

A gyökér stabilitásának vizsgálata statikus és dinamikus dőlésméréssel, valamint a gyökérzet vizsgálatával

BUZA Ágnes Kinga¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratórium

Kivonat

A városias környezetben lévő fák biztonságossága fontos kérdés. Kár keletkezhet többek között a fa tövestül kifordulásakor, aminek az esélye a gyökérzet stabilitásától függ. Ennek vizsgálatára jelenleg egyetlen, kellőképpen megbízható eredményeket adó mérési módszer ismeretes, a dőlésmérési húzóvizsgálat. Munkánk célja a húzóvizsgálat kiváltása más, új mérésekkel, illetve a kiválthatóság vizsgálata volt. Két módszert vizsgáltunk. Az egyikben a dőlésmérőt és a húzó acélkötelet helyettesítettük lézeres elmozdulás-méréssel illetve széléréssel. A másik módszer a gyökérzet feltérképezése. A lézeres elmozdulás-mérés megfelelőnek bizonyult, helyettesítheti a nagyobb tehetetlenségű dőlésmérési eljárást. A szélben történő mérés szabadon álló fák esetében helyettesítheti a húzóvizsgálatot. A gyökértérképezés sikeres volt, azonban a számított eredmények a húzóvizsgálathoz képest konzisztensen alacsonyabbak lettek, ezért ez a módszer még finomításra szorul.

Kulcsszavak: dőlésmérés, húzóvizsgálat, fák stabilitása, dinamikus stabilitásvizsgálat, statikus stabilitásvizsgálat, biztonsági faktor, gyökértérképezés

Static and dynamic root stability evaluations with inclinometer, and the examination of the roots

Abstract

The safety of the trees in urban areas is an important topic. Among others, one of the safety risks is the uprooting of the tree. The chance of uprooting depends on the stability of the roots. Currently, there is only one method, the inclino-type pulling test, that brings sufficiently reliable information to evaluate the stability of the roots. The aim of the work was to develop other measuring systems for the evaluation of root stability, to establish if these methods can replace the pulling test. Two new methods were tested. Firstly, the inclinometer and the pulling cable were replaced by laser movement tracking and wind measurement, respectively. Secondly, the main roots were mapped. The laser movement measurement provided acceptable results. Monitoring the movement of trees due to wind may replace the pulling test for free-standing trees. Root mapping was successful, but the calculated safety factors were consistently lower than the data from the pulling test. This latter method needs further refinement.

Keywords: pulling test, safety of trees, dynamic stability test, static stability test, safety factor, root mapping

Bevezetés

A közterületeken, parkokban, kertekben, óvodák vagy iskolák udvarain álló fák biztonságossága fontos kérdés. A közfigyelem általában a már megtörtént vagy éppen még megelőzhető kárkeletkezések, sérülések kapcsán foglalkozik ezzel a témával. A stabilitással, biztonságossággal foglalkozó vizsgálatok általában vagy a gyökérzet, vagy a törzs állapotára irányulnak, illetve létezik olyan módszer, mely egyszerre vizsgálja mindkettőt (Wessolly és Erb 1998).

A fa törzsének felmérésére több lehetőségünk van, mint például az akusztikus vagy ultrahang tomográfia, a törzs fúrásos vizsgálata, vagy a nyúlásmérési húzóvizsgálat (Brudi és Wassenaer 2002, Rinn et al. 1996, Divós és Mészáros 1994, Wang et al. 2001, Bucur 2005, Kahl et al. 2009). Ezzel szemben a jelenleg elérhető és megbízható módszerek közül csupán egyetlen, a dőlésmérési húzóvizsgálat vonatkozik a gyökérezet állapotának, biztonságosságának felmérésére. Ezért munkánk célja a gyökérre vonatkozó mérések, biztonságossági becslések körének bővítése volt.

A dőlésmérési húzóvizsgálat a statikus módszerek közé tartozik. A mérés során egy sodronykötél szimulálja a szélterhelést. A kivitelezéshez elengedhetetlen a megfelelő horgonyzás biztosítása a kötélen számára, és a mérés csak a 0–15 km/h szélsébség-tartományban végezhető. A használt eszközök nagyok, nehezek, és a méréshez általában létra is szükséges, hogy a húzó kötelet megfelelő magasságban lehessen rögzíteni a vizsgálandó fán.

Két célt fogalmaztunk meg munkánk során. Az egyik a statikus vizsgálat dinamikussá tétele, vagyis a valós szélben történő mérés kidolgozása és tesztelése. A másik egy, a húzóvizsgálatnál egyszerűbb, kisebb méretű és tömegű, könnyebben szállítható eszközzel való biztonságosságbecslés lehetőségének megteremtése. Ez utóbbira a korábban kidolgozott gyökértérképezést használtuk (Divós 2008), itt a biztonsági faktor számítása jelent újítást.

Természetesen mindkét elrendezést, és a mérésekből számolt biztonságossági faktorokat összehasonlítottuk a dőlésmérési húzóvizsgálattal, illetve annak adataival. Az összehasonlítás célja volt az ún. ellenállás tényező meghatározása is.

