

Bársonyvirágfajok (*Tagetes spp.*) nehézfém fitoremediációs potenciáljának értékelése laboratóriumi tesztmódszerekkel

*MÓNOK Dávid, KARDOS Levente, VÉGVÁRI György

Szent István Egyetem, Kertészettudományi Kar,
Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék, Budapest
(Beérkezett: 2019.02.15.; Elfogadva: 2019.04.25.)

Bevezetés

A nehézfémek nagy mennyiségben halmozódhatnak fel a talaj felső rétegében, mobilitásuk csekély mértékű, amelyet elsősorban a talaj fizikai-kémiai tulajdonságai határoznak meg (FILEP, 1998; WU et al., 2010; LIU et al., 2013). Ez jelentős környezeti kockázattal jár, mivel közvetve vagy közvetlenül bekerülhetnek a táplálékláncba, és ott az élő szervezetek károsodását idézhetik elő (KIRKHAM, 2006; KUMPIENE et al., 2008; NAGAJYOTI et al., 2010; KABATA-PENDIAS, 2011). A hazai jogrendben a talajok nehézfém-koncentrációjának határértékeit, illetve a szennyezés mérését a 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet szabályozza. A növekvő mezőgazdasági és ipari termelés révén egyre több területen okoz problémát a talajok nehézfém-tartalma. Jelentős figyelem irányul emiatt napjainkban a nehézfémrel szennyezett területek remediációjára (LIU et al., 2008; WU et al., 2010; WEI és YANG, 2010; LIU et al., 2017).

A különböző fitoremediációs eljárások környezetkímélő és költséghatékony megoldást jelentenek a talajok nehézfém-szennyezettségének csökkentésére (ALI et al. 2013; WAN et al. 2016, LIU et al., 2017). Az utóbbi években több dísznövény fitoremediációs potenciálját vizsgálták, amelyek olyan területeken alkalmazhatók, ahol a talaj remediációja mellett kiemelten fontos a növény esztétikai megjelenése is (WANG és ZHOU, 2005; LIU et al., 2008; NAKBANPOTE et al., 2016; LIU et al., 2017). E növények további előnye, hogy nagyobb biomasszával rendelkeznek, mint az általában ismert nehézfém akkumuláló és hiperakkumuláló növényfajok (LIU et al., 2008; NAKBANPOTE et al., 2016; LIU et al., 2017).

A dísznövények fitoremediációs alkalmazása előnyös lehet például városi területeken, ahol magas az ott élők környezeti minőség iránti igénye (LIU et al., 2008, LIU et al., 2017). A városi talajok nehézfém-szennyezettségét számos hazai és külföldi kutató vizsgálta korábban (KÁDÁR 1995; SZEGEDI, 1999; MADRID et al., 2002; FARSANG és PUSKÁS, 2009; WEI és YANG, 2010; HORVÁTH és BIDLÓ, 2015; SIMON, 2001). Összességében megállapítható, hogy a városi talajok nehézfém-tartalma sok esetben meghaladja az adott területre jellemző természetes háttér-koncentrációt (WEI és YANG, 2010). A hazai felméréseket tekintve, FARSANG és PUSKÁS (2009) jogszabályi határértéket meghaladó nehézfém-koncentrációkat (Cd, Co, Cu) mértek Szeged városának zöldterületein, SZEGEDI (1999) Debrecen, SIMON (2001) Nyíregyháza, HORVÁTH és BIDLÓ (2014) pedig Sopron és Szombathely talajaiban.

*Levelező szerző: MÓNOK DÁVID, Szent István Egyetem, Kertészettudományi Kar, Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék, 1118 Budapest Villányi út 29-43.
E-mail: monokdavid27@gmail.com

A bársonyvirág (*Tagetes*) nemzetségbe tartozó növényfajokat kedvező tulajdonságaik miatt (hosszan tartó virágzás, esztétikus megjelenés, szárazságtűrés, és betegségekkel szembeni ellenállás) gyakran alkalmazzák egyényári dísznövényként közparkokban (IGNATIEVA, 2010; BIRÓ, 2016). Egyes kutatások szerint ezek a fajok képesek a Cd és a Cu felhalmozására a föld feletti szerveikben (BOSIACKI, 2009; RUNGRUANG et al., 2011; AFROUSHEH et al., 2015; GOSWAMI és DAS, 2017). Emiatt a bársonyvirágok alkalmasak lehetnek a nehézfémek talajból való fitoextrakciójára (KUMAR et al., 1995; ALI et al., 2013; LIU et al., 2017).

A különböző nehézfémek toxikus mennyiségben halmozódhatnak fel a növényben, amelynek során gátolhatják a növények fotoszintézisét, sejtosztódását, vízfelvételét, valamint gyökérképződését (KIRKHAM, 2006; NAGAJYOTI et al., 2010; KABATA-PENDIAS, 2011). Ennek hatására jelentősen csökkenhet a növényi biomassza produkció, ami rontja az adott növény fitoextrakciós potenciálját (ALI et al., 2013; NAGAJYOTI et al., 2010; KABATA-PENDIAS, 2011). Emiatt kiemelten fontos, hogy olyan növényfajokat alkalmazzunk ilyen célokra, amelyek kevésbé érzékenyek a nehézfémek káros hatásaira. A növényi nehézfém-akkumulációt és -toxicitást számos talajtulajdonság is befolyásolja, mint például a pH, a kötöttség, a szervesanyag-tartalom, illetve más elemek jelenléte vagy hiánya (ALLOWAY, 1995; KABATA-PENDIAS, 2011; MÓNOK és FÜLEKY 2017; SIMON, 2014).

A szakirodalomban viszonylag kevés információ található arról, hogy a különböző nehézfémeknek milyen fitotoxikus hatása van a bársonyvirág fajokra, és milyen mértékben károsítják e növények esztétikai értékeit. Ennek vizsgálatára két laboratóriumi kísérletet állítottunk be. Kutatásunk első felében egy előkísérlet során kiválasztottuk azt a bársonyvirágfajt, amelyik a legkevésbé érzékeny a vizsgált négy nehézfémre: kadmium (Cd), ólom (Pb), réz (Cu), cink (Zn). Ezután tenyészedény kísérletben vizsgáltuk a nehézfémek hatásait a növény nehézfém-akkumulációjára, valamint növekedési és esztétikai paramétereire. A kutatás célja, hogy meghatározzuk, mely nehézfémek milyen mértékű szennyezése esetén lehet alkalmas a bársonyvirág a nehézfémek talajból való fitoextrakciójára.

