

Dr. Kastori Rudolf*

A szennyezett talajok fitoremediációja – lehetőségek és korlátok

*A talajhasználat tízparancsolatából:
Ne feledd, hogy a talajon nemcsak állsz, hanem élsz is!*

Stefanovics Pál

A termőtalaj jelentősége

A termőtalaj az emberiség legnagyobb természeti kincse, melyet termékenysége tesz a földi élet nélkülözhetetlen, megújuló erőforrásává. Lényegében a világ élelmiszer-termelésének az alapja. Szerepe nem merül ki a termőképességben, hiszen a víz, a hő tartalékolója, az élővilág elsődleges tápanyagforrása, a bioszféra génrezervoárja, foglalkoztatást biztosító tényező, a természet-szűrő és detoxikáló rendszere és a biodiverzitás fenntartója. Multifunkcionalitása a következőkben nyilvánul meg: korlátozás nélkül működik a természetes anyag- és energia-körforgásban; ökológiai szempontokat figyelembe véve bármilyen módon történő használata nem jelent veszélyt sem az ember, sem az állat- és növényvilág számára; a bioszféra más részeit (víz, levegő, élővilág) nem szennyezi. A talajok és a rájuk ható környezeti tényezők között dinamikus egyensúly áll fenn.

Világviszonylatban a legnagyobb fenyegetettséget az jelenti, hogy elfogy az élet fenntartásához és újratermeléséhez szükséges termőföld (Montgomery, 2007). A Föld teljes területe 52 milliárd hektár, ebből 14,9 milliárd ha-t szárazföld tesz ki. A Föld mezőgazdasági művelésre alkalmas területe 3,2 milliárd ha, ennek majdnem a fele, 1,5 milliárd ha kedvező adottságú. Művelésre alkalmas területek közé sorolható az erdők és a legelők egy része. Ezek talaja viszont rendszerint gyengébb minőségű, csak jelentős ráfordítással tehető alkalmassá (Kanawar,

* Dr. Kastori Rudolf akadémikus, a Magyar Tudományos Akadémia külső tagja, a Vajdasági Tudományos és Művészeti Akadémia, valamint a Szerb Mérnöki Akadémia rendes tagja, nyugalmazott egyetemi tanár, Újvidéki Egyetem, Mezőgazdasági Kar, Újvidék

1982). A termőtalaj nem megfelelő hasznosítása folytán a következő száz évben a potenciális termőtalajkészlet kimerül. A kedvező adottságú területeket gyakorlatilag már művelik. Az egy főre eső művelésre alkalmas terület állandóan csökken és jelenleg hozzávetőlegesen 0,88 ha-t tesz ki. A legveszélyeztetettebb ilyen szempontból Ázsia és Európa, ahol ez az arány 0,39, illetve 0,60 ha. A hivatalos adatok szerint Szerbiában mintegy 500 000 - 600 000 ha termőföld hever parlagon. Egyesek szerint ténylegesen ennél sokkal több szántó kihasználatlan az országban. Szerbiában évente kb. 6 200 ha termőföld kerül ki a mezőgazdasági termelésből.

A vadászó-gyűjtögető társadalomban 20-100 ha/fő, a népvándorlás idején 2-10 ha /fő, a letelepedett mezőgazdasági közösségekben 0,5-1,5 ha/fő termőföld biztosította a lakosság számára a szükséges élelmet. Egyes becslések szerint a mai intenzív gazdálkodásban már a 0,2 ha/fő is elegendő lehet a szükséges élelem előállítására. Napjaink 6,5-7 milliárd körüli népességét 1,5 milliárd ha megművelt földterület táplálja. A demográfiai robbanás alapja a Föld népességének exponenciális növekedése. Az előrejelzések szerint 2050-re a megművelt terület akár 0,1 ha/fő értékre csökkenhet a népesség növekedése és a talajpusztulás miatt. Lakótelepek, ipari létesítmények, autósztrádák építésével évente több száz ezer ha termőtalaj vész el, ami fokozza talajvédelem indokoltságát. Nem hanyagolható el a minőségromlásból származó termőterület-csökkenés sem. Egyes iparilag fejlett országokban a múlt század közepétől a lakosság száma a felével növekedett, míg a környezet szennyezése meghétszereződött.

A termőtalaj az emberiség fontos természeti erőforrása. Ide illően említhető Tóth (1988) definíciója, miszerint a természeti környezet azon ismert elemeit tekintjük természeti erőforrásnak, amelyek a termőerők meghatározott fejlettségi szintjén gazdaságosan hasznosíthatók a társadalom anyagi szükségleteinek kielégítésére.

A talajpusztulás globálisan egy-két nagyságrenddel haladja meg a talajképződés ütemét. Az EU becslése szerint a közösség területének kb. 16%-a, amely 50 millió ha felel meg, degradációs folyamatoknak van kitéve. A Föld elleni legnagyobb kihívás a környezet állapotának rohamos romlása. Természetes körülmények között évezredek alatt alakul ki a termőtalaj, egy-két évszázad alatt 1-2 cm feltalaj képződhet (Alexander, 1988). Gazdasági, ökológiai és egyben tudományos szem-

pontból a legnagyobb problémát a talajdegradációs folyamatok jelentik. Ezek közül lényeges szerepet játszik a talaj termékenységét gátló tényezők kialakulása. Ezek igen sokfélék lehetnek és csak részben állnak kapcsolatban a talajdegradációs folyamatokkal. A talajdegradáció okai lehetnek természeti tényezők (vízerózió, defláció stb.) vagy az emberi beavatkozások különböző közvetett vagy közvetlen hatásai (savanyosodás, talajtömörödés, a talaj tápanyagforgalmának kedvezőtlen irányú megváltozása stb.). A termőtalaj termékenységét gátló tényezők közül világszerte a talaj szennyeződésének fokozódása a legkifejezettebben károsító hatású. Talajszennyezésen értjük a talaj természetes, a minőségét jellemző egy vagy több paraméternek, a fizikai, kémiai, illetve biológiai tulajdonságainak kedvezőtlen irányú megváltozását.