Elméleti háttér

Biztonsági faktor

A fák gyökérezetére vonatkozó biztonsági faktor (angolul: „safety factor”, SF):

$$SF = \frac{M_b}{M_{sz}} \quad [1]$$

ahol:

M_b – a valamely mérési módszer segítségével számolt, az adott gyökérezet által kibírható maximális forgatónyomaték [Nm],

M_{sz} – a szél forgatónyomatéka, amit a [2] szerint számítunk ennél a becslésnél. A gyakorlatban a biztonsági faktor a fa tövestől kifordításához szükséges nyomatékot hasonlítja az adott területen várható maximális szélterheléssel [Nm].

A szélterhelés a következőképpen számítható (Divós 2008):

$$M_{sz} = F_{sz} h_k \quad [2]$$

$$F_{sz} = \frac{\rho}{2} v^2 AC \quad [3]$$

ahol:

F_{sz} – a szél által létrehozott erő [N],

h_k – a koronaközép magassága [m],

ρ – a levegő sűrűsége [kg/m^3],

v – a szél sebessége [m/s],

A – a korona és a törzs adott iránybeli felülete [m^2],

C – a fafajfüggő ellenállás tényező (Wessolly és Erb 1998).

A szélsébség Brudi és Wassenaer 2002 nyomán elfogadott értéke 33,3 m/s. A helyi viszonyokat, a terület beépítettségét és a magasság függvényében változó szélsébséget is figyelembe veszi az EN 1991 szabvány. A számításnál a javasolt 33,3 m/s értéktől az említett szabvány szerint eltérések lehetnek. Városias környezetben alacsony fák esetén a figyelembe veendő szélsébség kisebb, de tengerparton magas fák esetében nagyobb is lehet.

A biztonsági tényezőt 1,5-ös érték felett tartjuk elfogadhatónak (Brudi és Wassenaer 2002). Ez alatt – a becslés bizonytalanságai miatt – az adott fa nem tekinthető biztonságosnak.

Az [1] definícióval a gyökérezetre vonatkozó biztonsági faktor számítható. A törzs egy adott magasságban történő kettétörésére is számolnak biztonsági tényezőt, ez azonban – az adott magasság feletti részek tömegének változása miatt – másként definiálendő, más képlet szerint számítandó.

Az ellenállás tényező meghatározása

A dőlésmérési húzóvizsgálat kiértékelésénél használt, fafaj függő ellenállás tényezők többsége viszonylag állandó, erős szélben került meghatározásra (Wessolly és Erb 1998). Mivel a szél sok helyen nem állandó, hanem lökésekben érkezik, ezért – élve a méréseink adta lehetőségekkel – olyan ellenállás tényezőt számítottunk, mely a fafaj „széllökésekkel szembeni” ellenállását jellemzi.

A szélben történt mérés elmozdulás-idő és szélesség-idő adatai esetében idő szerinti illesztésre volt szükség, mivel a fa tövének elmozdulása néhány másodperccel később következett be, mint ahogy a széllökést mérhettük. A szélmérő által 10 méteres magasságban mért szélességeket a fa koronaközép magassága szerint számítottuk át a megfelelő képlet segítségével (Brudi és Wassanaer 2002).

Egy, kalibrációként elvégzett dőlésmérési húzóvizsgálat-sorozat dőlés-erő értékei segítségével a szélben történt mérés dőléseihez erő, illetve forgatónyomaték rendelhető. A szélesség ismeretében a [3] szerint az ellenállás tényező meghatározható.

Anyagok, eszközök, mérések

A kiválasztott fák

A méréseket a Nyugat-magyarországi Egyetem botanikus kertjében két lucfenyőn (*Picea albies*) és a közelben egy vadgesztenyefán (*Aesculus hippocastanum*) végeztük. A fák számítható szükséges adatait az 1. táblázat foglalja össze.

A két lucfenyő a botanikus kert állományának része, míg a vadgesztenyefa szabadon áll, vagyis a helyszínen fújó főszélirányban nem volt más fa a környezetében, míg a főszélirányra merőlegesen néhány méterre voltak fák.

1. táblázat A mérésre kiválasztott fák adatai (*az ellenállás tényezők Brudi és Wassanaer 2002 szerint)

Table 1 The data of the trees chosen for the measurements (*drag factors from Brudi and Wassanaer 2002)

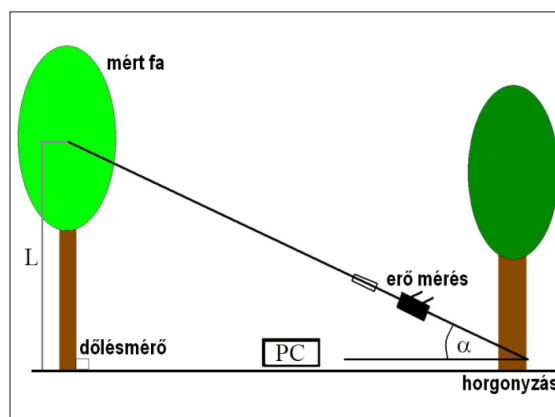
A vizsgált fa sorszáma	Fafaj	Magasság [m]	h_k [m]	A [m ²]	Ellenállás tényező [C*]
1.	Lucfenyő	20,5	13,3	23,7	0,20
2.	Lucfenyő	20,0	12,7	30,4	0,20
3.	Vadgesztenye	12,0	6,5	95,7	0,35

A gyökérzet stabilitásának becslése – dőlésmérési húzóvizsgálat

A dőlésmérési húzóvizsgálat során egy acélsodrony kötél szimulálja a szélterhelést, miközben mind a húzóerőt, mind a törzs dőlését mérjük. Az 1. ábrán is látható, hogy a kötelet a mért fán – a lehetőségekhez képest – a korona közepéhez minél közelebb kell rögzíteni, a dőlésmérőnek pedig a talajhoz minél közelebb kell történnie, mert a vizsgálat célja a gyökérzet állapotának felmérése. Mivel a törzs anyaga nem teljesen merev, ezért amennyiben a dőlésmérő magasabban kerül fel a fára, akkor a törzs tulajdonságai miatt az eredmény torzul. A horgonyzásra szolgáló másik fa természetesen helyettesíthető más, megfelelő tereptárggyal is (Neild és Wood 1999, Peltola et al. 2000).

