

SZAKDOLGOZAT

Prónay Kristóf

2024.



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Budai Campus

**Favizsgáló és faápoló szakmérnök szakirányú
továbbképzési szak**

**A Ludwig-szögek alkalmazásának előnyei szabálytalan törzsalak
esetén**

Belső konzulens: Sütöriné Dr. Diószegi Magdolna
egyetemi adjunktus

**Belső konzulens
intézete/tanszéke:** Tájépítészeti, Településtervezési és
Díszkertészeti Intézet;
Dísznövénytermesztési és
Dendrológiai tanszék

Külső konzulens: Weisz János

BKM Nonprofit Zrt. FŐKERT Kertészeti
Divízió, favizsgálati és nyilvántartási
osztályvezető

Készítette: Prónay Kristóf

2024.

1. Tartalomjegyzék

1. Tartalomjegyzék	1
2. Bevezetés és célkitűzések	3
3. Szakirodalmi áttekintés	4
3.1 Az élő fa állékonysága és tömege	4
3.2 A szélterhelés	5
3.3 A biztonsági tényező (Safety factor-SF)	6
3.4 A műszeres favizsgálat	7
3.5 Az akusztikus tomográfia	7
3.6 A Ludwig-szögek szerepe, jelentősége	8
3.7 A Fakopp 3D műszeres mérések során előforduló hibák	9
3.7.1 Általánosan előforduló hibák	9
3.7.2 Az irreguláris mérés esetében előforduló hibák	10
3.8 A gyakorlatban használt akusztikus tomográfok	10
3.8.1 A PiCUS akusztikus tomográf	10
3.8.2 Az ARBOTOM 3D akusztikus tomográf	12
3.8.3 A Fakopp 3D akusztikus tomográf	14
3.9 A vizsgált fafajok rövid botanikai leírása	17
3.9.1 <i>Acer platanoides</i> - Korai juhar	17
3.9.2 <i>Acer saccharinum</i> - Ezüstjuhar	18
3.9.3 <i>Aesculus hippocastanum</i> - Közönséges vadgesztenye	18
3.9.4 <i>Celtis occidentalis</i> - Nyugati ostorfa	18
3.9.5 <i>Gleditsia triacanthos</i> - Tövises lepényfa	19
3.9.6 <i>Morus alba</i> - Fehér eper	19
3.9.7 <i>Morus nigra</i> - Fekete eper	20
3.9.8 <i>Platanus acerifolia</i> - Közönséges platán	20
3.9.9 <i>Populus simonii</i> 'Fastigiata' - Oszlopos kínai nyár	20
3.9.10 <i>Quercus robur</i> - Kocsányos tölgy	21
3.9.11 <i>Robinia pseudoacacia</i> - Fehér akác	21
3.9.12 <i>Salix alba</i> - Fehér fűz	21
3.9.13 <i>Styphnolobium japonicum</i> - Közönséges pagodafa	22
3.9.14 <i>Tamarix gallica</i> - Kerti tamariska	22
4. Anyag és módszer	24

4.1	A vizsgált fák kiválasztása	24
4.2	A vizsgált fák Budapesten belüli elhelyezkedése.....	24
4.3	Az alkalmazott mérések leírása.....	26
4.4	Az alkalmazott mérések menete és a vizsgálatokhoz használt eszközök	26
4.5	Az alkalmazott elemzési és szemléltetési módszerek általános leírása.....	28
5.	Eredmények és értékelésük	29
5.1	A kapott értékek alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek alkalmazásának esetén.	29
5.1.1	A Ludwig-szögekkel és azok nélkül kapott eredmények összesítő táblázatának vizsgálata	29
5.1.2	A korhadrt területek alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek alkalmazása esetén.....	30
5.1.3	A biztonsági faktor (SF) alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek alkalmazása esetén.....	33
5.2	A kapott eltérések alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek pozícióinak különböző kiosztása esetén.....	38
5.2.1	A korhadrt terület eltérések grafikonjának elemzése a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében.....	38
5.2.2	A biztonsági faktor eltérések grafikonjának elemzése a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében.....	39
5.3	A két erősen kiugró eltérést mutató mérés adatainak és tomogramjainak vizsgálata	40
6.	Következtetések	42
6.1	A faegyedenként mért adatok hisztogram elemzéseinek összegzése	42
6.2	A cross-plot elemzések összegzése	42
6.3	A mért adatok hisztogram elemzéseinek összegzése	42
6.4	Az eltérések hisztogramjainak összegzése	43
6.5	Az esetleges fafaj specifikus eredmények vizsgálata.....	43
6.6	A kétféle vakszögekiosztással végzett mérések eredményeinek összegzése	44
6.7	A két kiugróan nagy eltérésű mérés tomogramjainak vizsgálatának eredménye.....	44
6.8	A következtetések összegzése	44
7.	Összefoglalás	46
8.	Irodalomjegyzék	47
9.	Ábrajegyzék.....	49

2. Bevezetés és célkitűzések

Napjainkban egyre többen ismerik fel a fák életünkre gyakorolt pozitív hatásait és szeretnének egyre több, lehetőleg koros fát a környezetükben tudni. Különösen igaz ez a városokban, ahol a zöldterületek aránya jóval kisebb, mint a vidéki kistelepüléseken. Emiatt az egyes faegyedek hosszú időn keresztül történő fenntartásának jelentősége felértékelődik. Ennek nyomán egyre gyakoribbá válik a fák állapotának vizsgálata abból a célból, hogy minél tovább biztonságosan megtarthatóak maradjanak. Ezeknek a vizsgálatoknak egy fontos eleme lehet a műszeres favizsgálat, azon belül is a Fakopp 3D akusztikus tomográf használata, mely alkalmazásának célja, hogy minél pontosabb képet kaphassunk a vizsgált fa állapotáról és ezáltal pontosabb és jobban alátámasztott döntéseket hozhassunk annak jövőjét illetően.

Annak érdekében, hogy feleslegesen ne vágjunk ki fákat, de a baleseteket is elkerülhessük, fontos a minél pontosabb és megbízhatóbb vizsgálatok elvégzésének képessége. Ezért különösen fontos a műszerhez elérhető, a pontosság növelésének ígértét hordozó kiegészítők, például a Ludwig-szögek hatásosságának vizsgálata.

Szakdolgozatom készítése során arra a kérdésre keresem a választ, hogy hasznos-e, és ha igen, akkor milyen esetekben a Ludwig-szögek alkalmazása a Fakopp 3D műszerrel történő mérések során. Ezen belül is szakdolgozatom célja mérésekkel alátámasztani azt a feltevést, miszerint, ha a Fakopp 3D akusztikus tomográf műszer alap érzékelői mellett Ludwig-szögeket is használunk, azzal pontosabb képet kapunk a fa vizsgált keresztmetszetének állapotáról. Ennek alapja, hogy a több mérési pont alkalmazásával pontosabban lekövethető a fa keresztmetszetének alakja, ami a feldolgozó szoftver számításaiban és így a fa veszélyességének értékelésében kiemelt szerepet játszik a statikailag még szerepet betöltő és a korhadt, nem teherviselő rész arányainak és elhelyezkedésének megállapításában. Ezen kívül a vakszögek segítségével végzett méréssel több adatból tevődik össze a sebességtérkép, ami így megbízhatóbb eredményt ad a több hangútvonal értékelése miatt, mivel így jobban átjárja a hang a vizsgált keresztmetszetet, javítva ezzel a lefedettséget és a felbontást.

Ennek vizsgálatára méréseket fogok végezni a műszerrel a Ludwig-szögekkel és azok nélkül, majd az így kapott eredményeket fogom olyan vizsgálatoknak alávetni, melyekből kiderülhet, hogy valóban érdemes-e használni őket, javítják-e a vizsgálat pontosságát és ha igen, akkor milyen módon a legeredményesebb az alkalmazásuk.

3. Szakirodalmi áttekintés

Ebben a fejezetben ismertetem a témám szempontjából fontos szakirodalmi források megállapításait, hogy bemutathassam az általam végzett vizsgálatok tudományos háttérét és elhelyezhessem azokat a favizsgálati eljárások rendszerében.

Elsőkén az élő fa állékonyságáról és a szélterhelésről írok részletesen, majd kifejtem a biztonsági tényező fogalmát, hogy a későbbiekben részletezett műszeres favizsgálati módszerek és az ezekhez tartozó eszközök leírásánál elősegíthessem azok működésének megértését.

3.1 Az élő fa állékonysága és tömege

Szakedolgozatom témájához nem csatlakozik szorosan a gyökérzet stabilitása, ezért ebben a részben csak a törzs stabilitására térek ki.

Egy ép fatörzs a fa stabilitását többszörösen túlbiztosítja. A törzsben elhelyezkedő romlás egy bizonyos fokig nem jelent statikai problémát, efölött azonban egy nagy széllökés akár a törzs törését is okozhatja. A romlás értékelésénél nem csak annak nagysága meghatározó, hanem az elhelyezkedése is legalább annyira fontos, hiszen a korhadt és ép részek egymáshoz viszonyított elhelyezkedése alapvetően befolyásolja a törzs statikáját. Például a korhadt rész egészen jelentős mértékű is lehet a stabilitás számottevő romlása nélkül, amennyiben a törzshöz képest koncentrikusan helyezkedik el, ellenben aszimmetrikus elhelyezkedés esetén már egy kismértékű korhadás is jelentősen ronthatja a fa stabilitását. Ez utóbbira példa lehet egy a törzsen található nyílt odú, mely (kosszarvasodás nélkül) igen nagy gyengülést eredményez, mivel ilyenkor a leggyengébb keresztmetszet „C” alakú lesz, ami egy nyitott falú csőnek felel meg a fizika törvényei szerint, ami statikailag sokkal gyengébb, mint egy zárt cső. Statikai megközelítéssel a fák befogott tartóhoz hasonlóan működnek, melyekben a szélterhelés hatására hajlító feszültségek ébrednek, amelyek kellő nagyság esetén a törzs törését okozhatják, vagy kihúzzák a földből a fa lehorgonyzásáért felelős gyökereket (DIVÓS, 2018; DIVÓS ET AL, 2021; LUKÁCS, 2017).

A fa gyökér feletti részéhez tartozó önsúlyának számításánál a fát csak egyszerűsítésekkel tudjuk megadni a számítások során, mivel ahány fa annyi féle törzskeresztmetszet, elváltozás, forma, koronaméret, koronaalak és egyéb változók lépnek fel, amelyeket nem lehet minden egyednél pontosan lemérni és megadni. Emiatt sok egyszerűsítésre van szükség, és arra, hogy ezek során inkább a biztonság javára térjünk el a valós alaktól. Az ilyenkor használt „famodellek” esetén a fát egy homogén rúdnak feleltetjük meg, melynek sűrűsége és magassága megegyezik a vizsgált fáéval, az átmérője pedig a fa mellmagassági átmérője. Az így kapott modell az esetek döntő hányadában 5-15% -kal felülbecsli a fa tömegét, ami a valóságnál nagyobb becsült teher miatt a biztonságosság szempontjából egy alulbecsléshez vezet, így teljesül az a kíváncsi, hogy mindig a biztonságosság javára tévedjünk.

A fa föld feletti tömege így az alábbi képlettel egyszerűen számolható:

$$m_{fa} = \rho_{fa} \cdot H \cdot D_{1,3}^2 \cdot \frac{\pi}{4}, \text{ ahol}$$

$m_{fa} = a$ fa nedves tömege (kg)

$\rho_{fa} = a$ nedves, zöld fa sűrűsége (kg/m³)

$H = a$ fa magassága (m)

$D_{1,3} = a$ mellmagassági átmérő (m) (DIVÓS ET AL, 2021)

3.2 A szélterhelés

A fabiztonsági számítások többsége tartalmaz valamilyen széladatot. Ez szinte mindig egy km/h-ban vagy m/s-ban kifejezett szélesebesség. A korábbi magyar szabványban 120 km/h [33 m/s]-ás erősségű szél volt megadva, egyenletes szélmodellel számolva. Jelenleg az EUROCODE EN 1991-es szabvány a mérvadó, melyet bonyolultsága miatt szoftver segítségével számolunk. Itt a vizsgált objektumokat a modell sávokra bontja a szélnek való kitettségük szerint, melyekre külön terheléseket számít, majd ezeket összegezve jön ki a keresett szélterhelés nagysága. Ezekben a sávokban a szélterhelést befolyásolják a (Fakopp műszer kiértékelő programjában beállítható) alap-szélesebesség (ez Magyarországon 26 m/s [93,6 km/h]) és a „térsg kategóriák”, melyek a következők lehetnek a jellemző tereptárgyaik magassága, elhelyezkedése és ezáltal szélárnyékoló képességük szerinti növekvő sorrendben, zárójelben a szabványban található eredeti definíciójukkal:

1. Tengerpart (nyílt tenger vagy tengerparti terület, kitéve a tenger felől fújó szél hatásainak)
2. Tópart (tó vagy sík terület elhanyagolható növényzettel és akadályok nélkül)
3. Mezőgazdasági terület (alacsony vegetációjú, például füves terület elszórtan elhelyezkedő akadályokkal (pl.: fák, épületek), melyek egymástól való távolsága legalább a hússzorosa a magasságuknak)
4. Falu (szabályosan vegetációval, épületekkel, vagy olyan különálló akadályokkal borított terület, melyek egymástól való távolsága maximum hússzorosa a magasságuknak, például falu, külvárosi terület, állandó erdő)
5. Város (olyan terület, melynek minimum 15 % -át olyan épületek fedik, amelyek átlagos magassága legalább 15 m) (DIVÓS ET AL., 2021; DIVÓS, 2020; EUROCODE EN 1991).

Amennyiben valamiért mégis magunk szeretnénk szélterhelést számolni, akkor az alábbi képletet használhatjuk, azzal a megjegyzéssel, hogy ha a vizsgált fa 26 méternél alacsonyabb, akkor a képlet általában nagyobb terhet ad eredményül, mint az EUROCODE EN 1991 használata esetén, ellenkező esetben pedig valamivel kisebbet.

$$F_{szél} = 0,5 \rho_{levegő} \cdot C_{fafaj} \cdot A_{korona} \cdot v_{szél}^2, \text{ ahol}$$

$$F_{szél} = \text{szélerő (N)}$$

$$\rho_{levegő} = a \text{ levegő sűrűsége (általában } 1,2 \text{ kg/m}^3\text{)}$$

$$C_{fafaj} = \text{fafajfüggő ellenállásitényező (nincs mértékegysége)}$$

$$A_{korona} = a \text{ korona szélnek kitett felülete (m}^2\text{)}$$

$$v_{szél} = \text{szélesebesség (m/s)}$$

Az ébredő forgatónyomaték képlete pedig tomográfia esetében, a különböző rétegmagasságok miatt az alábbi:

$$\sigma_{szél} = F_{szél} \cdot (h_{kk} - h_{réteg}) \cdot \left(\frac{z}{I_m}\right), \text{ ahol}$$

$\sigma_{szél}$ = a szél forgatónyomatéka (Nm)

$F_{szél}$ = szél erő (N)

h_{kk} = a korona középpontjának magassága (m)

$h_{réteg}$ = a vizsgált réteg magassága (m)

z = a semleges tengelytől (ahol a hajlítás során nincs feszültség) mért távolság (m)

I_m = az adott magasságbeli inercia (m^4) (DIVÓS ET AL., 2021)

3.3 A biztonsági tényező (Safety factor-SF)

A biztonsági tényező egy arányszám, amely azt mutatja meg, hogy hogyan viszonyul egymáshoz a fát várhatóan érő legnagyobb szélterhelés és a fa által törés vagy kidőlés veszélye nélkül elviselhető legnagyobb terhelés.

Ezeknek a terheléseknek a fa többféleképpen képes ellenállni. Egyrészt a faanyagának tulajdonságai révén, másrészt az alakjával és a szerkezetével. A biztonsági tényezővel tudjuk számszerűsíteni, hogy az anyagi és az alaki tulajdonságokból származó teherbírás hogyan viszonyul a várható, becsült terheléshez.

Képlete: SF = teherbíró képesség / összes terhelés. Mértékegysége jellegéből fakadóan nincsen.

A számolt biztonsági tényező nem az egész fára vonatkozik, hanem annak csak a vizsgált rétegére (vagy a gyökérzetére), mivel a számításához felhasznált adatok csak a mért rétegről szolgáltatnak információt. Emiatt amennyiben több rétegen is mértünk, mindig a legkisebb biztonsági tényezőt kell használni a rendelkezésre állók közül a döntéshozatal során. Viszont, ha csak egy rétegen mérünk, akkor nagyon fontos a mérés elvégzésekor pontosan kiválasztani a leggyengébb keresztmetszetet, mert akkor tudhatjuk, hogy az egész fa esetében a legkisebb SF értéket kaptuk a kiértékelés során, így ez alapján tudjuk értékelni a fa állapotát és meghatározni a további sorsát.

Mivel a biztonsági tényező egy arányszám, ezért értéke nagyobb lehet 1-nél, vagy 100% -nál, sőt az a kívánatos állapot, mivel a számolása során történt egyszerűsítésekből eredő hibák kompenzálása miatt általában a 1,5 (150%) feletti biztonsági tényező esetén tekintjük biztonságosnak a vizsgált fát. A 1,5 (150%) és 1 (100%) közötti értékek a „szürkezónába” tartoznak, ahol valamilyen megelőző tevékenységet, például koronakurtítást kell végezni a lehetséges baleset elkerülése érdekében. Az 1 (100%) alatti SF azt jelenti, hogy a terhelés, amivel számoltunk nagyobb, mint a vizsgált fa teherbírása, ezért a törésének vagy kifordulásának nagy az esélye a vizsgált szélebség esetén, tehát a fa veszélyes lehet (DIVÓS ET AL., 2021; DIVÓS, 2018; VIDA, 2023).

A kapott biztonsági tényezőhöz tartozó kockázati értékelést az alábbi táblázat foglalja össze. (1. táblázat)

Biztonsági Faktor	50% alatt	50%-100%	100%-150%	150% felett
Kockázati értékelés	Extrém kockázat	Magas kockázat	Mérsékelt kockázat	Alacsony kockázat

3.4 A műszeres favizsgálat

Műszeres favizsgálatot csak indokolt esetben kell végezni, sok esetben teljesen felesleges, mert már a vizuális favizsgálat is elegendő a döntéshozatalhoz. Amennyiben a szemrevételezés során úgy dönt a favizsgáló, hogy mégis szükséges az elvégzése, akkor is csak a vizuális vizsgálattal együtt értelmezhető, ezért a műszeres vizsgálatot mindig egy vizuális vizsgálat előzi meg, mely során a favizsgáló eldönti, hogy milyen eszközzel, eszközökkel és a fa mely részén, vagy részein végez mérést, hiszen a megbízhatósághoz fontos, hogy a fa leggyengébb részén alkalmazzuk a műszert. A műszeres favizsgálat célja, hogy a favizsgáló a szemrevételezéses vizsgálat során észlelt sérüléseket, elváltozásokat, korhadásra utaló jeleket (például gomba termőtest, kongó hang) szükség esetén a fatesten belül is vizsgálni tudja és meg tudja állapítani a romlás kiterjedtségét és elhelyezkedését a fatestben. A műszeres mérés eredménye általában egy biztonsági érték (SF), mely segít a fa állapotának értékelésében (DIVÓS ET AL., 2021; LUKÁCS, 2017; LUKÁCS ET AL., 2017).