A termőtalajt szennyező anyagok

A talajba számos szerves és szerves szennyezőanyag kerül (Kastori, 1995). Ez a minőségkárosítás emberi (antropogén) és természetes hatásokra következhet be. A szennyezések méretüktől és jellegüktől függően lehetnek pontszerűek (pl. egy bizonyos helyen kialakult ipari szennyezés) és nem pontszerűek (bárhol bekövetkező szennyezés pl. műtrágyahasználat folytán). Az utóbbi időben világszerte egyre nagyobb jelentőségűek a különböző nem pontszerű kibocsátásokból eredő talajszennyeződések. A mezőgazdaságra inkább nem pontszerű szennyezések jellemzők. Ezek részben a mezőgazdasági termeléssel összefüggő szennyezések, amelyek az alkalmazott műtrágyák, peszticidek, talajjavító anyagok, híg trágya és hulladékok okozta szennyeződésekkel származnak. A mezőgazdaság kemizálása – bár nélküle a növekvő létszámú és igényű emberiség táplálkozási szükségleteit nem lehet kielégíteni – azzal a veszéllyel jár, hogy a szakmailag nem kellően megalapozott és gondatlanul végrehajtott kémiai és egyéb beavatkozások következtében az ipari és energetikai üzemek mellett első számú környezetszennyező tényezővé válik. Nagy gondot okozhatnak a talajra kihelyezett vagy a talajba jutott különböző eredetű és kémiai összetételű hulladékok is, szennyvizek és szennyvíziszapok, amelyek a bennük lévő toxikus anyagokkal terhelik a talajt.

A szerves szennyezőanyagok részben közvetlenül jutnak a talajba, részben az ipar, a település és a közlekedés szennyező-forrásaiból,

ásványi lelőhelyekből, természetes pl. vulkáni eredetű nedves és száraz kiülepedésből erednek. Ezek közül elsősorban a nehézfémek és sóik veszélyesek, melyek származhatnak ólmozott benzinnel üzemelő gépkocsik kipufogógázából, különböző kohók, bányák, ipari telepek szennyvizéből, szennyvíziszapból stb. Károsodást okoznak a kibocsátó közelében, de nagyobb távolságra is eljutnak. Különböző ipari üzemek környékén a nehézfémeknek a növényekben való felhalmozódásával is számolni kell. A növényekben felhalmozott nehézfémek toxikus hatása a tápláléklánc tagjaiban (ember, állatok) érvényesül.

A szerves szennyezőanyagokat szennyvizek, szennyvíziszap, hulladék (fekália), sérült vezetékek juttatják a talajba. A detergensok háztartási és ipari szennyvizekből kerülnek a termőföldre. A policiklikus vegyületek természetes anyagként vagy szennyezőként fordulnak elő. A szennyező ásványi olaj az olajkutakból való kitermelés, illetve földalatti tartályok vagy vezetékek meghibásodása folytán kerülhet a talajba. A mezőgazdaságban alkalmazott vegyszerek többsége szintén szerves anyag.

A talaj egy bizonyos határig képes tompítani a szennyezőanyagok károsító hatását és ezáltal megakadályozni önmön termőképességének romlását. A jövőben, tehát, kimerülésének megakadályozására a káros környezeti hatásokkal szembeni pufferáló képességének megőrzésére és fokozására megkülönböztetett figyelmet kell fordítani. A talajok biológiai közösségei rugalmas adaptációs rendszert képeznek az idegen és az új kémiai vegyületek lebontására, hatástalanítására. A talajokban a gyomirtók biológiai és abiotikus tényezők hatására egyaránt bomlanak, átalakulnak.

A nehézfémekkel szennyezett talajok komoly környezeti problémát jelentenek. A fémionok igen változatos kötési formákat hoznak létre a talaj szilárd, ill. folyékony fázisában. Igen fontos annak ismerete, hogy mekkora a talajokban, üledékekben, talajoldatban stb. lévő összes nehézfém-tartalom különböző formáinak, frakcióinak részaránya, hiszen biofelvehetőségüket, egyszersmind toxikus hatásukat ez nagymértékben meghatározza. A talaj agyag- és szervesanyag-tartalma a fémszorbcio útján mérsékli a toxicitást. A talajokba került fémek mind aerob, mind anaerob körülmények között a talajban mikrobiológiailag serkentett korrózióknak vannak kitéve. A talajokban végbemenő kooxidációs folyamatoknak is igen nagy szerepük van a termőföld biokémiai és mikrobiológiai történé-

seiben. A mérgező elemeket tartalmazó vegyületeket a mikrobák kevésbé mérgezővé vagy ártalmatlanokká alakíthatják, de toxicitásukat még fokozhatják is. Például a talajokban – alkiltranszfer reakciók keretében – toxikus metil-higany keletkezik. Némely mikroba pedig a metil-higanyt higannyá és metánná redukálja, vagyis méregtelenít. A talajokban a gyomirtók biológiai és abiotikus hatásokra egyaránt bomlanak, transzformálódnak. A talajokban végbemenő kémiai, biokémiai és mikrobiológiai folyamatoknak kétségkívül fontos szerepük van a talaj önmegtisztulásában, azonban az esetek többségében önmagában elégtelenek a szennyezett talajok hatásos revitalizációjához.

