

A FEHÉR FŰZ (SALIX ALBA) FEJLŐDÉSÉNEK TANULMÁNYOZÁSA KŐOLAJJAL SZENNYEZETT TALAJBAN

HORÁK RITA

1. Bevezetés

1.1. A kőolaj mint környezetszennyező anyag

A kőolaj nagy mennyiségű, növényi és állati eredetű szerves anyag oxigén-szegény környezetben való bomlásával keletkezett, különböző mikrobiológiai reakciók, nagy nyomás és magas hőmérséklet hatására. Sűrűn folyó, sötét színű, jellegzetes szagú, a víznél könnyebb, vízben nem oldódó, gyúlékony, sokféle alkotót és szennyezést tartalmazó szerves vegyületek keveréke. Legtöbbször öt vagy több C atomos telített szénhidrogének alkotják.

Az utóbbi időben a járműforgalom megnövekedett, ami nagymértékben hozzájárult a környezetszennyezéshez. A gépjárművek kipufogógázaiban a szén, ólom és a szénhidrogének mellett megtalálhatóak a benzin elégeése után visszamaradt anyagok, a nafta szénhidrogénjei és származékai. Ez utóbbiak erősen mérgező, toxikus és rákkeltő anyagokat, policiklikus aromás szénhidrogéneket képezhetnek. A szakirodalomban általában rövidítve PAH-okként szerepelnek. Közéjük sorolható több mint 100 különböző szénhidrogén, melyek két vagy több aromás gyűrűből állnak. A gépkocsik által kibocsátott PAH-emisszió értéke változó: egyrészt függ a motorok fajtájától, azaz a dízelmotorok emissziója mindig nagyobb, mint a benzinmotoroké, de jelentősen kihat a szennyezés mértékére az üzemanyag minősége, a motor hőmérséklete és a motor állapota (elhasználtsága) is. A PAH-okat egyes növények (fitoremediáció) vagy mikroorganizmusok (bioremediáció) képesek eltávolítani a talajból, vízből és a levegőből, vagy kevésbé veszélyes vegyületekre bontani.

1.2. A kőolajszármazékok felhalmozódása a növényekben

Az utóbbi időben mind sürgetőbbé vált egy olyan technológiának a létrehozása, amely lehetővé teszi a környezetben felhalmozódott kőolajszármazékok mennyiségének csökkentését vagy lebontását, további elvárás, hogy az eljárás alacsony költségvetésű és egyszerűen kivitelezhető legyen. A fitoremediáció eleget tesz ezeknek a feltételeknek, hiszen a növények a gyökérvadadékok segítségével a veszélyes vegyületeket lebontják, nem toxikus vagy kevésbé veszélyes formába alakítják. Ezt számos kutatás támasztotta alá. A retek és a lucerna

57–90%-kal csökkenti a szennyezett talaj kerozinmennyiségét (Karthikeyan et al. 1999: 243–256). Komisar és Park (1997: 331–336) lucernával végzett kísérletei 80%-os eredményességgel csökkentették a dízelüzemanyagok okozta szennyeződést a talajban. Palmroth et al. (2002: 221–228) a fűfélék gyökerében kimutatták a dízelszármazékok felhalmozódását és bizonyították, hogy ezek a növények, valamint a leguminózák és a nyárfa is képesek a dízellel szennyezett talajon fejlődni. Aprill és Sims (1990: 253–265) megfigyelték, hogy a PAH-vegyületek degradációja gyorsabb a füves területeken, mint a parlagon hagyottakon. A nyárfa és a kőris az acenaftén, antracén, fluorantén, naftalin és a fenantrén mennyiségét csökkentették szignifikáns mértékben (Maila et al. 2005: 87–98).

1.3. Fitoremediáció

A fitoremediáció elnevezés a görög fiton – növény és a latin remediare – orvosol, helyrehoz szavak kombinációja. A fitoremediáció olyan módszer-együttes, amely lehetővé teszi, hogy növények (és a környező mikroorganizmusok) segítségével csökkentsük a környezetben (talaj, víz) felhalmozódott szennyező anyagok mennyiségét. Több csoportba oszthatjuk:

- fitoextrakció – a szennyező anyagok felvétele a környezetből és tárolása a növényekben (fitoakkumuláció),
- rizodegradáció – a szennyező anyagok lebontása a gyökérszónában (mikroorganizmusok segítségével),
- fitodegradáció – szennyező anyagok felvétele a környezetből, majd lebontása a növényben,
- fitovolatilizáció – a növények a szennyező anyagokat, még a fémszennyezőseket is (Hg, As, Se) képesek illékony, nem mérgező vegyületekké alakítani és a légterbe juttatni,
- fitostabilizáció – az anyagok mozgásának, ill. szállításának csökkentése a környezetben (a szennyezett talajból a szennyező anyagok csurgalékvízbe kerülésének korlátozása),
- gyökérszűrés – mérgező fémek eltávolítása a talajvízből.