A vizsgálatok lehetnek roncsolással járó és roncsolásmentes eljárások. Dolgozatomban ez utóbbi kategóriára fogok kitérni, ezen belül is az akusztikus tomográfiára.

3.5 Az akusztikus tomográfia

Az akusztikus tomográfia egy roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer, mely a rostokra merőlegesen végzett hangterjedésssebesség mérés révén képes kimutatni minden olyan hibát a fatestben, amely megváltoztatja a hangterjedés útvonaltát vagy sebességét. Ilyen hiba lehet a korhadás, odú vagy hosszabb repedés is (LUKÁCS ET AL., 2017).

A mérési technika alapja, hogy minimum két piezoelektromos gyorsulásérzékelőt rögzítünk a fatesthez (egy gyorsulásérzékelő lehet adó és vevő is), majd az egyiknél (adó) jelet generálunk, például megütjük kalapáccsal, ami elindít egy számlálót, amikor pedig a jel megérkezik egy másik gyorsulásérzékelőhöz (vevő) akkor a számláló leáll és megkapjuk a terjedési időt. Az aktuális adó és a vevők közti egyenes távolságot megmérjük, és a két adat hányadosaként megkapjuk a terjedésssebességet, amit összevetve a fafajra jellemző, vagy az adott fa biztosan egészséges részén mért kontroll sebességgel, megkapjuk, hogy van-e romlás a fában. Megfelelő kiértékelést alkalmazva megkapjuk az érzékelők által kijelölt síkkeresztmetszet radiális hangsebesség-térképét. Természetesen ezen feladatok nagyrészt már a műszer és a hozzá kapcsolódó szoftver végzi (DIVÓS és DIVÓS, 2005; DIVÓS ET AL., 2021).

Ha a terjedési sebesség csökken, akkor az annak a jele, hogy az adó és a vevő között korhadás vagy üreg van. Több vevő esetén (többcsatornás akusztikai tomográfia) nemcsak a romlás jelenlétét, hanem a méretét és az elhelyezkedését is ki lehet mutatni a műszerrel (DIVÓS ET AL., 2021).

A hanghullám lassabban terjed, ha levegőben vagy lazább faanyagban, például korhadásban halad. Az akusztikus műszerek mindig a leggyorsabb jelet mérik, ami áthalad az adó és a vevő közti faanyagon. Mivel a hang egészséges fában, rostirányra merőlegesen, nagyjából 2000 m/s-os sebességgel halad, levegőben pedig csak nagyjából 340 m/s-ot ér el, ezért az a jel ér át elsőként a vevőhöz, amely a legegészségesebb faanyagban halad, még abban az esetben is, ha ehhez meg kell kerülnie a korhadt részt. Ez azt is jelenti, hogy a korhadás belsejéről nem kapunk információt, csak a méretéről és az elhelyezkedéséről. Megzavarhatják a mérést a fában található olyan anyagok, amelyek az egészséges fához hasonlóan, esetleg annál is jobban vezetik a hangot. Ilyenek lehetnek például a reakciófa, a jég vagy a beton, melyek esetében a műszer egészségesnek mutathatja a vizsgált részt, vagy fémdarabok, melyek a fánál jobb hangvezetésük miatt furcsa anomáliákat okozhatnak a vizsgálat során.

A gyakrabban előforduló fafajoknál meghatározták, hogy mekkora a hang terjedési sebessége az egészséges faanyagában. Az akusztikus vizsgálatoknál használt tomogramok (azaz hangterjedési sebesség ábrák) az ezektől a sebességektől való eltéréseket ábrázolják, általában színskálák segítségével, melyeken így jól elkülöníthetők a korhadt és az egészséges területek a vizsgált keresztmetszetben.

Lehetőségünk van arra a mérési pontok számának növelésével, például Ludwig-szögekkel, hogy a vizsgált keresztmetszetet egyre jobban, egyre érzékenyebben fedjük le, így növelve a kapott tomogram pontosságát és felbontását, ám egy (jelenleg még vizsgált) határ után már ezzel a módszerrel sem jutunk többletinformációhoz. Amennyiben a használt érzékelők száma N , akkor $N(N-1)/2$ útvonalon tudjuk mérni a terjedésssebességet (DIVÓS és DIVÓS, 2005). Ez azért lehet fontos, mert a biztonsági tényező kiszámításához használt értékek egy része a tomogramból származik. Például az $A_{\text{ép}}/\text{rész}$, mely a keresztmetszet teherhordó része, vagy az $A_{\text{törzs}}/A_{\text{ép}}/\text{rész}$, ami a teljes keresztmetszet és az ép rész arányát fejezi ki. Ez utóbbival akkor kell számolni, amikor a keresztmetszet területe szabálytalan alakú. Ebben az esetben a mérés során az irreguláris mérési módot kell használni, mert ilyenkor a keresztmetszet teljes területét a kiértékelő szoftver számítja ki a felhelyezett érzékelők pozíciói alapján, szemben a kör vagy ellipszis móddal, amikor az egymásra merőleges átmérőkből számolja ugyanezt. Ilyen esetben fontos, hogy a felhelyezett érzékelők a lehető legjobban lekövessék a fa keresztmetszetének alakját (DIVÓS ET AL., 2021; VIDA, 2023).

3.6 A Ludwig-szögek szerepe, jelentősége

A Ludwig-szögek (másként vakszögek) a Fakopp 3D akusztikus tomográf részei, melyeket Dr. Divós Ferenc azért hozott létre, mert a favizsgálati gyakorlatban azt tapasztalták, hogy a szabálytalan törzsgeometria leírásához több mérési pontra van szükség és ezt a problémát költséghatékonyan akarta megoldani. Segítségükkel a mérési pontok száma megduplázható anélkül, hogy kétszer annyi gyorsulásérzékelőt kellene használni. A Ludwig nevet olasz favizsgálók javasolták Ludwig van Beethoven után, aki bár élete utolsó szakaszában megsüketült, mégis további csodálatos műveket komponált. Ezt csinálja a Ludwig-szög is, ami bár nem képes érzékelni a hangot, mégis nagy segítség a nagyfelbontású tomogram megalkotásában (VIDA, 2023; DIVÓS, 2020).

A Ludwig-szögek érzékelő nélküli jeladók, emiatt önmagukban nem használhatók, de a szögek hegyének alakja, mérete és anyaga megegyezik az érzékelőkéivel. Lényegük, hogy kalapáccsal rájuk koppintva ugyanolyan jelet (hangot) keltenek a fában, mintha egy érzékelőt

kopogtattunk volna meg és ezt a jelet veszik ilyenkor az érzékelők. Ennek több előnye is van. A legkézenfekvőbb, hogy nem kell több drága érzékelőt, erősítődobozt és kábelt vennünk és cipelnünk a vizsgálandó fához a pontosabb eredményhez. Ezenkívül a több mérési pont (és így hangútvonal) segítségével sokszor a valóságot hűbben tükröző diagramot, és SF értéket kapunk a vizsgálat és a kiértékelés végén (DIVÓS, 2020).

A műszer maximálisan 32 érzékelőt és 32 Ludwig-szöget tud kezelni kör- és ellipszis módban mérve, míg irreguláris módban csak 30-30at, mégis a vakszögek használatakor érdemesebb ez utóbbit választani, mivel ilyenkor mi szabhatjuk meg, hogy a két érzékelő között hova tesszük a Ludwig-szögeket, a többi mérési módnál ezt a program határozza meg. Ennek abban van jelentősége, hogy így tudjuk a lehető legpontosabban leképezni a törzs geometriáját, ami fontos szerepet játszik a biztonságosság meghatározásában a korhadat és a még teherbíró részek méretének és elhelyezkedésének értékelésénél.

Használatuk esetén egy rétegen minimum 10 Ludwig-szöget kell alkalmazni, melyek száma mindig meg kell, hogy egyezzen a használt érzékelők számával, mivel ezeket mindig két érzékelő közé kell beütni. Elhelyezésük során le kell követni velük a törzs egyenetlenségeit, hogy a törzs geometriáját a programban a lehető legpontosabban közelítsük a valósághoz. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy ha két érzékelő között egy befűződés vagy egy kitüremkedés, dudor van, akkor annak a legalacsonyabb, vagy kitüremkedés esetében a legmagasabb pontjára kell ütni a vakszöget (VIDA, 2023; DIVÓS, 2020).

A programban a mérés menete a Ludwig-szögek használatával nagyon hasonló a sima mérésekéhez. Ilyenkor a „Térbeli adatok” fülön az érzékelők számánál be kell pipálni a „Ludwig-szögek” rubrikát, hogy megjelenjenek a listában, mint másodlagos érzékelők. Amikor irreguláris módban mérünk, akkor mind az érzékelők, mind a Ludwig-szögek távolságait meg kell mérnünk az első és a középső érzékelőtől a törzsgeometria kirajzolásához.

Ezután az „Idő Adatok” fülön először az érzékelőkkel kell mérni, aztán a Ludwig-szögek jönnek sorban. Ha végeztünk a méréssel, a program ugyanúgy kiszámítja a tomogramot, ami után a „Kiértékelés” és a „Jelentés készítés” is ugyan úgy használható, mint a sima mérés esetében (DIVÓS, 2020; VIDA, 2023).

3.7 A Fakopp 3D műszeres mérések során előforduló hibák

3.7.1 Általánosan előforduló hibák

-Nem érintkezik az érzékelő a farésszel: Ilyenkor a műszer a valóságnál nagyobb korhadást mér, aminek következtében fals lesz minden további eredmény a kiértékelés során. Leggyakrabban a vastag kérgű fajoknál vagy kéregleválás esetén fordul elő. A tomogramon az érintett érzékelőnél egy nyúlvány látható vagy egy egyszínű kék folt utal arra, hogy a szög laza szövetben van (pl.: kéreg), esetleg a kérgen vagy az elvékonyodott paláston áthatolva levegőbe ér. Ilyen esetekben a megoldás vagy az érzékelő mélyebbre ütése vagy az áthelyezése lehet.

-Reakciófába ütöttük az érzékelőt: A reakciófa egyik gyakori típusa az ághelyi korhadásokat követő kalluszosodás során képződött szövet, amely a sérülést igyekszik lezárni. Ebben az esetben a tomogramon nem látszik korhadás jele, mivel a reakciófa rugalmassági modulusa

nagyobb a normális fáénál, ami miatt ebben a szövetben a hang gyorsabban terjed, mint a sértetlen normál fa szövetében. Emiatt a nagyobb sebesség miatt a mért adatok az ép fához hasonlóak lesznek még akkor is, ha a hangnak egy üreget megkerülve kellett megérkeznie az érzékelőhöz (INTERNETES FORRÁS 1; BÍRÓ, 2019). Ilyenkor megoldás lehet az érzékelő áthelyezése, hogy ne érintse a reakciófát.

3.7.2 Az irreguláris mérés esetében előforduló hibák

-Az érzékelők nem egy síkban helyezkednek el: Ebben az esetben fennáll annak a veszélye, hogy az érzékelők között mért távolság eltér a valótól, mivel a mért távolságok szöget zárnak be a mérés síkjával, ami a szoftverben a sík geometria ábrázolásnál súlyos pontatlanságokat eredményezhet, ami hamissá teszi a vizsgálat során kapott adatokat. Ennek a hibának az elkerüléséhez érdemes ebben a mérési módban is mérőszalagot használni az érzékelők felhelyezéséhez, hogy kijelöljük vele a kívánt síkot és ne tolódhassanak el egymástól függőlegesen irányban az érzékelők.

-Az érzékelőtávolságok mérésének pontatlansága: Az irreguláris mérés esetében az érzékelők távolságát nekünk kell megmérni. Ilyenkor, ha nem mérünk pontosan, akkor a kapott geometria és a mért adatok hamisak lesznek (BÍRÓ, 2019).

3.8 A gyakorlatban használt akusztikus tomográfok

3.8.1 A PiCUS akusztikus tomográf

A PiCUS akusztikus tomográf (1. ábra) a német Argus Electronic GmbH. terméke. Működési elve megegyezik az akusztikus tomográfiáról szóló fejezet részben tárgyaltakkal, így a Fakopp műszerével is, de felépítése, használata, és az általa kinyerhető eredmények eltérnek. A fatesttel való érintkezést itt sima szögek szolgáltatják, melyekhez a műszer maximum tizenkét érzékelője mágnesesen csatlakoztatható. A jelgenerálás egy mérőkalapáccsal történik, melynek csatlakozója szintén mágnessel rögzíthető az adó szerepét betöltő szöghöz. Ennél a módszernél különbséget teszünk a szenzorok és a mérési pontok között (mint a Fakopp műszer esetében a Ludwig-szöges mérésnél). A mérési pont (vakszög) egy sima szög, amiből bármennyit használhatunk. Ezek a kalapács csatlakoztatásával adóvá válnak, valamint amennyiben a szenzorokat csatlakoztatjuk hozzájuk, akkor vevőként is funkcionálhatnak a szenzorok vándoroltatása révén, így nagyon sok hangútvonalat mérhetünk vele (LOTHAR, 2016).

A PiCUS műszer részei:

- Fő egység
- Két kábelköteg: mágneses érzékelők és a kábeleik egybefűzve 1-6-ig, illetve 7-12-ig
- Szögek (az érzékelők rögzítésére a fatesthez vagy mérési pontnak)
- Számozott címkék (a szögek jelölésére)
- Gumikalapács (a szögek beütéséhez és a fa vizsgálatához)
- Mérőkalapács mágneses érintkezővel (a mérés kivitelezéséhez)
- PiCUS caliper (távolságméréshez)
- Mérőszalag
- Rögzítő heveder (a fő egység fára való rögzítéséhez) (INTERNETES FORRÁS 1)

A mérés menete röviden:

1. Meghatározzuk a mérés magasságát, valamint a mérési pontok számát és elhelyezkedését
2. Beütjük a szögeket és csatlakoztatjuk hozzájuk az érzékelőket
3. Megmérjük a fa geometriáját a mérési magasságon, ehhez a Fakopp műszeres irreguláris méréshez hasonlóan a szögek egyenes távolságát mérjük le két bázisponttól
4. Elvégezzük a mérést, mely során minden mérési pontot ötször megütünk a kalapáccsal
5. Kirajzoljuk a tomogramot és értelmezzük az eredményeket (2. ábra)

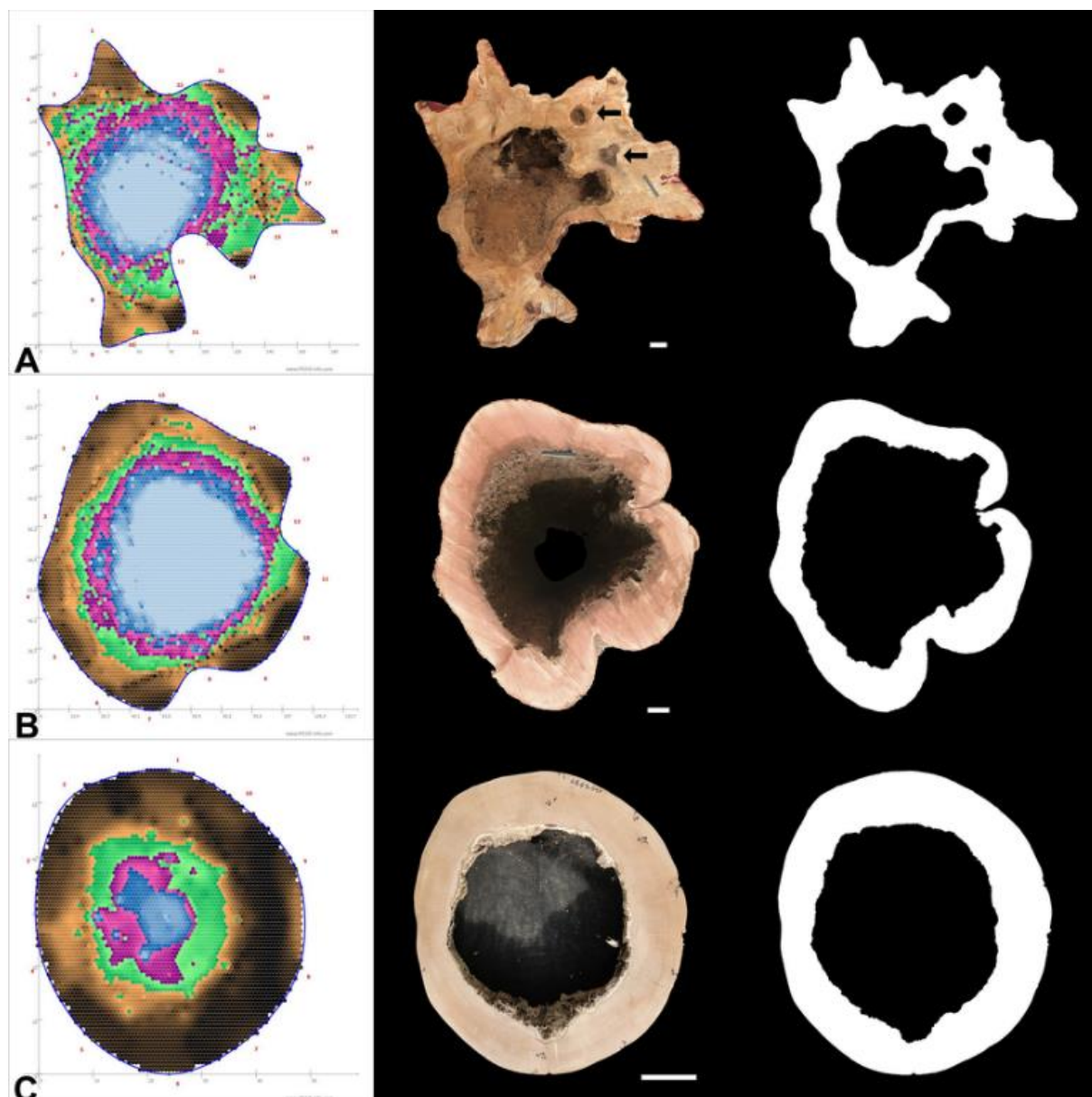
A rendszer előnyei:

- Kevesebb kábel és alkatrész, mint a Fakopp esetében
- Nem szükségesek speciális szögek
- Beépített GPS és famagasságmérő (LOTHAR, 2016)

1. ábra: A PiCUS tomográf az érzékelőivel, valamint az általa készített tomogram a fa képeére illesztve
Forrás: Internetes forrás 1



2. ábra: PiCUS tomográf tomogramjának pontossága
 Forrás: Internetes forrás 3



3.8.2 Az ARBOTOM 3D akusztikus tomográf

Az ARBOTOM 3D akusztikus tomográf a német Rinntech cég terméke. Működési elve megegyezik az akusztikus tomográfiáról szóló fejezet részben tárgyaltakkal, így a Fakopp műszerével is, de felépítése eltérő. Itt is különálló szögek szolgáltatják az érintkezést a fatesttel, melyekhez itt maximum huszonegy érzékelő rögzíthető, vakszögeket nem tud kezelni. A jelgenerálás a Fakopp műszerhez hasonlóan itt is egy sima kalapáccsal történik. A műszer kiegészíthető egy mechanikai modullal, mellyel szélterhelés is számítható a leggyengébb keresztmetszetre (INTERNETES FORRÁS 2; RINNTech, 2019).