Anyag és módszer

Felhasznált anyagok

A kísérletek során három különböző bársonyvirág fajt használtunk fel: a nagyvirágú bársonyvirágot (*Tagetes erecta* L.), a kisvirágú bársonyvirágot (*Tagetes patula* L.), valamint az apróvirágú bársonyvirágot (*Tagetes tenuifolia* Cav.). A nehézfémeket az alábbi formákban használtuk fel: $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Előkísérlet

A kísérlet kezdetén 3-3 g vattapárnát helyeztünk el műanyag tenyészedényekben (magasság: 40 mm, átmérő: 120 mm), melyek mindegyikére 25 db bársonyvirágmag, majd 50 ml meghatározott nehézfém koncentrációjú tesztoldat került. Az Pb, Zn, és Cu koncentrációk a tesztoldatban 0, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 mg l^{-1} , míg a Cd koncentrációk 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 mg l^{-1}

voltak. A tenyészedényeket ezután celofánnal fedtük le, majd klimatizált fényszobában 12 óra fény 12 óra sötétségben tartottuk 25 ± 1 °C-on. 6 nap után megszámoltuk a kicsírázott magvak számát, valamint lemértük a hajtás- és a gyökérkezdemény hosszát. A kísérletet véletlenszerű elrendezésben és négy ismétlésben végeztük el.

Tenyészedény kísérlet

Az előkísérlet alapján összességében a kisvirágú bársonyvirág (*Tagetes patula*) volt a legkevésbé érzékeny a kiválasztott nehézfémekre, ezért a tenyészedény kísérlet során csak ezt a fajt alkalmaztuk. A kísérlethez felhasznált tesztalaj tulajdonságait az 1. táblázat foglalja össze. Az alkalmazott nehézfém dózisok ebben az esetben a 6/2009. KvVM-EüM-FVM együttes rendeletben foglalt ún. B szennyezettségi határértékek 0-, 1-, 2-, és 4-szeresei voltak. Ezek az alábbi koncentrációkat jelentették:

Cd: 0, 1, 2, 4 mg kg⁻¹
Pb: 0, 100, 200, 400 mg kg⁻¹
Cu: 0, 75, 150, 300 mg kg⁻¹
Zn: 0, 200, 400, 800 mg kg⁻¹

A szükséges mennyiségű nehézfémet a talaj 60 %-os vízkapacitásának megfelelő mennyiségű desztillált vízben oldottuk fel. Az oldat bekeverése után a tesztalajt 1 hónapon keresztül 25 ± 1 °C hőmérsékleten inkubáltuk. Ezután a tenyészedényekbe egyenként 500 g talaj került, melyekbe 5 darab magot vetettünk el, a magok csírázása után pedig tenyészedényenként csak egy növényt tartottunk meg. A 120 napos terhelési periódus során a növényeket szabad ég alatt tartottunk. A terhelési periódus során a meteorológiai adatok szerint az átlagos napi középhőmérséklet 16,4 és 24,4 °C között alakult, és összesen 215 mm csapadék hullott. Csapadékmentes időszakban a növényeket öntöztük.

A terhelési periódus végén megszámoltuk a leveleket és a virágokat, valamint mértük a hajtás hosszát (cm) és száraztömegét (g), a gyökér hosszát (cm) és száraztömegét (g), továbbá a virágok átmérőjét (cm). A kísérlet végén meghatároztuk a talaj, valamint a növény hajtásának (beleértve minden föld feletti szervet) nehézfém koncentrációját is. Ezt cc. HNO₃+cc. H₂O₂ feltárás után AURORA AI 1200 típusú atomabszorpciós spektrofotométerrel (AURORA Instruments Limited) mértük. A bioakkumulációs faktor (BAF) értékek jelen kutatásban a növény hajtásában mért nehézfém koncentráció (mg kg⁻¹), valamint a talajban mért nehézfém koncentráció (mg kg⁻¹) hányadosait jelentik (OLGUÍN és SÁNCHEZ-GALVÁN, 2012). Ennek értelmében, ha a BAF értéke meghaladja az 1-et, akkor a növény képes az adott nehézfém felhalmozására a föld feletti szerveiben. A tenyészedény kísérletet szintén véletlenszerű elrendezésben és négy ismétlésben végeztük el.

1. táblázat.
A teszttalaj tulajdonságai

(1) Származási hely:	Soroksár
(2) Talajtípus:	réti talaj
K _A	39
pH _{H₂O}	7,1
pH _{KCl}	6,5
CaCO ₃ %	3,5
Humusz %	3,91
Só %	0,72
NH ₄ -N mg kg ⁻¹	4,1
NO ₃ -N mg kg ⁻¹	3,4
AL-P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	195
AL-K ₂ O mg kg ⁻¹	305

Statisztikai analízis

Az adatok elemzése SPSS és Graphpad Prism statisztikai programokkal történt. Az előkísérlet eredményeinek értékeléséhez kiszámoltuk az IC₅₀ értékeket (az adott paraméterben 50 %-os károsító hatást okozó nehézfém-koncentráció), melyeket az adatok normalizálása után logisztikus dózis-válasz modell segítségével állapítottunk meg. A tenyészedény kísérlet eredményeinek értékelését varianciaanalízis (ANOVA) és Tukey-teszt segítségével végeztük el. A statisztikai elemzésekhez 95 %-os szignifikancia szintet (p<0,05) használtunk.

Eredmények

Előkísérlet

Eredményeink alapján a tesztoldat növekvő nehézfém-koncentrációi szignifikánsan csökkentették a vizsgált növényi paraméterek (csírázási %, hajtáshossz, gyökérhossz) értékeit a kontrollhoz képest. Az 50 %-os károsodást jelző IC₅₀ értékek a 2. táblázatban találhatók.