A vizsgálathoz használt dőlésmérő egy buborék helyzetváltozása miatt bekövetkező kapacitás változásának segítségével mér, vagyis viszonylag nagy tehetetlenségű, lassú. A dőlésmérési húzóvizsgálathoz jól használható, ellenben a szélben történő mérés esetében azt tapasztaltuk, hogy időben kiátlagolja a törzs finomabb mozgásait.

A dőlésmérési húzóvizsgálat során a kötéllal maximum 0,2°-os dőlésig húzzák a fát, folyamatosan mérve az erőt és a dőlést. A dőlés-erő értékekre a [4] függvény illeszthető. Ebből megbecsülhető a fa gyökereitől történő kifordulásához szükséges forgatónyomaték. A mért adatokból, valamint a már részletezett szélterhelés becslés felhasználásával a gyökér biztonsági faktora, SF számolható Divós 2008 nyomán az alábbiak szerint.



1. ábra Dőlésmérési húzóvizsgálat áttekintő rajza

Figure 1 The model of the „inclinometer”-type pulling test

A mért dőlés-erő adatokra egy tangens függvény illeszthető, melyből F_{ki} [N] a fát gyökerestül már éppen kifordítani képes erő becsülhető.

$$\varphi_c = 0,33 \tan(1,34 (F/F_{ki})) + 0,5 (F/F_{ki})^2 - 0,1 (F/F_{ki}) \quad [4]$$

ahol:

ϕ – a mért dőlés [°],

ϕ_c – az illesztett görbe dőlés értékei [°],

F – a mért erő [N].

A függvény illesztése a legkisebb négyzetek elvén történik.

A számítógép által illesztett függvény ϕ_c értékei a mért ϕ értékeiből következnek, az ezekhez tartozó F erők szintén ismertek. Így meghatározható a F_{ki} kifordulást létrehozni képes erő, mely az adott kötél helyzetben értendő (lásd 1. ábra). A fa kifordításához elegendő forgatónyomaték M_{ki} :

$$M_{ki} = (F_{ki} L) \cos \alpha \quad [5]$$

ahol:

L – a kötél rögzítésének magassága [m],

α – a sodronykötél vízszintessel bezárt szöge.

A dőlésméréses húzóvizsgálat esetén az SF biztonsági faktor [1] szerinti számításakor az itt kiszámolt M_{ki} kerül M_b helyére.

A leírtak szerint 4-4 dőlésméréses húzóvizsgálatot végeztünk és biztonsági faktort számítottunk mindkét lucfenyőre és a vadgesztenyefára.

Gyökértérképezés

A gyökértérképezés során a főbb gyökerek helyzetét lehet meghatározni, mivel a hang terjedési sebessége jelentősen eltér talajban (kb. 300 m/s) és a gyökérzetben (kb. 3000 m/s) (Bucur 1995). Ezt a jelenséget kihasználva feltérképezhetjük a vastagabb gyökereket, a gyökerek megléte, szerkezete, helyzete pedig fontos lehet a stabilitás becsléséhez (Coutts 1983). Építési, ásási munkáknál is érdemes lehet figyelembe venni a főbb gyökerek helyzetét.

A mérés során a fa törzsére, a talajhoz közel felhelyezünk egy jeladó tüskét. Ezt kalapáccsal megütve hang indul el a fában, a gyökerekben. A hang megérkezését detektáljuk egy talajszondával, mely egy 40 cm hosszú alumínium tüskével szerelt. Ez biztosítja az érzékelő és a talaj közt az akusztikus csatolást. A mérési elrendezés látható a 2. ábrán. Így 0,5 méteres mélységig találhatjuk meg a gyökereket (Divós et al. 2009).

A jeladóból indított jel és a detektálás között eltelt időt mérjük, a fa törzstől adott, állandó távolságban. A mérést általában a törzstől 0,5 méteres távolságú kör kerülete mentén, 15 cm-es lépésekben végzik, a talajszondával. A mérés ismételhető a törzstől nagyobb távolságban. Amennyiben egy adott ponton a mért idő a többi ponthoz képest nagyságrendi csökkenést mutat, az a gyökérzet jelenlétére utal (Divós 2008).

Esetünkben a méréseket a tőtől 0,5 m, 1 m és 1,5 m-es távolságban végeztük. (Achim és Nicoll 2009-es cikke szerint a gyökértányér sugara jellemzően nem nagyobb, mint a mellmagassági átmérő háromszorosa; a mérést ennek megfelelően végeztük.) A talajon megjelöltük a helyeket, irányokat ahol a gyökérzetet érzékeljük (8A ábra). Helyszíni felmérés, illetve a készített fényképek segítségével gyökértérképet készítettünk (8B ábra).