A műszer részei:

- Fő egység
- Összekötőkábelek

- Szögek (az érzékelők rögzítésére a fatesthez)
- Kalapács (a szögek beütéséhez és a mérés kivitelezéséhez)
- Mérőszalag
- Íránytű

A mérés menete röviden:

1. Meghatározzuk a mérés magasságát és az érzékelők számát
2. Beütjük a szögeket és csatlakoztatjuk hozzájuk az érzékelőket (3. ábra)
3. Megmérjük a fa kerületét, és az ezen elhelyezkedő szögek egymástól való távolságát, majd a palásttól való merőleges távolságot minden szögnél, ahol eltér a kör keresztmetszettől
4. Elvégezzük a mérést, mely során minden mérési pontot ötször megütünk a kalapáccsal
5. Kirajzoljuk a tomogramot és értelmezzük az eredményeket (4. ábra) (RINNTech, 2019; INTERNETES FORRÁS 2)

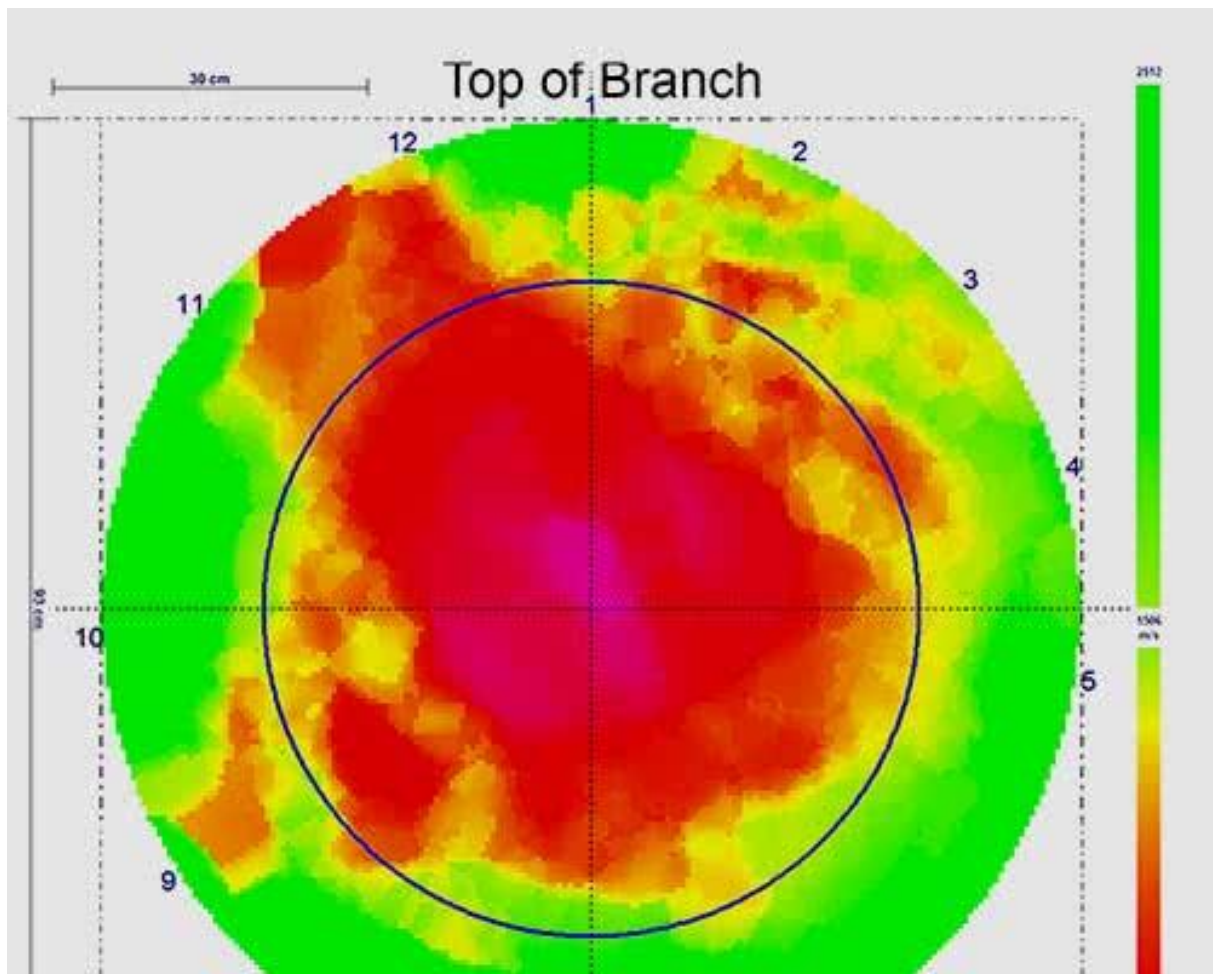
A rendszer előnyei:

- Zöld vagy narancssárga ledekkel jelzi, ha jól, vagy rosszul van összekötve, ezzel jelezve a hiba helyét is, ami nagy segítséget jelenthet terepen

3. ábra: Arbotom 3D akusztikus tomográf műszer
 Forrás: Internetes forrás 2



4. ábra: Az Arbotom 3D tomográf tomogramja
 Forrás: Internetes forrás 2



3.8.3 A Fakopp 3D akusztikus tomográf

A Fakopp 3D akusztikus tomográf a magyar Fakopp Bt. terméke. Működési elve megegyezik az akusztikus tomográfiáról szóló fejezet részben tárgyaltakkal, így az előző két műszerével is, de felépítése eltérő ezektől. Itt nem sima szöveget használunk a fatesttel való érintkezésre, hanem maga az érzékelő van egybeépítve egy tűskével. A műszer maximum 32 érzékelőt tud kezelni, de a PiCUShoz hasonlóan itt is van lehetőségünk vakszögek (Ludwig-szögek) használatára, melyek jelet nem vesznek csak adnak, ám itt csak a használt érzékelőkkel megegyező számban van erre lehetőség, de így is jelentősen megnövelhetjük a mért hangútvonalak számát (DIVÓS, 2020).

A műszer részei:

- Érzékelőtűskék
- Erősítődobozok
- Elemdoboz (Fő egység)
- Összekötőkábelek
- Acél kalapács (a mérés kivitelezéséhez)
- Gumikalapács (az érzékelők és vakszögek beütéséhez)

- Mérőszalag
- Átlaló (távolságméréshez)

A mérés menete:

1. Meghatározzuk a mérés magasságát, az érzékelők számát és helyét, valamint a fa magasságát
2. Az érzékelők rögzítése a törzsre a fa tengelyére merőleges síkban úgy, hogy a tűskék hegye áthaladjon a kérgen és érintse a fatestet
3. Az érzékelők megfelelő sorrendben való csatlakoztatása a számozott erősítődobozokhoz
4. Az erősítődobozok sorba kötése
5. Az elemdoboz csatlakoztatása a sor elejére vagy végére
6. Az elemdoboz csatlakoztatása a számítógéphez, tablethez vagy mobiltelefonhoz
7. A fa fajának, a kéregvastagságának, a beverési mélységnek és az érzékelők helyének megadása a szoftverben az átmérő(k) vagy irreguláris módban mérve a két bázisérzékelőtől mért egyenes távolságaikkal, valamint a mérési geometria kiválasztása a programban (kör, ellipszis, irreguláris)
8. A mérés indítása
9. Az érzékelők egymás utáni megkopogtatása. Mindegyikre legalább 3 alkalommal koppintunk rá, mielőtt tovább lépünk a következőre
10. Kirajzoljuk a tomogramot és értelmezzük az eredményeket, biztonsági tényezőket számolunk a programmal a kiértékelés során (5-6. ábra) (DIVÓS, 2020)

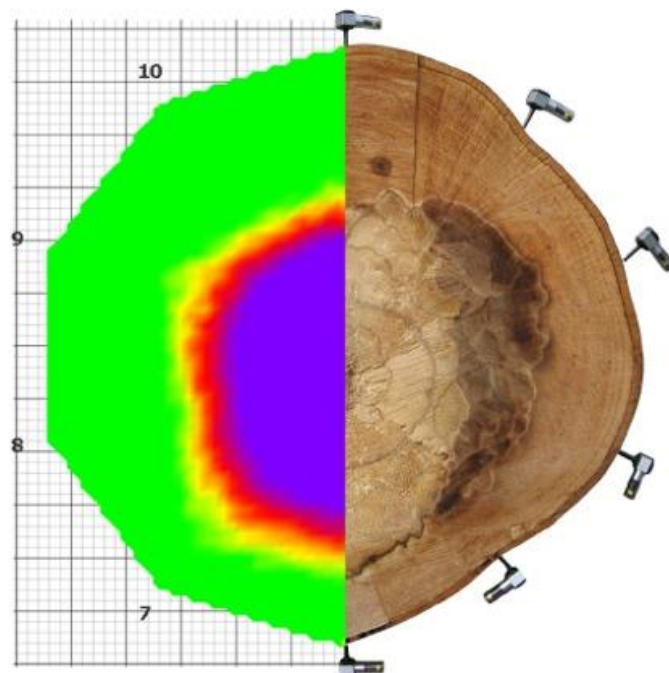
A rendszer előnyei:

- Statikai kiértékelést is végezhetünk a műszerhez tartozó szoftverrel
- Ingyenesen letölthető szoftver, sok mindenre kitérő használati utasítás
- Cserélhető akkumulátor/elem a műszerben
- Könnyen beszerezhető mikrofonkábeleket használ
- Tablettel és telefonnal is használható

5. ábra: Fakopp 3D műszer és tomogramja
Forrás: Internetes forrás 4



6. ábra: A Fakopp 3D tomográf tomogramjának pontossága
Forrás: Internetes forrás 4



3.9 A vizsgált fafajok rövid botanikai leírása

3.9.1 *Acer platanoides* - Korai juhar

Európa nagyrészen őshonos fafaj. Főként dombvidéki és középhegységi elterjedésű faj, gyertyános-tölgyesekben, bükkösökben és szurdokerdőkben gyakori. Rosszul viseli a légszennyezést és a sózást. Töről jól sarjad. Utca- és parkfásításra gyakran használják, ahol gyakran gyomosít.

LEÍRÁSA

Koronája sudaras, magasra tolódó, terebélyes. Törzse egyenes, hengeres, de villásodásra hajlamos. Általában közepes termetű faj, de jó termőhelyen elérheti a 25-30 méteres magasságot is. Rövidebb életű, mérsékelt növekedésű faj. Hajtásai fényes vöröses barnák, rügyei fénylő pirosas-barnák. Levelei keresztben átellenes állásúak, papírszerűek, öt karéjúak, 8-22 cm hosszúak. Termése ikerlependék, melynek szárnyai tompaszöget zárnak be egymással. Fája kemény, nehéz. Tavasszal korán fakad (BARTHA, 1999; HAULIK, 1988; JOHNSON és MORE, 2007; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023).

3.9.2 *Acer saccharinum* - Ezüstjuhar

Észak-Amerikából származó pionír jellegű fafaj. A nedves, nyirkos helyeken fejlődik a legjobban. Mészkerülő, a sózást nem bírja. Ágai törékenyek, törzse a szél hatására elferdülhet, ezért inkább parkfának ajánlott. Nálunk díszfaként gyakran ültetik. Gyors növekedésű fa.

LEÍRÁSA

Boltozatos, széles gúla alakú koronája laza, fűzszerű, a korona szélén lévő ágak gyakran csüngők. Törzse sokszor elhajló, vázái meredeken felfelé törők, hajlamos a vízajtások képzésére. Kérge idősebb korban hosszúkas cserepekben leváló. Nagyobb termetű fa, mely 25-30 méteresre is megnőhet. Rövid életű fafaj. Hajtásai csúcsuk felé vékonyodók, fényes vörösesbarnák. Levelei mélyen öt karéjúak, 8-14 cm hosszúak, színi oldaluk világoszöld, fonákuk ezüstös. Levélélük nagy fogakkal durván fogazott. Termése ikerlependék, mely nagy és gyakran aszimmetrikus. Korán fakad (HAULIK, 1988; SCHMIDT, 2003; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023; NAGY, 2009; JOHNSON és MORE, 2007; RETKES és TÓTH, 2006).

3.9.3 *Aesculus hippocastanum* - Közönséges vadgesztenye

A Balkánon honos fafaj, de hazánkban a XVI. század óta termesztik. Sorfának és parkfának sokáig ültették, de a klímaváltozás és a károsítói miatt jelentősége a városokban csökken. Rosszul viseli a légszennyezést, légszárazságot és a sózást. A talaj tápanyagaival szemben igényes. Allelopátiás tulajdonsága ismert. Gyors növekedésű.

LEÍRÁSA

Koronája keskeny, boltozatos; rövid, ívesen lehajló, görbe ágakból áll. Törzse sokszor csavarodott, rövid. Nagyobb méretű fa, magassága elérheti a 25 métert is. Hosszú életű fa. Hajtásai vastagok, vörösek vagy szürkék; világos paraszemölcsökkel és nagyobb, patkóalakú levélripacsokkal. A csúcsrügy óriási és ragadós. Levelei tenyeresen összetettek, 5-7 levélkéből állnak, az egyes levélké a felső harmadukban a legszélesebbek és ülők. Élük kétszeresen fűrész. Termése nagy mennyiségű, vastag falú, tüskés tok, magjai nagyok, barnák, lapított gömb alakúak szürke köldökfolttal. Fája puha. Korán fakad (JOHNSON és MORE, 2007; HAULIK, 1988; RETKES és TÓTH, 2006; SCHMIDT, 2003; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023; CSAPODY ET AL., 1966).

3.9.4 *Celtis occidentalis* - Nyugati ostorfa

Észak-amerikai fafaj. Kezdetben az akácok második lombkoronaszintjébe szánták. Jól viseli a légszennyezést, a sózást és a szárazságot is. Jó a regenerálódó képessége, emiatt a nagyobb metszéseket is elviseli. Kedvelt utcai sorfa, de a mélyen lehajló oldalágai zavarhatják a forgalmat az úrszelvénybe való belógásukkal. Termését télen a madarak szívesen fogyasztják.

LEÍRÁSA

Széles, szabálytalan koronájú fa. Törzse fiatalon sima, később bibircsesen barázdálttá válik. Magassága elérheti a 20-25 métert is. Hosszúéletű fa. Hajtásai vékonyak, hosszúak (ostorszerűek) és fényes barnák, paraszemölcsökkel borítottak. Rügyei világosbarnák, hosszúak, vesszőre simulók, csúcsuk elhajló. Levelei hegye kihegyezett, elhajló csúcsú. A levéllemez kemény, szabálytalanul fűrészfogas, 6-12 cm hosszú. Színi oldaluk érdes, fényes,

fonákuk szőrökkel borított. Termése borsó nagyságú, gömbös tojásdad, csonthéjas. Fája jó minőségű, kemény. Tavasszal későn fakad (HAULIK, 1988; RETKES és TÓTH, 2006; SCHMIDT, 2003; JOHNSON és MORE, 2007; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023; CSAPODY ET AL., 1966).

3.9.5 *Gleditsia triacanthos* - Tövises lepényfa

Észak-Amerika középső részén honos fafaj, de hazánk közterületein és az alföldön gyakran ültetik. Városokban mára inkább a tövistelen változatát ('*Inermis*') ültetik. Szívós fa, jól bírja a szárazságot, de a nedves talajokat is. Eltűri a sózást és az erős metszést is, ami miatt élősvényként is alkalmazzák. Tuskóról jól sarjad, erős növekedésű. Kedvelt utca- és parkfa.

LEÍRÁSA

Koronája laza, idős korban ernyőszerű. Törzse az alapfajnak görbe és hosszú tövisekből álló töviscsomókkal tarkított, kertészeti változatai egyenesek és általában törzstövis mentesek. Nagyobb termetű fa, kifejtett magassága elérheti a 20-25 métert is. Hajtásai zezzugos növekedésűek, paraszemölcsösek, később az alapfajnál erősen tövisessé válnak. A tövisek nagyok, kemények, hegyesek és háromágúan elágazók. Levelei egyszeresen, vagy kétszeresen szárnyaltak, 7-15 pár levéléből állnak, 20 cm-esek. A levélkék 2-4 cm-esek, megnyúlt tojásdadok, kopaszok, élük gyengén hullámos, levélnyelük rövid. Termése nagy, barna, lapos hüvely, ami a hossztengelye körül megcsavarodik. Benne a magok egy pépes váladékban helyezkednek el. Fája kemény. Az egyik legkésőbb fakadó fánk (HAULIK, 1988; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023; NAGY, 2009; SCHMIDT, 2003; CSAPODY ET AL., 1966; JOHNSON és MORE, 2007).

3.9.6 *Morus alba* - Fehér eper

Belső-Ázsiában honos fafaj. A selyemhernyó tápnövényeként, vele együtt került Európába, ahol útsorfaaként is használták. Hazánkban főként régi vidéki házak kertjében, régi parkokban, szórványosan utak mentén és ártereken kivadulva fordul elő. Édes termését a madarak szívesen fogyasztják. Kiváló minőségű faanyagából pálinkás hordót is készítenek. Talaj szempontjából tágtűrő, a metszést jól viseli.

LEÍRÁSA

Nyitottabb, boltozatos, gömbölyded koronát nevel. Törzse általában karcsú és egyenes. Közepes termetű fa, általában 10-15 méter magas, de jó termőhelyen ennél jóval magasabbra is megnőhet. Hosszú életű fa. Hajtásai fűzszerűek, szürkék, és hamar simává válók. Rügyei kicsik, hegyesek. Levelei vékonyak, simák és fényesek, a fonáki erek szőrösek. Alakjuk széles tojásdad, sokszor mélyen karéjos, az élük durván fogazott. Hosszuk 10-20 cm. Termése szeder szerű, fehér vagy pirosas színű. Fája kemény. Későn fakad (HAULIK, 1988; RETKES és TÓTH, 2006; JOHNSON és MORE, 2007; SCHMIDT, 2003; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023).

3.9.7 *Morus nigra* - Fekete eper

Kis-Ázsiában honos fafaj, de Európában hosszú ideje termesztik. Hazánkban szórványosan, általában vidéki kertekben fordul elő. Szőrös levelei miatt a selyemhernyó nem fogyasztja. Talaj szempontjából tágtűrűsű. Lassabb növekedésű.