A Cd minden növénynél és minden paraméternél a legtoxikusabb nehézfémnek bizonyult, mivel az IC₅₀ értékek ennél a nehézfémnél voltak a legalacsonyabbak. A csírázás- és gyökérnövekedés gátlásban nem volt jelentős különbség a növények között, azonban a hajtás növekedésének gátlásában a kisvirágú bársonyvirágnál jóval magasabb IC₅₀ érték (27,6 mg l⁻¹) volt tapasztalható, mint a másik két növény esetében (12,8 mg l⁻¹ és 20,9 mg l⁻¹). Összességében az Pb volt a legkevésbé toxikus a növényekre, mivel az IC₅₀ értékek a legtöbb esetben ennél a nehézfémnél voltak a legmagasabbak. A csírázási %-nál és a hajtáshossznál a legmagasabb értékek a kisvirágú bársonyvirágnál voltak (1462,0 mg l⁻¹ és 418,8 mg l⁻¹), míg a gyökérhossz esetében kisebb különbség volt a növények között. Cu esetében nem volt jelentős különbség a növények IC₅₀ értékei között. A csírázási % IC₅₀ értéke 233,9 és 290,0 mg l⁻¹, a hajtáshosszá 199,5 és 261,5 mg l⁻¹, a gyökérhosszá pedig 79,9 és 97,1 mg l⁻¹ között volt. Zn esetében azonban jelentős különbségeket tapasztaltunk a növények IC₅₀ értékei között. A

legnagyobb érték mindhárom paraméter esetében a kisvirágú bársonyvirágnál, míg a legkisebb érték az apróvirágú bársonyvirágnál volt. Minden adatot összevetve, a nehézfémek toxicitásának sorrendje az alábbiak szerint alakult: Cd>Cu>Zn>Pb.

Megállapítható továbbá, hogy a Cd-, Cu- és Zn-terhelések hatására mindhárom bársonyvirágfaj alkalmazása esetén a gyökérhosszra volt a legalacsonyabb IC₅₀ érték. Utóbbi két nehézfém esetében a legnagyobb IC₅₀ értékek a csírázási %-ban voltak. Pb hatására nagyon magas IC₅₀ értékeket állapítottunk meg a nagyvirágú bársonyvirág és a kisvirágú bársonyvirág csírázási %-ára.

2. táblázat

A nehézfémek számított IC₅₀ értékei (mg l⁻¹) a bársonyvirág vizsgált növényi paramétereire

(1) Nehézfém	(2) Vizsgált paraméter	Nagyvirágú bársonyvirág (<i>T. erecta</i>)	Kisvirágú bársonyvirág (<i>T.</i> <i>patula</i>)	Apróvirágú bársonyvirág (<i>T. tenuifolia</i>)
Cd	(3) Csírázási %	15,5	12,2	11,2
	(4) Hajtáshossz	12,8	27,6	20,9
	(5) Gyökérhossz	7,7	7,3	5,9
Pb	(3) Csírázási %	812,7	1462,0	154,5
	(4) Hajtáshossz	231,6	418,8	302,6
	(5) Gyökérhossz	380,8	349,2	286,3
Cu	(3) Csírázási %	277,0	290,0	233,9
	(4) Hajtáshossz	199,5	261,4	220,5
	(5) Gyökérhossz	85,1	79,9	97,1
Zn	(3) Csírázási %	446,6	644,9	167,6
	(4) Hajtáshossz	249,8	310,4	158,6
	(5) Gyökérhossz	82,1	90,2	51,9

Megjegyzés: az IC₅₀ érték az adott paraméterben 50 %-os károsító hatást okozó nehézfém-koncentráció (mg l⁻¹), melyeket az adatok normalizálása után logisztikus dózis-válasz modell segítségével állapítottuk meg.

Tenyészedény kísérlet

A vizsgálat során nem kezelt talajokból is kimutatható volt a talaj természetes nehézfém-koncentrációja (3. táblázat). A nehézfém-terhelések hatására szignifikáns mértékben nőttek a talajok mért nehézfémkoncentrációi. Az alkalmazott dózishoz képest minden esetben kisebb nehézfém koncentrációt mértünk vissza, különösen Zn esetében tapasztaltunk jelentős különbséget (a 800 mg kg⁻¹-os kezelés esetén például mindössze 105,2 mg kg⁻¹ mértünk). A kisvirágú bársonyvirág hajtásának nehézfém-koncentrációi szintén szignifikánsan nőttek a növekvő dózisok hatására. A szennyezettségi határérték négyszeres koncentrációját alkalmazva Cd, Pb és Zn esetén több mint háromszor, míg Cu esetén több mint kétszer nagyobb volt a hajtás nehézfém-koncentrációja, mint a kontrollban.

A bioakkumulációs faktor (BAF) értékeket tekintve megállapítható, hogy a kisvirágú bársonyvirág jelentős mértékben képes felhalmozni Cd-ot, valamint Zn-et a hajtásában. Előbbi nehézfém esetében 7,99 és 11,53 közötti BAF értékek, míg

utóbbinál 7,08 és 18,22 közötti értékek voltak jellemzők. A Cu-kezelések esetén szintén meghaladta az 1-et a BAF érték, azonban a Cu koncentráció növekedésével ez jelentősen csökkent. Míg a kontrollban 6,45-ös BAF értéket tapasztaltunk, a 300 mg kg⁻¹-os terhelés esetén ez már csak 1,46 volt. Pb esetén a BAF értékek 0,77 és 1,32 között voltak, ami alapján a tesztnövény nem akkumulálta nagy mennyiségben az Pb-t a hajtásában.

A tenyészedényenkénti nehézfém-felvételt tekintve a kisvirágú bársonyvirág a Cd több mint 10 %-át felvette a tesztalajból mind a három kezelésben. A két legnagyobb dózisú Zn-terhelésben közel 10 mg Zn-et vett fel a bársonyvirág tenyészedényenként. Pb és Cu legnagyobb adagú kezelésében mindkét nehézfémből több mint 3 mg-ot vett fel a növény.

3. táblázat

A kisvirágú bársonyvirág (*T. patula*) nehézfém-akkumulációja a nehézfém-kezelések hatására

