Anyagvizsgálók Lapja
2022/I. lapszám

Akusztikus és elektromos impedancia tomográfiás vizsgálatok lakott környezetben élő fákon – törési biztonság megítélése

Acoustic and electric impedance tomography examinations on trees in urban areas – Safety calculation for trunk failure

Buza Ágnes Kinga [a], Divós Ferenc [b]

[a] termék manager, Fakopp Enterprise Bt., agnesbuza@fakopp.com
[b] ügyvezető, Fakopp Enterprise Bt., divos@fakopp.com

Kulcsszavak
fa,
faanyag,
roncsolásmentes favizsgálat,
akusztikus,
tomográfia

Absztrakt

Jelen cikk célja áttekintő képet adni, elsősorban a lakott környezetben lévő, fák akusztikus és elektromos impedanciás mérési lehetőségeiről, illetve az ún. biztonsági faktorról. Akusztikus úton a faanyag minősége, illetve épsége (vagy a korhadás területe) becsülhető. A tomográfiák nagy előnye, hogy képet is szolgáltatnak a vizsgált réteg(ek)ről. Az akusztikus méréseket faszerkezeteken is sikerrel alkalmazzák. A tomográfia adaptálható betonra is.

Keywords
tree,
wood material,
non-destructive,
acoustic,
tomography

Abstract

The aim of the paper is to provide a summary of the possibilities of acoustic and electric impedance measurements on trees (especially the ones living in urban areas) and to present the so-called Safety Factor. Acoustic measurements can estimate the quality of the wood material, so if a decay is present, the area of the decay can be evaluated. A great advantage of the tomographies is the ability to provide images of the examined layer(s). Acoustic measurements can also be applied to wooden structures. The tomography can be adapted to concrete as well.

1. Bevezetés

A városias környezetben lévő fák hozzájárulnak az emberek mind mentális, mind fizikai egészségéhez, serkentik a tanulási képességet [1,2], valamint kedvezően befolyásolnak több környezeti tényezőt (pl. légszennyezettség, páratartalom, hőmérséklet).

Ugyanezek a fák azonban veszélyforrást is hordoznak magukban, a letörő, lezuhanó ágak, eltörő törzsek vagy kifordult fák személyi sérülésekhez, anyagi károkhoz vezethetnek. A városias környezetben élő fák biztonságosságának vizsgálata kiemelt feladat, hiszen ebben a környezetben gyakran fordulnak elő emberek és tereptárgyak a fa miatt kockázatosnak tekinthető területen [3].

Vizsgálódásaink célja tehát képet kapni a biztonságosságról, méghozzá olyan mód(ok)on, mely(ek) során a fa nem károsul. Fontos előnye az ilyen technikáknak a mérés megismételhetősége, mely által az időbeli változások (pl. korhadások növekedése) követhetővé válnak. (A műszeres mérések célja természetesen más is lehet, mint például a biomassza mennyiségének becslése, vagy a fotoszintetizáló képesség vizsgálata,… ezek azonban kívül esnek a jelen cikk keretein.)

Az első ilyen méréseket több évtizede kezdték meg. A gyökérzet teherbírását, a fa kifordulásának esélyét becslő húzóvizsgálatokat több, mint három évtizede alkalmazzák sikeresen. Ma már elterjedtnek mondható a technika [4].

Az akusztikus (és ultrahangos) vizsgálatok sem sokkal maradnak le. Több, mint két évtizede vizsgálják a fákat a bennük mérhető hangsebesség segítségével [5]. A megfelelően kivitelezett akusztikus mérések korhadás vagy üreg jelenlétét képesek jelezni [6]. Az akusztikus módszer lehetővé tette az akusztikus tomográfia kidolgozását, a belső állapot pontosabb felmérését is. A tomogram (és más paraméterek, pl. a korona területe) segítségével megbecsülhető, hogy a fa mért rétege kibírja-e, ha nagy sebességű (általában 120 km/h) széllökések érik a fát.

Elektromos jelek a fában, faanyagban történő terjedésével a hetvenes évek óta foglalkoznak [7]. Az ilyen mérések eredményeinek értelmezése azonban sokáig a többi technikához képest viszonylag nagy tapasztalatot kívánt, nehézkesebb volt. Annak ellenére, hogy az elektromos impedancia tomográfia képes jelezni a korai gombatámadást, mind a mai napig kevésbé elterjedt eszköz.

2. A faanyag akusztikus tulajdonságai és a „vonalmenti” akusztikus mérések

A faanyag a fa növekedésének következtében nem homogén, de szabályos. A faanyag anatómiai irányai a rostirány (a növekedés irányával, a törzzsel párhuzamos), a radiális irány (a növekedés irányára merőleges, sugár irány), illetve a tangenciális irány (az „évgyűrű-irány”).

A különböző irányokban különböző hangsebességeket mérhetünk (azonos fafaj esetén is), valamint a helyzetet bonyolítja a tény, hogy a faanyagban transzverzális és longitudinális hullámok is létrejönnek, melyek sebessége szintén különböző [8].

Ha egy fán találomra választanánk két pontot, és ezek között mérnénk a hangsebességet, szinte semmilyen használható információhoz nem jutnánk. A kettő pont közti, vonalmenti mérések vagy a törzs mentén, vagy arra pont merőlegesen, egy átmérőn történnek.