Az így kapott gyökértérkép által becsültük azt a területet, ahol a gyökerek kapcsolatban vannak a talajjal, ahol „kapaszkodnak”. A 3. ábrán látható a becslésre egy példa (2. fa).

A meghatározott terület segítségével egy egyszerű modellt kívántunk alkotni a fa biztonságosságának becslése céljából.

A meghatározott terület (A_{gy}) segítségével egy egyszerű modellt állítottunk fel a fa biztonságosságának becslésére, a következő képlet szerint:



2. ábra A gyökértérképező eszköz használatban
Figure 2 The root mapping tool

$$M_{ka} = c_t A_{gy} h_{gy} \quad [6]$$

ahol:

M_{ka} – a gyökérzet a talajba kapaszkodásának forgatónyomatéka [Nm],

c_t – a talaj nyírószilárdsága [N/m²],

A_{gy} – a becsült „kapaszkodási” terület [m²],

h_{gy} – a gyökérzet mélysége a talajban [m].

(A talaj nyírószilárdságának értékét és gyökérzet becsült mélységét Péterfalvi József* szakértői véleményére alapoztuk.)

M_{ka} segítségével [1] szerinti SF, biztonsági faktor számítható. A képletben az M_{ka} kerül M_b helyére. A gyökértérképezést a helyszínek adottságai miatt csak a két lucfenyőre végeztük el.

Lézeres elmozdulásmérés

A dőlésmérőt helyettesítő elmozdulásméréshez egy zöld lézer pointert használtunk, amit a fa törzsére, a talajszinthez a lehető legközelebb rögzítettük. A lézer fényét a fától 15–30 m távolságban elhelyezett ernyő fogta fel, amelyet beárnyékolunk a jobb kontraszt érdekében, és amelyhez fixen egy webkamerát rögzítettünk, mely egy számítógépre továbbította a képet. Ezt egy megfelelő képelemző program dolgozta fel. Az így kapott mozgás adataiból, a webkamera felbontásának, valamint az ernyő a lézerforrástól való távolságának ismeretében a valós elmozdulás, abból pedig a dőlés számolható.

Az elmozdulásmérést először a korábbi, mesterséges dőlésméréssel megegyezően végeztük, olyan módon, hogy közben a lézert is a vizsgált fa törzséhez, a talajszinthez lehető legközelebb rögzítettük. A dőlés, az erő és a lézer elmozdulás adatait egyaránt mértük és rögzítettük. Ezután gyenge szélben végeztünk összehasonlító méréseket.

Szélmérés

A szél fára, fákra gyakorolt hatásának vizsgálatához egy olyan szélsébségmérő eszközre volt szükség, melynek időbeni felbontása elegendő ahhoz, hogy ne átlagolja ki a szellökéseket.

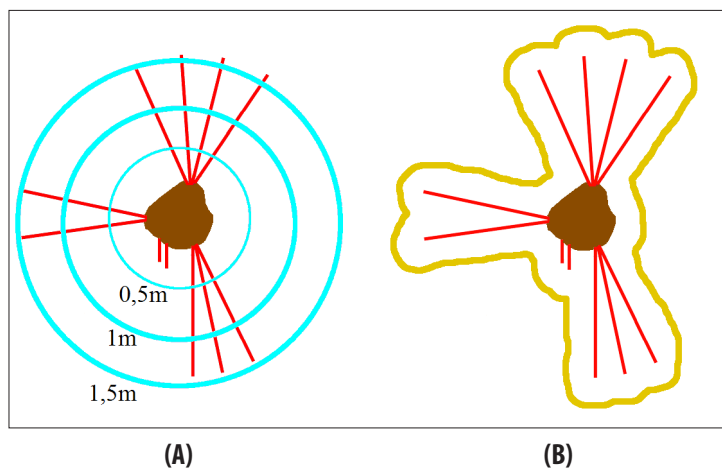
A használt, ultrahangos szélmérő a Fakopp Bt. fejlesztése (a fejlesztők egy későbbi publikációban kívánják részletesen bemutatni az eszközt). Működési elve a Doppler-effektuson alapszik. A szélsébségmérő látható a 4. ábrán.

A szélmérő 5 adat/2 másodperces mintavételezési frekvenciával működik, amit elégségesnek találtunk a szellökések detektálására. A szélméréseket egy összerakható torony segítségével, 10 méteres magasságban végeztük. Mindhárom kiválasztott fán elvégeztük a méréseket.

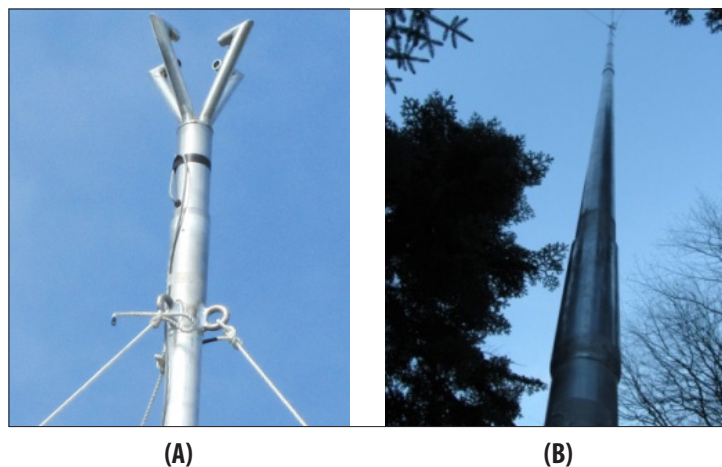
Az ellenállás tényező meghatározásának lépései

A vadgesztenyefán történt dőlésmérési húzóvizsgálat, valamint a valós szélben történt mérés által lehetőség volt az ellenállás tényező meghatározására. Ez a következő lépések szerint történt:

1. A húzóvizsgálat értékeire illeszthető függvény ábrázolása (a [4] szerinti tangens-függvény).
2. A szélsébség-dőlés értékek időillesztése, majd az egyes szellökések által a tőben létrehozott dőlés értékelése.