(1) Nehézfém	(2) Kezelés (mg kg ⁻¹)	(3) Talaj nehézfém- koncentrációja (mg kg ⁻¹)	(4) Hajtás nehézfém- koncentrációja (mg kg ⁻¹)	(5) Bioakkumu- lációs faktor (BAF) érték	(6) Nehézfém- felvétel (mg/ tenyészedény)
Cd	0	0,61±0,22 ^a	5,88±1,90 ^a	9,64±1,84 ^{ab}	0,07±0,01 ^a
	1	1,46±0,24 ^b	11,68±3,14 ^b	8,00±1,65 ^a	0,13±0,02 ^b
	2	1,52±0,42 ^b	17,52±3,33 ^{bc}	11,53±2,11 ^b	0,20±0,01 ^c
	4	2,82±0,58 ^c	22,54±3,52 ^c	7,99±1,84 ^a	0,24±0,03 ^c
Pb	0	44,91±16,51 ^a	59,21±11,35 ^a	1,32±0,14 ^a	0,68±0,29 ^a
	100	65,08±5,70 ^a	75,59±9,84 ^a	1,16±0,25 ^a	0,83±0,19 ^a
	200	176,5±21,5 ^b	135,2±11,2 ^b	0,77±0,18 ^b	1,57±0,24 ^b
	400	344,7±17,1 ^c	352,3±54,3 ^c	1,02±0,31 ^a	3,26±0,23 ^c
Cu	0	19,70±11,89 ^a	126,5±10,5 ^{ab}	6,45±1,01 ^a	1,45±0,15 ^a
	75	44,50±4,66 ^b	144,9±9,9 ^{bc}	3,26±0,70 ^b	1,59±0,20 ^a
	150	90,41±32,66 ^c	185,4±22,5 ^b	2,05±0,58 ^c	2,02±0,37 ^b
	300	234,2±22,8 ^d	342,7±47,4 ^c	1,46±0,32 ^c	3,51±0,54 ^c
Zn	0	36,15±6,78 ^a	255,8±51,6 ^a	7,08±1,45 ^a	2,95±0,40 ^a
	200	39,78±7,61 ^{ab}	724,6±114,3 ^b	18,22±1,83 ^b	7,72±0,28 ^b
	400	56,07±5,96 ^b	995,2±180,1 ^{bc}	17,75±2,80 ^b	9,83±0,55 ^c
	800	105,2±35,5 ^c	1205,3±239,2 ^c	11,46±1,09 ^c	9,93±0,87 ^c

Megjegyzés: Az eredmények átlag±szórásaként szerepelnek (n=4). A különböző betűk a felső indexben szignifikáns eltérést jelölnek az adott nehézfém-kezelési között a Tukey-teszt alapján (p<0,05).

A kisvirágú bársonyvirág növekedési paramétereinek értékeit a 4. táblázat tartalmazza. A Cd-kezelések hatására nem változott a növény hajtásának hossza és

tömege, azonban a határérték négyszeres koncentrációját alkalmazva szignifikánsan csökkent a gyökér hossza és tömege a kontrollhoz képest. Mindkét paraméterben több mint 20 %-os csökkenés következett be. Pb esetén a legnagyobb dóziszú kezelés hatására szignifikánsan csökkent a hajtás hossza és tömege, valamint a gyökér tömege. A Cu-kezelések nem okoztak szignifikáns hatást egyik vizsgált növekedési paraméterben sem. Zn esetén már a határérték kétszeres koncentrációjának alkalmazásakor is szignifikánsan csökkent a hajtás hossza, valamint a gyökér tömege. A legnagyobb koncentrációjú kezelés hatására pedig minden növekedési paraméter szignifikánsan kisebb volt, mint a kontrollban. A gyökér hossza több mint 20 %-kal, míg a többi növekedési paraméter több mint 30 %-kal csökkent a kontrollhoz képest.

4. táblázat

A nehézfém-kezelések hatása a kisvirágú bársonyvirág (*T. patula*) növekedési paramétereire

(1) Nehézfém	(2) Kezelés (mg kg ⁻¹)	(3) Hajtás hossza (cm)	(4) Hajtás száraz tömege (g)	(5) Gyökér hossza (cm)	(6) Gyökér száraz tömege (g)
Cd	0	28,35±3,77 ^a	11,54±1,81 ^a	16,53±2,06 ^a	3,44±0,52 ^a
	1	25,44±2,85 ^a	10,98±1,64 ^a	16,34±1,75 ^a	3,56±0,74 ^a
	2	29,12±4,66 ^a	11,46±2,05 ^a	14,65±1,34 ^{ab}	3,20±0,31 ^{ab}
	4	24,45±3,65 ^a	10,45±1,66 ^a	13,24±1,24 ^b	2,54±0,41 ^b
Pb	0	28,35±3,77 ^a	11,54±1,81 ^a	16,53±2,06 ^a	3,44±0,52 ^a
	100	26,54±2,58 ^{ab}	11,03±2,22 ^{ab}	16,04±2,24 ^a	3,14±0,22 ^{ab}
	200	27,11±4,24 ^{ab}	11,60±1,54 ^a	16,22±1,63 ^a	3,11±0,38 ^{ab}
	400	22,28±2,15 ^b	9,24±1,02 ^b	14,48±1,40 ^a	2,77±0,32 ^b
Cu	0	28,35±3,77 ^a	11,54±1,81 ^a	16,53±2,06 ^a	3,44±0,52 ^a
	75	28,85±5,82 ^a	10,95±1,24 ^a	16,32±1,34 ^a	3,52±0,40 ^a
	150	26,52±3,44 ^a	10,90±2,10 ^a	16,98±2,68 ^a	3,62±0,31 ^a
	300	24,45±2,65 ^a	10,24±1,53 ^a	16,05±1,85 ^a	3,01±0,24 ^a
Zn	0	28,35±3,77 ^a	11,54±1,81 ^a	16,53±2,06 ^a	3,44±0,52 ^a
	200	26,88±3,54 ^{ab}	10,65±1,34 ^a	16,35±1,54 ^a	3,22±0,52 ^{ab}
	400	23,12±3,56 ^{bc}	9,88±2,12 ^{ab}	14,04±1,89 ^{ab}	2,74±0,30 ^{bc}
	800	19,54±2,60 ^c	8,24±1,48 ^b	12,76±2,10 ^b	2,28±0,25 ^c

Megjegyzés: Az eredmények átlag±szórásként szerepelnek (n=4). A különböző betűk a felső indexben szignifikáns eltérést jelölnek az adott nehézfém-kezelései között a Tukey-teszt alapján (p<0,05).

A nehézfém-kezelések hatását a kisvirágú bársonyvirág levél és virág számára, valamint virág átmérőjére az 5. táblázat mutatja be. A Cd-kezelések nem voltak szignifikáns hatással a vizsgált esztétikai paraméterekre. Az Pb határértékének kétszeres és a négyszeres koncentrációi szignifikánsan csökkentették a virágok

számát a kontrollhoz képest. A Cu esetében a legnagyobb dóziszú kezelés szignifikánsan csökkentette a virágok számát, valamint átmérőjét. A Zn hatására a legnagyobb dózishoz minden vizsgált esztétikai paraméter csökkent a kontrollhoz képest, sőt a virágok átmérője már a határérték kétszeres koncentrációját alkalmazva is kisebb volt, mint a kontrollban.

