyakorolt toxicitását is. A felület növelésével és a kémiai reakciókhoz szükséges aktiválási energia csökkentésével növelik a mikroorganizmusok hatékonyságát a hulladékok és a mérgező anyagok lebontásában, aminek következtében a biológiai kármentesítés ideje és költsége is összességében csökken [9, 48].

Mint minden más módszernek, ennek az igen ígéretes technológiának is megvannak a maga hátrányai. Az élelmiszerláncba vagy az ivóvízforrásba való bekerülésével ezek a részecskék átkerülhetnek emberbe vagy más élő szervezetekbe, oxidatív stresszválaszt, tüdőtoxicitást, mutagenezist és sejthalált okozva. Eltávolításuk pedig jelentős problémát jelenthet kis méretük miatt [40].

2) Génmódosított élőlények alkalmazása

Ígéretes megközelítés a bioremediáció hatékonyságának növelésére a genetikailag módosított mikroorganizmusok ellenőrzött használata. A szennyezés azonosítása után lehetőség van célzott biokatalizátor tervezésére, amely hatékonyan tudja lebontani a szennyező anyagot (hatékonyabban, mint a természetesen jelenlévők). Lehetőség van a mikrobákba új, hatékony anyagcsereutak beépítésére, már meglévők hatékonyságának fokozására, illetve a lebontó enzimek szubsztrátspecifitásának bővítésére. A genetikailag módosított mikroorganizmusokkal támogatott bioremediáció gazdaságilag megtérülő, egyszerű és gyors. Mindazonáltal megvannak a technikának a veszélyei is. A horizontális génátvitel és a génmódosított organizmus ellenőrizetlen szaporodása mindenképpen olyan problémák, melyeket figyelembe kell venni [9, 22, 49]. Erre egy megoldást jelenhet olyan tisztított enzimkészítmények használata, melyek nem tartalmaznak már semmilyen genetikai anyagot, csupán a lebontásért felelős fehérjéket. Ez ugyan megnöveli

a kezelési költségeket, azonban csökkenti a környezeti veszélyeket [46].

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a 2017-1.3.1-VKE-2017-00013 projekt támogatását.

Irodalomjegyzék

- [1] National Toxicology Program. 15th Report on Carcinogens. (2021) https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK590951/table/polycyclicaromatichydrocarbons_t01/%0A.
- [2] Kim, K.-H., Jahan, S.A., Kabir, E., Brown, R.J.C. (2013) A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environ Int*, **60**: 71–80.
- [3] Abdel-Shafy, H.I., Mansour, M.S.M. (2016) A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt J Pet*, **25**: 107–23.
- [4] Sakshi., Haritash, A.K. (2020) A comprehensive review of metabolic and genomic aspects of PAH-degradation. *Arch Microbiol*, **202**: 2033–58.
- [5] Shimada, T., Fujii-Kuriyama, Y. (2004) Metabolic activation of polycyclic aromatic hydrocarbons to carcinogens by cytochromes P450 1A1 and 1B1. *Cancer Sci*, **95**: 1–6.
- [6] Abdel-Shafy, H.I., Mansour, M.S.M. (2016) A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt J Pet*, **25**: 107–23.
- [7] Nisbet, I.C.T., LaGoy, P.K. (1992) Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regul Toxicol Pharmacol*, **16**: 290–300.
- [8] Van Liedekerke, M., Prokop, G., Rabl-Berger, S., Kibblewhite, M., Louwagie, G. (2013) Progress in the Management of Contaminated Sites in Europe. *Publ Off Eur Union*, **EUR 26376**: JRC85913.
- [9] Nam, K.J., Li, Q., Heo, S.K., Tariq, S., Loy-Benitez, J., Woo, T.Y., Yoo, C.K. (2021) Inter-regional multimedia fate analysis of PAHs and potential risk assessment by integrating deep learning and climate change scenarios. *J Hazard Mater*, **411**: 125149.
- [10] Ailijiang, N., Zhong, N., Zhou, X., Mamat, A., Chang, J., Cao, S., Hua, Z., Li, N. (2022) Levels, sources, and risk assessment of PAHs residues in soil and plants in urban parks of Northwest China. *Sci Rep*, **12**: 21448.
- [11] Valizadeh, S., Lee, S.S., Choi, Y.J., Baek, K., Jeon, B.-H., Andrew Lin, K.-Y., Park, Y.-K. (2022) Biochar application strategies for polycyclic aromatic