Ténylegesen, általában µs-os pontossággal idő- és mm-es vagy cm-es pontossággal távolságmérés történik, a sebességet ezekből számítjuk ki. Ennek a tomográfiánál lesz jelentősége, hiszen ott a mérési pontok egy része nem pontosan sugárirányban van egymáshoz képest. A mérés során az elsőként megérkező jel haladási idejét kapjuk meg [9].

A törzs mentén, a rostirányban mérhető hangsebesség a faanyag minőségéről ad információt. A magasabb

1. ábra: *Vonalmenti akusztikus mérés sematikus rajza ép és korhadt fa esetén*

hangsebesség jobb minőségű, nagyobb rugalmassági modulussal rendelkező faanyaggot jelez [10]. Ezt a mérést elsősorban faültetvényeken végzik, ott viszont kifejezetten nagy számban.

Az átmérő, illetve sugár irányú mérések a radiális hangsebességet mérik. Táblázatokból, korábbi mérésekből ismerjük számos fafaj egészséges állapotában mérhető radiális hangsebességét. Ha korhadás vagy üreg van jelen, elsőként az a jel fut be, amely „megkerülte” a sérült részt (lásd 1. ábra). A hangsebesség csökkenésének mértéke a korhadás méretére is utal. Általában nem egyetlen átmérő mentén, hanem legalább kettő, egymásra merőleges irányban történik a mérés.

Konkrét példával élve, ha egy platán (Platanus acerifolia) fasorban az egyik fán, (a talajtól számítva) 1 méteres magasságban 50 cm-es átmérőt és 380 µs-os jel áthaladási időt mérünk, a szomszéd fán pedig azonos magasságban 60 cm-es átmérőt és 365 µs-os jelet detektálunk, akkor az egyik sebességre 1316 m/s, a másikra pedig 1644 m/s adódik. Ez az első fán kb. 20%-os sebességcsökkenést jelent, míg a másodikon kevesebb, mint fél százaléknyit. Vagyis az első fában valószínűleg annak keresztmetszetének 20-40%-át kitevő korhadás található, addig a másik fa jó eséllyel egészséges. Nem található benne centrális korhadás az adott magasságon, a vizsgált vonal mentén.

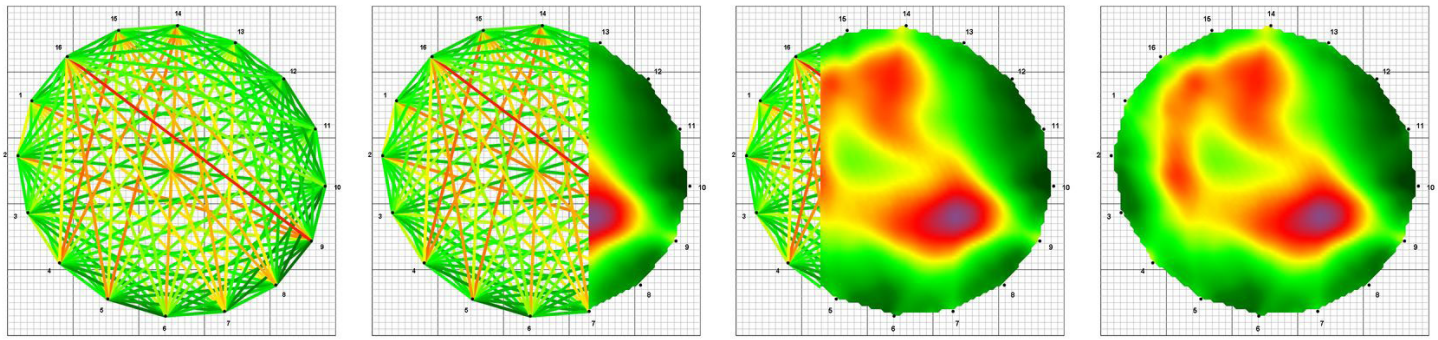
3. Akusztikus tomográfia

Több érzékelővel, egy keresztmetszet mentén, több vonalon is mérhetünk (2. ábra) [11, 12]. Ezek egy része, akár többsége nem halad át az keresztmetszet középpontján. Így lesznek olyan mérések, melyek nem átmérőben, radiális irányban történtek. A radiális- (sugár-) és a tangenciális- („évgyűrű”-) irányú sebességek arányainak ismeretében a nem sugár-, illetve nem tangenciális-irányú mérések is felhasználhatóvá válnak. Az iránykompenzáció után az akusztikus tomográfia a többi tomográfiához hasonló elven működik. Vagyis különböző vonalakon mér (sebességet számol), majd ezekből az adatokból visszaszámítja az adott sík lehetséges hangsebesség képét, tomogramját [9].

Az akusztikus tomogram sebesség térkép az adott pontban mérhető hangsebességet mutatja meg. Skálája fafajonként változó. (Ahogy az ép faanyagban mérhető hangsebesség is különböző.) A képi megjelenítés fő célja, hogy jól elkülönüljön rajta az egészséges (statikailag tartó) farész a korhadt vagy üreges (nem tartó) farésztől. (A biomechanikai számítások, a biztonság számítás egyik bemenete is ez az információ.)