5. táblázat

A nehézfém-kezelések hatása a kisvirágú bársonyvirág (*T. patula*) esztétikai paramétereire

(1) Nehézfém	(2) Kezelés (mg kg ⁻¹)	(3) Levelek száma	(4) Virágok száma	(5) Virágok átmérője (cm)
Cd	0	28,00±4,32 ^a	2,50±0,58 ^a	4,15±0,51 ^a
	1	27,25±3,40 ^a	2,00±1,83 ^a	3,78±0,62 ^a
	2	29,00±3,37 ^a	2,50±0,58 ^a	3,50±0,22 ^a
	4	26,25±2,06 ^a	1,75±0,96 ^a	4,04±0,38 ^a
Pb	0	28,00±4,32 ^a	2,50±0,58 ^a	4,15±0,51 ^a
	100	28,50±3,00 ^a	2,00±1,41 ^{ab}	3,78±0,78 ^a
	200	27,00±3,83 ^a	1,50±0,58 ^b	3,89±0,57 ^a
Cu	0	28,00±4,32 ^a	2,50±0,58 ^a	4,15±0,51 ^a
	75	28,25±2,87 ^a	1,75±1,50 ^{ab}	3,64±0,48 ^{ab}
	150	26,50±2,65 ^a	2,00±0,82 ^{ab}	3,37±0,64 ^{ab}
	300	25,25±2,22 ^a	1,50±0,58 ^b	3,35±0,41 ^b
Zn	0	28,00±4,32 ^a	2,50±0,58 ^a	4,15±0,51 ^a
	200	27,00±1,15 ^a	2,00±1,41 ^a	3,66±0,58 ^{ab}
	400	23,50±3,32 ^{ab}	1,50±0,82 ^{ab}	3,05±0,54 ^b
	800	22,00±2,94 ^b	0,75±0,96 ^b	2,25±0,34 ^c

Megjegyzés: Az eredmények átlag±szórásaként vannak szerepelnek (n=4). A különböző betűk a felső indexben szignifikáns eltérést jelölnek az adott nehézfém-kezelési között a Tukey-teszt alapján (p<0,05).

Az eredmények értékelése

Az előkísérlet során mind a négy vizsgált nehézfém káros hatással volt a bársonyvirágok csírázására, valamint hajtás- és gyökérnövekedésére. A károsító hatás mértéke függött a nehézfémek típusától és dózistól, továbbá a bársonyvirágfajtától. Az eredmények alapján a nehézfémek a vizsgált paraméterek közül a növények csírázására voltak legkevésbé toxikusak. Ennek lehetséges oka, hogy a növény kizárólag a magban tárolt tápelemeket használta fel a kezdeti növekedéséhez, vagy a tesztoldatban oldott nehézfémek nem jutottak át a maghéjon (ARAÚJO és MONTEIRO, 2005; VAN DER ENT et al., 2013). A Cd, a Cu és a Zn a gyökér növekedését károsította a legnagyobb mértékben. A korábbi vizsgálatok

alapján a gyökérhossz csökkenése érzékenyebb mutatója a nehézfémek toxicitásának, mint a hajtáshossz csökkenése, mivel a gyökérzet felelős elsősorban a fémek abszorpciójáért és akkumulációjáért (ARAÚJO és MONTEIRO, 2005; NAGAJYOTI et al., 2010). A kísérlet során meghatározott toxicitási sorrendhez (Cd>Cu>Zn>Pb) hasonló sorrendet írt le DI SALVATORE et al. (2008) más növényfajok esetében (kerti saláta, brokkoli, paradicsom).

A tenyészedény kísérlet alapján a kisvirágú bársonyvirág a Cd-ot és a Zn-et nagy mennyiségben halmozza fel a föld feletti szerveiben. A két nehézfém kémiaiilag nagyon hasonló, a talajból könnyen mobilizálhatók és felvehető potenciálisan toxikus elemek közé tartoznak (FILEP, 1998; KIRKHAM 2006). A Cd felhalmozódását bársonyvirágfajokban néhány korábbi kutatás kapcsán már leírták (BOSIACKI, 2009; RUNGRUANG et al., 2011; GOSWAMI és DAS, 2017). A Cu bioakkumulációjának mértéke a dózis növelésével folyamatosan csökkent. Hasonló eredményre jutottak AFROUSHEH et al. (2015) is nagyvirágú bársonyvirág alkalmazása esetén. Ezzel szemben GOSWAMI és DAS (2017) kutatása alapján a nagyvirágú bársonyvirág hajtásában több mint 10-szeres Cu koncentráció is jellemző lehet, mint a növényneveléshez használt rézzel szennyezett tesztalajokban. Vizsgálatai eredményeink eltérését kísérletünk jelentős különbözősége okozhatja. Kísérletünkben az Pb-t nem akkumulálta jelentős mértékben a tesztnövény.

Megfigyelhető volt, hogy a kísérlet végén mért nehézfém koncentráció a talajban minden esetben kisebb volt, mint az alkalmazott nehézfém-dózis. Ennek egyik oka, hogy a nehézfémek egy részét a növény felvette a talajból. Fontos megemlíteni azonban, hogy az általunk alkalmazott feltárással a „pseudoösszes” elemtartalmat vizsgáljuk, vagyis az elemek egy része a kristályrácsokban maradhat. Felmerülhet továbbá, hogy a csapadék, illetve az öntözés hatására a nehézfémek egy része kimosódott a talajból.

A kisvirágú bársonyvirág esztétikus megjelenése elsősorban a virágok számától és azok átmérőjétől függ. A virágok száma az Pb-, Cu- és Zn-kezelések hatására, míg az átmérője csak a Cu és a Zn hatására csökkent. Az általunk vizsgált koncentrációtartományban a Cd nem volt szignifikáns hatással a virágokra, amelyet LAL et al. (2005) kutatásai is alátámasztottak. Szintén meghatározó lehet esztétikai szempontból a levelek száma, amelyet azonban csak a legnagyobb dózisu Zn-terhelés csökkentett szignifikáns mértékben. A fitoextrakciós eljárások során kiemelten fontos, hogy a növény biomasszája ne csökkenjen jelentősen az adott szennyezőanyag hatására (ALI et al., 2013, NAGAJYOTI et al., 2010; KABATA-PENDIAS, 2011). Ennek értékelésére kísérletünkben a hajtás tömeg eredmények adnak lehetőséget. Ezt a paramétert csak a Pb és a Zn csökkentette a kontrollhoz képest, különösen utóbbinál volt jelentős csökkenés tapasztalható. A Zn jelentős mértékű toxicitását a föld feletti szervekre magyarázhatja, hogy a kezelések hatására jelentősen csökkent a gyökér hossza és tömege, ami megzavarhatta a kisvirágú bársonyvirág víz- és tápelemfelvételét (NAGAJYOTI et al., 2010; KABATA-PENDIAS, 2011). Cu alkalmazása esetén nem tapasztaltunk csökkenést a hajtás tömegében. A Cd a legnagyobb alkalmazott dózisban káros hatást gyakorolt a növény gyökérzetének vizsgált paramétereire, azonban a hajtásban nem volt