1.4. A fűzek szerepe a fitoremediációban

A *Salix* nemzetség, a *Salicaceae* család egyik tagja, széles körben elterjedt, mintegy 600 fajt ölel fel. Fás szárú, cserje- vagy fatermetű, lombhullató, kétlaki évelő növény. Kérge eleinte sima, később mély, hosszanti barázdákkal felrepedezik. Ágaik és hajtásaik vékonyak, hajlékonyak és hosszúak. Levelük vékony, vége éles, a levélnyel általában rövid, a levéllemezek lándzsa vagy tojásdad alakú, szélük ép, enyhén fűrészelt vagy hullámos. Egyivarú barkavirágai nagyon egyszerűek, a virágtakaró hiányzik. Leggyakrabban folyók, tavak mellett vagy árterületeken élnek. Jól ellenállnak a téli fagyoknak is. Jelentős

hibridizációs képességüknek köszönhetik fajgazdagságukat, de számos alfajjal interspeciális és intraspeciális hibriddel keresztezett változatai is vannak. Jellemző rájuk, hogy viszonylag könnyen szaporíthatóak vegetatív úton is, valamint, a nagy genetikai potenciál és a gyors növekedés folytán rövid idő alatt nagy biomasszát hoznak létre. A *Salicaceae* családnál a szerves vegyületek felszívódását Patterson és Schnoor (1992: 274–283) figyelték meg, míg mások a fémek és egyéb szennyező anyagok csökkenését állapították meg a fűzek jelenlétében, a túlműtrágyázott mezőgazdasági területeken (Greger–Landberg 1998: 505–601, Östmann 1994: 153, 156), szennyvízzel terhelt területeken (Hasselgren 1998: 71–74) és a különböző radiónukleotidokkal szennyezett helyeken (Vandenhove et al. 2001: 157–184). Az etanol és a benzén felszívódását Patterson és Schnoor (1992: 274–283) állapították meg a *S. babylonicanál*. A nehézfémek felhalmozódásának fő helye a szár, ezt Punshon és Dickinson (1997: 285–292) bizonyították, amikor kétszeres Cd mennyiséget mértek a fűzfa szárában a levélhez viszonyítva. A *S. cinerea* fajról megállapították, hogy vizes területen kisebb mennyiségben képes eltávolítani a talajból a kadmiumot és a cinket, mint a száraz területekről (Vandecasteele et al. 2004), valamint, eredményesebben akkumulálja a fent említett elemeket, mint más erdei növények (Vandecasteele et al. 2002, 2003). Maila et al. (2005) kimutatták, hogy a fűzek jelenlétében, nem szignifikáns mértékben ugyan, de csökken a naftalén, fenantrén és a PAH-vegyületek mennyisége. Ezek a kísérletek és mérések alapján feltételezhetjük, hogy a különböző fűzfaklónok eredményesen használhatóak a nafta eltávolításakor is.

2. Célkitűzés

A kísérlet célja, hogy megállapítsuk, miként hat ki a különböző koncentrációjú kőolajjal szennyezett talaj a fűzfaklónok (SA/I/1, SA/H/1 és SA/K/1) morfológiai és fiziológiai jellemzőire. A kapott eredmények alapján meg kell határoznunk, melyik klón használható legeredményesebben fitoremediációra, azaz, azt a genotípust, amelynek a legnagyobb a szerves anyag termelése, stabilitása, biomasszája, mindemellett nagy mennyiségben képes a talajból eltávolítani a kőolajat és a kőolajszármazékokat.

3. Módszerek

A fehér fűz (*Salix alba*) három klónjának (SA/I/1, SA/H/1, SA/K/1) hajtásait különböző kőolaj-koncentrációt tartalmazó tenyészedényekben neveltük az üvegházban, félig ellenőrzött körülmények között. Hat kezelést alkalmaztunk, melyekben az ásványi olaj és a szénhidrogének mennyiségét változtattuk (1. táblázat).

1. táblázat
A szénhidrogének és a nyersolaj koncentrációja a szupsztrátban

Kezelés	Nedvesség (%)	Össz szénhidrogén, mg/kg	Ásványi olaj, mg/kg
I.	3,25	20,83	5,12
II.	0,26	76,88	54,87
III.	0,28	812,96	571,80
IV.	0,44	6046,60	3769,00
V.	0,43	9311,70	5370,00
VI.	0,42	10841,60	6174,00

A kísérlet során lemértük a klorofill fluoreszcenciáját és meghatároztuk a fotoszintézis intenzitását Clark-elektrodák segítségével (Walker 1987: 145), mely szerint a fotoszintézis/légzés intenzitása egyenlő az elektrodában keletkezett/abszorbeált oxigén mennyiségével. A fotoszintézis és a légzés intenzitása $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2\text{s}$.