3. ábra A 2. fa gyökértérképe (A) és a gyökerek által lefedett területtel (B)
Figure 3 The root map (A) and the surface reached by the roots (B) of tree No. 2.



4. ábra A szélsébségmérő (A) és a széltorony (B)
Figure 4 The wind measuring tool (A) and the wind tower (B)

* egyetemi docens, a Nyugat-magyarországi Egyetem Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézetének igazgatója

3. A szél által létrehozott dőlés értékek visszakeresése a húzóvizsgálat által számított tangensfüggvényen, ennek segítségével forgatónyomatékok hozzárendelése a dőlés értékekhez.
4. A szélesség adatok forgatónyomatékokhoz rendelése, majd az ellenállás tényező számítása [2] és [3] alapján.

Eredmények és értékelés

A dőlésmérés és az elmozdulásmérés összehasonlítása

A dőlésmérési húzóvizsgálat kiválthatóságának értékeléséhez ellenőriznünk kellett, hogy a lézer mozgása képes-e a dőlésmérőhöz hasonló, azzal megfeleltethető, annak helyettesítésére is használható adatsort adni. Ezért húzóvizsgálatok során egyszerre mértük a lézer elmozdulását és a dölést.

Az adatsorokat az idő függvényében ábrázoltuk. Egy ilyen grafikon látható az 5. ábrán, amelyen az erő, elmozdulás és dőlés adatokat az összehasonlításhoz célszerű skálán ábrázoltuk.

A mérés során megállapíthattuk, hogy a lézer mozgásának követése az általunk létrehozott mérési összeállításban megfeleltethető a dőlésmérő adatainak. A dőlésmérő időbeli felbontása 10 Hz, míg a lézer mozgását 5 adat/2 másodperccel mértük (mivel ez felel meg a szélmérő által küldött jeleknek, a program, amivel követni tudtuk a lézer elmozdulását ezzel az időfelbontással dolgozott).

Igaz, hogy a dőlésmérő több adatot szolgáltat (10 Hz), a lézer elmozdulásának követésével mégis finomabb mozgást figyeltünk meg, melyről feltételezhető, hogy ez a dőlésmérő tehetetlensége miatt nem látható a dőlésmérő által mért adatsorban (5. ábra). Valós, de nem viharos szélben a lézeres követés valószínűleg jobban megfelel a mérés céljaira, mint a hagyományos dőlésmérő.

Dőlésmérési húzóvizsgálatot sikeresen végeztünk mindhárom, a mérésre kijelölt fán. A biztonsági faktor számításához szükséges függvény illesztés látható a 6. ábrán. A mérés és a kiértékelés a PullingTest nevű program segítségével történt.

A valós szélben történő mérés eredményei

Első méréseink során állományban álló fák (1. és 2. fa) mértünk az elmozdulást a szélesség méréssel párhuzamosan. Ekkor azt találtuk, hogy míg a szél által a tőben létrehozott mozgásokat a dőlésmérővel nem tudtuk követni, addig a lézeres elmozdulásmérés sikeresnek bizonyult. Azonban a szélesség és a tő elmozdulása között nem tudunk korrelációt megállapítani. Vagyis az állományban álló fák tövének mozgása és a tőlük néhány méterre, 10 méter magasan mért szélesség között nem találtunk összefüggést.

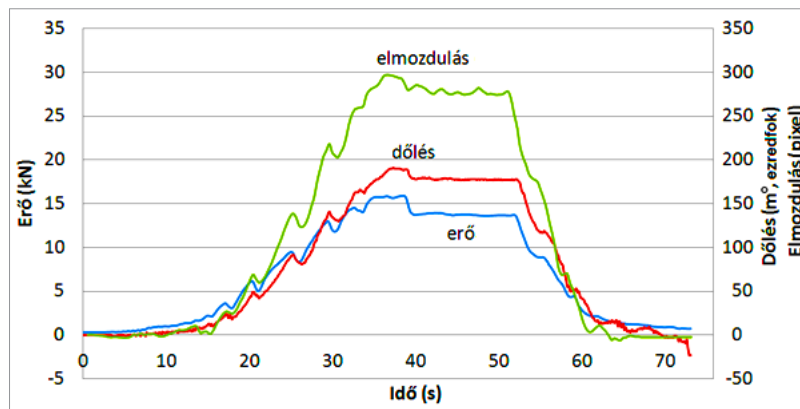
A 3. fa kellően szabadon állt, a helyszínen fújó főszélirányban nem volt más fa a környezetében, míg a főszélirányra merőlegesen néhány méterre voltak fák. Erre a vadgesztenyefára sikerült megállapítani a főszélirányból fújó szél sebessége és a tő dőlése közötti összefüggést. Egy ilyen mérés látható a 7. ábrán.