A következő 50 évben az élelmiszerigény várhatóan megháromszorozódik. Ez a jelentős igény csak akkor elégíthető ki, ha pozitív változások következnek be az élelmiszer termelésében, elosztásában, elérhetőségében és biztonságában, amiben a termőtalaj védelmének fokozott szerepe van. A világ élelmiszerválságának lényege, hogy amíg az iparilag fejlettebb, gazdagabb országok többségében élelmiszer-túltermelés van, a másik részén állandósult az élelmiszerhiány. A növekvő elhalálozás egyik meghatározó oka az előbbieken a túltápláltság, míg az utóbbiakban az alultápláltság. A szárazföldi állatokhoz és részben növényekhez hasonlóan az ember is elsősorban a talajból származó élelemre van utalva. Az életszínvonal és ehhez kapcsolódóan az egészséges táplálkozás jelentőségének tudata szintén szükségessé teszi a talajvédelmet, az egészséges környezet biztosítását, fenntartását és továbbfejlesztését.

A továbbiakban elsősorban a szennyezett talajok fitoremediáció útján történő megtisztításával kapcsolatos eredményeket és tapasztalatokat ismertetjük.

A talaj tisztítása a környezetkímélő eljárásokkal – Zöld technológia

A szennyezett talajok tisztítására a szakirodalom a szennyezés méretétől és jellegétől függően számos eljárást tart számon (Saxen et al., 1999). Az alkalmazott technológiai eljárások három csoportba oszthatók: fizikai, kémiai és biológiai módszerekre (fitoremediáció, bioremediáció). A talaj szennyezettségének megszüntetésében fontos szerepe van a talaj önmegtisztulásának is, mivel elősegíti a hulladékanyagok ártalmatlanítását. A talaj ilyen értelmű szerepét azonban nem szabad túlbecsülni. A nagymértékben és erősen mérgező hatású anyagokkal szennyezett tala-

jok esetében az öntisztulásra nem lehet alapozni. Ilyen esetben el kell végezni a talaj tisztítását az erre a célra kifejlesztett technológiai eljárásokkal, amennyiben a szennyezés foka meghaladja az egyes szennyezőanyagokra vonatkozó küszöbértéket (1. táblázat). Az egyes országokban a küszöbértékek eltérőek, attól függően milyen célra használják a talajt (Eikmann és Kloke, 1993).

ELEM	SZENNYEZETLEN TALAJ	TISZTÍTÁS SZÜKSÉGES
As	29	55
Cd	0,8	12
Co	20	240
Pb	85	530
Mo	10	200
Zn	140	-
Ba	200	625
Cr	100	380
Cu	36	190
Hg	0,3	10
Ni	35	210

1. táblázat

A szennyeztelen és szennyezett talaj egyes elemeinek küszöbértéke (mg kg⁻¹ SzA) (Vegter, 1997)

A talaj szennyeződésének megítéléséhez nem elegendő az egyes elemek vagy szennyezőanyag koncentrációjának ismerete, a veszélyfok meghatározásához ismerni kell a talaj kémiai és fizikai tulajdonságait, a szennyezés módját, a talajhasznosítást, stb. Bizonyos elemek ugyanis csak akkor fejthetnek ki a növényekre bármilyen hatást, ha az a növény számára felvehető alakban van jelen a talajban. A külső tényezők közül fontos az adott elem ionogén-jellege, komplex képzőképessége, oldhatósága vízben, a talaj pH-értéke, komplexképzők jelenléte, stb.

A nagymértékben szennyezett talajok tisztítása történhet a talaj kitermelése nélkül (in situ), vagy a talaj kitermelésével (ex situ). A talaj kitermelése nélkül alkalmazott módszerek közé sorolhatók a talaj átlevélgőztetése, mosása (extrakció), a rögzítés, lekötés és a biológiai lebontás. A talaj kitermeléssel történő tisztítását helyben végzik, biológiai lebontási eljárásokkal (olajszennyezés, fenolok, aromás szénhidrogének stb.

esetén) szilárdítással, rögzítő anyagok használatával, égetéssel (600–1200oC), hőbontással (400–800°C), talajmosási eljárásokkal stb. A talaj tisztítása a talaj kitermelése nélkül vagy kitermelésével költséges és ökológiai szempontból kifogásolható. Különböző vegyszerek használata, a talaj magas hőmérsékleten történő kezelése, kimosása, tömörítése stb. kedvezőtlenül hat a talajéletre, a talaj fizikai és kémiai tulajdonságaira, mert egyes talajalkotók is kimosódhatnak belőle, következésképp a talaj tulajdonságai megváltozhatnak. E módszerekkel kezelt talajok gyakran csak több év eltelte után nyerik vissza elsődleges tulajdonságaikat, termőképességüket. Esetenként, azonban, az is előfordul, hogy az ilyen talajok többé nem hasznosíthatók mezőgazdasági célokra.