LEÍRÁSA

Alacsony, boltozatos, lapított gömb alakú, sűrű és ágas-bogas koronát nevel. Törzse sokszor görbe, rövid, elhajló, dudoros. Közepes termetű fa, általában a 10-12 méteres magasságot éri el. Hosszú életű fa. Hajtásai vaskosak, szőrösek, szürkés színűek. Rügyei szélesek, vörösek. Levelei vastagok, színi oldaluk érdes, általában hosszuk 8-12 cm. Alakjuk visszás tojásdad vagy szív, időnként mélyen karéjos vagy szeldelt, levélélé erősen csipkézett. Termése szeder szerű, fekete (HAULIK, 1988; RETKES és TÓTH, 2006; JOHNSON és MORE, 2007; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023).

3.9.8 *Platanus acerifolia* - Közönséges platán

Spanyolországból vagy Franciaországból származó fa. A keleti- és a nyugati platán állandósult hibridje, melynek bélyegei átmenetet képeznek a két szülőfaj között. Európában több évszázada ültetik, nálunk a XIX. században vált népszerűvé. Parkokba és fasorokba is előszeretettel telepítik. A városi klímát jól tűri, de a légszennyezésre és a sózásra érzékenyek. Sebzáró képessége kiemelkedő. Gyorsabb növekedésű fa.

LEÍRÁSA

Koronája szabad állásban terebélyes, törzse rövid, vázágai hosszúak, többé-kevésbé egyenesek, kisebb ágai erősen görbék. Zárt állásban törzsük egyenes és jól feltisztuló. Kérge krémszínű és szürke, nagy lemezekben leváló. Nagy termetű fa, magassága a 35-40 métert is elérheti. Hosszú életű fafaj, legidősebb angolai egyedei több mint 320 évesek. Hajtásai zegzugosak, barnászöldek, fiatalon nemezesek. Levelei vastag lemezűek, 3-5 karéjúak, 10-25 cm-esek, juharszerűek, de váltakozó állásúak. Termése párosával álló 2,5 cm-es, tavasszal szétnyíló gömb alakú terméságazat, mely szőrös makkokból áll. Későn fakad (JOHNSON és MORE, 2007; CSAPODY ET AL., 1966; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023; HAULIK, 1988; NAGY, 2009; SCHMIDT, 2003; RETKES és TÓTH, 2006).

3.9.9 *Populus simonii* 'Fastigiata' - Oszlopos kínai nyár

Észak-kínai eredetű fafaj. Magyarországon a 'Fastigiata' fajta gyakori. A szennyezett levegőt jól tűri, közepesen szárazságtűrő. Fasorokba, parkokba és mezővédő erdősávokba telepítik, főként kecses, oszlopos habitusa és gyors növekedése miatt.

LEÍRÁSA

Koronája enyhén kúp formájú vagy széles oszlopos. A 'Fastigiata' sarjadzásra erősen hajlamos törzsén és meredeken felfelé törő vázágain fejlődő vékonyabb ágai csüngők. Közepes termetű fafaj, magassága elérheti a 20 métert is. A 'Fastigiata' egyedei 20-30 éves koruk után hajlamosak a hirtelen pusztulásra. Hajtásai szögletesek, kopaszok. Levelei bőr szerűek, visszás tojásdadok, fonákjuk fehéres zöld, kopasz. Szélük sűrűn csipkézett. Méretük változatos, leggyakrabban 5-12 cm hosszúak. A levélnyél rövid, általában 1-2 cm-es.

Termésük hosszú barka, apró magvaik repítőszőrökkel rendelkeznek. Tavasszal korán fakad (JOHNSON és MORE, 2007; RETKES és TÓTH, 2006; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023).

3.9.10 *Quercus robur* - Kocsányos tölgy

Észak-afrikai, Kis-ázsiai és európai elterjedésű, főként síkvidéki faj, alföldjeinken gyakori. Polimorf megjelenésű faj. Természetes területfoglalása nálunk csökkenőben van. Elviseli a szárazabb időszakokat és a sózást is. Töről jól sarjad. Régi kastélyparkokban nem ritkák a matuzsálemkorú egyedei. Parkokba és útmenti területek védőfásítására is használják.

LEÍRÁSA

Vastag, görbe ágai terebélyes koronát alkotnak. Törzse nyúlánk, hengeres, gyakran többé-kevésbé térgörbe. Kérge rövid, mély, érdes bordákra tagolódik. Nagytermetű, lassan növekvő fa, magassága a 35 métert is elérheti. Hosszú életű, élettartama elérheti akár a több száz évet is. Hajtásai gyengén szögletesek, zöldesbarnák, kopaszok. Rügyei a vesszők végén csoportosan állnak, világosbarnák, öt oldalúak, finoman pillásak, csúcsuk tompa. Levelei szórt állásúak, visszás-tojásdadok, vékonyak, kopaszok, mélyen karéjosak. Hosszuk 5-15 cm, levélnyelük rövid, mindössze 3-8 mm, melyet két apró karéj szegélyez. Termései 5-12 cm hosszú kocsányon lógó világosbarna makkok, melyek kupacsa csak a makk negyedét borítja. Fája nehéz, kemény, de rugalmas. Van korán és későn fakadó változata is (BARTHA, 1999; HAULIK, 1988; JOHNSON és MORE, 2007; RETKES & TÓTH, 2006).

3.9.11 *Robinia pseudoacacia* - Fehér akác

Az atlantikus Észak-Amerika fafaja. Főleg a sík- és alacsonyabb dombvidéki kultúrerdők fája. Szárazságtűrő. A termőhellyel szemben igénytelen, de ki is éli azt. Gyökerén nitrogéngyűjtő baktériumok élnek. Töről és gyökérről is jól sarjad, szinte kiirthatatlan. Allelopátiás hatása miatt csak kevés fajt tűr meg maga mellett. Jó mézelo. A városi klímát jól tűri. Igénytelensége és gyors növekedése miatt gyakori útsorfa.

LEÍRÁSA

Koronája magasra tolódó, laza, ágai vékonyak. Törzse nyúlánk, egyenes, koronán átfutó. Kérge vastag, mélyen, hálózatosan bordázott. Nagytermetű, gyorsan növekvő fa, magassága 35 méter is lehet. Hosszú életű, élettartama akár a 200-250 évet is elérheti. Hajtásai vörösesbarnák, bordásak, a levélripacs oldalán egy-egy lapos, szúrós pálhatövissel. Rügyei rejtettek. Levelei szórt állásúak, páratlanul szárnyaltak, 9-23 elliptikus, 2,5-4,5 cm hosszú, finoman kicsípett csúcsú levélkéből állnak. Termései csoportosan lógó vörösesbarna, 6-11 cm hosszú lapos hüvelyek, melyekben kis sötétbarna, vese alakú magok találhatók. Fája nehéz, kemény, tartós. Az egyik legkésőbb fakadó fánk (BARTHA, 1999; HAULIK, 1988; RETKES és TÓTH, 2006; JOHNSON és MORE, 2007).

3.9.12 *Salix alba* - Fehér fűz

Európában és Nyugat-Ázsiában honos fafaj. Síkvidékeken, ártereken gyakori. Hazánkban az alapfaj a Duna és mellékfolyói mentén puhafás ligeterdőkben állományalkotó. A nedves, meszes talajokat részesíti előnyben. Jó mézelo. Tuskóról jól sarjad, jól dugványozható.

Napjainkban kultúrváltozatait ültetik, ezért az alapfaj visszaszorulóban van. Gyors növekedésű.

LEÍRÁSA

Gyakran tötől ágas, kezdetben kúpos, majd széles koronájú fa, hegyes szögben felfelé törő, bókoló végű ágakkal. Törzse sokszor kissé görbe, rövid. Nagy termetű fa, mely akár 30 méteresre is megnőhet. Hosszabb életű faj, élettartama elérheti 120 évet is. Hajtásai nagyon vékonyak, zöldesbarnák vagy vörösesek, fényesek, kezdetben selymesen szőrösek, majd lekopaszodók. Rügyei kicsik, megnyúltak, hajtáshoz simulók, selymesen szőrösek. Levelei szórt állásúak, 5-10 cm-esek, keskeny lándzsásak, közepén a legszélesebbek, a fonákon ezüstösen szőrösek. A levélélük finoman fűrészes. Termése kopasz, hegyes tojásdad, világosbarna, visszahajló csúcsú tok, melyben apró szőrüstökös, körte alakú magvai vannak. Fája könnyű, puha, laza szövetű (BARTHA, 1999; HAULIK, 1988; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023; RETKES és TÓTH, 2006; CSAPODY ET AL., 1966; JOHNSON és MORE, 2007; NAGY, 2009).

3.9.13 *Styphnolobium japonicum* - Közönséges pagodafa

Kína Észak-keleti részén és Koreában honos fafaj. Jó mézelő. Talajokban nem válogat. Jól viseli a szárazságot és a légszennyezést. Gyökérgümőiben nitrogénkötő baktériumok élnek. Parkokba és fasorokba gyakran ültetik, kopárfásításra is alkalmas. Vegetációs ciklusa eltolódott, leveleit zölden hullatja. Gyorsabb növekedésű fa.

LEÍRÁSA

Koronája széles gömbölyded, vastag, szabálytalan, görbe ágakkal. Törzse szürkésbarna, hálózatosan bordás. Nagy méretű fa, magassága a 25 métert is elérheti. Hosszú életű; egy, az angliai Kew Királyi Botanikus Kertben ültetett példányának kora meghaladja a 270 évet. Hajtásai egyévesen hengeresek, fényesek, mohazöldek, szórtan paraszemölcsösek. Idősebb ágai barnák, világos foltosak. Rügyei kicsik, levélalapba rejtettek. Levelei 25 cm-esek, páratlanul szárnyaltak, 9-15 ép szélű, hegyes, 3-6 cm-es levélkéből állnak. Termése 8 cm-es, a magokra szorosan ráfeszülő, nem felnyíló hüvelytermés. Magvait nyálkás burok veszi körül. Későn fakad (HAULIK, 1988; JOHNSON és MORE, 2007; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023; CSAPODY ET AL., 1966; SCHMIDT, 2003; RETKES és TÓTH, 2006).

3.9.14 *Tamarix gallica* - Kerti tamariska

Az Atlanti-óceán közelében, Észak-Franciaországtól Észak-Afrikáig honos. Hazánkban díszcserjeként régóta ültetik. Jól tűri a homokos, száraz talajokat, de az átültetést nehezen viseli el.

LEÍRÁSA

Széles, nagyobb bokortermetű, sarjadzó, eldeformálódott törzsű cserje. Törzse hosszában sűrűn barázdált, rostos, barna. Magassága általában nem haladja meg a 3-5 métert. Hajtásai fel- és szétállóak, fiatalon világoszöldek, később vörösesbarnák. Rügyei nagyon aprók, hajtáshoz nyomottak, egymáshoz közel állók. Levelei spirálisan állók, pikkelyszerűek, lehullók. Virágai az az évi hajtások végén nyílnak, látványosak, rózsaszínek, 5 tagúak, 3-5 cm

hosszúak, tömöttek. Termése négyszögletes, szürkés tok, magja csúcsán szőrüstök van (JOHNSON és MORE, 2007; HAULIK, 1988; CSAPODY ET AL., 1966; HONFI és SÜTÖRINÉ, 2023).

4. Anyag és módszer

Ebben a fejezetben bemutatom az általam vizsgált fák kiválasztásának módját és a városon belüli elhelyezkedésüket, majd részletesen leírom a mérések kivitelezésének menetét és az azok elvégzéséhez szükséges eszközöket. Végül kitérek az általam használt elemzési módszerek általános leírására.

4.1 A vizsgált fák kiválasztása

A méréseim során a Budapesti Közművek Nonprofit Zrt. FÖKERT Kertészeti Divíziójának budapesti fakataszteréből célirányosan kiválasztott 31 darab fán végeztem akusztikus tomográfiás vizsgálatot Fakopp 3D műszer segítségével. A szűrés során olyan fákat választottam ki, amelyek megfelelően nagy átmérőjű -és rossz állapotú- törzsszel voltak nyilvántartva ahhoz, hogy fel tudjam rá helyezni az érzékelőket és a Ludwig-szögeket is kellően nagy távolságra, valamint a fakataszteri fényképek alapján szabálytalan törzskeresztszeggel rendelkeztek. Ilyeneket a város egész területén találtam elszórtan, ezért időoptimalizálás céljából kiválasztottam azokat a helyszíneket, ahol egymáshoz viszonylag közel több előzetesen megfelelőnek vélt fa is található volt. Törekedtem arra is, hogy minél több fafajt, és fajonként lehetőleg több egyedet is vizsgáljak az esetlegesen már ilyen kis darabszámnál is előforduló fajspecifikus eredmények kimutatásához. A rossz törzsállapotra azért volt szükség, hogy a tomogramon lehetőleg nagymértékű romlás rajzolódjon ki, mivel például így tudtam összehasonlítani az alapérzékelős és a Ludwig-szöges mérés pontosságát a biztonsági tényező és a keresztmetszet/romlott rész arányainak változásain kívül.

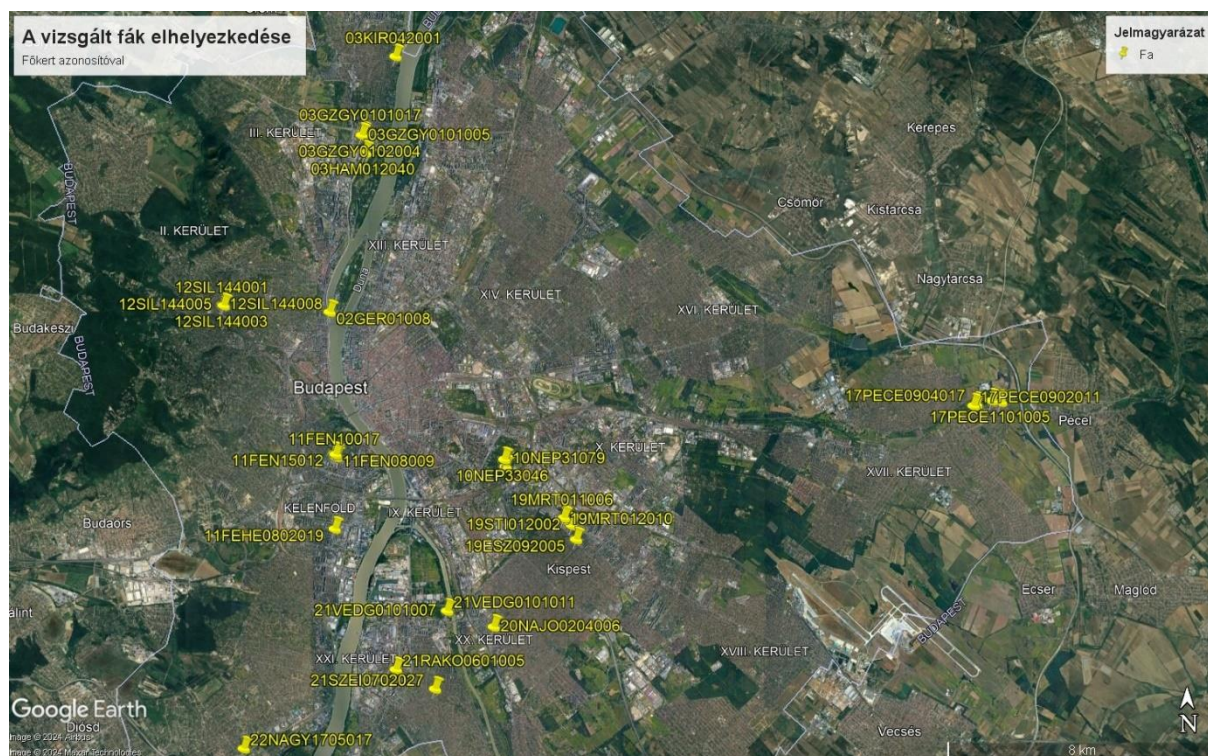
4.2 A vizsgált fák Budapesten belüli elhelyezkedése

A vizsgálatokat az alábbi táblázatban (2. táblázat) és térképen (7. ábra) feltüntetett helyszíneken végeztem az ott található fákon, amelyek megfeleltek az előző pontban kifejtett követelményeknek.

2. táblázat: A vizsgált fák helyszínenkénti bontásban
 Forrás: Saját táblázat

Helyszín	Házszám	Főkert azonosító	Fafaj	Fafaj-Tudományos név
II. kerület				
Germanus Gyula park	Híd Bistro kerthelyiség	02GER01008	Kocsányos tölgy	<i>Quercus robur</i>
III. Kerület				
Gázgyári lakótelep	8.	03GZGY0101005	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>
	Gázos utca 5. II. épület mellett	03GZGY0101017	Közönséges platán	<i>Platanus acerifolia</i>
	8.	03GZGY0102004	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>
Hamvas Béla sétány	9.	03HAM012040	Közönséges platán	<i>Platanus acerifolia</i>
Királyok útja	86.	03KIR042001	Ezüst juhar	<i>Acer saccharinum</i>
X. kerület				
Népliget	-	10NEP31079	Kínai nyár	<i>Populus simonii</i>
	-	10NEP33046	Korai juhar	<i>Acer platanoides</i>
XI. kerület				
Fehérvári út	120-128.	11FEHE0802019	Közönséges pagodafa	<i>Styphnolobium japonicum</i>
Feneketlen-tó	-	11FEN08009	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>
	-	11FEN10017	Fehér fűz	<i>Salix alba</i>
	-	11FEN15012	Ezüst juhar	<i>Acer saccharinum</i>
	-	11FEN15014	Fehér eper	<i>Morus alba</i>
XII. kerület				
Szilágyi Erzsébet fasor	32.	12SIL144001	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>
	32.	12SIL144003	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>
	34.	12SIL144005	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>
	36.	12SIL144008	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>
XVII. Kerület				
Péceli út	234.	17PECE0902011	Nyugati ostorfa	<i>Celtis occidentalis</i>
	246.	17PECE0904017	Fehér akác	<i>Robinia pseudoacacia</i>
	269.	17PECE1101005	Fehér eper	<i>Morus alba</i>
	275.	17PECE1201015	Fehér eper	<i>Morus alba</i>
XIX. Kerület				
Esze Tamás utca	44.	19ESZ092005	Tövises lepényfa	<i>Gleditsia triacanthos</i>
Martinovics utca	3.	19MRT011006	Nyugati ostorfa	<i>Celtis occidentalis</i>
	6.	19MRT012010	Nyugati ostorfa	<i>Celtis occidentalis</i>
Szent Imre utca	2.	19STI012002	Nyugati ostorfa	<i>Celtis occidentalis</i>
XX. Kerület				
Nagysándor József utca	12.	20NAJO0204006	Fekete eper	<i>Morus nigra</i>
XXI. Kerület				
II. Rákóczi Ferenc út	173.	21RAKO0601005	Fehér akác	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Szent István út	82.	21SZEI0702027	Fehér akác	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Védgát utca	47.	21VEDG0101007	Kerti tamariska	<i>Tamarix gallica</i>
	47.	21VEDG0101011	Kerti tamariska	<i>Tamarix gallica</i>
XXII. Kerület				
Nagytétényi út	Tarkagéb utca 2. mellett	22NAGY1705017	Közönséges pagodafa	<i>Styphnolobium japonicum</i>

7. ábra: A vizsgált fák elhelyezkedése térképen, Főkert azonosítóival jelölve
 Forrás: Saját térkép, Google Earth 2024.03.22



4.3 Az alkalmazott mérések leírása

A vizsgálatokat 2023 szeptember 19. és október 12. között végeztem.