A fotoszintetikus pigmenteket acetonnal vontuk ki a levélből, majd mennyiségüket spektrofotométerrel határoztuk meg. Az eredményeket Wettstein (1957: 427–433) szerint számoltuk és mg/g-ban fejeztük ki. A fluoreszcenciát PMS fluoriméterrel, BioMonitor és AB segítségével mértük le.

Százhusz nap után meghatároztuk a növények föld feletti részének friss biomasszáját és a levél felszínét Li-Cor LI 3000 szerkezettel. Ezek után 50–60 °C-on elvégeztük a levelek és a hajtások súlyállandóságig tartó szárítását.

Az adatokat MS Excell és MstatC programokkal dolgoztuk fel.

4. Eredmények

4.1. A nafta hatása a növények növekedésére és a biomasszára

Mint már kifejtettük, a kőolaj és a kőolajszármazékok negatívan hatnak a környezetünkre. A kísérletben a negativitás foka az alkalmazott kőolaj koncentrációjától, de a növény genotípusától is függött. Kivizsgáltuk a levelek számát, súlyát (friss), a hajtások súlyát, a levelek felszínét, a friss és szárított biomasszát.

A levelek számának változását azért érdekes megfigyelni, mert információt szolgáltat nem csupán a mérgezés, illetve az ellenálló képesség fokáról, hanem – mivel bennük játszódik le a fotoszintézis – azért is, kihat e folyamat mértékére és sikerességére, ezáltal a növény biomasszájára is. A kísérletben megfigyeltük, hogy ha a talajban növeljük a kőolaj koncentrációját, az a levelek

számának csökkenését okozza (2. táblázat). Az SA/K/1 klónnál számoltuk meg a legtöbb levelet (a második kezelés esetében). Az eredmény szignifikáns volt, amikor összevetettük a többi kezelés hatásával. Ha a klónokat vetjük össze, hasonló következtetésre jutunk. Ez esetben is az SA/K/1 klónnál figyelhetjük meg a szignifikáns növekedést.

2. táblázat

A levelek számának változása a talajban jelen levő kőolaj hatására (db)

A levelek száma							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	30 cd	38 bc	16 h	17 gh	29 cde	23 defgh	26 b
SA/H/1	30 cd	27 defg	19 fgh	20 efgh	27 defg	17 h	23 b
SA/K/1	43 b	56 a	27 def	37 bc	28 cdef	21 defgh	36 a
Átlag	34 a	40 a	21 c	25 bc	28 b	20 c	

Hogy átfogó képet kapjunk a fotoszintézisről, fontos volt meghatározni a levelek súlyát és felszínét. A levelek nyers súlyának lemerésekor nem állapítottunk meg statisztikailag jelentős különbséget a fűzfaklónok között, viszont mindegyiknél megfigyelhető volt a kőolaj negatív hatása, azaz, a vizsgált paraméterek csökkenése. A SA/I/1 klónnál a II. kezelés szignifikánsan megnövelte a levélsúlyt, míg a SA/H/1 és SA/K/1 klónoknál a kisebb kőolaj-koncentrációk alkalmazásakor rosszabb eredményeket kaptunk, mint amelyet megfigyelhettünk az V. és VI. kezelés esetében (3. táblázat).

A szárítás utáni súly lemerésekor is hasonló eredményeket figyeltünk meg, azaz a klónok között a kísérlet végén átlagosan nincs statisztikailag jelentős különbség. Átlagosan a legkisebb száraz levélsúlyt a SA/K/1, a legnagyobbat az SA/H/1 klónnál állapítottuk meg. Figyelembe véve a kapott eredményeket lezögezhetjük, hogy a kőolaj a levél súlyára is negatívan hat. Hasonló következtetésre jutott Palmroth (et al. 2002: 221–228), amikor a kőolaj hatását figyelte meg a fűveken és a leguminózákon.

3. táblázat

Különböző kőolaj-koncentrációk hatása a levelek súlyára (g)

A levelek (friss) súlya							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	4,350 abc	6,003 a	1,450 e	1,397 e	2,760 cde	2,667 cde	3,104 a
SA/H/1	5,480 ab	4,257 abc	1,357 e	1,603 de	2,893 cde	1,923 de	2,919 a
SA/K/1	4,350 abc	3,597 bcd	1,133 e	2,083 de	1,853 de	1,133 e	2,358 a
Átlag	4,727 a	4,619 a	1,313 b	1,694 b	2,502 b	1,908 b	

Szárított levélsúly							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	1,137 bc	1,910 a	0,497 de	0,463 de	0,853 bcde	0,857 bcde	0,953 a
SA/H/1	1,903 a	1,357 ab	0,453 de	0,567 cde	0,973 bcd	0,653 cde	0,984 a
SA/K/1	1,350 ab	1,003 bcd	0,347 e	0,637 cde	0,610 cde	0,320 e	0,711 a
Átlag	1,463 a	1,423 a	0,432 c	0,556 bc	0,812 b	0,610 bc	

A fotoszintézis sikerességére kihat a levél felszíne is. Átlagosan nézve, e paraméter megfigyelésekor sem mértünk szignifikáns különbséget a fűzfaklónok között. Megállapítottuk, hogy a nafta koncentrációjának növekedése a levelek felszínének szignifikáns csökkenését idézték elő (4. táblázat). Csak az SA/I/1 klónnál figyelhető meg a levél felszínének fokozódása a II. kezelés eredményeképpen, viszont ez a növekedés statisztikailag jelentéktelen.