Másik – ma már egyáltalán nem elhanyagolható – haszna

3. ábra: *Több magasságban mért tomogramokból interpolációval készült függőleges vetület a vizsgált fa fotójára vetítve*



2. ábra: *Tomográfia mérési vonalai és a mérésekből visszaállított tomogram (a zöld szín ép faanyagra, a sárga és a piros gyengébb, korhadt részekre utal)*

a tomogramnak, a képnek, hogy ezen „laikus számára is látható”, hogy probléma van-e az adott fával. A favizsgálatot megrendelők (magánszemélyek, cégek, önkormányzatok) így nem csak egy szöveges jelentést kapnak, hanem színes ábrákat is, ami segíti a kommunikációt és az együttműködést.

Tomogram több magasságban is mérhető, a mért síkok közötti részről interpolálással kapható kép, mely 3D-ben is megjeleníthető (3. ábra) [13].

Érdemes tudnunk róla, hogy a vonalmenti mérésekhez hasonlóan a tomográfia során érzékelt jelek sem azok a jelek, melyek áthaladtak a sérült, korhadt részen, hanem azok, amelyek megkerülték azt. Repedés vagy úgynevezett benőtt kéreg esetén is kiterjedt, korhadtnak tűnő terület jelenik meg a tomogramon. Ez azonban a későbbiekben nem jelent gondot, mivel a repedés vagy épp a kéreg jelenléte hasonlóan csökkenti a teherbíró keresztmetszetet, mint a korhadás.

4. Akusztikus mérés kivitelezése, technikai részletek

Legyen szó vonalmenti vagy tomográfia mérésről, az akusztikus mérések során figyelni kell:

- a megfelelő irány (rost- vagy radiális-irány, magasság) megtartására,
- a jó minőségű akusztikus csatolásra – az érzékelőnek át kell hatolnia a kérgen, az érzékelő hegyének ép faanyagban kell lennie a mérés során,
- az eszköz tisztaságára (pl. ha fennáll annak a lehetősége, hogy egy gombafertőzés az egyik fáról a másikra átkerülhet, az érzékelők fertőtlenítése ajánlott),
- arra, hogy a mért fában lévő víz ne legyen fagyott állapotban (a jég képes kitölteni a korhadt részeket és átvezetni rajtuk a hangjeleket, így félrevezető tomogramok készülnek),
- a mérést végzők épségére (az érzékelők igen hegyesek) [14].

Egy mérés a megfelelő mérési sík kiválasztásával kezdődik (ehhez favizsgáló szakemberre van szükség, aki meg tudja mondani, mely magasságban várhatóan a leggyengébb a fa szerkezete, melyik az a sík, amit ellenőrizni érdemes/kell).

Az érzékelők felszerelése után kapcsoljuk be az adatgyűjtő/továbbító elektronikát, majd egy kis, fém kalapácscsal, kézileg hozzuk létre a hangjeleket, „megkoppintva” az érzékelőket. Ajánlott minden érzékelőn legalább ötször mérni.

A vonalmenti mérésnél az órát a „start” érzékelőre történő ütés indítja, és a másik érzékelőn megjelenő jel állítja meg. Tomográfiánál tetszőleges érzékelő ütése indítja az időmérést, és az előzőhöz hasonlóan a beérkező jelek állítják meg. Az időmérés ±3 µs-os pontossággal történik. Egy vonalon történő mérés ideje kevesebb, mint egy perc, míg egy réteg tomogramjának felvétele általában kb. 20 perc.

A mérés befejeztével, annak típusa – vonalmenti vagy tomográfia – szerint történik a kiértékelés. Vonalmenti méréseknél egyszerű táblázat vagy telefonos applikáció használható, míg a tomográfia teljes kiértékelése számítógépen lehetséges.

5. Törzs kettétörésére vonatkozó biztonsági tényező meghatározása

Az akusztikus tomográfia kiértékelésének meghatározó pontja a biztonságosságra vonatkozó számítás, mely a törzs teherbíró képességéről, annak kettétöréssel szembeni tartásáról ad információt. (Biztonsági tényező máshogy, más részre is számolható, pl. húzóvizsgálat során a gyökerestül való kifordulásra, ámbár ezek nem képzik jelen cikk tárgyát.)

A biztonsági tényező (SF, az angol Safety Factor) a becsült teherbírás és a becsült terhelés aránya (pl. 2,78 vagy 278%, de nem valószínűség vagy esély!) [15].

$$SF = (\text{teherbíró képesség}) / (\text{össz. terhelés}) \qquad (1)$$

Ami jelen estünkben (vagyis a mért rétegre, és csak akkor, ha a törzs nem hasadt fel):

$$SF_{\text{törzs_tomogram}} = \sigma_{\text{nyszil}} / (\sigma_{\text{szél}} + \sigma_{\text{önsúy}} + \sigma_{\text{dőlés}}) , \qquad (2)$$

ahol:

σ_{nyszil} – az adott fafajra vonatkozó nyomószilárdság [N/m^2],
$\sigma_{\text{szél}}$ – (az adott sebességű) szél által létrehozott hajlítófeszültség [N/m^2],
$\sigma_{\text{önsúy}}$ – önsúlyból adódó nyomófeszültség [N/m^2],
$\sigma_{\text{dőlés}}$ – a fa dőléséből számolt hajlító feszültség [N/m^2].