Megállapítható, hogy a lézeres elmozdulásmérés alkalmas a fa dőlésének mérésére valódi, szeles körülmények között, azonban a mérés csak szabadon álló fák esetében alkalmazható, mivel a jelenlévő más, kellően magas vagy nagyméretű tereptárgyak jelenléte, takarása mind a mérendő szél nagyságát és irányát, mind a fa koronáját és törzsét érő szélterhelést befolyásolhatják.

Az ellenállás tényező meghatározása

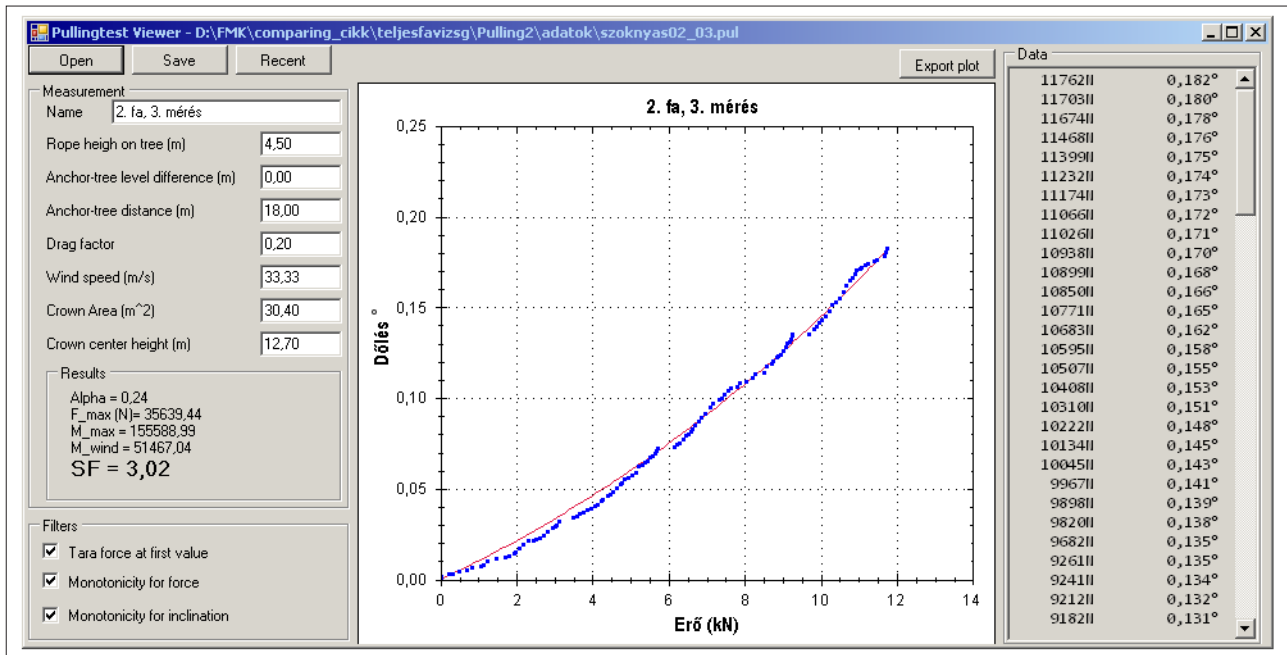
A vizsgált vadgesztenyefán dőlésmérési húzóvizsgálatot is végeztünk és értékeltük a valós szél hatására létrejövő mozgásokat is. A két mérés során gyűjtött adatok segítségével meg tudtuk határozni a fa ellenállás tényezőjét. Az általunk számított ellenállás tényező $0,302 \pm 0,049$. Az irodalomból ismert adat $0,35$ (Wessolly 1989).

Sajnos az egyetlen, élőfa ellenállástényezőt megadó publikációban (Wessolly 1989) nincsenek hibahatárok megadva.



5. ábra Az 1. fatörzs dőlésmérési vizsgálatának eredményei

Figure 5 Measured laser movement (green), inclination (red) and load (blue) data of tree Nr. 1 as a function of time



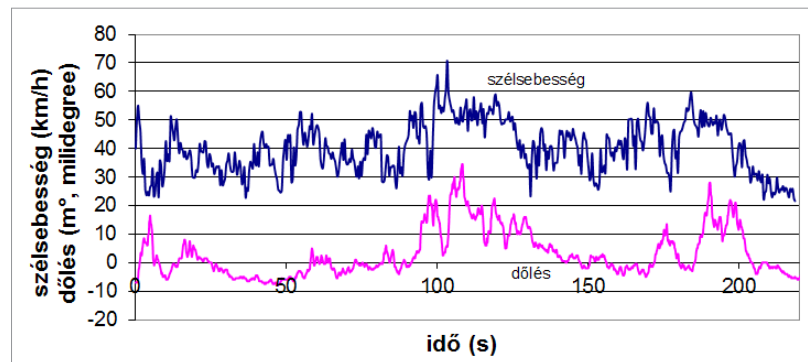
6. ábra Függvény illesztés a biztonsági faktor számításához a 2. fa egyik mérése után

Figure 6 Function fitting for calculating the safety factor, after testing tree No. 2.

Azt látjuk, hogy vizsgálataink során megadott intervallumban benne van a Wessolly által mért érték is. Ha bármilyen kicsi hibát is feltételezünk a Wessolly-értékhez, akkor is elmondható, hogy a megadott és a feltételezett hibahatárok átfedik egymást. Ez hibahatáron belüli egyezést jelent, tehát a mérés megbízhatónak bizonyult.