4. táblázat

A különböző kőolaj-koncentrációk hatása a levél felszínének nagyságára (cm²)

Levélfelszín							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	251,39 a	263,07 a	79,92 ef	65,93 ef	120,80 cde	128,86 cde	151,66 a
SA/H/1	229,40 ab	179,20 bc	55,49 ef	78,54 ef	82,50 ef	94,93 def	120,01 ab
SA/K/1	227,98 ab	165,24 bcd	35,69 f	76,31 ef	26,57 f	55,22 ef	97,84 a
Átlag	236,26 a	202,50 a	57,03 b	73,60 b	76,62 b	93,00 b	

A füzek morfológiai és fiziológiai változásainak megállapítására fontos volt megfigyelnünk a hajtások súlyát is. Amennyiben a kőolaj jelenlétében csökken a hajtások súlya, az mérgezésre, azaz fitotoxikusságra utal. A kísérlet végén a klónok között nem állapítottunk meg szignifikáns különbséget. Minden esetben a kőolaj koncentrációjának növelése a hajtások súlyának szignifikáns csökkenését okozta, kivételt képez az SA/I/1 klón esetében, ahol a II. kezelés pozitívan hatott a megfigyelt paraméterre (5. táblázat).

5. táblázat

A különböző kőolaj-koncentrációk hatása a hajtások súlyára (g)

A hajtások súlya							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	4,260 bc	7,140 a	1,030 efg	1,000 efg	2,577 de	1,960 efg	2,994 a
SA/H/1	4,007 cd	4,317 bc	0,673 g	0,857 fg	2,217 efg	1,273 efg	2,224 a
SA/K/1	5,770 ab	5,380 bc	1,220 efg	1,397 efg	2,473 def	1,357 efg	2,933 a
Átlag	4,679 a	5,612 a	0,974 c	1,084 c	2,422 b	1,530 bc	

A fitoremediációra szánt klón kiválasztásakor fontos volt tudnunk, miként reagált a növény (klón) biomasszája a szennyezőanyagra. Az a klón a legellenállóbb, amelyiknél a biomassza állandó marad, vagy csak minimálisan csökken. A kísérlet során mind a friss, mind a szárított biomasszát lemértük. A nyers súly lemérése után megállapítottuk, hogy a fűzfaklónok között nincs statisztikailag jelentős különbség. Átlagosan nézve a legnegatívabb hatást a III. és IV. kezelés váltotta ki. Az SA/I/1 klónnál megállapítható a szignifikáns biomassza növekedése a II. kezelés hatására. A szárított biomassza mérésekor hasonló eredményeket kaptunk, azaz, nincs statisztikailag jelentős különbség a három klón között. Most is a legkifejezettebb biomassza-csökkenést a III. kezelés váltotta ki. Kisebb kőolaj-koncentrációk esetén az SA/I/1 klón reagált és állt ellen eredményesen a szennyezésnek, mert a másik két klónnal összevetve szignifikáns biomasszát hozott létre (6. táblázat). Méréseink eredményei meg-egyeznek Pamroth et al. (2002: 221–228) kísérleteinek eredményeivel, amikor kőolaj jelenlétében a füveknél (*Festuca rubra*, *Poa pratensis*, *Lolium perenne*) és leguminózáknál (*Trifolium repens*, *Pisum sativum*) biomassza-csökkenés volt megfigyelhető. Eltérő következtetésre jutott Hutchinson et al. (2001: 1516–1523) a petróleum hidrokarbonokkal végzett kísérletek során, amikor a biomassza-növekedést állapították meg a magasabbrendű növényeknél.

6. táblázat
A nafta hatása a friss és száraz biomasszára (g)

Biomassza							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	6,983 cd	13,15 a	2,293 fg	2,393 fg	5,333 de	4,623 def	5,796 a
SA/H/1	9,217 bc	8,573 bc	1,683 g	2,460 fg	5,113 def	3,197 efg	5,041 a
SA/K/1	10,12 b	8,977 bc	2,353 fg	3,763 efg	3,887 efg	2,490 efg	5,265 a
Átlag	8,773 a	10,23 a	2,110 c	2,872 c	4,778 b	3,437 bc	
Szárított biomassza							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	3,173 bc	5,047 a	0,817 e	0,930 de	2,187 cd	1,840 de	2,332 a
SA/H/1	4,25 ab	3,337 bc	0,907 de	0,973 de	2,100 cde	1,217 de	2,131 a
SA/K/1	4,14 ab	3,567 b	0,937 de	1,610 de	1,623 de	1,050 de	2,154 a
Átlag	3,853 a	3,983 a	0,887 c	1,171 bc	1,970 b	1,369 bc	