Az említett technológiai eljárások hiányosságai szükségessé tették olyan módszerek kifejlesztését melyek egyidejűleg hatásosak, olcsók és, ami különösen fontos, ökológiai szempontból elfogadhatók (McCutcheon és Schnoor, 2003, Singh és Ward, 2004). Ezzel kapcsolatosan a múlt század végén született meg a gondolat a szennyezett talajok tisztításáról növények segítségével. Ez a zöld technológia, illetve a fitoremediáció (gör. *phyton* - növény, lat. *remediare* - eltávolítani). Eddig a következő technológiai eljárások kerültek alkalmazásra: fitoextrakció (fitoakkumuláció, fitoabszorpció, fitoszekvesztráció, hiperakkumuláció); fitostabilizáció (fitoimobilizáció); rizofiltráció (fitofiltráció); rizodegradáció; fitodegradáció; (fitotranszformáció) és fitovolatizáció. Az említett eljárások különböző szennyezőanyagok eltávolítására vagy ártalmatlanítására alkalmasak (2. táblázat).

ELJÁRÁS	SZENNYEZŐANYAG
Fitostabilizáció	NF, MO, HA, RA, SzA
Fitomobilizáció	NF, MO, HA
Fitoextrakció	NF MO, HA, RA, SzA
Fitovolatizáció	NF, MO, HA, RA, SzA
Fitodegradáció	SzA
NF - nehézfémek; MO - metalloidok; HA - halogének; RA - radionuklidok; SzA - szervesanyag	

2. táblázat

A fitoremediáció alkalmazása különböző szennyezőanyagokkal terhelt talajok tisztítására (Wenzel et al., 1999)

A fitoextrakció a zöld technológia legelterjedtebb módszere (Stojanović, 2008). Elsősorban nehézfémekkel és radionuklidokkal szennyezett talajok és vizek tisztítására alkalmazzák. A növények a szennyezett talajból vagy vízből felszívják a szennyező anyagot, és ily módon megtisztul a talaj vagy a víz. Kelátok alkalmazásával fokozni lehet az egyes fémek felvételét a fitoextrakció folyamán (Award és Römheld, 2000). A fitoextrakció során hiperakkumulációra képes növényeket alkalmazunk szennyezett talajok és vizek megtisztítására. Fitoextrakcióra különösen alkalmas a nyárfa mivel gyorsan növekszik, mélyére ható és fejlett a gyökérzete, és intenzív a vízfelvétele (Pilipović et al., 2005, Nikolić, 2010). A nyárfa és a fűzfa alkalmas a nitráttal szennyezett talajok tisztítására is. A kisebb mértékben szennyezett talajok tisztítása energianövények termesztésével is megoldható.

A fitostabilizáció a nehézfémek (Pb, Cr és Hg) immobilizációján alapszik. A talaj kémiai, fizikai és biológiai tulajdonságainak változása következtében a szennyező anyag nehezen oldhatóvá válik. Például a gyökér által leadott foszfátionok az ólommal nehezen oldható Pb-foszfátot képeznek (Salt et al. 1995). A fitostabilizációban a mikroorganizmusoknak is fontos szerepük van.

A rizofiltrációt álló- és folyóvizek, valamint szennyvizek megtisztítására használják. A növény gyökere felveszi, megköti és felhalmozza vagy kicsapja a vízben oldott szennyező anyagokat és ezáltal megtisztítja a vizet. Elsősorban fémekkel (Pb, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn, Zn, Cr) és radionuklidokkal (Sr, Ce, U) szennyezett vizek megtisztítására használják (Dushenkov et al., 1995, Pajević et al., 2008). A rizofiltráció folyamán a növény gyökerén megtelepedett mikroorganizmusoknak és algáknak is fontos szerepük van a szennyezett környezet megtisztításában. A rizofiltráció változata a fitofiltráció amikor a növények víz alatti szára is aktív szerepet tölt be. Például a békalencse (*Statietes aloides*) többféle vízben oldott fém eltávolítására képes.

A rhizodegradáció a biodegradációs folyamatok intenziválásán alapszik. A növények gyökere számos szerves és szervetlen anyagok választ ki és ezáltal kedvezően befolyásolja a rizoszférában található mikroorganizmusok számát és az anyagcsere aktivitását. A mikroorganizmusoknak viszont fontos szerepük van az egyes szerves szennyező anyagok lebontásában és ionok felvételében. Az ionok felvételét elősegí-

tik a gyökerekkel szimbiózisban élő mikorrhiza gombák (Boyd i Martens, 1998).

A fitodegradáció folyamán a növények felszívják a szennyező anyagokat a talajból, álló-, folyó- és szennyvizekből, s enzimeik segítségével lebontják őket. Például a nyárfa gyökérzete a triklór-etilén, a cukorrépa pedig a nitroglicerinnel lebontására képes. A fitodegradációban fontos szerepe van a gyökéren megtelepedett rizoflóranak.

A fitovolatilizáció folyamán a növények révén a szennyező anyag – önnön –tulajdonságainak megváltozása következtében a szennyezett közegből a levegőbe kerül. Például a növények a Se-t dimetil-szelenid alakjában kibocsátják a levegőbe. A genetikailag módosított, higany rezisztens *Arabidopsis thaliana* olyan enzimmel rendelkezik, mely képes a metil-Hg-t redukálni és a higanyt a légkörbe juttatni (Bizily et al., 1999).