A nyomószilárdság roncsolásos tesztekkel határozható meg, a számításokhoz a stuttgarti táblázatokból [4] veszszük az értékét (lásd 1. táblázat).

1. táblázat: *Az elemzésekhez használt néhány fafaj jellemző adatai a stuttgarti táblázat alapján*

Fafaj	Javasolt ellenállási tényező [c_{fafaj}]	Élő, nedves sűrűség [kg/m^3]	Nyomószilárdság [MPa]
Akác	0,15-0,2	929	20
Amerikai tulipánfa	0,25	427	17
Erdeifenyő	0,15	528	17
Európai bükk	0,25-0,30	655	22,5
Európai vörösfenyő	0,15	769	17
Fehér fűz	0,2	408	16
Fehér nyár	0,2	756	20
Fekete nyár	0,2	394	20
Kislevelű hárs	0,25	398	20
Kocsányos tölgy	0,25	697	28
Közönséges jegenyefenyő	0,2	415	15
Közönséges lucfenyő	0,2	424	21
Közönséges nyír vagy bibircses nyír	0,12	634	22
Magas kőris	0,2	594	26
Mamutfenyő	0,2	801	18
Platán	0,25	539	27
Vörös tölgy vagy amerikai tölgy	0,25	657	20

A szélterhelés és a szél által létrehozott hajlítófeszültség számolása során a favizsgálatban megszokott logikát követjük, vagyis a fákkal kapcsolatban a ’80-as évek óta használt [16, 17], az áramlástan területéről átvett (a valós helyzetet némileg egyszerűsítő) szélerőből indulunk ki.

$$F_{szél} = 0{,}5\, \rho_{levegő}\, c_{fafaj}\, A_{korona}\, v_{szél}^2 \,, \qquad (3)$$

ahol:

$\rho_{levegő}$ – a levegő sűrűsége [kg/m³], (hőmérséklet függő érték, de a gyakorlatban 1,2 kg/m³ érték használata javasolt),
c_{fafaj} – fafaj függő ellenállási tényező [-] (néhány jellemző értékét lásd 1. táblázatban),
A_{korona} – a korona szélnek kitett felülete [m²],
$v_{szél}$ – szélsebesség [m/s].

A szél forgatónyomatéka:

$$M_{szél} = F_{szél}\, h_{kk} \,, \qquad (4)$$

ahol:

h_{kk} – a korona középpontjának magassága [m].

A szél által létrehozott, a törzs alján mért hajlító feszültség:

$$\sigma_{szél} = M_{szél}\,(z/I) \,, \qquad (5)$$

ahol:

z – a semleges tengelytől mért távolság (ez az a tengely,ahol hajlítás során nincs feszültség) [m],
I – az adott magasságbeli inercia, másodrendű nyomaték [m⁴].

Az inercia az $I = \iint_{x\,y} x^2\, dx\, dy$ kettős integrállal számolható. Értéke kör tartományra $I_{kör} = (\pi d^4) / 64$. Vagyis a szél által létrehozott hajlítófeszültség kör keresztmetszetű fánál:

$$\sigma_{szél} = M_{szél}\, [64\, z / (\pi\, d^4)] \,. \qquad (6)$$

Mivel a tomográfiát általában más magasságokban is használják, nem csak talajszinten, ezért egy lépést „visszza” kell lépnünk a forgatónyomaték definíciójához (erő szorozva magassággal). A szél által létrehozott hajlító feszültség tetszőleges magasságban:

$$\sigma_{szél} = F_{szél}\,(h_{kk} - h_{réteg})\,(z/I) \qquad (7)$$

ahol:

$h_{réteg}$ – a vizsgált réteg magassága [m].

A szél által létrehozott hajlítófeszültség kör keresztmetszetű fánál, tetszőleges magasságban:

$$\sigma_{szél} = F_{szél}\,(h_{kk} - h_{réteg})\,[64\, z/(\pi\, d^4)] \,. \qquad (8)$$

Az önsúly és az abból adódó nyomófeszültség meghatározásához szintén közelítő modellt használunk, mely az esetek többségében 5-15%-kal felül becsüli a tömeget. A modellünk egy homogén rúd, mely ugyanolyan sűrűségű és magasságú, mint a fa. Átmérője állandó, a fa 130cm-es magasságban mért, úgynevezett mellmagassági átmérője.

$$m_{fa} = \rho_{fa}\, H\, D_{1.3}^2\, \pi / 4 \,, \qquad (9)$$

ahol:

m_{fa} – a fa tömege [kg],
ρ_{fa} – a nedves, zöld fa sűrűsége [kg/m³] (néhány jellemző adat az 1. táblázatban),
H – a fa magassága [m],
$D_{1.3}$ – a mellmagassági átmérő [m].

Általánosan, nem kör keresztmetszetű fára:

$$m_{fa} = \rho_{fa}\, H\, A_{törzs} \,, \qquad (10)$$

ahol:

$A_{törzs}$ – a törzs keresztmetszete [m²].