4.2. A kőolaj hatása a fotoszintézisre

4.2.1. A fotoszintézis és a légzés intenzitása

A fotoszintézis bonyolult folyamat, mely során a nap energiája kémiai energiává alakul át, amit a növények szerves anyagok előállítására használnak, melléktermékként pedig oxigént szabadítanak fel. A fotoszintézis intenzitása azzal, hogy meghatározza a szerves anyagok mennyiségét, kihat a növények fejlődésére és növekedésére is. A fotoszintézis átlagos intenzitását vizsgálva a fűzfaklónok között nem figyeltünk meg jelentős eltérést. A kezelések hatását összevetve megállapíthatjuk, hogy az I., II., VI. kezelés jelentős mértékben megnövelte a fotoszintézis intenzitását. Az SA/H/1 klónnál megfigyelhető a szignifikáns növekedés, amikor a II. és a VI. kezelés hatott rá, azonban ez nem váltotta ki a biomassza megnövekedését, amit a légzés intenzitásának fokozódásával magyarázható, mely során a szerves anyagok lebontódtak. Hasonló következtetésre jutott Sudhakar et al. (2001: 1351–1358), amikor megállapították, hogy a nehézfémek és a PAH-vegyületek együtthatása a fotoszintézis intenzitásának megnövekedését váltja ki. Eltérő eredményeket kapott Kusk (1978: 1–6) a *Nitzschia palea* nevű fajnál, amikor a fotoszintézis inhibícióját figyelte meg naftalén, benzén és nyersolaj jelenlétében. A fotoszintézis intenzitása mellett fontos meghatározni a légzés intenzitását is, hogy megállapíthassuk, mely klón a legalkalmasabb a kőolajjal szennyezett területek megtisztítására. Ha a légzés intenzitása megnövekszik, az előidézi a szerves anyagok gyors ütemű lebontódását. Mindemellett a légzés fokozódása utalhat a növény

mérgezésére is (fitotoxikusság). A legnagyobb intenzitást az SA/H/1 klónnál figyeltük meg, az érték statisztikailag jelentős az SA/I/1 klónnál mérthez képest. Átlagosan nézve a legnagyobb légzésintenzitás minden klónnál a II. és a VI. kezelés hatása alatt figyelhető meg. A legkisebb ingadozás az SA/I/1 klónnál tapasztalható, ami azt jelenti, hogy ez a klón áll ellen a legjobban a kőolaj mérgező hatásának. Mivel a megnövekedett légzés a szerves anyagok mennyiségének a csökkenését váltja ki, fontos, hogy ez a paraméter minél stabilabb, illetve alacsonyabb maradjon. Eredményeink eltérnek Duxbery et al. (1997: 1739–1748) kutatásainak eredményeitől, aki megállapította, hogy a PAH-vegyületek a fotoszintézis és a légzés intenzitásának a csökkenését idézik elő.

4.2.2. A nafta hatása a pigmentek mennyiségére

4.2.2.1. A nafta hatása a klorofill mennyiségére

A fotoszintézis során a fényenergiát speciális pigmentek gyűjtik be, mint amilyen a klorofill a, b és a karotenoidok. A fitoremediációra legalkalmasabb klón kiválasztásakor tudnunk kell, miként változik a pigmentek mennyisége a különböző fehérfűz-klónoknál, hiszen, ha sérül a fotoszintetikus szerkezet, akkor a szerves anyagok mennyisége is csökken, ami a biomassa csökkenését is előidézi. A friss növényi anyagban a legnagyobb klorofillkoncentrációt az I. kezelés, azaz a legkisebb kőolaj-adagolás mellett figyeltük meg, míg a VI. kezelés váltotta ki a pigmentek legszámottevőbb csökkenését. Ha a kísérlet végén összevetjük a klónokat, megállapíthatjuk, hogy az SA/K/1 klónnál a pigmentek koncentrációja jelentősen több, mint a másik két esetben, mégsem mondhatjuk, hogy ez a klón ellenálló lenne a kőolaj káros hatásainak, mert ezt a nagy mennyiséget csak a kontrollnövényben mért, eredetileg is nagy számú pigmentjeinek köszönheti. Stabilnak és ellenállónak mutatkozott azonban a másik két klón (SA/I/1 és SA/H/1), így a vizsgált paraméter alapján ezek a legalkalmasabbak a fitoremediációra. A kapott eredményeket átszámítottuk a szárított anyagokra is, és ugyanerre a következtetésre jutottunk.