- hydrocarbons removal from soils. *Environ Res*, **213**: 113599.
- [12] Azubuiké, C.C., Chikere, C.B., Okpokwasili, G.C. (2016) Bioremediation techniques–classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol*, **32**: 180.
- [13] Kuppusamy, S., Thavamani, P., Venkateswarlu, K., Lee, Y.B., Naidu, R., Megharaj, M. (2017) Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions. *Chemosphere*, **168**: 944–68.
- [14] Koul, B., Taak, P. (2018) Ex situ Soil Remediation Strategies. *Biotechnol Strateg Eff Remediat Polluted Soils*, p. 39–57.
- [15] Fernández Rodríguez, M.D., García Gómez, M.C., Alonso Blazquez, N., Tarazona, J.V. (2014) Soil Pollution Remediation. *Encycl Toxicol*, p. 344–55.
- [16] Tomei, M.C., Daugulis, A.J. (2013) Ex Situ Bioremediation of Contaminated Soils: An Overview of Conventional and Innovative Technologies. *Crit Rev Environ Sci Technol*, **43**: 2107–39.
- [17] Patel, A.B., Shaikh, S., Jain, K.R., Desai, C., Madamwar, D. (2020) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Front Microbiol*, **11**.
- [18] Feng, D., Lorenzen, L., Aldrich, C., Maré, P.W. (2001) Ex situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods. *Miner Eng*, **14**: 1093–100.
- [19] Zoghi, P., Mafigholami, R. (2023) Optimisation of soil washing method for removal of petroleum hydrocarbons from contaminated soil around oil storage tanks using response surface methodology. *Sci Rep*, **13**: 15457.
- [20] Qiu, Y., Xu, M., Sun, Z., Li, H. (2019) Remediation of PAH-Contaminated Soil by Combining Surfactant Enhanced Soil Washing and Iron-Activated Persulfate Oxidation Process. *Int J Environ Res Public Health*, **16**: 441.
- [21] Lee, S.-H., Kim, S.-O., Lee, S.-W., Kim, M.-S., Park, H. (2021) Application of Soil Washing and Thermal Desorption for Sustainable Remediation and Reuse of Remediated Soil. *Sustainability*, **13**: 12523.
- [22] Gitipour, S., Sorial, G.A., Ghasemi, S., Bazyari, M. (2018) Treatment technologies for PAH-contaminated sites: a critical review. *Environ Monit Assess*, **190**: 546.
- [23] Ferrarese, E., Andreottola, G., Oprea, I.A. (2008) Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation. *J Hazard Mater*, **152**: 128–39.
- [24] Motamedimehr, S., Gitipour, S. (2019) Sub- and Supercritical