Ép törzs esetén a nyomófeszültség:

$$\sigma_{önsúly} = m_{fa}\, g / A_{törzs} \,, \qquad (11)$$

ahol:

g – a gravitációs állandó (9,81 m/s²),
$A_{törzs}$ – a törzs keresztmetszete [m²].

A fa teljes tömege $m_{fa} = \rho_{fa} H A_{törzs}$. Nyomófeszültség számolásakor csak a vizsgált réteg feletti tömeget kell figyelembe venni, mivel csak ezt a tömeget kell megtartania a rétegnek. A fa tömeg egy adott réteg felett:

$$m_{fa} = A_{törzs}\,(H\text{-}h_{réteg})\, \rho_{fa} \,, \qquad (12)$$

ahol:

$h_{réteg}$ – a vizsgált réteg magassága [m].

Az önsúlyból adódó nyomófeszültség adott rétegre, ha ép a törzs:

$$\sigma_{önsúly} = [A_{törzs}\,(H\text{-}h_{réteg})\, \rho_{fa}\, g] / A_{törzs} \,. \qquad (13)$$

$A_{törzs}$-zsel egyszerűsítve:

$$\sigma_{önsúly} = (H\text{-}h_{réteg})\, \rho_{fa}\, g \,. \qquad (14)$$

Az önsúlyból adódó nyomófeszültség adott rétegre, ha korhadás van a vizsgált rétegben:

$$\sigma_{önsúly_{korhadt}} = (H\text{-}h_{réteg})\, \rho_{fa}\, g\, (A_{törzs} / A_{ép_rész}) \,, \qquad (15)$$

$A_{ép_rész}$ – a valóban terhet tartó, ép faanyag területe [m²].

Érdemes lehet tudnunk róla, hogy a szélteher általában legalább tízszer nagyobb, mint az önsúlyból adódó teher. Így a tömeg túlbecslése az összterhelést általában kevesebb, mint 1%-kal növeli.

Hajlítófeszültség akkor jelentkezik, ha a törzs nem függőlegesen áll, dől valamilyen irányba. Ekkor a dőlésből fakadó hajlító feszültség:

$$\sigma_{dőlés} = (m_{fa}\, g\, h_{kk} \sin\alpha)\,(z/I) \,, \qquad (16)$$

ahol:

m_{fa} – a fa tömege [kg],
g – a gravitációs állandó (9,81 m/s²),
h_{kk} – a korona középpontjának magassága [m],
α – a törzs dőlési szöge a függőlegeshez képest,
z – a semleges tengelytől mért távolság (ez az a tengely, ahol hajlítás során nincs feszültség) [m],
I – az adott magasságbeli inercia, másodrendű nyomaték [m⁴].

Az inercia kör esetében kapott értékét beírva megkapjuk a hajlítófeszültséget kör keresztmetszetű fákra:

$$\sigma_{dőlés} = (m_{fa}\, g\, h_{kk} \sin\alpha)\,[64\, z/(\pi\, d^4)] \,. \qquad (17)$$

4. ábra: *Betonszerkezet mérése. Jobbról balra: érzékelők egy betonoszlopon, mérés, „koppintás" kis (fém) kalapáccsal, és egy oszlop tomogramja. A zöld szín magasabb hangsebességre, míg a sárga, a piros és a kék színek egyre alacsonyabb hangsebességre utalnak*

A fentiek alapján a törzs ketté törésére vonatkozó, tomográfián alapuló biztonsági faktor (a mért rétegre, és csak akkor, ha a törzs nem hasadt fel):

$$SF = \frac{\sigma_{nyszil}}{F_{szél}\left(h_{kk} - h_{réteg}\right)\left(\frac{z}{l}\right) + \left(H - h_{réteg}\right)\rho_{fa} g\left(\frac{A_{törzs}}{A_{ép_rész}}\right) + \left(m_{fa} g h_{kk} \sin\alpha\right)\left(\frac{z}{l}\right)} . \quad (18)$$

A tomográfia alapján készült, egyszerűsített tomogram (, mely csupán „tartó" és „nem-tartó" kategóriába sorolja a faanyagot), mind az ép rész keresztmetszetében, mind pedig (számítógépes számításokkor) az inerciában jelenik meg.

A biztonsági tényező értékelése három sávot különböztet meg. Ha az érték 1,5 feletti, akkor alacsony annak a kockázata, hogy a törzs a mért rétegben törjön ketté. Azért nem 1 egész, hanem 1,5 fölött alacsony a kockázati besorolás, mert a számításhoz használt adatok egy része becsült (pl. koronaterület, fa tömege). Általánosságban elmondható, hogy az értékelés során, bizonytalan esetben inkább a kockázat túlbecslésére és semmiképpen nem a biztonság túlbecslésére törekszünk.

A következő kockázati besorolási sáv a „mérsékelt kockázat", ami a biztonsági tényező 1 és 1,5 közti értékeihez tartozik, míg, ha a biztonsági tényező 1 alatti, akkor a kockázat magas, valószínűleg beavatkozás szükséges még a következő nagyobb vihar előtt.