4.2.2.2. A nafta hatása a klorofill b mennyiségére

A klorofill b az anetena pigmentek közé tartozik, a fény összegyűjtését végzi, ezért jelentős szerepe van a fotoszintézisben. Az SA/K/1 klónnál állapítottuk meg a klorofill b-t a legnagyobb mennyiségben, de most is, mint a klorofill a esetében, nem ez a fűzfaklón mutatkozott a legstabilabbnak. Az eredmények arra utalnak, hogy a fitoremediációra az SA/I/1 klón a legalkalmasabb, hiszen ennél mértük le a klorofill b mennyiség legkisebb ingadozását. Eredményeink részben megegyeznek Kummerová et al. (2006: 489–496) *Pisum sativum*on végzett méréseivel, amikor a klorofill b mennyiségének a csökkenését állapította meg fluorantrén jelenlétében, miként mi is az SA/K/1 klónnál. A kapott

eredményeket átszámoltuk a szárított levél egységnyi területére és ez esetben is a legellenállóbbnak az SA/I/1 klón bizonyult.

4.2.2.3. A friss és szárított növény klorofill a/b tartalmának változása a kőolaj mennyiségétől függően

A klorofill a/b mennyiségi viszonya a fotoszintézis szempontjából szintén nagyon fontos. Az arány megváltozása kihat a fotoszintézisre, annak sikerességére, ezen keresztül pedig a biomasszára is. Meg kellett tehát állapítanunk, mely növényeknél marad e két pigmentnek állandó a viszonya. Méréseink során a legnegatívabb hatást a VI. kezelés idézte elő mindhárom fűzfaklónál. A kísérlet során jelentős csökkenést figyeltünk meg az SA/K/1 klónnál, annak ellenére, hogy ennél a növénynél mértük a legnagyobb értékeket legkisebb koncentrációk esetén. A kőolaj káros hatását legjobban az SA/I/1 és SA/H/1 klónok viselték el, ezeknél mutatkozott a legnagyobb stabilitás, ezért e paraméter alapján a legalkalmasabbak a fitoremediációra. Eredményeinket átszámítottuk a szárított levél egységnyi felületére, és hasonló eredményeket kaptunk. Ez esetben az SA/I/1 klón mutatkozott a legellenállóbbnak.

4.2.2.4. A karotenoidok mennyiségének változása kőolaj jelenlétében

A sárgás-narancssárgás színű karotenoidok, ahogy a klorofill b is, a kísérő pigmentek közé tartoznak, s így fontos szerepük van a fotoszintézisben. Méréseink során megállapítottuk, a legnagyobb koncentrációban adagolt nafta (VI. kezelés) váltotta ki a legjelentősebb csökkenést, a legnegatívabb hatást. A karotenoidok szignifikáns csökkenését az SA/K/1 klónnál figyeltük meg. A legstabilabbnak, a legellenállóbbnak is az SA/H/1 klón mutatkozott. A kapott értékeket átszámítottuk a szárított levél egységnyi felületére is. Ez esetben is az SA/K/1 klónnál volt megállapítható, statisztikailag jelentős a karotenoid csökkenése, míg a stabilitás az SA/H/1 és SA/I/1 fűzfaklónoknál figyelhető meg.

4.2.3. A klorofill fluoreszcenciájának változása kőolaj hatására

Ahhoz, hogy a fotoszintézis határfokát megértsük, fontos volt lemérnünk a klorofilok fluoreszcenciáját. A növényt ért stressztényezők befolyásolják a fotoszintézist, mely pl. a klorofill fluoreszcencia időbeli mérésével vizsgálható. Miután a PS II abszorbeálja a fényt, a keletkezett energia egy részét saját aktivitására használja fel: a fotokémiai munka (80%) 17% hővé alakul, 3% pedig fluoreszcencia formájában távozik (Arsenijević–Pajević 2002: 119–188). Amennyiben eltérés mutatnak a fenti értékek, akkor az a fotoszintézis gátlására (inhibíció), vagy a fotoszintetikus elektrontranszport-láncon bekövetkezett károsodásra utal. A kísérletben mindhárom vizsgált növénynél a VI. kezelés hatott legnegatívabban (7. táblázat). Az SA/K/1 klónnál károsodott legjobban

a fotoszintézis folyamata, összevetve a másik két klónnal statisztikailag jelentős fluoreszcenciacsökkenést tapasztaltunk. A kapott eredmények arra utalnak, hogy az SA/I/1 klón áll legjobban ellen a nafta károsító hatásának, itt a legkisebb az ingadozás.