A szennyezett talaj és víz biológiai tisztítása történhet megfelelő lebontó képességű mikroorganizmusok kihasználásával és élettevékenységük számára optimális körülmények biztosításával.

Fontos kihangsúlyozni, hogy a fitoremediáció egyes technológiai megoldásai részleteikben esetenként fedik egymást, ami részben zavart okoz a szakirodalmi terminológiában.

A továbbiakban a nehézfémekkel szennyezett talajok fitoextrakció útján történő megtisztításával kapcsolatos eredményeket és tapasztalatokat fogjuk részletesebben bemutatni.

Fitoextrakció

Számos kutató már a múlt század első felében utal olyan növényekre, melyek zavartalanul növekednek és fejlődnek nehézfémekkel terhelt környezetben. Baumann 1885-ben 1% cinket mért a nehézfémtűrő árvácskafaj (*Viola calaminaria* L) szárazanyagába. Ezt követték számos idevágó eredmények és ma már nagyszámú olyan növényfaj ismeretes, amely magas fémkoncentráció jelenlétében megél, és a fémeket nagyobb mennyiségben felhalmozza. Ebből kiindulva támadt az a gondolat, hogy az említett tulajdonságokkal bíró növények alkalmasak a nehézfémekkel szennyezett talajok megtisztítására.

Nhézfémek alatt azokat a fémeket értjük, melyek sűrűsége elemi formában 5,0 g cm³ felett van. A szakirodalomban más határértéke-

ket is használnak. Toxikológiai szempontból a kémiai elemek három csoportba sorolhatók (Szabó, 1992). Az ún. nem kritikus elemek a Na, K, Mg, Ca, H, N, O, C, P, Fe, Cl, Br, F, Li, Rb, Sr és Si. Nagyon mérgező és az ember, állatok szervezetébe viszonylag könnyen bejutó, felszívódó elemek a Be, Co, Ni, Cu, Se, As, Sn, Zn, Te, Pd, Ag, Cd, Pb, Au, Hg, Sb és Bi. Mérgező hatású, de igen nagy mértékben oldhatatlan vagy nagyon ritka elemek a Ti, Hf, Zr, W, Nb, Ta, Re, Ga, La, Os, Rh, Ir, Ru és Ba. Egyes elemek itt most nem szerepelnek, mert nehezen besorolhatók, ezenkívül maga e kategorizálás sem éppen tökéletes. A toxikus elemek transzformációi és körforgalmuk pályautjai a talajokban, növényekben és a táplálkozási láncban ma intenzív kutatómunka tárgyát képezik (Kabata-Pendias és Pendias, 2000).

Ökológiai szempontból a nehézfémek (Pb, Hg, Cd, Cr, Ni, Zn, Cu stb.) okozzák a legnagyobb problémát, mert magasabb koncentrációjú toxikus hatásúak. Veszélyeztetik az ember és állat egészségét, és károsítják a növényeket is. E fémek közül az élőlények számára egyesek nélkülözhetetlenek (Fe, Zn, Mn, Cu stb.).

A fitoremediációt és ezen belül a fitoextrakciót talajtisztításra hiperakkumulációra képes növények alkalmazásával 1982-ben javasolták először. Számos irodalmi adat utal fémekkel (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Zn), nemfémekkel (B), metalloiddal (As, Se) és radionukleotidokkal (Sr, Cs, U) szennyezett talajnak és víznek sikeres hiperakkumulációra képes növényekkel való tisztítására (Salt, et al., 1995, Kumar et al., 1995, Banuelos et al., 1999, Prasad és Freitas, 2003).

Ma már számos növényről ismeretes, hogy egy vagy több nehézfémet képes nagyobb mennyiségben felhalmozni (3. táblázat). A szakirodalomban ezeket a növényeket hiperakkumulátoroknak nevezik. A szakirodalom 215 fémeket nagy mennyiségben felhalmozni képes növényről tesz említést, melyek a fémekkel szemben hipertoleranciát mutatnak: 145 Ni hiperakkumulátor, 26 Co, 24 Cu 4, Pb és 2 Cd (Rajković et al., 2008). Az Ameriai *maritima* szárazanyagra számítva több mint 1% Pb-t felhalmozhat, az *Arabidopsis halleri* pedig 3% Zn-t akkumulálhat. Egyes növények, pl. a *Thlaspi caerulescens*, több nehézfémet képesek felhalmozni: 3% Zn, 8% Pb és 01% Cd. A *Brassica junca* Cr-t, Ni-t, Pb-t, és Se-t halmoz fel és von ki a talajból. A fitoremediációval foglalkozó kutatók és genetikusok az utóbbi időben kutatási célul tűzték ki, hogy a hiperakkumulátor növényeknek a fémtoleranciáért felelős génjeit nagy

biomasszát képző, gyorsan növekvő, ellenálló, a nehézfémeket a szárban felhalmozó, mélyen gyökerező természetű növényekbe átültessék. A nehézfémek hiperakkumulátorai rendszerint a következő családokhoz tartoznak: Brassicaceae, Euphorbiaceae, Astaraceae, Laminaceae és Scorophudariaceae. Az ideális hiperakkumulátor tulajdonságai a következők:

ELEM	FAJOK	LEVELEK MAXIMÁLIS FÉMKONCENTRÁCIÓJA mg/kg SzA
Zn	<i>Thlaspi calaminare</i>	39,600
Cu	<i>Aeolanthus bioformifolius</i>	13,700
Ni	<i>Phyllanthus serpentinus</i>	38,100
Co	<i>Haumaniastrum roberti</i>	10,200

3. táblázat

A nehézfémek akkumulációja néhány hiperakkumulátor fajnál (Chaney et al., 1995)

Az ideális hiperakkumulátor növény tulajdonságai:

- toleráns a magas fémkoncentrációval szemben;
- képes nagyobb mennyiségben felhalmozni egy vagy több nehézfém (1000 mg/kg SzA Ni, Cu, Cr, Pb 10.000 mg/kg SzA Zn, Mn);
- a felvett fémeket elsősorban a hajtásban halmozza fel;
- nagy a szervesanyagtermése;
- rövid a tenyészideje;
- könnyen termeszthető;
- termesztése nem költséges;
- ellenálló a kedvezőtlen ökológiai tényezőkkel, betegségekkel és rovarkártevőkkel szemben;
- monokultúrában is termesztendő.

A nehézfémek nagyobb koncentrációja az embernél, állatoknál és a növényeknél mérgezési tüneteket vált ki (Kastori et al., 1997). Nehézfém-mérgezés hatására fellépő károsodások növényeknél a plazmamembrán-károsodás, zavarok a tápanyagok felvételében, fotoszintézisben, vízháztartásban, csökkent a virág- és magképzés, fokozott az oxigéngyökök képződése, továbbá morfológiai és anatómiai elváltozások tapasztalhatók. A növények a nehézfémekkel terhelt környezetben kétfé-

le reakcióval biztosíthatják túlélésüket: a nehézfémfelvétel korlátozásával, ezáltal felhalmózódásával és a felvett nehézfém eltűrésével (tolerancia-mechanizmusok) (Arsenijević-Maksimović et al., 2001, Memon et al., 2001). A hiperakkumulátor növényekre az utóbbi a jellemző. A nehézfém felvételének korlátozása többféle módon történhet: a fémionok immobilizálásával a sejtfalban, elsősorban a pektinek révén, a gyökér felületén, valamint a plazmamembránon való permeáció megváltozásával. Egy további lehetséges mód a nehézfémek felhalmozódásának csökkentésére a felvett fémionok egy részének aktív visszatranszportálása a külső környezetbe. Lehetséges rezisztencia-utat jelent a fémionok kötése, kelátképződése fémionkötő proteinekkel és polipeptidekkel (fitokelatinok, proteinkomplexek) a citoplazmában, valamint a fémionok kötése egyes karbonsavakkal (citrát, oxalát, malát), fémorganikus komplexek képződésével. A fitokelatinok a nehézfémionokat a citoplazmából a vakuólumba szállítják, ahol azok szerves sav-ligandumokhoz kötődnek. A nehézfémek a vakuólumba kerülve különülnek el a sejtnél az anyagszere szempontjából aktív, egyszersmind fontos részeiből. A tolerancia lehet kotolerancia (koincidentális tolerancia), amikor egy vagy több elem iránti tolerancia egy másik elem iránti toleranciát eredményez. A növények nehézfém-rezisztenciája örökletes tulajdonság (konstitutív tolerancia), de a nehézfém-stressz lehet adaptáció eredménye is (indukált tolerancia).

A fitoremediációra alkalmas növényeknek azonkívül, hogy toleránsak a szennyezőanyagokkal szemben, más követelményeknek is meg kell felelniük. Többek között el kell érni, hogy az adott ökológiai viszonyokban sikeresen termeszthetők legyenek. Termesztett növényeink közül a kukorica és a bab a hajtásában 1% Pb-t képes akkumulálni, a szennyezett talajból, míg az olajrepcé és a retek a Zn-et nagyobb mennyiségben szívja magába. Ez indokoltá tette a vidékünkön termesztett növények alkalmazhatóságának kivizsgálását fitoremediáció céljából. A 4. táblázatban feltüntetett eredmények arra utalnak, hogy az egyes növényfajok eltérő mértékben halmozzák fel az egyes elemeket a hajtásban és a szemben egyaránt. Átlagban a hajtásban a legkisebb mértékben a kukorica és legintenzívebben a napraforgó halmozta fel a vizsgált elemeket. A szemben viszont a felhalmozás mértéke legkisebb volt az olajrepcénél és legnagyobb a búzánál. A fitoremediáció szempontjából sokkal fontosabb a hajtásban felhalmozott mennyiség, mivel a hajtás vegeta-

tív része képezi a biológiai termés nagyobb hányadát, hozzávetőlegesen két harmadát. Más szerzők kutatási eredményei is utalnak arra, hogy a napraforgó alkalmas a nehézfémekkel szennyezett talajok tisztítására. Jovanović et al. (2001) megállapították, hogy a napraforgó nagyobb mértékben halmozza fel az uránt a szójánál és a kukoricánál. Az olajrepce Zn-akkumulációs képességét tehát a Zn-kel szennyezett talaj megtisztulását az általunk kapott eredmények is bizonyítják.