6. Kitekintés – akusztikus mérések fa- és betonszerkezeten

A faszerkezetek akusztikus mérései megelőzték az élő fán történő méréseket, ezek alapján kezdtek el akusztikus eszközökön dolgozni az élő fával foglalkozó szakemberek is [18].

A faszerkezetek vonalmenti akusztikus mérései a szerkezeti elemek teherbíróképességéről adnak információt. Mind a beépített faanyagok mind pedig a fűrészárú vizsgálható ilyen módszerekkel. A tomográfia ugyancsak alkalmazható különböző faszerkezetek esetében is (pl. fa kilátó ...), mely során a tomográf képes megmutatni a szerkezet gyengébb (akár belső) részeit is. Bővebben a témáról jelen szám további cikkeiben olvashatunk.

Az akusztikus tomográfia betonszerkezetek vizsgálatára, belső hibáinak feltérképezésére is használható. Ebben az esetben a hangsebesség irányfüggetlen (az iránykompenzáció értéke 1 az élő fáknál megszokott 0,7-0,8 helyett). Valamint az érzékelő kiképzése módosul annyiban, hogy nem kell hegyesnek, tüskésnek lennie, hiszen nincs jelen az akusztikailag rosszul csatoló kéreg. Beton vizsgálatakor érdemes lapos végű érzékelőkkel dolgozni, ezeket gyurmaragasztóval rögzíteni a kívánt pozíciókra. A jobb hangvezető képesség miatt a hangjel gerjesztésére használt kalapácsot is érdemes kisebbre cserélni. A jellemző hangsebesség tartomány a beton esetében 2-3-szor magasabb, mint a fa esetében (lásd 4. ábra).

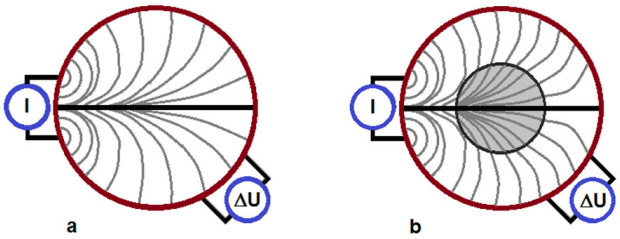
7. Impedancia tomográfia

A fák, fafajuknak megfelelően, elektromos impedancia mintázatot mutatnak, ha az akusztikus tomográfiához hasonlóan a növekedés irányára merőleges síkban mérünk. A konkrét impedancia érték, ami két (elektromos) érzékelő között mérhető azonban nem csak a fafajtól vagy a faanyag minőségétől függ, hanem például a hőmérséklettől is [19].

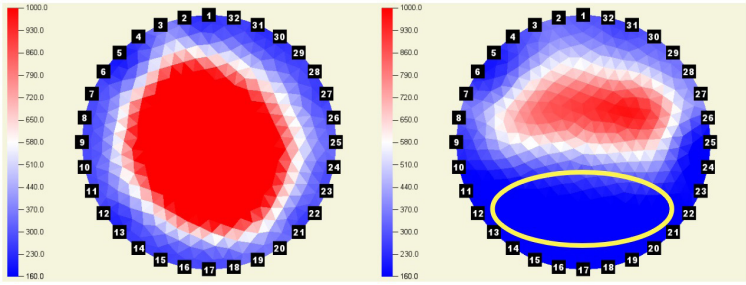
Alex Shigo, a „modern faápolás atyja", még a '70-es években próbálkozott az átmérő mentén mérhető ellenállás értelmezésével (saját műszert is fejlesztett shigométer néven). Az eredmények értelmezése azonban kimondottan nehézkesnek bizonyult, így a shigométer nem terjedt el a favizsgálati gyakorlatban [20].

A mintázat, egy átfogóbb kép keresésének, értelmezésének ötlete a geofizika irányából tért vissza a favizsgálat területére. A geofizikában alkalmazott impedancia tomográfia és a favizsgálat során alkalmazott között a fő különbség a geometriában jelentkezik. A talajra érzékelők egy sora kerül lehelyezésre, míg a fa törzsén a törzset követve, körben helyezkednek el az érzékelők, egymással szemben is [21]. A mérés, favizsgálatban szokásos elnevezése EIT (elektromos impedancia tomográfia), ami azonban kicsit félrevezető. Valójában egyenáramú mérések történnek, de az élő faanyag polarizációja miatt másodpercenként 4-szer polaritást váltunk, 2 Hz-es négyszög jelet használva. Ezért nincsen mérve a képzetes komponens.