kimutatható károsító hatása. A vizsgált koncentrációtartomány felett, 50 mg kg^{-1} Cd terhelés esetén, már szignifikánsan csökkent a nagyvirágú bársonyvirág hajtásának tömege a kontrollhoz képest GOSWAMI és DAS (2017) kísérletében.

Az előkísérlet és a tenyészedény kísérlet eredményeit összehasonlítva megfigyelhető, hogy az előkísérlet során jóval toxikusabbnak bizonyultak a nehézfémek a kisvirágú bársonyvirágra. Ennek oka az lehet, hogy a fiatal növények általában jóval érzékenyebbek a nehézfémekre (KÁDÁR, 1995; NAGAJYOTI et al., 2010). Fontos megemlíteni azonban azt is, hogy a kísérletben alkalmazott tesztoldat jelentősen különbözik a természetes talajoktól. A talajokban a nehézfémek kevésbé oldható formába kerülhetnek, és így nehezebben elérhetőek a növények számára (GHOSH és SINGH, 2005). A növényi felvételt pedig számos talajtényező (pl.: pH, kötöttség, szervesanyag-tartalom) is befolyásolja (ALLOWAY, 1995; KABATA-PENDIAS, 2011; MÓNOK és FÜLEKY 2017; SIMON, 2014).

Következtetések

Bár a tesztoldatokat alkalmazó kísérleteknek nagyon kicsi a környezeti relevanciája, az általunk elvégzett előkísérlet alkalmas volt arra, hogy összehasonlítsuk különböző bársonyvirágfajok toleranciáját a kiválasztott nehézfémekkel szemben. Eredményeink alapján a négy nehézfémre a kisvirágú bársonyvirág volt a legkevésbé, míg az apróvirágú bársonyvirág volt a legérzékenyebb.

A szennyezett talajok nehézfém-tartalmának fitoextrakciójára olyan növények alkalmazása ideális, amelyek képesek felhalmozni az adott nehézfémet a föld feletti szerveikben, viszont a biomassájuk nem csökken jelentős mértékben. Tenyészedény kísérletünk alapján a vizsgált koncentráció-tartományban a kisvirágú bársonyvirág alkalmas lehet a kadmiummal, rézzel vagy cinkkel szennyezett talajok remediációjára. A szennyezettségi határértékek kétszeresét alkalmazva nem történt szignifikáns csökkenés a növény esztétikai paramétereiben. Ez alapján ilyen mértékű szennyezés esetén olyan területeken is alkalmazható ez az eljárás, ahol kiemelten fontos a növény megjelenése is. Ilyenek lehetnek a különböző városi területek (pl.: közparkok, középületek és lakóházak kertjei, utak melletti zöldfelületek), ahol a korábbi hazai és külföldi kutatások szerint is sok esetben problémát jelentett a talajok nehézfém-szennyezettsége. Megfelelő tápanyag-ellátás, öntözés, valamint esetleges növényvédelmi ellátás biztosításával a kisvirágú bársonyvirág alkalmazása egyszerű és költséghatékony módja lehet a városi talajok nehézfém-tartalmának csökkentésére. Ennek során elsősorban a mobilis elemkészlet csökken, ami által megelőzhető a nehézfémek kimosódása, vagy újabb mennyiségek felvehetővé válása (SIMON, 2004). Mivel a kisvirágú bársonyvirágot általában egyéves dísznövényként alkalmazzák, a keletkezett növényi biomassza a tenézszezidőszak végén betakarítható.

Fontos megemlíteni, hogy természetes körülmények között csak nagyon ritkán fordul elő, hogy mindössze egyetlen nehézfém okozzon szennyezettségi problémát egy adott talajban. Emiatt célszerű lenne vizsgálni a bársonyvirág fitoextrakciós képességeit kevert nehézfém-szennyezésű talajokon is, amely során figyelembe

vehető a nehézfémek együttes hatása (pl. Cd és Zn esetleges antagonizmusa) is a növényi felvételre, illetve toxicitásra. Ennek vizsgálatára alkalmas az általunk használt tenyésztedény kísérlet. A kísérlet során problémaként merült fel, hogy a nehézfémek egy része kimosódhatott a tenyésztedényekből. Erre megoldást jelenthet a szennyezett talaj érlelési idejének a meghosszabbítása. A kimosódott nehézfém mennyiségének becslésére pedig érdemes lehet a kísérlet során olyan tenyésztedényeket is bevonni, amelyekbe nem kerül tesztnövény.

Összességében tehát a kisvirágú bársonyvirág bizonyos feltételek mellett alkalmas lehet szennyezett talajok nehézfém-tartalmának csökkentésére. Napjainkban számos további kutatás folyik, melyben különböző dísznövények fitoextrakciós potenciálját térképezik fel. A jövőben így elképzelhetők olyan megoldások, melyek során az adott területre jellemző szennyezőanyag csökkentésére olyan dísznövényfaj kombinációkat alkalmaznak, amelyek kert- és tájépítészeti, valamint esztétikai szempontból is megfelelők.

Összefoglalás

A fitoremediációs eljárások alkalmazása költségghatékony és környezetkímélő megoldást jelent a szennyezett területek helyreállítására. Korábbi kutatások alapján a bársonyvirágok alkalmasak lehetnek nehézfémmel szennyezett területek fitoremediációjára, azonban kevés információval rendelkezünk arról, hogy a fémeknek milyen toxikus hatása van ezekre a növényekre. Kutatásunk során két különböző kísérletet (egy előkísérletet és egy tenyésztedény kísérletet) állítottunk be négy kiválasztott nehézfém (Cd, Pb, Cu, Zn) növényi bioakkumulációjának és toxicitásának vizsgálatára három különböző bársonyvirág fajon.