Az első mérés során az adott faegyeden 10 vagy 12 érzékelő segítségével mértem irreguláris módban (a szabálytalan törzskeresztmetszet miatt), majd ugyanazon a keresztmetszeten ugyanazzal az érzékelőkiosztással új mérést végeztem, amelyhez már az alap érzékelők közeibe beütöttem a Ludwig-szögeket is, így a mérési helyek számának megduplázásával is elvégeztem a vizsgálatot. Az így kapott eredményeket hasonlítottam össze a kiértékelés során minden fa esetében. A méréseim egy részénél a vakszögeket az érzékelők közé pontosan féltávra ütöttem, míg a másik részénél jobban figyelembe vettem a törzs keresztmetszetének az alakját is, és igyekeztem annak a lehető legpontosabb leképezésére a szögek elhelyezésénél. Fontos kiemelni, hogy a méréseimnek nem volt célja a teljes fa állapotának felmérése, így nem a leggyengébb keresztmetszeten mértem a műszerrel ahogyan azt egy rendes favizsgálatnál kell csinálni, hanem igyekeztem a legszabálytalanabb keresztmetszetet kiválasztani, hogy a lehető legjobban kijöhessen a különbség a kétfajta mérési mód között.

4.4 Az alkalmazott mérések menete és a vizsgálatokhoz használt eszközök

A mérések kivitelezéséhez Fakopp 3D akusztikus tomográfot, laptopot, 10-12 érzékelőt, 10-12 Ludwig-szöget, 5-6 jelerősítő dobozt, 1 elemdobozt (fő egység, Bluetooth jeladó), összekötő kábeleket, gumi és fém kalapácsot, előbbit az érzékelők és Ludwig-szögek beütéséhez, míg utóbbit a mérés kivitelezéséhez, mérőszalagot, az érzékelőknek a vizsgált fa kerületén történő arányos elosztásához, átlalót, az érzékelők és a Ludwig-szögek bázisérzékelőktől való egyenes távolságának megméréséhez, iránytűt, a fa északi oldalának

meghatározásához, szögkihúzó, az érzékelők és a Ludwig-szögek kíméletes kihúzásához és végezetül a műszer kezeléséhez és a kiértékeléshez az ArborSonic 3D (v5.3.162 verziójú) szoftvert használtam. A magasságok méréséhez lézeres távolságmérőt és egy Suunto PM-5/1520 típusú famagasságmérőt alkalmaztam 15 méteres távolságból.

A méréseket a következőképp végeztem:

Minden fánál egy magasságméréssel kezdtem a vizsgálatot, majd kiválasztottam a leghabártyalanabb keresztmetszetet, ahol a mérést el tudtam végezni és arra a rétegmagasságra gumikalapáccsal beütöttem az első érzékelőt a fa északi oldalára, mivel a szoftver számára fontos az érzékelők tájolása a számítások elvégzéséhez és ez az alapértelmezett beállítás. Ezt követően a mérőszalag segítségével megmértem a fa kerületét a kiválasztott magasságon, majd ennek alapján amennyire lehetett a törzs egyenetlenségeit és sérüléseit figyelembe véve arányos távolságokra elosztottam körben a 10, vagy nagyobb törzsmérő esetében 12 érzékelőt és rögzítettem őket a fatesthez. Mivel irreguláris módban mértem, ezért én határoztam meg az érzékelők helyét. Ez olyankor jelent nagy könnyebbséget, amikor például egy odú nyílása van a vizsgált keresztmetszeten, ami akadályozná az érzékelők szabályos kiosztását. Ilyenkor irreguláris módban az odú falának két szélére lehet ütni az érzékelőket. Ezután az átlaló segítségével megmértem az érzékelők pontos helyét a program számára két bázisérzékelőtől mérve, hogy a „térbeli adatok” fülön ki tudja rajzolni a mért réteg geometriáját, majd megadtam a rétegmagasságot, a kéregvastagságot és az érzékelők beverési mélységét. Amikor ez megvolt, csatlakoztattam az érzékelőkhöz az erősítő dobozokat, majd ezeket is összekötöttem egymással és az elemdobozzal a kábelek segítségével. Ezt követően csatlakoztattam az összeszerelt műszert a számítógéphez.

Ezután következett az „idő adatok” mérése, mely során a körben felhelyezett érzékelőket sorban megkocogtattam a kalapáccsal, mindegyikre egymás után ötöt-ötöt ütöttem. Amennyiben ezalatt hibás idősor keletkezett, úgy azt töröltem és egy új ütést végeztem a pótlására. Amikor körbeértem az érzékelőkön, elmentettem az így keletkezett adatokat és elkezdtem beütni a Ludwig-szögeket az érzékelők közeibe. A vizsgált fák nagyjából felénél ezt féltávnál tettem, míg a többinél a törzs alakjához jobban igazodva helyeztem el őket. Amikor minden a helyén volt, megmértem a vakszögek távolságait is a bázisérzékelőkhöz viszonyítva és az így keletkezett új geometriával megismételtem a mérést, ezúttal azonban a Ludwig-szögekre is ütöttem ötöt-ötöt a sima érzékelők után. Itt a rétegmagasságot 1 cm-el magasabbnak adtam meg, hogy a kiértékelés során pontosan ugyanazzal a koronafelülettel számoljon a program, valamint, hogy jobban elkülönüljön egymástól a két réteg és könnyebben értelmezhető legyen a kapott eredmény.

Ez a magasságbeli különbség a számítások során olyan elenyésző eltérést okoz az erőkar hosszában, ami a kapott eredményeket nem befolyásolja kimutatható mértékben, hiszen egy 1-2 centiméteres különbség egy 5-10 méteres erőkar esetén mindössze 0,2% (BÍRÓ, 2019).

Ennek végeztével a szoftverben áttértem a „sebesség adatok” fülre, ahol a mért adatok alapján megjeleníti az adott réteghez tartozó tomogramot (hangterjedési sebesség ábrát). Ekkor már sok esetben szembetűnő volt a különbség a kétfajta mérés eredménye között mind a program által kirajzolt geometriában, mind a romlott rész ábrázolásában.

Miután végeztem a terepi mérésekkel, megkezdődhetett a kiértékelés. A programban az ehhez tartozó fülön elvégeztem a szükséges adatok beállítását, úgymint a szélsősebesség (26m/s), a

szélmodell (EN1991) és a térség kategória (város), amit a fa teljes alakos fényképének betöltése követett, amin a szoftverben található eszközök segítségével körberajzoltam a korona kontúrját, behúztam a magasságvonalat, melynél megadtam a fa mért magasságát és berajzoltam a törzs vízszintessel bezárt szögét. Majd ezen adatok segítségével a program kiszámította a korona területét és ennek segítségével a fa mért rétegéhez tartozó biztonsági tényezőt és a korhadt területek százalékos arányát a keresztmetszetben.

A kiértékelés után a kapott értékeket táblázatba gyűjtöttem, ahol kiszámítottam a kétfajta mérés során keletkezett eltéréseket és értékeltém azokat, melyekre az Eredmények és értékelésük fejezetben fogok kitérni.

4.5 Az alkalmazott elemzési és szemléltetési módszerek általános leírása

A mérések során kapott eredmények célkitűzésben meghatározott célok szerinti értékeléséhez és szemléltetéséhez többféle módszert alkalmaztam, melyek a következők voltak:

-Cross-plot elemzés: A cross-plot elemzéssel vizsgálható, hogy milyen korrelációs kapcsolat áll fenn több mért, vagy számított adat között. Használata során egy koordináta-rendszerben ábrázoljuk a valamilyen közös jellemző alapján összefüggő adatokat (pl.: egy keresztmetszeten elvégzett kétfajta mérés), majd elemezzük azok illeszkedését egy a pontfelhőre illesztett, az origón áthaladó egyenesre (KISS, 1985).

-Hisztogram: A hisztogram egy speciális oszlopdiagram, melyet leggyakrabban gyakorisági sorok ábrázolására használnak. Vízszintes tengelyén a vizsgált csoportokat, míg függőleges tengelyén azok előfordulási gyakoriságát jeleníti meg. Amennyiben a csoportok nem egyenletesen vannak felosztva, úgy az oszlopok nem azonos szélességűek. Ilyen esetben a gyakoriságsűrűséget ábrázoljuk, azaz a téglalap területe megegyezik az adott csoport gyakoriságával (GERŐCS és VANCSÓ, 2010).

Az adatelemzés során használt számítások:

-Eltérés: Az eltérés azt mutatja meg, hogy két érték között mekkora a differencia. Ennek kiszámításához a dolgozatomban a $(P_{\text{Ludwig}} - P_{\text{Sima}}) / P_{\text{Sima}}$ képletet használtam, ami két szám különbségét fejezi ki százalékban. A képletben a „P” a vizsgált paraméter (korhadt terület vagy SF) értékeit jelöli (GERŐCS és VANCSÓ, 2010).

-Eltérések átlaga: Az eltérések átlaga egy számtani középérték, amellyel az adatokat helyettesítve azok összege változatlan marad (KORPÁS, 1996).

-Átlagos eltérés: Az átlagos eltérés az adatoknak az átlaguktól való átlagos abszolút eltérését fejezi ki. Egy adott adathalmaz szóródását mutatja meg (INTERNETES FORRÁS 5).

-Eltérések szórása: Az eltérések szórása azt mutatja meg, hogy az adatok milyen mértékben térnek el a középértéktől (INTERNETES FORRÁS 6).

-Eltérések mediánja: Az eltérések mediánja egy úgynevezett helyzeti középérték, a növekvő sorba rendezett adatok középső értéke, melytől mérve az adatok abszolút távolságainak összege minimális (INTERNETES FORRÁS 7).

5. Eredmények és értékelésük

Ebben a fejezetben az általam végzett mérések és azok kiértékelése során kapott eredményeket fogom bemutatni és értelmezni. Először ismertetem a kapott értékek alakulását a Ludwig-szögek alkalmazása esetén, majd kitérek a Ludwig-szögek pozícióinak különböző kiosztása esetén fellépő különbségekre, végül megvizsgálom a kiugró eltéréseket mutató mérések adatait.

5.1 A kapott értékek alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek alkalmazásának esetén

A korhadrt rész aránya, illetve a biztonsági faktor értékeit és eltéréseit további vizsgálatoknak vettem alá, hogy feltárhassam a különbségeket a hagyományos módon és a Ludwig-szögekkel végzett mérések eredményei között.

5.1.1 A Ludwig-szögekkel és azok nélkül kapott eredmények összesítő táblázatának vizsgálata

Az általam kapott eredményeket a 3. táblázat mutatja be.

Már a táblázat adataiból jól látszik, hogy amennyiben a Ludwig-szögek használatával kisebb korhadrt terület arányt mértem, abban az esetben a hozzájuk tartozó biztonsági faktor nagyobb értéket vett fel, mint a hagyományos mérés esetében. Szintén leolvasható a táblázatból, hogy a méréseim 71%-ában nagyobb biztonsági faktort eredményezett a vakszögek használata.

3. táblázat: A Ludwig-szögekkel és azok nélkül kapott eredmények

Forrás: Saját táblázat

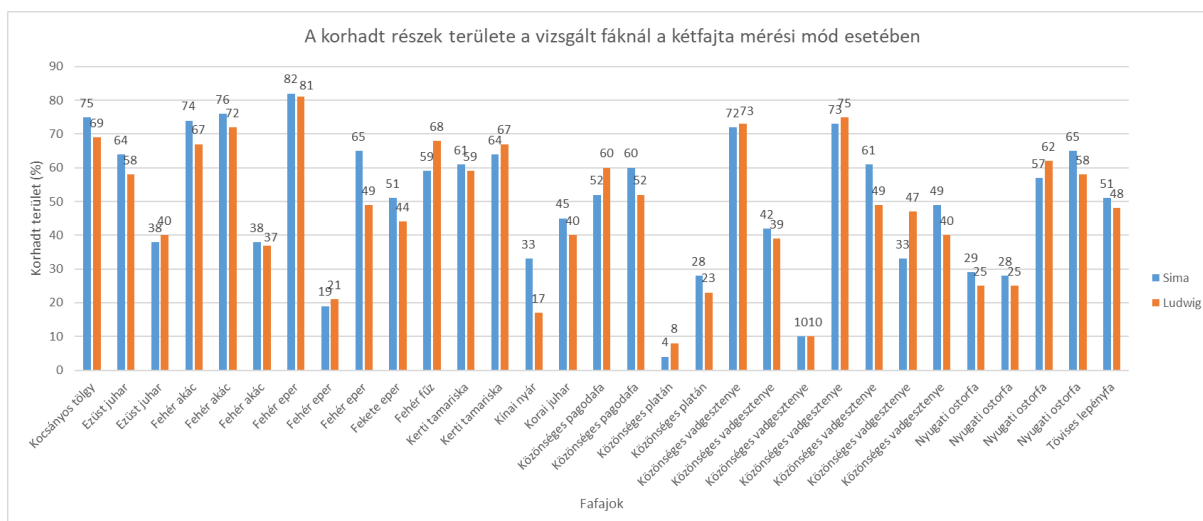
Főként azonosító	Fafaj-Magyar név	Fafaj-Tudományos név	Korhadrt terület-Sima (%)	Korhadrt terület-Ludwig (%)	ELTÉRÉS	SF-Sima (%)	SF-Ludwig (%)	ELTÉRÉS
02GER01008	Kocsányos tölgy	<i>Quercus robur</i>	75	69	-8%	183	220	20%
03GZGY0101005	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	72	73	1%	255	189	-26%
03GZGY0101017	Közönséges platán	<i>Platanus acerifolia</i>	4	8	100%	300	263	-12%
03GZGY0102004	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	42	39	-7%	78	93	19%
03HAM012040	Közönséges platán	<i>Platanus acerifolia</i>	28	23	-18%	215	252	17%
03KIR042001	Ezüst juhar	<i>Acer saccharinum</i>	64	58	-9%	791	977	24%
10NEP31079	Kínai nyár	<i>Populus simonii</i>	33	17	-48%	770	1001	30%
10NEP33046	Korai juhar	<i>Acer platanoides</i>	45	40	-11%	253	283	12%
11FEHE0802019	Közönséges pagodafa	<i>Styphnolobium japonicum</i>	52	60	15%	286	240	-16%
11FEN08009	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	10	10	0%	204	225	10%
11FEN10017	Fehér fűz	<i>Salix alba</i>	59	68	15%	607	541	-11%
11FEN15012	Ezüst juhar	<i>Acer saccharinum</i>	38	40	5%	155	168	8%
11FEN15014	Fehér eper	<i>Morus alba</i>	82	81	-1%	231	272	18%
12SIL144001	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	73	75	3%	114	69	-39%
12SIL144003	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	61	49	-20%	43	54	26%
12SIL144005	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	33	47	42%	53	38	-28%
12SIL144008	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	49	40	-18%	133	158	19%
17PECE0902011	Nyugati osterfa	<i>Celtis occidentalis</i>	29	25	-14%	108	113	5%
17PECE0904017	Fehér akác	<i>Robinia pseudoacacia</i>	74	67	-9%	250	404	62%
17PECE1101005	Fehér eper	<i>Morus alba</i>	19	21	11%	344	330	-4%
17PECE1201015	Fehér eper	<i>Morus alba</i>	65	49	-25%	217	293	35%
19ESZ092005	Tövises lepényfa	<i>Gleditsia triacanthos</i>	51	48	-6%	106	115	8%
19MRT011006	Nyugati osterfa	<i>Celtis occidentalis</i>	28	25	-11%	1204	1227	2%
19MRT012010	Nyugati osterfa	<i>Celtis occidentalis</i>	57	62	9%	354	302	-15%
19STI012002	Nyugati osterfa	<i>Celtis occidentalis</i>	65	58	-11%	154	171	11%
20NAJO0204006	Fekete eper	<i>Morus nigra</i>	51	44	-14%	2336	2526	8%
21RAKO0601005	Fehér akác	<i>Robinia pseudoacacia</i>	76	72	-5%	193	478	148%
21SZEIO702027	Fehér akác	<i>Robinia pseudoacacia</i>	38	37	-3%	1405	1488	6%
21VEDG0101007	Kerti tamariska	<i>Tamarix gallica</i>	61	59	-3%	171	253	48%
21VEDG0101011	Kerti tamariska	<i>Tamarix gallica</i>	64	67	5%	211	126	-40%
22NAGY1705017	Közönséges pagodafa	<i>Styphnolobium japonicum</i>	60	52	-13%	519	738	42%
Eltérések átlaga:					-2%			12%
Átlagos eltérés:					14%			22%
Eltérések szórása:					24%			35%
Eltérések mediánja:					-6%			10%
-Az érzékelők között feltápra helyezett Ludwig-szögekkel végzett mérések								

5.1.2 A korhadt területek alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek alkalmazása esetén

5.1.2.1 A kétféle módszerrel mért korhadt részek területe faegyedenként

Az értékek nagyságrendjének szemléltetésére, valamint a kétféle módon mért terjedéssebességek alapján meghatározott értékek összehasonlításának megkönnyítésére a 8. ábrán az egyes fák a kétféle módon kiszámított korhadt részek területének arányát ábrázoltam. A kék szín a hagyományos módon, míg a narancssárga a Ludwig-szögekkel mért értékeket mutatja. A vízszintes tengelyen, a táblázatban lévővel megegyező sorrendben az egyes fákat, míg a függőlegesen a mért értékeket tüntettem fel egész százalékra kerekítve. Az ábrán azt láthatjuk, hogy a Ludwig-szögek segítségével mért korhadt területek százalékos aránya az esetek kétharmadában kisebb, mint a hagyományos módon mértéké.