ELEM	SZEM	HAJTÁS
Cu	búza > tritü > repce > napraf > kuko	napraf > tritü > búza > repce > kuko
B	búza > tritü > napraf > repce > kuko	napraf > repce > tritü > búza > kuko
Sr	kuko > búza > tritü > napraf > repce	napraf > búza > kuko > tritü > repce
Zn	tritü > kuko > búza > napraf > repce	tritü > kuko > búza > napraf > repce
Ni	napraf > tritü > repce > kuko > búza	napraf > kuko > búza > tritü > repce
Cd	tritü > napraf > repce > búza > kuko	repce > napraf > tritü > kuko > búza
Mo	tritü > kuko > búza > napraf > repce	repce > tritü > kuko > búza > napraf
Se	búza > tritü > repce > kuko > napraf	napraf > tritü > búza > repce > kuko
Átlag	búza > tritü > napraf > kuko > repce	napraf > tritü > búza > repce > kuko
tritü - tritikálé; napraf - napraforgó; kuko – kukorica		

4. táblázat

*A mikroelem-terhelés hatása (810 kg/ha) a mikroelem-akkumuláció fokára
(Kastori et al., 2008)*

Az egészséges táplálkozás szempontjából fontos tudni, milyen mértékben halmozódnak fel az egyes elemek, különösen nehézfémekkel szennyezett talajon, a növény azon részében, melyet az ember és állat tápláléknak használ. Ezt egyaránt fontos tudni az esszenciális és a toxikus hatású elemekről. A mikroelemeknek a hajtás vegetatív részeiből a szembe kerülését, tehát a transzlokációs indexet néhány termesztett növényünkönél a 5. táblázat mutatja. A feltüntetett eredmények alapján leszögezhető, hogy a kukoricánál a legkisebb a máknál viszont a legintenzívebb a hajtás vegetatív részeiben felhalmozott mikroelemek transzlokációja a növény generatív szervébe, a szembe.

ELEM	NÖVÉNY
Ni	tritikálé > búza > mák > borsó > kukorica
Cu	mák > búza > tritikálé > borsó > kukorica

Zn	tritikálé >búza >borsó > mák >kukorica
Mo	mák >borsó > búza >tritikálé >kukorica
Mo	mák > búza >tritikálé >kukorica >borsó
Ba	búza > mák >borsó > tritikálé > kukorica
Átlag	mák >tritikálé >búza > borsó >kukorica

5. táblázat

*A mikroelemeknek a hajtásból a szembe irányuló transzlokációja
(Kastori, et al., 2007)*

Összefoglaló

Az eddig publikált tudományos kutatási eredmények és a gyakorlati alkalmazásban szerzett tapasztalatok alapján leszögezhető, hogy a fitoremediációnak számos előnye van a szennyezett környezet tisztításában más ismert technológiai megoldásokkal szemben, de ugyanakkor bizonyos korlátait is számba kell vennünk.

A fitoremediáció pozitív tulajdonságai:

- környezetkímélő, nincs negatív hatása a környezetre;
- nem költséges (sokkal olcsóbb, mint a helyben tisztítás talajki-termeléssel vagy talaj kitermelés nélkül), és nem energiaigényes;
- a növényekben felhalmozott fémek újra hasznosíthatók;
- a betakarított növények megfelelnek energia előállítására;
- a fitoremediáció a talaj és a víz tisztítására egyaránt hasznosítható;
- szervesetlen és szerves anyagok eltávolítására vagy lebontására alkalmas;
- nincs szükség külön technikai eszközökre és berendezésre;
- pontszerű és nem pontszerű szennyezéskor is alkalmazható;
- nincs negatív kihatással a tájképre.

A fitoremediáció korlátai:

- a növények nem képesek a talaj mélyebb rétegeiből eltávolítani a szennyező anyagokat (egyéves zöld növények 1–2 m, több éves fák 3–5 m mélységből);
- a talaj tisztítása a hiperakkumulátor növény tulajdonságaitól és a környezet szennyezettségi fokától függően 10–20 évet is igénybe vehet;

- a nagymértékben szennyezett és erősen fitotoxikus anyagokat tartalmazó talajok és vizek tisztítására nem alkalmas;
- télen vidékünkön nem alkalmazható;
- a környezet tisztítására alkalmazott növényeket biztonságba kell helyezni.

Felhasznált irodalom:

1. Alexander, E. B. (1988): Rates of soil formation, implications for soil-loss tolerance. *Soil Science*, 145: 37–45.
2. Arsenijević-Maksimović, I., Jelić, M., Lomović, S., Kastori, R. (2001): Genetic and physiological bases of plant tolerance to high concentrations of heavy metals and aluminium. In: Quarrie, S. et al. (eds.) *Genetics and Breeding of Small Grains*. Agricultural Research Institute Serbia, Beograd, 377–405.
3. Award, F., Römheld, V. (2000): Mobilization of Heavy Metals from Contaminated Calcareous Soils by Plant Born, Microbial and Synthetic Chelators and Their Uptake by Plants. *Journal of Plant Nutrition*. 23: 1847–1856.
4. Banuelos, G. S., Shannon, M. C., Ajwa, H., Draper, J. H., Jordahl, J., Licht, L. (1999): Phytoextraction and accumulation of boron and selenium by *Populus* hybrid clones. *Int. J. Phytoremediation*, 1: 81–96.
5. Bizily, S. P., Clayton, L. R., Summers, O. A., Meagher, R. (1999): Phytoremediation of methylmercury pollution: merB expression in *Arabidopsis thaliana* confers resistance to organomercurials. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96: 6808–6813.
6. Boyd, R. S., Martens, S. N. (1998): The significance of metal hyperaccumulation for biotic interactions, *Chemoecology*, 8: 1–7.
7. Chaney, R. L., Brown, S., Li, Y. M., Angle, J.S., Homer, F., Green, C. (1995): Potential use of metal hyperaccumulators. *Mining Environ. Manage.* 9–11.
8. Dushenkov, V., Nanda Kumar, P. B. A., Motto, H., Raskin, I. (1995): Rhizofiltration. The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environ. Sci. Technol.* 29:1239–1245.
9. Eikmann, T., Kloke, A. (1993): Nutzungsmöglichkeiten und Sanierung belasteter Böden. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 34, Darmstadt.
10. Jovanović, Lj., Cupać, S., Janjić, V., Sarić, M., Marković, M. (2001): Usvajanje i distribucija urana u gajenim biljkama. *Zbornik XIV Simpozijuma Jugoslovenskog društva za biljnu fiziologiju*, Goč, 26.
11. Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (2000): *Trace Elements in Soil and Plants*, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington.