A gyökérkeresés eredménye

A gyökértérképezést a két lucfenyőn végeztük el. Megtaláltuk a főbb gyökereket, és elkészítettük a gyökértérképet, ami a 8B. ábrán látható.

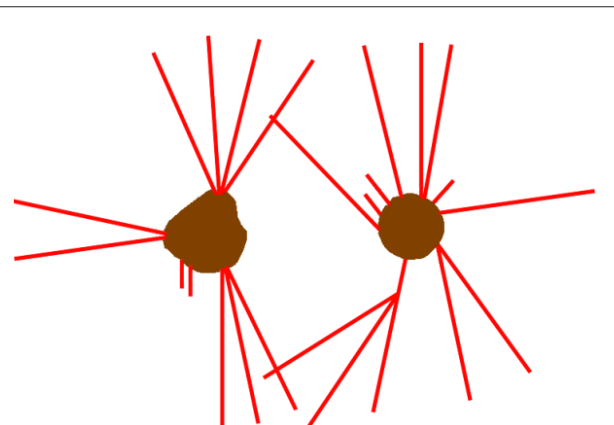


7. ábra A szabadon álló vadgesztenyefa tővének mozgása és a szélsebesség (a fa tővének mozgása néhány másodperc késéssel követi a szelet)

Figure 7 The wind velocity data (blue) and the movement (pink) of a free-standing horse chestnut tree. The movement of the trunk shows a few seconds of lag



(A)



(B)

8. ábra Fényképfelvétel (A) a feltérképezett gyökerekről és számítógép segítségével megrajzolt gyökértérkép (B)

Figure 8 Root mapping. A photo of the roots found (A) and the model made by a computer (B)

A gyökértérképből becsültük a kapaszkodási terület méretét, aminek segítségével biztonsági faktort számítottunk.

A biztonsági faktorok összehasonlítása

A lucfenyőkön dőlésmérési húzóvizsgálatot és gyökértérképezést is végeztünk. A 2. táblázat foglalja össze a számított biztonsági faktorokat.

Az adatokból jól látszik, hogy a gyökértérképezés kifordulási tényérbecsléséből számított biztonsági faktor kb. 2,5-szer kisebb, mint a húzóvizsgálat során mért. Ugyanakkor a két fa biztonsági tényezőinek viszonylagos értéke nagyon hasonló mind a két módszer esetében. Ez azt sugallja, hogy ugyan a gyökértérképezés jelenleg még nem adja vissza a valós biztonsági faktorokat, de azokkal arányos értékeket ad. A gyökérzet felülete arányosnak tűnik a fa biztonságosságával.

Az eltérés oka pontosan nem ismert. Elképzelhető, hogy a módszerrel nem detektálható kisebb gyökerek okozhatják az eltérést. Ezek nem vehetőek figyelembe a számításnál, azonban az eddigi eredmények alapján úgy tűnik, hogy ez arányos a detektálható gyökerekből számított felülettel. Ez alapján bevezethető lehet egy korrekciós tényező, amivel a gyökérből számított tényezőt megszorozva becsülhető a valós biztonsági faktor. Természetesen két fából erre nézve nem lehet megbízható következtetéseket levonni, de jövőbeni vizsgálatok erre választ adhatnak, ahogy a mérés különböző fafajokon történő megisméltése is fontos lenne azért, hogy a végén egy könnyen felhasználható eszközt kapjunk.

Az eltérés oka pontosan nem ismert. Elképzelhető, hogy a módszerrel nem detektálható kisebb gyökerek okozhatják az eltérést. Ezek nem vehetőek figyelembe a számításnál, azonban az eddigi eredmények alapján úgy tűnik, hogy ez arányos a detektálható gyökerekből számított felülettel. Ez alapján bevezethető lehet egy korrekciós tényező, amivel a gyökérből számított tényezőt megszorozva becsülhető a valós biztonsági faktor. Természetesen két fából erre nézve nem lehet megbízható következtetéseket levonni, de jövőbeni vizsgálatok erre választ adhatnak, ahogy a mérés különböző fafajokon történő megisméltése is fontos lenne azért, hogy a végén egy könnyen felhasználható eszközt kapjunk.

Összefoglalás

Munkánk során két új, a gyökérzet biztonságosságát becsülő módszert hasonlítottunk a már jól bevált dőlésmérési húzóvizsgálathoz. Az egyik új eljárás során a valós szélben történő mérést próbáltuk ki. A másik, a gyökértérképezés célja egy, a húzóvizsgálathoz egyszerűbben kivitelezhető mérés és ehhez tartozó kiértékelés kidolgozása volt.

A lézeres elmozdulásmérést a dőlésméréssel összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a dőlésmérési húzóvizsgálatban a dőlésmérő helyettesíthető lézeres elmozdulásméréssel. Az elmozdulás adatai jól megfeleltethetőek a dőlés értékeinek, s a mérés felbontása is jobb.

A dőlésmérő egy buborék helyzetváltoztatása miatt bekövetkező kapacitásváltozást méri, ebből számítja magát a dőlést. Mivel a buborék elmozdulása nem lehet tetszőlegesen gyors, ezért feltételezhető, hogy lézeres elmozdulásmérés során látható apróbb mozgások valódi mozgásnak felelnek meg.