Az akusztikus tomográfia és az elektromos impedancia tomográfia közti fő különbség a jelek terjedésében keresendő. Míg az akusztikus jelet elképzelhetjük úgy, hogy az egyenes vonalban halad két érzékelő között, addig az



5. ábra: Az impedancia tomográfia működési elve; I – az áram betáplálás, kettő elektródán, ΔU – a feszültségmérés szintén két elektródán, a) homogén keresztmetszet esetén, b) inhomogén keresztmetszet esetén



6. ábra: Ellenállás tomogram egészséges (balra) és beteg (jobbra) luc fenyőn. Az egészséges esetben jól lászik a lucra jellemző mintázat (kívül alacsonyabb ellenállásértékek, belül, körben magasabbak). A beteg fánál megfigyelhető, hogy a gomba által támadott részen alacsonyabb ellenállás mérhető, mint az ép részen és a minta is torzult

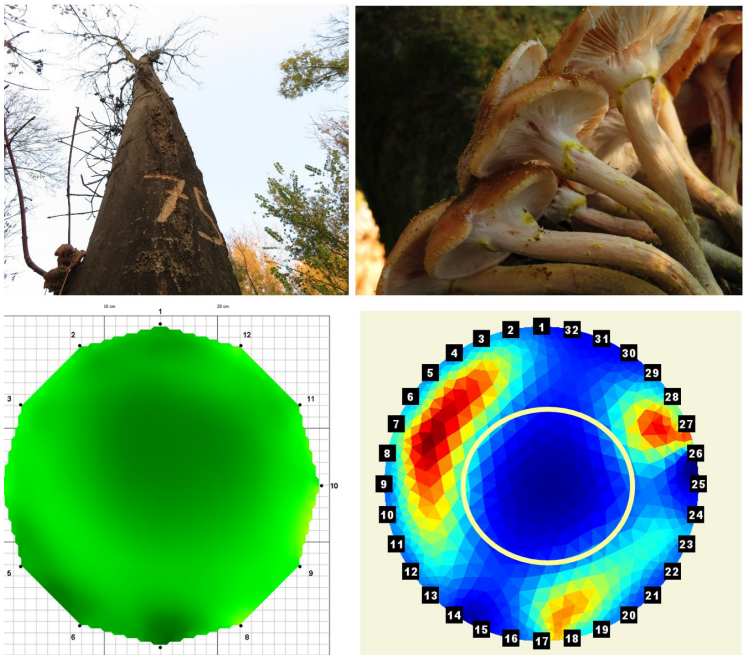
elektromos mérések görbék, cilinderfelületek mentén történnek két-két érzékelő, elektróda között (lásd 5. ábra). Az impedancia tomogram iterációk segítségével határozható meg.

Természetesen az impedancia tomogram információ tartalma is különbözik az akusztikus tomogramétól. Míg akusztikus esetben a faanyag minőségéről és teherbíró képességéről kapunk képet, addig az impedancia tomográfia elsősorban az anyag inhomogenitásait képes megtalálni, élő fák tekintetében ez a tomogram mintázatok összehasonlításával értelmezhető (lásd 6. ábra).

Vagyis, először fel kell vennünk egy fafaj egészséges egyedeinek tomogramjait (ezek hasonló mintázatot fognak mutatni, lásd 6. ábra). Ha rendelkezésre áll, ellenőrzésképpen érdemes lehet felvenni ismerten beteg, gombatámadott fák tomogramjait is. Ha az impedancia tomogramon látható mintázat eltér az egészséges esetben várhatótól, vagyis a szabad ionok, töltések eloszlása más, ez általában valamilyen sérülésre, gomba támadásra, ághelyre utal.

A favizsgálati gyakorlatban impedancia tomográfiával az akusztikushoz képest korábban lehet észlelni egy gombatámadást (még azelőtt, hogy a faanyag mechanikai tulajdonságai jelentősen megváltoznának).

Az akusztikus és az impedancia tomográfia jó kiegészítője egymásnak, együttes használatuk a fa jövőjét tekintve pontosabb becslést ad, mely ismeretében pontosabb gondozás írható elő és valósítható meg (lásd 7. ábra).



7. ábra: Fiatal kőris fa láthatóan rossz állapotban (balra, fent), a kőrisfát megtámadó tuskógomba (jobbra fent), akusztikus (balra, lent) és impedancia (jobbra lent) tomográfiával kapott kép. A faanyag még nem gyengült meg annyira, hogy az látható legyen az akusztikus tomogramon, míg (a jelölt részen) már látható az elváltozás az ellenállás tomogramon

8. Összefoglalás

A cikk áttekintette a lakott környezetben élő fák akusztikus és elektromos impedanciás mérési lehetőségeit. A mért eredményeken alapuló biztonsági számolás is röviden bemutatásra került, ahogy az élő fákra kifejlesztett mérőeszközök más anyagokon való felhasználása is.

Az egy vonalon történt akusztikus méréssel a faanyag minősége, illetve a faanyag épsége (vagy korhadás esetleges jelenléte) becsülhető. A tomográfiás mérések során sokkal több vonalon történik a mérés, így, a megfelelő számítások után, kép is kapható a vizsgált réteg(ek)ről, illetve, interpolációval a rétegek közöti rész is becsülhető, amit egy 3D modell ad vissza.

Az akusztikus méréseket „holt” fán, faszerkezeteken, épületen, kilátókon is sikerrel alkalmazzák, a tomográfia még beton oszlopok, vagy akár falrészek vizsgálatára is alkalmas.

Az impedancia tomográfia jól egészíti ki az akusztikus tomográfiát, használata előbb jelzi a gombatámadásokat, illetve pl. benőtt ághelyek megtalálásával pontosíthatja az akusztikus tomogram értelmezését.