- Decontamination of Oil-Based Drill Cuttings: A Review. *Environ Energy Econ Res*, **3**: 225–40.
- [25] Ugrina, M., Jurić, A. (2023) Current Trends and Future Perspectives in the Remediation of Polluted Water, Soil and Air—A Review. *Processes*, **11**: 3270.
- [26] Mirzaee, E., Sartaj, M. (2023) Remediation of PAH-contaminated soil using a combined process of soil washing and adsorption by nano iron oxide/ granular activated carbon composite. *Environ Nanotechnology, Monit Manag*, **20**: 100800.
- [27] Bianco, F., Race, M., Papirio, S., Esposito, G. (2023) A critical review of the remediation of PAH-polluted marine sediments: current knowledge and future perspectives. *Resour Environ Sustain*, **11**: 100101.
- [28] Kuppusamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Naidu, R. (2016) Ex-Situ Remediation Technologies for Environmental Pollutants: A Critical Perspective. p. 117–92.
- [29] Lukić, B., Panico, A., Huguenot, D., Fabbicino, M., van Hullebusch, E.D., Esposito, G. (2017) A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment. *Environ Technol Rev*, **6**: 94–116.
- [30] Paudyn, K., Rutter, A., Kerry Rowe, R., Poland, J.S. (2008) Remediation of hydrocarbon contaminated soils in the Canadian Arctic by landfarming. *Cold Reg Sci Technol*, **53**: 102–14.
- [31] Jørgensen, K.S., Puustinen, J., Suortti, A.-M. (2000) Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environ Pollut*, **107**: 245–54.
- [32] Whelan, M.J., Coulon, F., Hince, G., Rayner, J., McWatters, R., Spedding, T., Snape I. (2015) Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions. *Chemosphere*, **131**: 232–40.
- [33] Sayara, T., Sánchez, A. (2020) Bioremediation of PAH-Contaminated Soils: Process Enhancement through Composting/Compost. *Appl Sci*, **10**: 3684.
- [34] Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B.V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B.S., Tripathi, M. (2022) Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants: A Review for a Green and Sustainable Environment. *Toxics*, **10**: 484.
- [35] Forján, R., Lores, I., Sierra, C., Baragaño, D., Gallego, J.L.R., Peláez, A.I. (2020) Bioaugmentation Treatment of a PAH-Polluted Soil in a Slurry Bioreactor. *Appl Sci*, **10**: 2837.
- [36] Maitra, S. (2018) In situ bioremediation - an overview. *Res J Life Sci*

- Bioinformatics, Pharm Chem Sci*, **4(6)**: 576–98.
- [37] Lee, L., Zhai, X., Lee, J. (2007) INDOT Guidance Document for In-Situ Soil Flushing.
- [38] Koul, B., Taak, P. (2018) In Situ Soil Remediation Strategies. *Biotechnol Strateg Eff Remediat Polluted Soils*, p. 59–75.
- [39] Puzder, T., Dr. Csáki, F., Dr. Gruiz, K., Dr. Horváth, Z., Márton, T., Sajgó, Z. (2001) Kármentesítési kézikönyv 4.
- [40] Kuppusamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Naidu, R. (2016) In-Situ Remediation Approaches for the Management of Contaminated Sites: A Comprehensive Overview. p. 1–115.
- [41] Shen, Z., Jin, F., O'Connor, D., Hou, D. (2019) Solidification/Stabilization for Soil Remediation: An Old Technology with New Vitality. *Environ Sci Technol*, **53**: 11615–7.
- [42] Ma, F., Wu, B., Zhang, Q., Cui, D., Liu, Q., Peng, C., Li, F., Gu, Q. (2018) An innovative method for the solidification/stabilization of PAHs-contaminated soil using sulfonated oil. *J Hazard Mater*, **344**: 742–8.
- [43] Lima, A.T., Kleingeld, P.J., Heister, K., Loch, J.P.G. (2011) Removal of PAHs from contaminated clayey soil by means of electro-osmosis. *Sep Purif Technol*, **79**: 221–9.
- [44] Sharma, H.D., Reddy, K. (2004) Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies. (John Wiley & Sons, Hoboken, N. J.) *Environ Int*, **35**: 50–5.
- [45] Vidonish, J.E., Zygourakis, K., Masiello, C.A., Sabadell, G., Alvarez, P.J.J. (2016) Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review of Technology Innovation for Sustainable Remediation. *Engineering*, **2**: 426–37.
- [46] Colombano, S., Davarzani, H., van Hullebusch, E.D., Ignatiadis, I., Huguenot, H., Zornig, C., Guyonnet, D. (2020) In Situ Thermal Treatments and Enhancements: Theory and Case Study BT - Environmental Soil Remediation and Rehabilitation: Existing and Innovative Solutions. p. 149–209.
- [47] Vásquez-Murrieta, M.S., Hernández-Hernández, O.J., Cruz-Maya, J.A., Cancino-Díaz, J.C., Jan-Roblero, J. (2016) Approaches for Removal of PAHs in Soils: Bioaugmentation, Biostimulation and Bioattenuation. *Soil Contam - Curr Consequences Furth Solut*.
- [48] Ismail, N.A., Kasmuri, N., Hamzah, N. (2022) Microbial Bioremediation Techniques for Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs)—a Review. *Water, Air, Soil Pollut*, **233**: 124.