Állományban álló fákkal kapcsolatban a valós szélben végzett mérések során arra jutottunk, hogy nem javasolt a sodronyköteles dőlésmérés kiváltása valós széllal történő méréssel. Mert a törzs dőlése, elmozdulása a méréseink során nem volt összefüggésbe hozható a mért szélesebességekkel, így ezekből számítani nem lehetett. Szabadon álló, a fő szélirányból nem takart fa esetében viszont sikerült összefüggést találnunk a széllökések, a szélesebesség és a tő mozgása között. Ebben az esetben egy kalibrálásra szolgáló húzóvizsgálat elvégzése után ellenállás tényezőt is számítottunk.

Az ellenállás tényező a szélterhelés számításában jelentős. A jelenleg a számításokhoz használatos fafajfüggő ellenállás tényezők többsége viszonylag állandó, erős szélben került meghatározásra (Wessolly és Erb 1998). Ezért érdekes az általunk számított, a széllökéssel szembeni ellenállás tényező, melyre $0,302 \pm 0,049$ -t kaptunk, míg az irodalomból ismert adat $0,35$ (Wessolly 1989). Az általunk mért érték szórása jelenleg jelentős, ennek csökkentése további feladat, mely után lehetséges az értékek érdemi összehasonlítása. Jelenleg az állapítható meg, hogy a mérés alkalmas lehet ellenállás tényező mérésére is.

Gyökértérképezést is folytattunk, mely során a főbb gyökereket sikeresen megtaláltuk. A gyökerek alapján becslést végeztünk arra nézve, hogy mekkora lehet az a terület, amelyen a fa a talajjal érintkezik, abba „kapaszkodik”. E terület felhasználásával becslést adtunk a fa tövestől való kifordulására vonatkozó biztonsági faktorára.

A számított biztonsági faktort a dőlésmérési húzóvizsgálat során megállapított biztonsági faktoralal vetettük egybe. A gyökértérképezés után számított érték kb. 2,5-szer alacsonyabb, mint a húzóvizsgálat által meghatározott. Emiatt ez a mérés a biztonsági becslésre jelenlegi állapotában nem alkalmas, a számítás so-

2. táblázat A két vizsgált lucfenyő dőlésméréssel (SF_d) és gyökérkeresés után (SF_{gy}) számított biztonságossági faktorai és azok arányai

Table 2 The data of the trees chosen for the measurements (*drag factors from Brudi and Wassenaer 2002)

	SF_d	SF_{gy}	SF_d / SF_{gy}
1. fa	5,07	1,94	2,61
2. fa	3,02	1,27	2,38
1. fa / 2. fa	1,68	1,53	

rán végzett becslések azonban finomíthatóak, további vizsgálatok elvégzése után a biztonságosság becslése sikerrel járhat. Erre utal az is, hogy a két fa biztonságosságának aránya majdnem azonos a gyökértérképezés során kapott értékek arányával. A gyökérzet mennyisége, helyzete ilyen módon összefüggésbe hozható lehet a biztonságossággal, bár a mérés és a kiértékelés még pontosításra szorul.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Talentum Műhely – a tudományért és tehetségekért a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0005 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Achim, A., Nicoll, B. C. (2009) Modelling the anchorage of shallow-rooted trees. *Forestry*, 82. 273-284.
- Brudi, E., van Wassenae, P. (2002) Trees and statics: Nondestructive failure analysis. In: *Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings*. Savannah, Georgia, USA, October 2002. International Society of Arboriculture. pp. 53-69.
- Bucur, V. (1995) *Acoustics of Wood*, CRC Press, 393 old.
- Bucur, V. (2005) Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees, *Ultrasonics* 43: 237-239
- Coutts, M. P. (1983) Root architecture and tree stability, *Plant and soil* 71: 171
- Divós F., Bejő L., Tóth Á. (2009) Instrument Supported Tree Evaluation in Hungary, In: *Proc. 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Beijing Forestry University, October 12-14, 2009. pp. 71-76.
- Divós F. (2008) Fák gyökérzetének akusztikus vizsgálata a stabilitás meghatározásához. Szakmai beszámoló a FAGYOKER, NKTH (Baross)-06 „Fák gyökérzetének akusztikus vizsgálata” 2007.07.02.-2008.06.30. pályázat keretében.
- Divós F., Mészáros K. (1994) Root decay detection by stress wave technique. In: *Proc. 1st European Symposium on Nondestructive Testing*, University of Forestry and Wood Science, Sopron, September 21-23, 1994. pp. 524.
- Kahl, T., C. Wirth, M. Mund, G. Böhnisch, E. Schulze (2009) Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway Spruce, *European Journal of Forest Research* 128:467-473
- Neild, S.A., Wood, C.J. (1999) Estimation of stem and root-anchorage flexibility in trees, *Tree Physiology* 19:141-151
- Peltola, H., Kellomaki, S., Hassinen, A., Granander, M. (2000) Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland, *Forest Ecology and Management* 135(1-3):143-153
- Rinn, F., Schweingruber, F. H., Schar, E. (1996) Resistograph and x-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species, *Holzforschung* 50(4): 303-311
- Wang, L., Yang, X., Xu, K. (2001) Current situations and research development of non-destructive testing for wood properties, *Forestry Engineering*, 17(6): 1-3
- Wessolly, L. (1989) A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees – Summary, *Arboricultural Journal* 13. 45-65
- Wessolly, L., Erb, M. (1998) *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer Verlag, Berlin, Germany, 272 old.
- I.S. EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Wind actions (British Standard), British Standards Institution (BSI)