8. ábra: A kétféle módszerrel mért korhadt részek területe faegyedenként
Forrás: Saját ábra



5.1.2.2 A kétféle módszerrel mért korhadt részek területének cross-plot elemzése

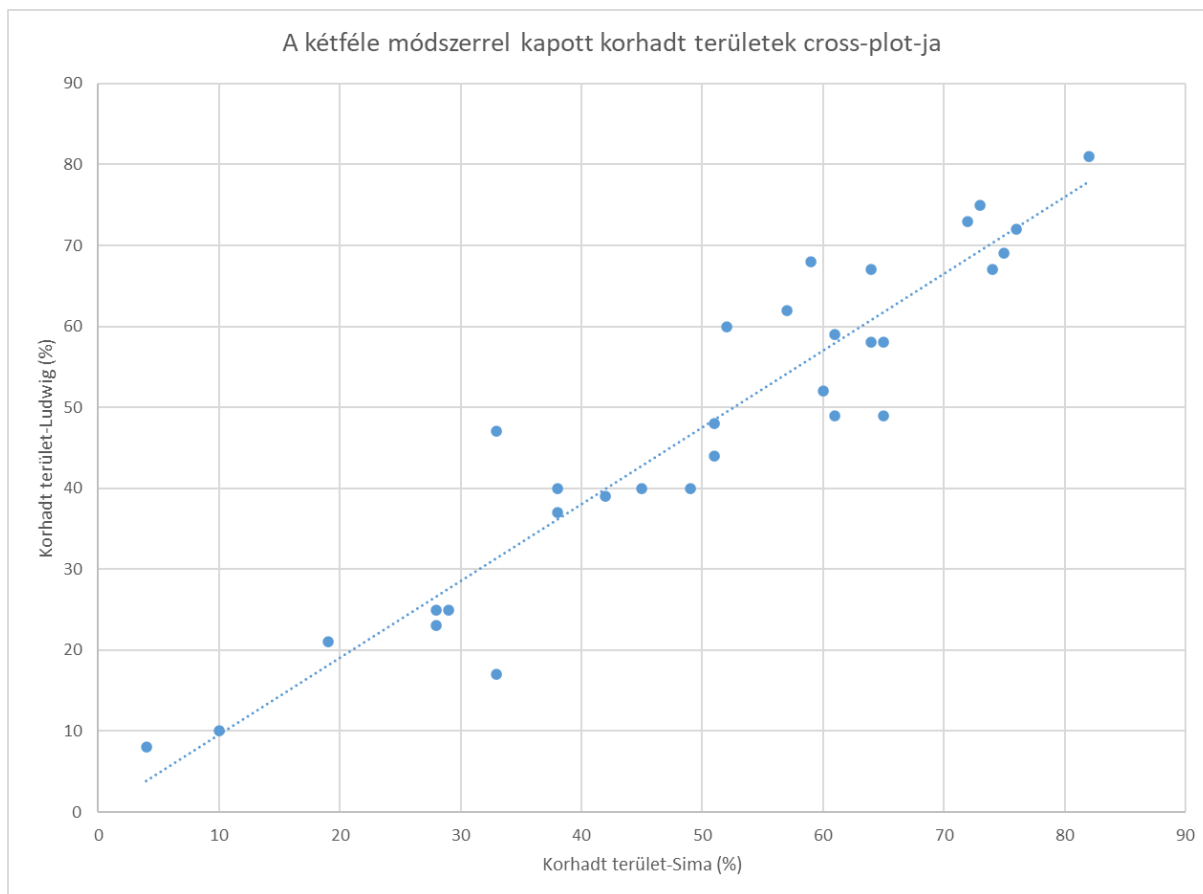
Annak érdekében, hogy megvizsgálhassuk, hogy a hagyományos és a Ludwig-szöges módszerrel meghatározott értékek között van-e valamilyen értelmezhető függvény kapcsolat, elkészítettem a 9. ábrán látható cross-plot-ot. A vízszintes tengelyen a hagyományos, míg a függőlegesen a Ludwig-szögekkel mért terjedéssebességek alapján kiszámított értékeket ábrázoltam. Az ábrán pontozott vonallal jelöltem a pontfelhőre illesztett, az origón áthaladó egyenest. Amennyiben a kétféle módon mért értékek megegyeznének, akkor ezen az egyenesen kellene elhelyezkedniük, de mivel minden mérés valamekkora hibával terhelt, a pontoknak ezen egyenes szűk környezetében kellene lenniük. Az ábrán jól látható, hogy:

- a pontok esetenként viszonylag távol vannak az egyenestől,
- amennyiben nem lineáris, hanem valamilyen más függvénykapcsolatot feltételeznénk, például exponenciálisat, logaritmikust stb., az illeszkedés nem javulna.

Ezek alapján megállapítható, hogy az adatsorok között függvény kapcsolat nem ismerhető fel, közöttük az összefüggés inkább véletlenszerű.

9. ábra: A kétféle módszerrel mért korhadt részek területének cross-plot elemzése

Forrás: Saját ábra



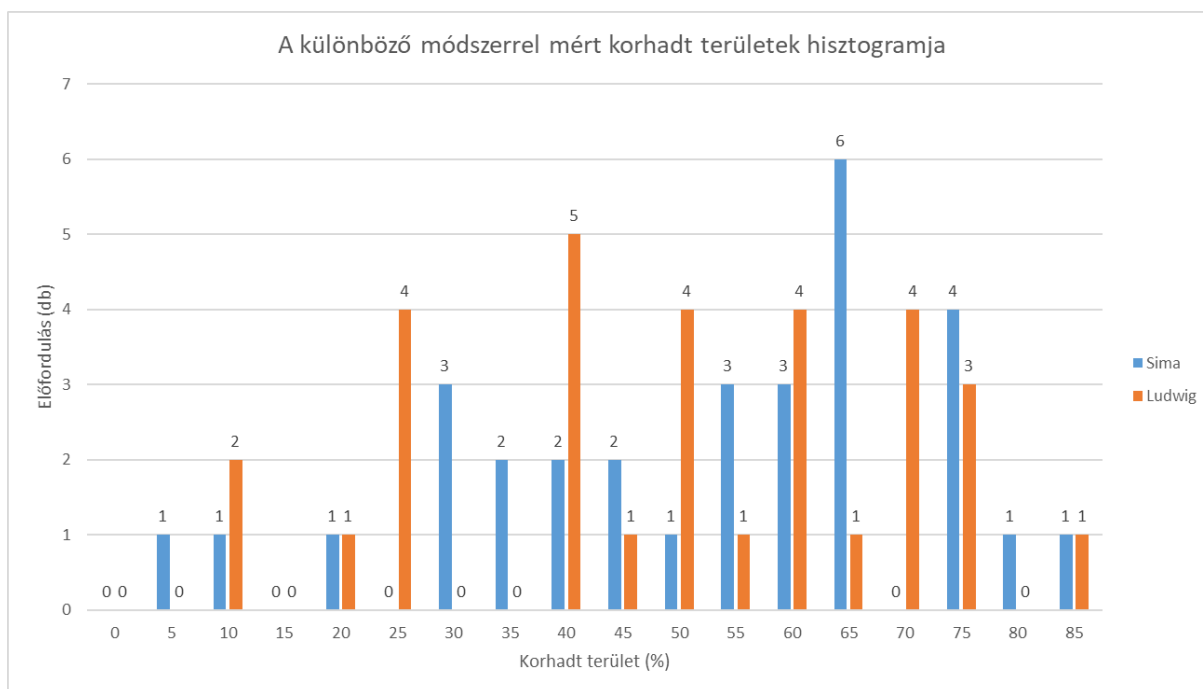
5.1.2.3 A kétféle módszerrel mért korhadási értékek hisztogramja

A 10. ábrán a különböző korhadási értékek hisztogramja látható a kétféle mérési módszer esetében. A vízszintes tengelyen a korhadt területek százalékos arányát, míg a függőlegesen az előfordulásuk darabszámát tüntettem fel. A hagyományos módszerrel mért adatok gyakoriságát a kék, míg a Ludwig-szögekkel mérteket narancssárga színnel jelöltem. A könnyebb értelmezhetőség kedvéért az egyes értéktartományok fölött feltüntettem a hozzájuk tartozó darabszámokat is. Az ábráról a következőket tudjuk leolvasni:

- a 40%-nál nagyobb értékek mindkét mérési mód esetében nagyobb valószínűséggel fordulnak elő, gyakorlatilag megegyező arányban, de a 0-40% közötti intervallumban is hibahatáron belüli az eltérés. Mindkettő esetén ± 1 db,
- a statisztikai szemmel nézve viszonylag kis adatmennyiséget is figyelembe véve az eltérések több helyen szignifikánsak, a 25, 40, 50, 55, 65 és 70%-os tartományokban az eltérések jóval nagyobbak 1-nél.

A fentiekből az következik, hogy a kétfajta mérési módban mért korhadt terület arányok gyakorisági értékei között többször sokszoros különbség van egy-egy 5%-os intervallumban, de összességében az értékek gyakorisága nagyobb tartományokat nézve kiegyenlített.

10. ábra: A kétféle módszerrel mért korhadási értékek histogramja
Forrás: Saját ábra



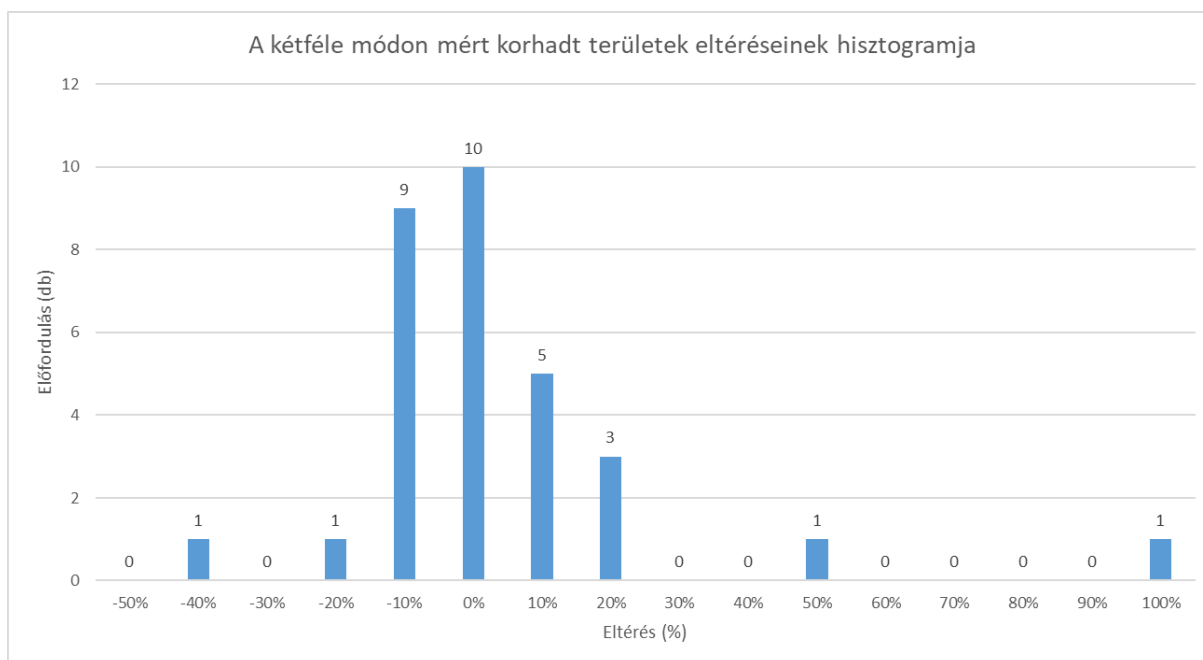
5.1.2.4 A korhadási értékek eltéréseinek histogramja a kétféle módszer esetében

A 11. ábrán a kétféle módon mért terjedésssebességből számított korhadat részek terület arányainak eltérése látható. Az egyes oszlopok felett feltüntettem az adott sávban lévő értékek előfordulását is. Az ábra azt mutatja, hogy:

- az eltérések zöme, 77%-a, a -10% és 10% közötti sávba esik,
- a 100% érték nagyon kilóg a sorból.

Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy az adatok eloszlása egyenletes, a hibáktól eltekintve a Gauss-függvényt követi.

11. ábra: A korhadási értékek eltéréseinek hisztogramja a kétféle módszer esetében
 Forrás: Saját ábra



5.1.3 A biztonsági faktor (SF) alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek alkalmazása esetén

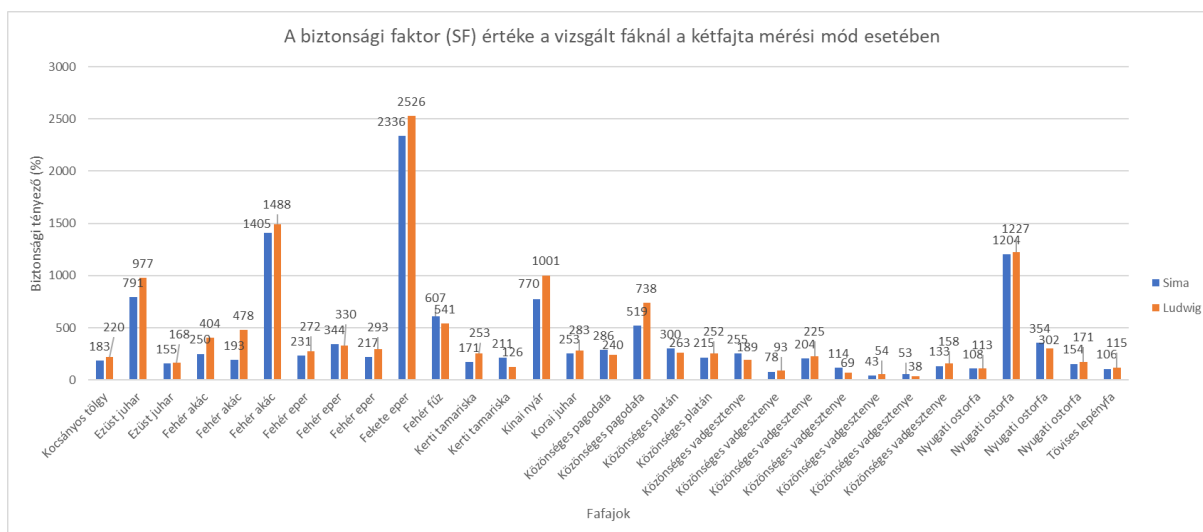
5.1.3.1 A kétféle módszerrel mért biztonsági faktor értéke faegyedenként

A kiszámított biztonsági faktorok nagyságrendjének szemléltetésére, valamint a kétféle módszerrel mért adatok alapján meghatározott érték összehasonlításának megkönnyítésére a 12. ábrán az egyes fákon a kétféle módon mért terjedéssebesség adatokból számított biztonsági faktort ábrázoltam. A kék szín a hagyományos módon, míg a narancssárga a Ludwig-szögekkel mért értékeket mutatja. A vízszintes tengelyen, a táblázatban lévőkkel megegyező sorrendben az egyes fákat, míg a függőlegesen a kiszámított előfordulási gyakoriságokat tüntettem fel egész százalékban.

Az ábrán az látható, hogy a Ludwig-szögek segítségével meghatározott értékek jellemzően nagyobbak, mint a hagyományos módon mértékek esetében. Különösen szembetűnő a jelenség a nagyobb biztonsági faktorok esetében.

12. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági faktor értéke faegyedenként

Forrás: Saját ábra



5.1.3.2 A kétféle módszerrel mért biztonsági faktorok cross-plot elemzése

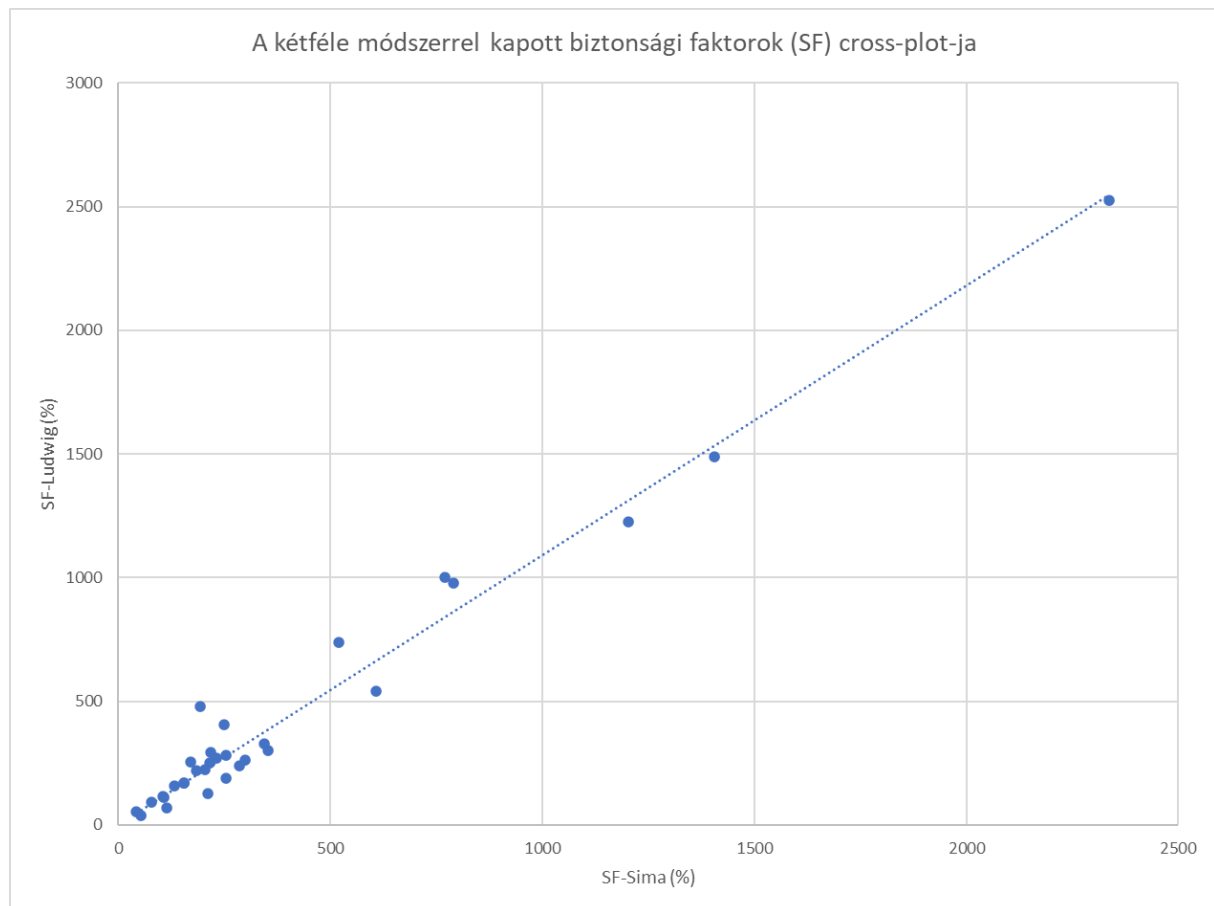
Annak érdekében, hogy megvizsgálhassuk, hogy a hagyományos és a Ludwig-szöges módszerrel mért biztonsági tényezők között van-e valamilyen értelmezhető függvény kapcsolat, elkészítettem a 13. ábrán látható cross-plot-ot. A vízszintes tengelyen a hagyományos módon, míg a függőlegesen a Ludwig-szögekkel mért értékeket ábrázoltam. Az ábrán pontozott vonallal jelöltem a pontfelhőre illesztett, az origón áthaladó egyenest. Amennyiben a kétféle módon mért értékek megegyeznének, akkor ezen az egyenesen kellene elhelyezkedniük, de mivel minden mérés valamekkora hibával terhelt, a pontoknak ezen egyenes szűk környezetében kellene lenniük. Az ábrán jól látható, hogy:

- a pontok esetenként viszonylag távol vannak az egyenestől,
- amennyiben nem lineáris, hanem valamilyen más függvénykapcsolatot feltételeznénk, például exponenciálisat, logaritmikust stb., az illeszkedés nem javulna.