7. táblázat
A fluoreszcencia változása kőolaj jelenlétében

Fluoreszcencia							
Klón/Kez.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Átlag
SA/I/1	7,213 abcd	7,578 ab	7,500 ab	7,560 ab	7,247 abc	6,937 cd	7,339 a
SA/H/1	7,553 ab	7,623 a	7,287 abc	7,447 ab	7,092 bcd	6,393 e	7,232 a
SA/K/1	7,440 abc	7,153 abcd	6,723 de	6,267 ef	6,247 ef	5,883 f	6,619 b
Átlag	7,402 ab	7,451 a	7,170 abc	7,091 bc	6,862 c	6,404 d	

5. Összefoglalás

A kísérlet során a következőket állapítottuk meg:

- a fűzfaklónok különbözőképpen reagáltak a táptalajban jelen levő kőolajra, a reakció függött a genotípustól és a szennyezőanyag koncentrációjától is,
- a levelek száma a kőolaj koncentrációjának növekedésével csökkent, átlagosan az SA/K/1 klónnál figyeltük meg a legnagyobb csökkenést,
- a levelek súlya és felszíne, valamint a hajtások súlya is csökkent a kőolaj jelenlétében. Az SA/I/1 klónnál kisebb kőolaj-koncentráció jelenlétében a vizsgált paraméterek normális, sikeres fejlődését tapasztaltuk,
- a kísérlet végén nem állapítottunk meg jelentős különbséget a növények biomasszájának mérésekor, azonban az SA/I/1 klón a II. kezelés (kisebb kőolaj-koncentráció) hatására szignifikáns növekedést mutatott,
- a fotoszintézis intenzitása jelentősen megnőtt az SA/H/1 klón esetében (II. és VI. kezelés), azonban ez nem hatott ki a biomassza növekedésére,
- a legnagyobb légzésintenzitást az SA/H/1 klónnál mértük le, ami stresszre utal,
- a klorofill a/b mennyisége az SA/K/1 klónnál volt a legnagyobb, azonban csak az SA/I/1 klónnál tapasztaltuk ennek a pigmentnek a növekedését, még a legnagyobb kőolaj-koncentráció mellett is,
- a klorofill a/b mennyisége az SA/K/1 klónnál jelentősen több volt, mint az SA/I/1 és az SA/H/1 klónoknál, ezek jobban elviselték a táptalajban lévő magas kőolaj-koncentrációt is,
- a karotenoidok mennyisége az SA/I/1 és az SA/H/1 klónoknál állandó volt a különböző kőolaj-mennyiségekkel szemben is,
- a fluoreszcencia mérésekor az SA/I/1 klón mutatkozott a legstabilabbnak.

Figyelembe véve a kapott eredményeket, leszögezhetjük, hogy a vizsgált három fűzfaklón közül SA/I/1 a legalkalmasabb a kőolajjal szennyezett talajok megtisztítására, mivel, amikor ez a szennyező anyag kisebb koncentrációban volt jelen a táptalajban, akkor megfigyeltük a levelek súlyának, a hajtásoknak, a levél felszínének és a biomasszájának a növekedését is, a fotoszintézis és a légzés intenzitása stabil volt, a klorofill a, b, a klorofill a/b és karotenoidok mennyisége magas és viszonylag stabil volt, eltekintve az adagolt kőolaj-koncentrációktól. A legkisebb változások a klorofill fluoreszcenciájának mérésekor és a nitrát-reduktáz aktivitásában is ennél a klónnál figyelhetők meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- Aprill, W. – R. C. Sims 1990. Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil. *Chemosphere* 20: 253–265.
- Arsenijević-Maksimović, I. – S. Pajević 2002. *Praktikum iz fiziologije biljaka*. Verzal Press, Novi Sad, 119–188.
- Arsenijević-Maksimović, I. – S. Pajević 2002. *Praktikum iz fiziologije biljaka*. Verzal Press, Novi Sad, 119–188.
- Duxbury, C. L. – D. G. Dixon – B. M. Greenberg 1997. Effects of simulated solar radiation on the bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by the duckweed *Lemna gibba*. *Environmental Toxicology and Chemistry* 16: 1739–1748.
- Greger, M. – T. Landberg 1998. Use of willow clones with high Cd accumulation properties in phytoremediation of agricultural soils with elevated Cd levels. In: R. Prost., ed. 1988. *Contaminated soils*. Paris, France: INRA, Les Colloques no 85. 505–601.
- Hasselgren, K. 1998. Use of municipal waste products in energy forestry: highlights from 15 years of experience. *Biomass and Bioenergy* 15: 71–74.
- Hutchinson, L. S. – A. P. Schwab – M. K. Banks 2001. Phytoremediation of aged petroleum sludge: Effects of irrigation techniques and scheduling. *Journal of Environmental Quality* 30: 1516–1523.
- Karthikeyan, R. – L. C. Davis – K. R. Mankin – L. E. Ericson – P. A. Kulaknow 1999. Biodegradation of Jet Fuel (JP-8) in the presence of vegetation. In: *Proceedings of the 1999 Conference on Hazardous Waste Research*. St. Louis, Missouri, May 24–27, 1999. 243–256.
- Komisar, S. J. – J. Park 1997. Phytoremediation of diesel-contaminated soil using alfalfa. In: *Fourth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium* Vol. 3. April 28-May 1, 1997, New Orleans, LA. 331–336.
- Kummerová, M. – J. Krulova – Š. Zezulka – J. Tříška 2006. Evaluation of fluoranthene phytotoxicity in pea plants by Hill reaction and chlorophyll fluorescence. *Chemosphere* 65: 489–496.
- Kusk, K. O. 1978. Effects of Crude Oil and Aromatic Hydrocarbons on the Photosynthesis of the Diatom *Nitzschia palea*. *Physiologia Plantarum* 43: 1–6.
- Maila, M. P. – P. Randima – T. E. Cloete 2005. Multispecies and monoculture rhizoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from the soil. *International Journal of Phytoremediation* 7: 87–98.