Irodalomjegyzék

[1] Shibata S., Suzuki N.: Effects of an indoor plant on creative task performance and mood, Scandinavian Journal of Psychology, 45, 2004. pp.373–381.

[2] Taylor A. F., Wiley A., Kuo F. E., Sullivan W. C.: Growing Up in the

Inner City: Green Spaces As Places to Grow. Environment and Bhavior, 30, 1998. pp.154-168.

[3] Brudi E., van Wassenaer P. J.: Trees and Statics: Nondestructive Failure Analysis. In: Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings: How Trees Stand Up and Fall Down. International Society of Arboriculture, Champaign, Illinois, 2002. pp.53-70.

[4] Wessolly L., Erb M.: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer Verlag, Berlin, Germany. 1998.

[5] Allison, R. B., Wang, X., Senalik, C.A.: Methods for Nondestructive Testing of Urban Trees. Forests 11, 2020, https://doi.org/10.3390/f11121341

[6] Ostrovský, R., Kobza, M., Gažo, J.: Extensively damaged trees tested with acoustic tomography considering tree stability in urban greenery. Trees 31, 2017. pp1015–1023 https://doi.org/10.1007/s00468-017-1526-6

[7] Shortle, W. C.: Shigometer In: Maloy. O.C.; Murray, T.D., eds. Encyclopedia of Plant Pathology. New York, NY: John Wiley 2000. pp.902-903.

[8] Bucur Voichita: Acoustics of Wood. CRC Press, 1995.

[9] Divós Péter: Akusztikus tomográfia élő fák vizsgálatára; TDK dolgozat, Budapest, BME, 2004.

[10] Wang X., Ross R. J., McClellan M., Barbour R. J., Erickson L. R., McGinnis G. D.: Nondestructive evaluation of standing trees with stress wave methods. Wood and Fiber Science 33. 2001. pp.522- 533.

[11] Kobza, M., Ostrovský, R., Adamčíková, K.: Stability of trees infected by wood decay fungi estimated by acoustic tomography: a field survey. Trees. 2021. https://doi.org/10.1007/s00468-021-02185-w

[12] Divos F., Szalai L.: Tree evaluation by acoustic tomography. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Berkeley, 2002. pp 251–256

[13] Buza A. K., Divos F.: Spruce tree fighting back–study of honey fungus infection. Folia Oecol 43. 2016. 204–207

[14] ARBORSONIC 3D: User's Manual, 2020., https://upload.fakopp.com/manuals/Manual.en-USv6.2.3.pdf

[15] Buza A. K., Goncz B.: Comparison of trees and NDT methods. Wood Research 60(1). 2015. pp. 45-58.

[16] Jones H. G.: Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, Cambridge, 1983.

[17] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai. Előadás jegyzet, Budapest, 1992. https://mek.oszk.hu/00500/00584/00584.pdf

[18] Divós F., Divós P., Divós G.: Acoustic Techniques: From Seedling to Wood Structures. Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.) Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA. 2007. pp.3-12.

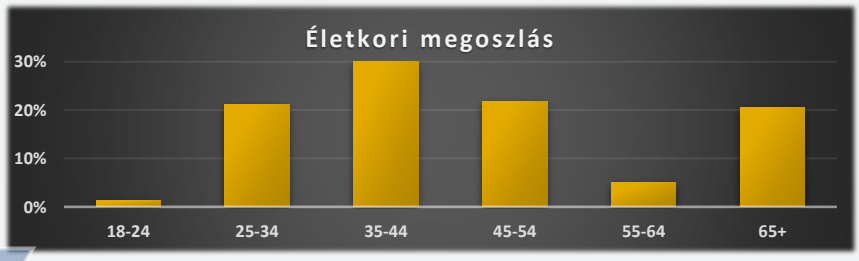
[19] Buza A. K., Divós F.: "Time-lapse" case study of impedance tomography on beech. General Technical Report-Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, (FPL-GTR-272), 2019. pp. 376-381.

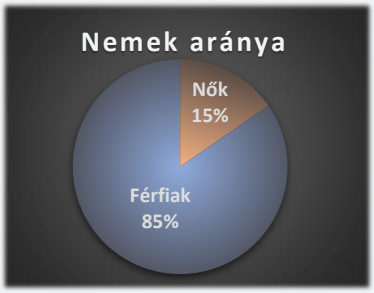
[20] Wilson, P. J., Allen, J. D., Walker, J. C. F.: Appraisal of the Shigometer technique. New Zealand Journal of Forestry Science, 12(1), 1982. pp.86-95.

[21] Goncz B., Divos F., Bejo L.: Detecting the presence of red heart in beech (Fagus sylvatica) using electrical voltage and resistance measurements. Eur. J. Wood Prod. 76(2). 2018. pp.679–686.

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA - 1 ÉVE A FACEBOOKON

Facebook oldalunk 1 éves lett, mely alatt **közel 160 kedvelőnk** lett. A legtöbb olvasónk Budapestről, Debrecenből, Miskolcról és Szegedről követi a facebook oldalunkat, melynek nemek közötti és életkori eloszlása a következő:





Legtöbb aktivitást mutató bejegyzésünk a felelős szerkesztőnkkel, Tóth László professzor úrral készített beszélgetés beharangozója