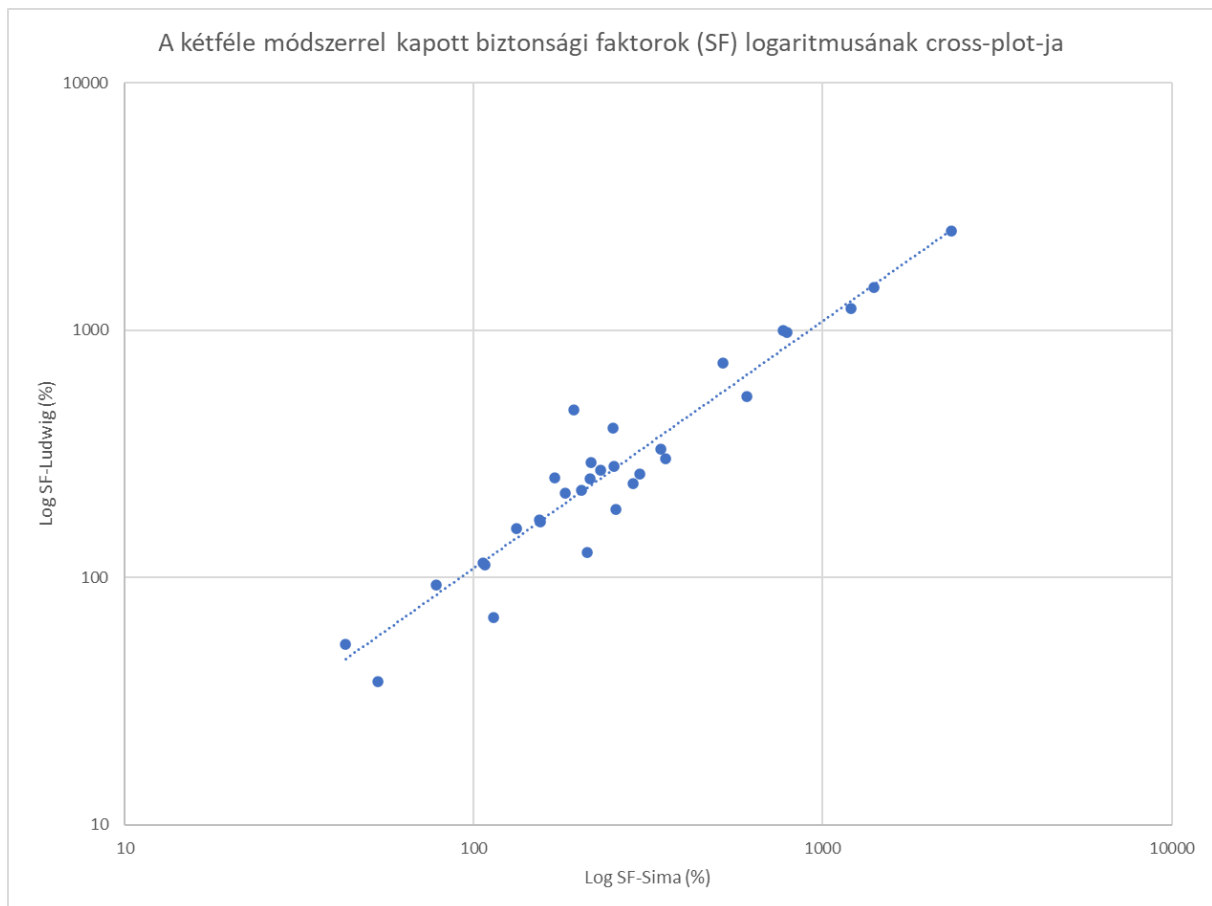
Ezek alapján megállapítható, hogy az adatsorok közötti összefüggés, a korhadásokhoz hasonlóan, inkább véletlenszerű.

Mivel az adatok dinamikája nagy volt és ráadásul a kis értékeknél besűrűsödtek, ezért megvizsgáltam az értékek logaritmusának kapcsolatát is, amelyet a 14. ábrán mutatok be. Ebben az esetben a pontfelhő eloszlása ugyan homogénebb lett, de az adatok között értelmezhető függvény kapcsolatot ez esetben sem tudtam felfedezni.

13. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági faktorok cross-plot elemzése
Forrás: Saját ábra



14. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági faktorok logaritmusának cross-plot elemzése
 Forrás: Saját ábra



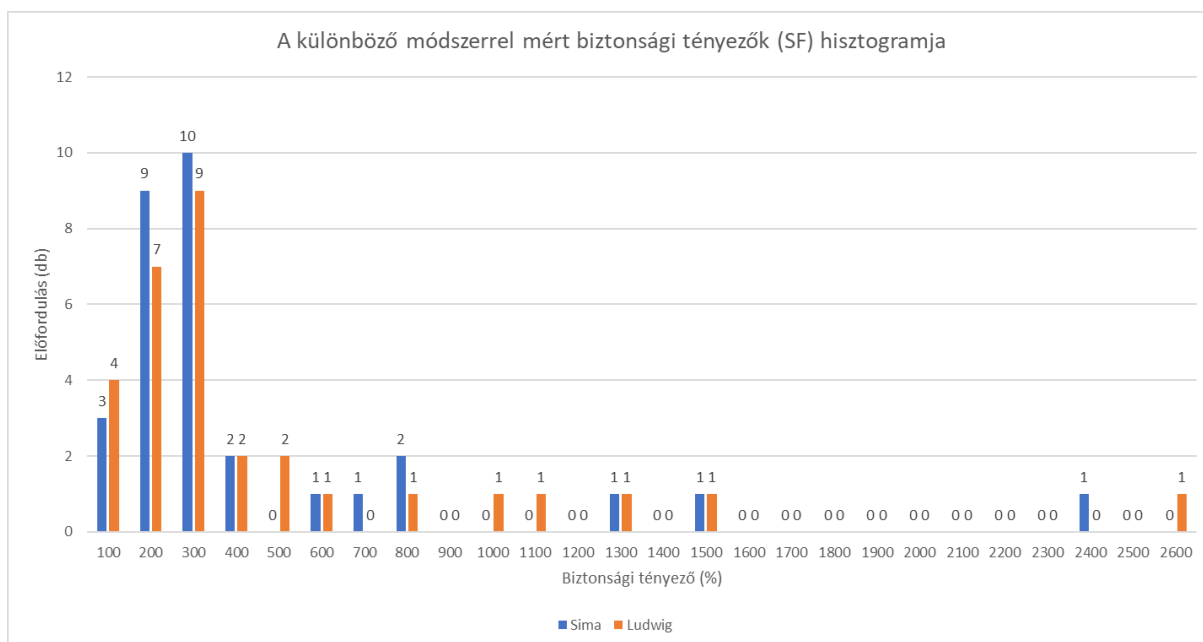
5.1.3.3 A kétféle módszerrel mért biztonsági tényezők hisztogramja

A 15. ábrán a különböző biztonsági faktor (SF) értékek hisztogramja látható a kétféle mérési módszer esetében. A vízszintes tengelyen a biztonsági tényező százalékos arányát, míg a függőlegesen az előfordulásuk darabszámát tüntettem fel. A hagyományos módszerrel mért adatok gyakoriságát a kék, míg a Ludwig-szögekkel mért mérteket narancssárga színnel jelöltem. A könnyebb értelmezhetőség kedvéért az egyes értéktartományok fölött feltüntettem a hozzájuk tartozó darabszámokat is. Az ábra alapján a következő megállapítások tehetők:

- a 0-100% és a >200% tartományban a biztonsági tényezők előfordulása a hibahatáron (± 1 db) belül megegyezik,
- kisebb eltérés csak a 100-200% sávban van, azonban ez is alig haladja meg a hibahatárt, így ez betudható a viszonylag kis számú mintának.

Összefoglalásképpen megállapíthatjuk, hogy a kétféle módon mért biztonsági faktorok előfordulási gyakorisága a hibahatáron belül megegyezik.

15. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági tényezők hisztogramja
Forrás: Saját ábra



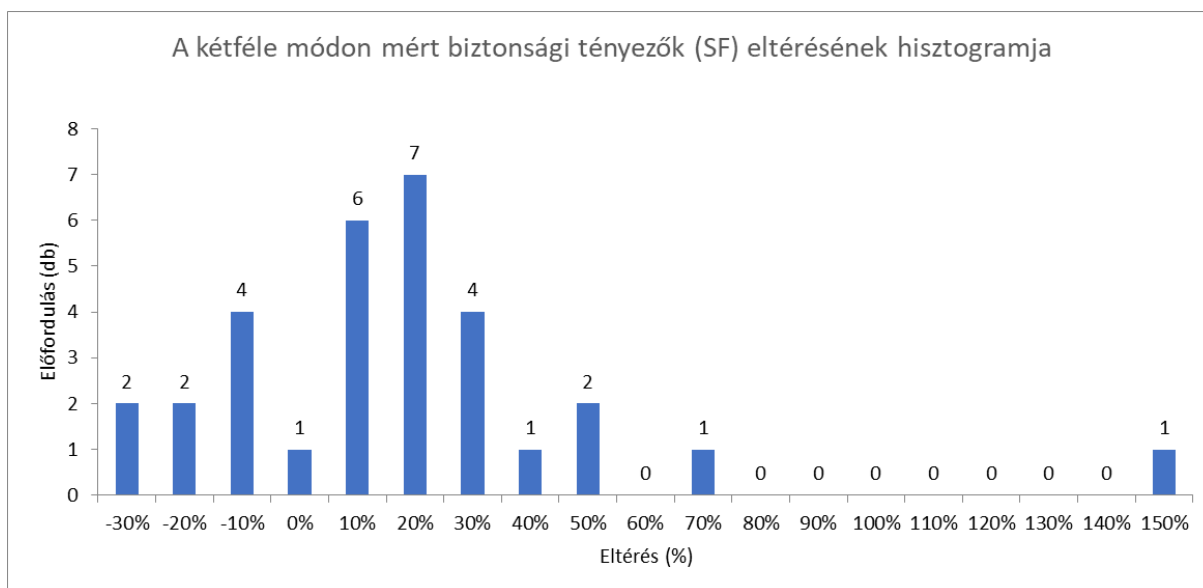
5.1.3.4 A biztonsági faktorok eltéréseinek hisztogramja a kétféle módszer esetében

A 16. ábrán a kétféle módon mért biztonsági faktor eltérése látható. Az egyes oszlopok felett feltüntettem az adott értéksáv előfordulását is. Az ábra azt mutatja, hogy:

- az eltérések eloszlása a 0% fölötti tartományban közel normális (Gauss),
- a 150% érték nagyon kilóg a sorból.

Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy a kétféle mérés alapján kijött biztonsági tényezők aránya közel véletlenszerű, de mivel ehhez képest a negatív eltérések enyhén túlreprezentáltak a hisztogramon, így a valós eloszlása valahol a Gauss és a binomiális között van.

16. ábra: A biztonsági faktorok eltéréseinek hisztogramja a kétféle módszer esetében
 Forrás: Saját ábra



5.2 A kapott eltérések alakulásának vizsgálata a Ludwig-szögek pozícióinak különböző kiosztása esetén

A korhadrt rész aránya, illetve a biztonsági faktor értékeit és eltéréseit további vizsgálatoknak vettem alá, hogy feltárhassam az esetleges különbségeket és hasonlóságokat az érzékelők közé pontosan féltávra helyezett, és a keresztmetszet szabálytalanságait jobban lekövető vakszög elhelyezéssel végzett mérések eredményei között.

Fontos megjegyezni, hogy a kétféle vakszögekiosztással végzett méréseket nem ugyanazokon a faegyedeken végeztem, ezért az itt feltárt összefüggéseket fenntartásokkal kell kezelni.

5.2.1 A korhadrt terület eltérések grafikonjának elemzése a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében

A 17. ábrán a két különböző Ludwig-szög elhelyezés esetén előforduló korhadrt terület értékek eltéréseinek statisztikai tulajdonságai láthatók. A grafikonon narancssárgával az érzékelők közé pontosan féltávra helyezett Ludwig-szögekkel végzett mérések tulajdonságait jelöltem, míg a késsel a vizsgált keresztmetszet alakját jobban lekövető módon elhelyezett vakszögekkel végzett mérésekéit. A könnyebb értelmezhetőség kedvéért az egyes értéktartományok fölött feltüntettem a hozzájuk tartozó eltéréseket egész százalékra kerekítve. A diagram és a hozzá tartozó táblázat azt mutatja, hogy:

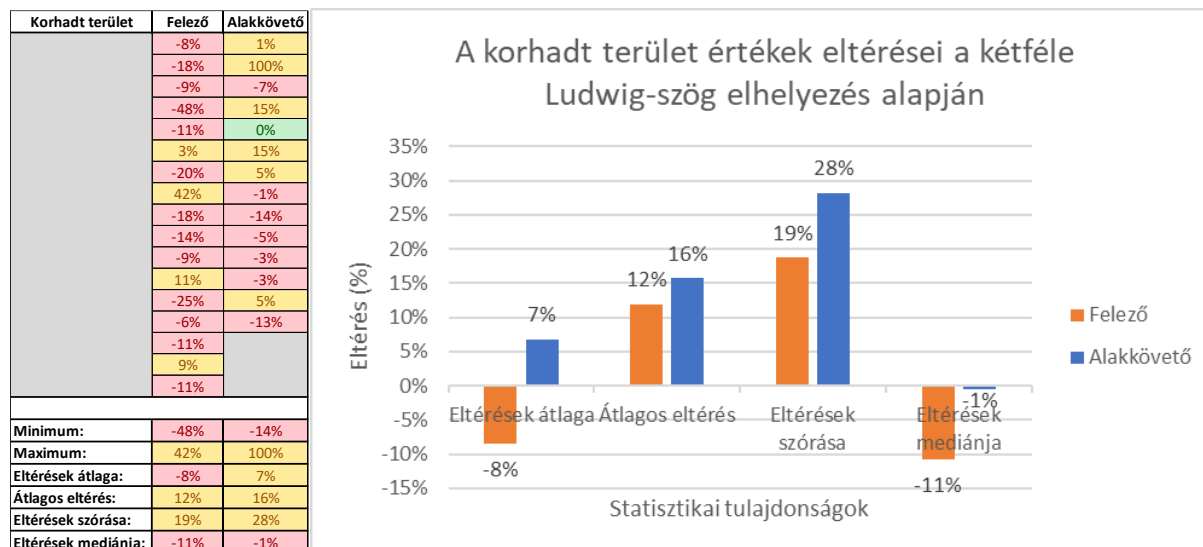
- az átlagos eltérés mind a kétféle vakszög elhelyezés esetén hasonló a hagyományos és a Ludwig-szögekkel végzett mérések értékeinél,
- az érzékelők közé féltávra helyezett vakszögeknél a Ludwig-szögekkel mért korhadrt terület értékek az esetek több mint kétharmadában kisebbek voltak, mint a hagyományos módszerrel

mérték, míg az alakkövetően elhelyezett vakszögekkel mértéknél közel fele-fele arányban lett kisebb vagy nagyobb a korhadrt terület értéke a vakszöges mérés esetén.

Ezekből arra következtethetünk, hogy a vizsgált törzskeresztmetszet alakjának pontosabb leírása komolyan befolyásolhatja a kapott korhadrt terület értékeket.

17. ábra: A korhadrt terület eltérések grafikonja és táblázata a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében

Forrás: Saját ábra



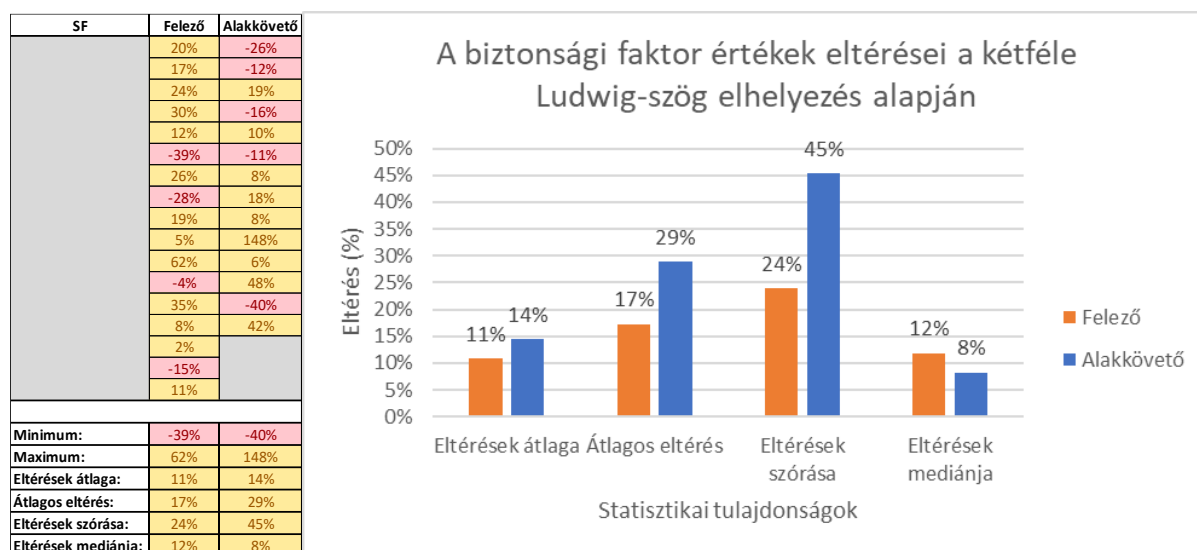
5.2.2 A biztonsági faktor eltérések grafikonjának elemzése a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében

A 18. ábrán a két különböző Ludwig-szög elhelyezés esetén előforduló biztonsági faktor értékek eltéréseinek statisztikai tulajdonságai láthatók. A grafikonon narancssárgával az érzékelők közé pontosan féltávra helyezett Ludwig-szögekkel végzett mérések tulajdonságait jelöltem, míg a kékkel a vizsgált keresztmetszet alakját jobban lekövető módon elhelyezett vakszögekkel végzett mérésekéit. A könnyebb értelmezhetőség kedvéért az egyes értéktartományok fölött feltüntettem a hozzájuk tartozó eltéréseket egész százalékra kerekítve. A diagramról és a hozzá tartozó táblázatról az olvasható le, hogy:

- a biztonsági faktor esetében az eltérések szórása majdnem kétszer akkora az alakkövetően elhelyezett vakszögek esetében, mint a féltávra helyezetteknél,
- az átlagos eltérés értéke 12%-kal nagyobb az alakkövetően elhelyezett vakszögek esetén, mint a féltávra helyezetteknél.