- Östmann, G. 1994. Cadmium in Salix – a study of the capacity of Salix to remove cadmium from arable soils. In: Aronsson, P. – K. Perttu eds., 1994. *Willow Vegetation Filters for Municipal Wastewaters and Sludges: A Biological Purification System*. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet. 153–156.
- Palmroth, M. R. T. – J. Pichtel – J. A. Puhakka 2002. Phytoremediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel. *Bioresource Technology* 84: 221–228.
- Patterson, K. G. – J. L. Schnoor 1992. Fate of alachlor and atrazine in a riparian zone field site. *Water Environment Research* 64: 274–283.
- Punshon, T. – N. M. Dickinson 1997. Mobilisation of heavy metals using short rotation coppice. *Aspects of Applied Biology* 49: 285–292.
- Vandecasteele, B. – B. De Vos – F. M. G. Tack 2002. Cadmium and zinc uptake by volunteer willow species and elder rooting in polluted dredged sediment disposal site. *Science of the Total Environment* 299: 191.
- Sudhakar, B. T. – J. B. Marder – S. Tripuranthakam – D. G. Dixon – B. M. Greenberg 2001. Synergistic effects of a photooxidized polycyclic aromatic hydrocarbon and copper on photosynthesis and plant growth: Evidence that in vivo formation of reactive oxygen species is a mechanism of copper toxicity. *Environmental toxicology and chemistry* 20: 1351–1358.
- Vandecasteele, B. – R. Lauriks – B. De Vos – F. M. G. Tack 2003. *Cd and Zn concentration in hybrid poplar foliage and leaf beetles grown on polluted sediment-derived soils. Environmental Monitoring and Assessment*. In press.
- Vandecasteele, B. – P. Quqtert – F. M. G. Tack 2004. *The effects of hydrological regime on the bioavailability of Cd, Mn and Zn for the wetland plant species Salix cinerea. Environmental Pollution*. In press.
- Vandenhove, H. – Y. Thirty – A. Gommers – F. Goor – J. M. Jossart – E. Hočm – T. Gäufer – J. Roed – A. Grebenkov – S. Timofeyev 2001. Short rotation coppice for revaluation of contaminated land. *Journal of Environmental Radioactivity* 56: 157–184.
- Walker, D. A. 1987. *The Use of the Oxygen Electrode and Fluorescence Probes in Simple Measurements of Photosynthesis*. Oxygrafics Limited, University of Sheffield Print Unit. 145.
- Wettstein, D. 1957. Chlorophyll-letale und submikroskopische formwechsel der plastiden. *Experimental Cell Research* 12: 427–433.

*Ispitivanje rasta različitih klonova bele vrbe (Salix alba)
na naftom kontaminiranim zemljištima*

RITA HORAK

U radu je ispitan uticaj različitih koncentracija nafte na morfo-fiziološke karakteristike klonova bele vrbe (SA/I/1, SA/H/1, SA/K/1). Uticaj nafte zavisio je od primenjene koncentracije u hranjivom medijumu kao i od genotipa. Utvrđeno je smanjenje broja listova, mase listova i izbojaka, smanjenje površine listova i ukupne biomase kao i sadržaja ukupnog hlorofila i karotenoida kod svih klonova. U odnosu na kontrolnu grupu biljaka, intenzitet disanja i fotosinteze je bio povećan kod svih klonova, ali ovo povećanje nije bilo statistički značajno. Fluorescencija hlorofila se smanjila kod svih

klonova sa povećanjem koncentracije nafte. Između klonova nije detektovana statistički značajna razlika u aktivnosti nitrat-reduktaze. Sagledavanjem dobijenih rezultata došlo se do zaključka da je klon SA/I/1 najpodesniji za remedijaciju.

*Investigation of growth of white willow (Salix alba)
clones on crude oil contaminated soils*

RITA HORÁK

This work examines the influences of different concentrations of crude oil on the morphological-physiological features of willow clones. The effects of crude oil depended on the concentration of crude oil in the soil as well as on the genotype. We observed a setback in the quantity of leaves, the mass of leaves and roots, the surface of the leaves and in the total biomass, and what is more, a decrease in the amount of total chlorophyll, chloroplast and carotenoid in case of all clones. Regarding the control plants the intensity of breathing and photosynthesis increased with every clone but this increase was not statistically significant. With the increase of the crude oil concentration the fluorescence of chlorophyll decreased in case of all clones. Based on the obtained results the conclusion is that the clone identified as SA/I/1 is the best suited for fitoremediation.