A csíranövényes előkísérlet alapján a kisvirágú bársonyvirág (*Tagetes patula*) volt a legkevésbé érzékeny az alkalmazott nehézfémekre, ezért ezt a növényt alkalmaztuk a tenyésztedény kísérlet során. A tenyésztedény kísérletben a növényeket a magyar jogszabályokban meghatározott talaj nehézfém szennyezettségi határérték 0-, 1-, 2- és 4-szeres dózisainak tettük ki. 120 napos talaj-növény interakció után mértük a növény növekedési paramétereit (hajtáshossz és tömeg, gyökérhossz és tömeg), valamint az esztétikai paramétereit (levelek és virágok száma, virágok átmérője). A növény hajtásának és a tesztalaj nehézfémkoncentrációit $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ feltárás után atomabszorpciós spektrofotométerrel határoztuk meg.

Az eredményeink alapján a kisvirágú bársonyvirág képes a Cd és a Zn bioakkumulációjára a hajtásában, mivel 7-18-szor nagyobb koncentrációt mértünk a növény hajtásában, mint a tesztalajban. A Cu szintén akkumulálódott a hajtásban, azonban a növekvő Cu dózisok hatására a felhalmozódás mértéke csökkent. A növényi paraméterek (a Zn-terhelések kivételével) csak a legnagyobb dózisú nehézfém-terhelésekben csökkentek szignifikáns mértékben a kontrollhoz képest. A Zn szignifikánsan csökkentette a hajtáshosszt, a gyökér száraz tömegét, valamint a virágok átmérőjét már 400 mg kg^{-1} koncentráció esetén is.

Az eredményeink szerint a kisvirágú bársonyvirág alkalmas lehet kadmiummal, rézzel vagy cinkkel szennyezett talajok fitoremediációjára a vizsgált

koncentráció-tartományokban. Alkalmazásuk városi területeken (pl. közparkokban, középületek és lakóházak kertjeiben, vagy utak melletti zöldfelületeken) megfelelő lehet, mivel ezek a növények a környezetet is szépítik.

Kulcsszavak: nehézfém, bársonyvirág, *Tagetes*, fitoremediáció

Ez a munka az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3-I-SZIE-38. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

Irodalom

- 6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet a földtani közeg és a felszín alatti vízszennyezéssel szembeni védelméhez szükséges határértékekről és a szennyezések méréséről. Magyar Közlöny 2009/51. (IV. 14.). 14398-14413.
- AFROUSHEH, M., TEHRANIFAR, A., SHOOR, M. és SAFARI, V. R., 2015. Salicylic acid alleviates the copper toxicity in *Tagetes erecta*. International Journal of Farming and Allied Sciences. **4**. 232-238.
- ALI, H., KHAN, E. és SAJAD, M. A., 2013. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. Chemosphere. **91**. 869-881.
- ALLOWAY B.J., 1995: Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional, London.
- ARAÚJO, A. S. F. és MONTEIRO, R. T. R., 2005. Plant bioassays to assess toxicity of textile sludge compost. Scientia Agricola. **62**. 286-290.
- BIRÓ, B., SUMALAN, R., SUMALAN R., FARKAS E., SCHMIDT B., 2016. Az arbuszkuláris mikorrhiza- (AM) gombák hatásának vizsgálata *Tagetes patula* L. foszforfelvételére és fejlődésére modellkísérletben. Kertgazdaság. **48**. 45-52.
- BOSIACKI, M., 2009. Phytoextraction of cadmium and lead by selected cultivars of *Tagetes erecta* L. Part II. Contents of Cd and Pb in plants. Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus. **8**. 15-26.
- DI SALVATORE, M., CARAFA, A. M., és CARRATÙ, G., 2008. Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: a comparison of two growth substrates. Chemosphere. **73**. 1461-1464.
- FARSANG, A., PUSKÁS, I., 2009. A talajok sajátosságai a városi ökoszisztémában – Szeged talajainak átfogó elemzése. Földrajzi Közlemények. **133**. 397-409.
- FILEP G., 1998. Behaviour and fate of pollutants in soil. In: Soil Pollution. (Ed: FILEP, G.), Agricultural University of Debrecen, Debrecen. 23-51.
- GHOSH, M. és SINGH, S. P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. Asian Journal on Energy and Environment. **6**. 18.
- GOSWAMI, S. és DAS, S., 2017. Screening of cadmium and copper phytoremediation ability of *Tagetes erecta*, using biochemical parameters and scanning electron microscopy–energy-dispersive X-ray microanalysis. Environmental Toxicology and Chemistry. **36**. 2533-2542.

- HORVÁTH, A., és BIDLÓ, A., 2015. Városi talajok nehézfém vizsgálatai a nyugat-dunántúli régióban (Esettanulmány). *Agrokémia és Talajtan*. **64**. 139-158.
- IGNATIEVA, M., 2010. Design and future of urban biodiversity. In: *Urban biodiversity and design* (Ed.: MULLER, N., WERNER, P., KELCEY, J. G.). John Wiley & Sons, Oxford. 118-144.
- KABATA-PENDIAS A., 2011. *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- KÁDÁR I., 1995. Környezet és természetvédelmi kutatások: A talaj-növény-állatember tápláléklánc szennyeződése kémiai elemekkel Magyarországon. A Környezet- és Területfejlesztési Minisztérium és az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete kiadványa, Budapest.
- KIRKHAM M. B., 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*. **137**. 19-32.
- KUMAR, P. N., DUSHENKOV, V., MOTTO, H. és RASKIN, I., 1995. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science & Technology*. **29**. 1232-1238.
- KUMPIENE, J., LAGERKVIST, A. és MAURICE, C., 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – a review. *Waste Management*. **28**. 215-225.
- LAL, K., MINHAS, P. S., CHATURVEDI, R. K. és YADAV, R. K., 2008. Extraction of cadmium and tolerance of three annual cut flowers on Cd-contaminated soils. *Bioresource Technology*. **99**. 1006-1011.
- LIU, J. N., ZHOU, Q. X., SUN, T., MA, L. Q. és WANG, S., 2008. Identification and chemical enhancement of two ornamental plants for phytoremediation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. **80**. 260-265.
- LIU, J., XIN, X. és ZHOU, Q., 2017. Phytoremediation of contaminated soils using ornamental plants. *Environmental Reviews*. **26**. 43-57.
- LIU, X., SONG, Q., TANG, Y., LI, W., XU, J., WU, J. és BROOKES, P. C., 2013. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis. *Science of the Total Environment*. **463**. 530-540.
- MADRID, L., DÍAZ-BARRIENTOS, E. és MADRID, F., 2002. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville. *Chemosphere*. **49**. 1301-1308.
- MÓNOK, D. és FÜLEKY, G., 2017. A talaj kadmium szennyezettségének vizsgálata angolperje (*Lolium perenne* L.) bioteszttel. *Agrokémia és Talajtan*. **66**. 333-347.
- NAGAJYOTI, P. C., LEE, K. D. és SREEKANTH, T. V. M., 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*. **8**. 199-216.
- NAKBANPOTE, W., MEESUNGNOEN, O. és PRASAD, M. N., 2016. Potential of ornamental plants for phytoremediation of heavy metals and income generation. *Bioremediation and Bioeconomy*. In: *Bioremediation and Bioeconomy* (Ed.: PRASAD, M. N. V.). Elsevier, USA. 179-217.
- OLGUÍN, E. J., és SÁNCHEZ-GALVÁN, G. (2012). Heavy metal removal in phytofiltration and phycoremediation: the need to differentiate between bioadsorption and bioaccumulation. *New biotechnology*, **30** 3-8.