- [49] Juwarkar, A.A., Singh, S.K., Mudhoo, A. (2010) A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Rev Environ Sci Bio/Technology*, **9**: 215–88.
- [50] Mahjoub, B. (2013) Plants for Soil Remediation. *RSC Green Chem*, p. 106–43.
- [51] Allamin, I.A., Shukor, M.Y. (2021) Phytoremediation of PAHs in Contaminated Soils: A Review. *Bioremediation Sci Technol Res*, **9**: 1–6.
- [52] Rizwan, M., Singh, M., Mitra, C.K., Morve, R.K. (2014) Ecofriendly Application of Nanomaterials: Nanobioremediation. *J Nanoparticles*, **2014**: 1–7.
- [53] Kour, D., Khan, S.S., Kour, H., Kaur, T., Devi, R., Judy, C., Rai, P.K., McQuestion, C., Spells, S., Bianchi, A., Mohan, R., Rai, A.K., Yadav, A.N. (2022) Microbe-mediated bioremediation: Current research and future challenges. *J Appl Biol Biotechnol*, : 6–24.



Kelemenné Nagy Kinga a BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karán, Biomérnök mesterszakon végzett 2014-ben. 2013-ban kiemelt I-helyezést ért el a kar TDK konferenciáján, 2014-ben elnyerte a Kar Kiváló Hallgatója díjat. PhD tanulmányait a BME Oláh György Doktori Iskolájában folytatta Vértessy Beáta témavezetésével, ahol 2019-ben fokozatot szerzett. 2018 óta dolgozik a BME Alkalmazott Biokémia és Élelmiszertudományi Tanszékén, 2019 óta egyetemi adjunktusként. 2007 óta a HUN-REN TTK Enzimológiai Intézet Genom Metabolizmus Kutatócsoport tagja. Tagja az MTA Molekuláris Biológiai, Genetikai és Sejtbiológiai Bizottságának. Elsődleges kutatási területe a genomi uracilszint mennyiségének, szerepének és hatásainak vizsgálata. Emellett számos belföldi és külföldi kollaborációban vesz részt, köztük több környezetvédelmi vonatkozásúban.



Vértessy G. Beáta, az MTA levelező tagja, az Academia Europaea tagja, MTA doktora, a HUN-REN TTK Enzimológiai Intézet kutató professzora, a BME egyetemi tanára. A L'Oréal Unesco díjazottja, Mestertanár Aranyérmes. Publikációs aktivitását >140 cikk, > 8000 citáció, H-index: 43 jellemzik. Szakterülete a szerkezeti és molekuláris biológia, ahol fő területe a genomi integritás fenntartásában kulcsfontosságú dUTPáz enzimcsalád működésének jellemzése, tumorellenes kemoterápiák kutatása, a dUTPázok reakciómechanizmusának leírása. A DNS-beli uracil szerepének egyik felfedezője. Sikeres, rangos díjakat elnyert kutatók nevelője (22 PhD fokozat). Az általa irányított Biostruct Laboratórium nemzetközi kurzusok színtere.