Kanawar, J. S. (1982): Managing soil resources to meet challenges to mankind. 12th Congress of ISSS, New Delhi.

12. Kastori, R. (1995): Zaštita agroekosistema. Feljton, Novi Sad.

13. Kastori, R., Kádár, I., Maksimović I. (2007): Translocation of heavy metals and Sr and Ba from vegetative parts to seeds of some crops. Proceedings XIVth Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, Hungary, 221–225.

14. Kastori, R., Kádár, I., Maksimović, I. (2008): Possibilities for employment of some species for phytoremediation of microelements. Proceedings The Second Joint PSU–UNS International Conference on BioScience: Food, Agriculture and Environment, Novi Sad, Serbia 140–145.

15. Kastori, R., Petrović, N., Arsenijević-Maksimović, I. (1997): Teški metali i biljke. U: Kastori, R. (ured.) Teški metali u životnoj sredini. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, 197–257.

16. Kumar, P. B. A. Nanda, Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I. (1995): Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. Environ. Sci. Technol. 29: 1232–1238.

17. McCutcheon, S. C., Schnoor, J. L. Eds. (2003): Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants, Wiley-Interscience, Hoboken.

18. Memon, R. A., Aktoprakligil, D., Özdemir, A., Vertii, A. (2001): Heavy metal accumulation and detoxification mechanism in plants. Turl. J. Bot. 25, 111–121.

19. Montgomery, D. R. (2007): Dirt. The erosion of civilization. Univ. of California Press.

20. Nikolić, N. (2010): Topole u fitoremedijaciji teških metala. Zadužbina Andrejević, Beograd.

21. Pajević, S., Borišev, M., Rončević, S., Vukov, D., Igić, R. (2008): Heavy metal accumulation of Danube river aquatic plants - indication of chemical contamination. Central European Journal of Biology. 3: 285–294.

22. Pilipović, A., Nikolić, N., Orlović, S., Petrović, N., Krstić, B. (2005): Cadmium phytoextraction potential of poplar clones (*Populus* spp.) Z. Naturforsch. 60: 247–251.

23. Prasad, M. N. V., Freitas, H. M. (2003): Metal hypoaccumulation in plants – biodiversity prospecting for phytoremediation technology. Electronic Journal of Biotechnology, 6, 286–290.

24. Rajković, S., Tabaković-Tošić, M., Dražić, D., Veselinović, M., Rakonjac, Lj. (2008): Fitoremedijacija – način čišćenja zemljišta. Ecologica, 15: 187–191.

25. Salt, D. E., Blaylock, M., Nanda Kumar P. B. A., Dushenkov, V., Ensley B. D., Chet, I., Raskin, I. (1995): Phytoremediation: A novel strategy

for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnol.* 13: 468–474.

26. Saxen, P. K., Krishna Raj, S., Dan, T., Perras, M. R., Vettakkorumakkav, N. N. (1999): Phytoremediation of heavy metal contaminated and polluted soils. In: Prasad, M. N. V., Hagemeyer, J. (eds.) *Heavy Metal Stress in Plants*. Springer, Berlin. 305–318.

27. Singh, A., Ward, P.O. Eds. (2004): *Applied Bioremediation and Phytoremediation*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

28. Stojanović, M., Grubiš, M., Adamović, M., Stevanović, D., Milojković, J. (2008): Fitoremedijacija: „green technology” u funkciji dekontaminacije zemljišta. *Ecologica*, 15: 97–102.

29. Szabó, I. M. (1992): *Az általános talajtan biológiai alapjai*. Magyar Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.

30. Tóth M., (1988): A természeti erőforrások potenciálja és igénybevételenek, gazdasági elvi-módszertani kérdései. MTA Földrajztudományi Kutató Intézete, Budapest.

31. Vegter, J. J. (1997): In: Prost, I. R. (ed.) *Contaminated Soils*. INRA 85, INRA, Paris.

32. Wenzel, W.W., Lombi, E., Adriano, D. C. (1999): Biogeochemical processes in the rhizosphere: role in phytoremediation of metal-polluted sites. In: Prasad, M. N. V. and Hagemeyer, J. (eds.) *Heavy Metal Stress in Plants – From Molecular to Ecosystems*. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, New York. 273–303.