- RUNGRUANG, N., BABEL, S. és PARKPIAN, P., 2011. Screening of potential hyperaccumulator for cadmium from contaminated soil. *Desalination and Water Treatment*. **32**. 19-26.
- SIMON, L., 2001. Heavy metals, sodium and sulphur in urban topsoils and in the indicator plant chicory (*Cichorium intybus* L.). *Acta Agronomica Hungarica* **49**. 1-13.
- SIMON L., 2004. Fitoremediáció. *Környezetvédelmi Füzetek*. Azonosító: 2318. BMKE OMIKK, Budapest. 1-59. old.
- SIMON L. 2014. Potentially harmful elements in agricultural soils. In: Bini, C. & Bech, J. (eds.), *PHEs, Environment and Human Health. Potentially Harmful Elements in the Environment and the Impact on Human Health*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London (ISBN 978-94-017-8964-6), pp. 85-137, 142-150.
- SZEGEDI, S., 1999. Debrecen nehézfém-szennyezettsége. *Magyar Tudomány*. **106/44**. 1192-1200.
- VAN DER ENT, A., BAKER, A. J., REEVES, R. D., POLLARD, A. J. és SCHAT, H., 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction. *Plant and Soil*. **362**. 319-334.
- WAN, X., LEI, M. és CHEN, T., 2016. Cost-benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Science of the Total Environment*. **563**. 796-802.
- WANG, X. F. és ZHOU, Q. X., 2005. Ecotoxicological effects of cadmium on three ornamental plants. *Chemosphere*. **60**. 16-21.
- WEI, B., és YANG, L., 2010. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*. **94**. 99-107.
- WU, G., KANG, H., ZHANG, X., SHAO, H., CHU, L. és RUAN, C., 2010. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities. *Journal of Hazardous Materials*. **174**. 1-8.

Assessing the phytoremediation potential of marigold species (*Tagetes* spp.) for various heavy metals using laboratory test methods

*Dávid MÓNOK, Levente KARDOS, György VÉGVÁRI

Department of Soil Science and Water Management, Faculty of Horticultural Science,
Szent István University, Budapest

Summary

Applying phytoremediation techniques for restoration of contaminated sites is a cost-effective and environmental friendly solution. According to some previous research marigolds could be able for phytoremediation of heavy metal contaminated soils, however little information is available on the toxicity of metals on these plants. In our study two different experiments (a preliminary and a pot experiment) were conducted to measure the bioaccumulation and the toxic effects of four heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn) on three different marigold species.

According to the results of the preliminary seed germination experiment French marigold (*Tagetes patula*) was the least sensitive species to the applied heavy metals, therefore this plant was used in the pot experiment. In pot experiment the plants were exposed to heavy metal doses at 0, 1, 2 and 4 times the soil contamination limit values given in Hungarian regulations. After a 120-day period of soil-plant interaction, growth parameters (shoot heights and dry masses, root heights and dry masses) and aesthetical parameters (number of leaves and flowers, and flowers diameter) were measured. Heavy metal concentration of plant shoots and test soil were determined after $\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}_2$ digestion by atomic absorption spectrometry.

According to our results French marigold is able to bioaccumulate Cd and Zn in its shoots, since 7 to 18 times more metal concentration were measured in plant shoot than in test soil. Cu were also accumulated in shoots, however the rate of bioaccumulation was decreased with increasing dose of Cu. Plant parameters were significantly decreased only at the highest dose of heavy metal treatment (except for Zn treatments) compared with control. Zn significantly decreased shoot heights, root dry masses and flowers diameter at 400 mg kg^{-1} .

Our results indicate that French marigold could be able for phytoremediation of Cd, Cu and Zn contaminated soil within the tested concentration. With the advantage that this plant can also beautify the environment, using it in urban areas (e. g. public parks, gardens or green areas along streets) has an important and practical significance.

Keywords: heavy metal, marigold, *Tagetes*, phytoremediation

Tables and figures

Table 1. Properties of the test soil. (1) Location. (2) Type of soil.

Table 2. IC₅₀ values of heavy metals on the studied plant parameters of *Tagetes* species. (1) Heavy metal. (2) Studied plant parameter. *Note: IC₅₀ values (heavy metal concentration that cause 50 % inhibition effects on plant parameters) were determined after normalization with a log-logistic dose-response model.*

Table 3. Heavy metal accumulation of French marigold (*T. patula*) due to heavy metal treatments. (1) Heavy metal. (2) Treatment. (3) Heavy metal concentration of soil. (4) Heavy metal concentration of shoot. (5) Bioaccumulation factor (6) Heavy metal uptake of plant (g/pot). *Note: Results are shown as mean±SD (n=4). Different small letter means there is a significant difference between treatments by Tukey's multiple test (P <0.05).*

Table 4. Effects of heavy metal treatments on growth parameters of French marigold (*T. patula*). (1) Heavy metal. (2) Treatment. (3) Shoot height. (4) Shoot dry matter yield. (5) Root height. (6) Root dry matter yield. *Note: See Table 3.*

Table 5. Effects of heavy metal treatments on aesthetical parameters of French marigold (*T. patula*). (1) Heavy metal. (2) Treatment. (3) Number of leaves. (4) Number of flowers. (5) Flowers diameter. *Note: See Table 3.*

Open Access nyilatkozat: A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID_1)