Ezekből arra következtethetünk, hogy a biztonsági faktorok a sima és a Ludwig-szöges mérési mód esetében jobban eltérnek egymástól, ha a vakszögek elhelyezésével pontosabban képezzük le a fa keresztmetszetének alakját.

18. ábra: A biztonsági faktor eltérések grafikonja és táblázata a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében
 Forrás: Saját ábra

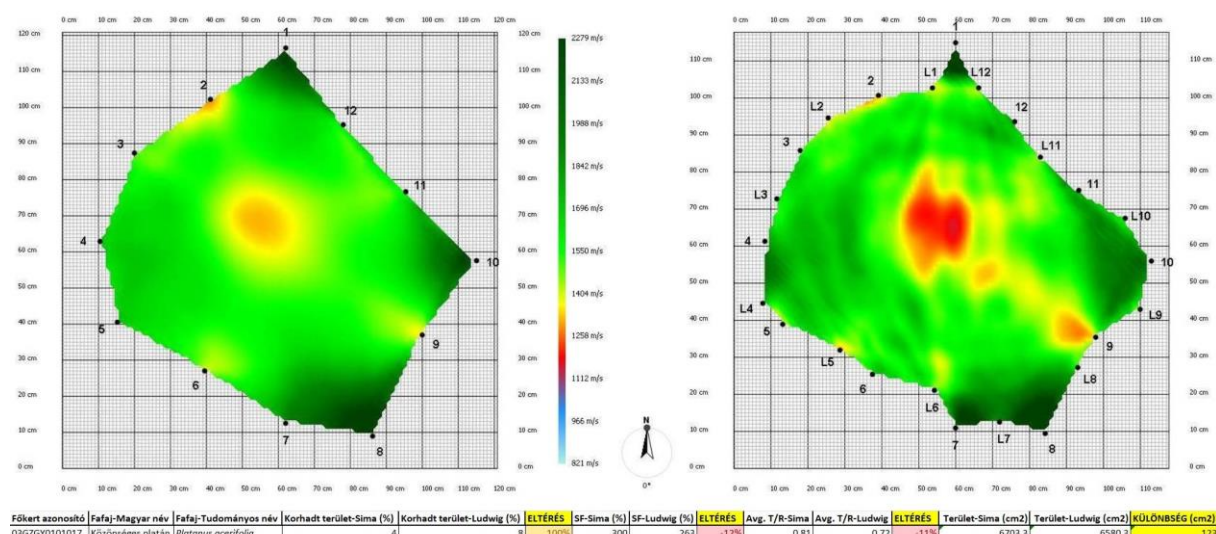


5.3 A két erősen kiugró eltérést mutató mérés adatainak és tomogramjainak vizsgálata

A hagyományos módon és a Ludwig-szögekkel végzett mérések során két fánál is kiugró eltérés értékek jöttek ki egyes tulajdonságoknál. A 03GZGY0101017 Főkert azonosítójú Községes platánál ez 100%-os korhadt terület eltérés, míg a 21RAKO0601005 Főkert azonosítójú Fehér akác esetében 148%-os biztonsági faktor eltérés. Ezen eltérések okának kiderítése érdekében ezeknél a fánál megvizsgáltam a kapott tomogramokat, és a hozzájuk tartozó mért értékeket, melyeket a 19. és a 20. ábrán ábrázoltam.

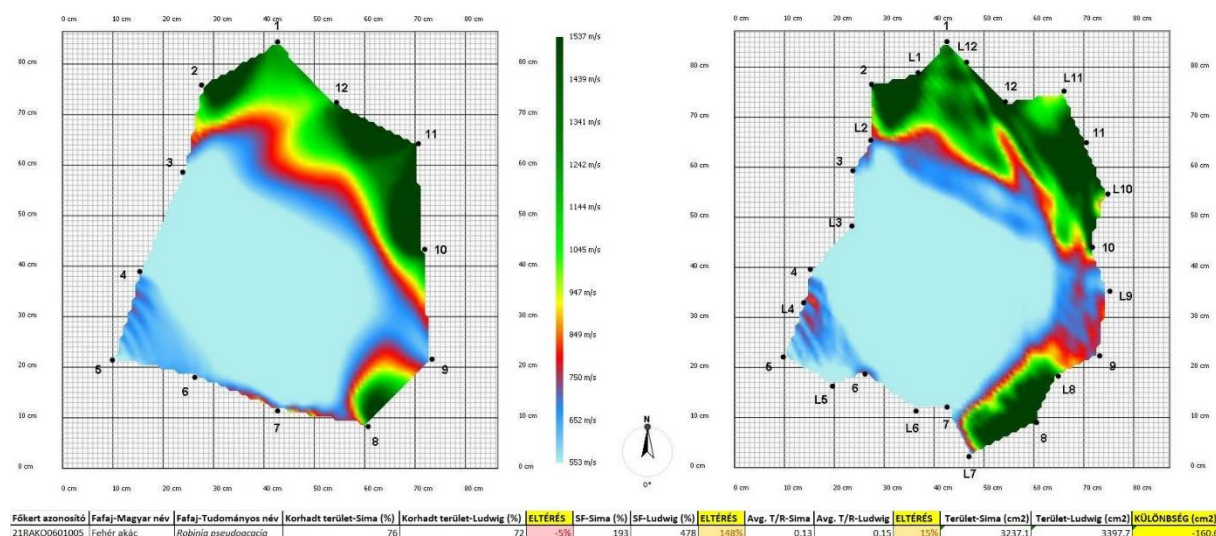
- A 03GZGY0101017 azonosítójú fánál azt láthatjuk a tomogramon és a hozzá tartozó táblázatban, hogy a Ludwig-szögekkel végzett mérés esetében az érzékelők és a vakszögek által leírt törzskeresztmetszet 123 cm^2 -rel kisebb lett (-2%-os eltérés), mint a hagyományos módon, csak érzékelőkkel mért, miközben a korhadt terület mértéke látványosan nőtt, az értéke pontosan megkétszereződött. Ennek hatására pedig a biztonsági tényező a nagymértékű korhadt terület változás arányához képest viszonylag keveset, 37%-ot csökkent, ami egy -12%-os eltérésnek felel meg. Ebből az következik, hogy ennél a fánál a mérési mód és a mérési geometria megváltoztatása erősen befolyásolta a mért korhadási értéket és ezen keresztül negatív irányba befolyásolta a biztonsági tényezőt.

19. ábra: A 03GZGY0101017 azonosítójú fa tomogramjai és táblázata. Balra a hagyományos módon, míg jobbra a Ludwig-szögekkel mért tomogram látható
 Forrás: Saját ábra



• A 21RAKO0601005 azonosítójú fánál azt láthatjuk a tomogramon és a hozzá tartozó táblázatban, hogy a Ludwig-szögekkel végzett mérésnél az érzékelők és a vakszögek által leírt törzskeresztmetszet $160,6 \text{ cm}^2$ -rel nagyobb lett (5%-os eltérés), mint a hagyományos módon, csak érzékelőkkel mért, miközben a korhadt terület értéke kismértékben csökkent. Ennek hatására a biztonsági faktor 285%-ot nöött, ami egy 148%-os eltérésnek felel meg. Tehát ennél a fánál a mérési mód és a mérési geometria megváltozása nagyban kihatott a biztonsági tényező értékére és erősen pozitív irányba befolyásolta azt.

20. ábra: A 21RAKO0601005 azonosítójú fa tomogramjai és táblázata. Balra a hagyományos módon, míg jobbra a Ludwig-szögekkel mért tomogram látható
 Forrás: Saját ábra



6. Következtetések

Ebben a fejezetben leírom, hogy az általam végzett elemzések során milyen eredményekre jutottam a Bevezetés és célkitűzés fejezetben leírt várakozásaimhoz képest és levonom a megfelelő következtetéseket.

6.1 A faegyedenként mért adatok hisztogram elemzéseinek összegzése

A kétféle módszerrel faegyedenként mért biztonsági faktor esetén megfigyelhető, hogy a kapott értékek az összes mérés 71%-ában nagyobbak a Ludwig-szögekkel végzett mérések esetében.

Ezzel ellentétben a korhadt terület esetében fordul ez az arány, ott a hagyományos módszerrel végzett mérések hozzák a nagyobb értékeket az esetek 64%-ában. Ez alátámasztja azt az alapvető hipotézist miszerint, ha nagyobb a korhadt terület aránya, akkor kisebb SF értéke. Ebből az rajzolódik ki, hogy amennyiben a mérésünk során Ludwig-szögeket is használunk, akkor az esetek több, mint kétharmadában nagyobb biztonsági tényezőt kapunk, mintha csak az alap érzékelőkkel vizsgáltuk volna a fát. (8. és 12. ábra)

A vizsgált fák 16%-a esetén a hagyományos módon mért SF átlagosan 26%-kal kisebb volt, mint a Ludwig-szögekkel mért. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy van 16% esély arra, hogy ha például egy Ludwig-szögekkel végzett mérés éppen 100%-nál nagyobb biztonsági faktort eredményez, ami már csak mérsékelt kockázatot jelez, akkor az alap érzékelős mérés esetén a fa átcsúszik a 100%-os határ alá, ami már a magas kockázatú kategória, és esetleg valami elkerülhető beavatkozást eredményezhet. Ez nem egy túl nagy esély, de a sima érzékelős mérés esetén a határértékek közelébe eső SF esetén érdemes lehet mérlegelni, hogy használjunk-e Ludwig-szögeket is.

6.2 A cross-plot elemzések összegzése

A cross-plot elemzések az általam végzett mérések esetében nem hoztak ki függvény szerű összefüggést a kétféle módszer között, sem a korhadt terület, sem a biztonsági tényező esetében. A kétféle módon kapott értékek összefüggése inkább véletlenszerűnek mondható. Ebből az következik, hogy nincs általános szabály arra, hogy az egyik módszerrel mért értékek változása esetén hogyan és milyen mértékben változnak a másik módszer méréseinek eredményei. (9., 13. és 14. ábra)

6.3 A mért adatok hisztogram elemzéseinek összegzése

A korhadt terület értékek esetében az olvasható ki az elemzésből, hogy bár egy-egy 5%-os intervallumban a kétféle módon mért értékek gyakorisága között sokszor többszörös különbség is van, az egész tartományt nézve (a legkisebb és a legnagyobb érték között) egyik módszer esetében sem figyelhető meg olyan tendencia, hogy általánosan nagyobb, vagy kisebb eredményeket hozna ki.

A biztonsági faktor értékek előfordulási gyakoriságának esetén szintén nem figyelhető meg tendenciális eltérés a kapott értékeknél a kétféle mérési mód használatával. (10. és 15. ábra)

Tehát kijelenthető, hogy bár a vizsgált fák esetében a kétféleképpen mért értékek nagyon ritkán egyeznek meg, az összes mérési eredményt a faegyedektől külön vizsgálva nem fedezhető fel olyan tendencia, miszerint az egyik, vagy a másik fajta mérési mód esetén kiugróan eltérő eredményeket kapnánk csak a mérés milyensége miatt. Az eredmények a legkisebb és a legnagyobb értékek közötti teljes tartományban hasonló arányban fordulnak elő.

6.4 Az eltérések hisztogramjainak összegzése

A kétfajta mérés közötti eltérések hisztogramjait elemezve a két vizsgált tulajdonság esetében (korhadt terület, SF) a legkisebb és a legnagyobb értékek közötti tartományban a fáktól elvonatkoztatva az összes mérési eredményt szemlélve az eltérések előfordulásának gyakorisága a korhadt terület vizsgálata esetén közel normális eloszlású, tehát a középső értékek felé haladva a gyakoriságuk nő, míg attól távolodva a nagyobb eltérések felé a gyakoriságok csökkennek.

A biztonsági faktor eltéréseit vizsgálva viszont már inkább véletlenszerű eloszlás látható, alátámasztva a cross-plot elemzés eredményeit, de tágabban véve a hibahatárt a valós eloszlás (az aránylag sok negatív érték miatt) valahol a normális és a binomiális között helyezkedik el. (11. és 16. ábra)

Tehát a fentiekből levonható következtetés, hogy a kétféle mérési mód eredményeinek eltérései a két vizsgált tulajdonság esetében a hibahatárokat tágabban értelmezve hasonlítanak a normális eloszlásra, ami azt jelenti, hogy az arányaiban kisebb eltérések gyakrabban fordulnak elő, mint a nagyobbak, tehát nincs radikális különbség a kétfajta mérési módon mért értékek között, de szigorúbban nézve inkább egy olyan véletlenszerű eloszlást látunk, ahol a szélsőséges értékek előfordulásának gyakorisága kisebb, mint a középső értékéé.

6.5 Az esetleges fafaj specifikus eredmények vizsgálata

Sajnos az Anyag és módszer fejezetben meghatározott kritériumok szerint kiválasztott, majd a méréseimhez megfelelőnek bizonyult fák között kevés az azonos fafajú egyed, így a kis mintaszám miatt nem tudok megfelelő következtetéseket levonni a fafajspecifikus eredmények tekintetében. Egyedül a Közönséges vadgesztenye esetén lehetne értelme ilyen vizsgálatnak, de azok eredményei között ilyen kis darabszám mellett nem sikerült összefüggést feltárni. (4. táblázat)

4. táblázat: A Ludwig-szögekkel és azok nélkül kapott eredmények a Közönséges vadgesztenye esetében
Forrás: Saját táblázat

Főként azonosító	Fafaj-Magyar név	Fafaj-Tudományos név	Korhadt terület-Sima (%)	Korhadt terület-Ludwig (%)	ELTÉRÉS	SF-Sima (%)	SF-Ludwig (%)	ELTÉRÉS	Avg. T/R-Sima	Avg. T/R-Ludwig	ELTÉRÉS
03GZGY0101005	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	72	73	1%	255	189	-26%	0,15	0,15	0%
03GZGY0102004	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	42	39	-7%	78	93	19%	0,35	0,38	9%
11FEN08009	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	10	10	0%	204	225	10%	0,68	0,68	0%
12SIL144001	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	73	75	3%	114	69	-39%	0,14	0,12	-14%
12SIL144003	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	61	49	-20%	43	54	25%	0,22	0,3	36%
12SIL144005	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	33	47	42%	53	38	-28%	0,43	0,32	-26%
12SIL144008	Közönséges vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i>	49	40	-18%	133	158	19%	0,3	0,37	23%
Eltérések átlaga:					0%			-3%			4%
Átlagos eltérés:					13%			24%			16%
Eltérések szórása:					21%			27%			21%
Eltérések mediánja:					0%			10%			0%

6.6 A kétféle vakszögkiosztással végzett mérések eredményeinek összegzése

Összevetve az érzékelők közé pontosan féltávra és a fa törzskeresztmetszetének alakját pontosabban lekövető módon elhelyezett Ludwig-szögekkel végzett mérések eredményeit (17. és 18. ábra), a következő megállapításokra juthatunk:

- a vizsgált törzskeresztmetszet alakjának pontosabb leírása az alakkövetően elhelyezett vakszögekkel komolyan befolyásolhatja a kapott korhadat terület értékeit,
- a biztonsági faktorok a sima és a Ludwig-szöges mérési mód esetében jobban eltérnek egymástól, ha a vakszögek elhelyezésével pontosabban képezzük le a fa keresztmetszetének alakját.

Tehát az alakkövető Ludwig-szög elhelyezés összességében a hagyományos, csak piezo érzékelőkkel végzett méréstől jobban különböző, nagyobb szórású értékeket szolgáltat a korhadás és a biztonsági faktor esetében, mint a féltávra helyezett vakszögek esetén. Itt fontos megjegyezni, hogy volt két olyan mérésem, ahol a hagyományos és a Ludwig-szöges mérés eredményei kiugróan nagy eltérést mutattak, és ebből mind a kettőt alakkövetően végeztem.

6.7 A két kiugróan nagy eltérésű mérés tomogramjainak vizsgálatának eredménye

Megvizsgálva a 03GZGY0101017 és a 21RAKO0601005 Főkert azonosítójú fa előző fejezetben tárgyalt mérési eredményeit (19. és 20. ábra), arra jutunk, hogy mindkét esetben az okozta az ilyen nagymértékű eltérést, hogy a Ludwig-szögek használata miatti megnövekedett hangútvonalszám és a valóshoz jobban közelítő törzsgeometria pontosabban írta le a fa tényleges állapotát.

6.8 A következtetések összegzése

Összegezve a következtetéseket, a vizsgálataim során arra jutottam, hogy ugyan nem fedezhető fel általános függvényszerű összefüggés, és általánosságban nincs kiugró különbség a hagyományos és a Ludwig-szögekkel végzett mérések értékei között, mégis az rajzolódik ki az eredményekből, hogy az esetek 71%-ában nagyobb biztonsági tényezőt kapunk a vakszögek használatával, mintha csak az alap érzékelőkkel vizsgáltuk volna a fát. Ezekből az a következtetés vonható le, hogy bár a biztonsági faktor eltérések a kétfajta mérés között általában nem szignifikánsak, erősen leromlott állapotú és szabálytalan törzskeresztmetszetű fák esetében a megalapozottabb és pontosabb döntéshozatalhoz ajánlott a Ludwig-szögek alkalmazása a Fakopp 3D műszerhez, mivel a több mérési pont használatával pontosabban lekövethető a fa vizsgált keresztmetszetének alakja, ami a feldolgozó szoftver számításaiban és így a fa veszélyességének értékelésében kiemelt szerepet játszik a statikailag még szerepet betöltő és a korhadat, nem teherviselő rész arányainak és elhelyezkedésének megállapításában. Ezen felül a vakszögek használatával több adatból tevődik össze a sebességtérkép, ami így megbízhatóbb eredményt ad a több hangútvonal értékelése miatt, mivel így jobban átjárja a hang a vizsgált keresztmetszetet, javítva ezzel a lefedettséget és a felbontást. Különösen igaz ez a hagyományos mérés esetén a határértékek közelébe eső biztonsági faktorú fák esetében.

Ezzel igazolást nyert a Bevezetés és célkitűzés fejezetben megfogalmazott feltevés.

A szakdolgozatom során kitértem még két vizsgálati tényezőre. Az első szerint, ha a Ludwig-szögeket a törzsgeometriát jobban lekövető módon helyezzük el a hagyományos érzékelők közeibe, akkor pontosabb képet kapunk a fa állapotáról, mintha pontosan féltávra helyeznénk el őket. Ezekből a vizsgálatokból levonva a következtetést, arra jutottam, hogy az alakkövető Ludwig-szög elhelyezés összességében a hagyományos, csak piezo érzékelőkkel végzett méréstől jobban különböző, nagyobb szórású értékeket szolgáltat a korhadás és a biztonsági faktor esetében, mint a féltávra helyezett vakszögek esetén, ami a pontosabban leírt törzsgeometria eredménye, és alátámasztja a feltevést.

A második vizsgált tényező, a fafaj specifikusság esetén sajnos nem jutottam eredményre, mert a vizsgálatra alkalmas fák között kevés volt megegyező fafajú. Csak a Közönséges vadgesztenyénél volt négyenél több (hét) egyed, de ilyen kis darabszám mellett nem sikerült összefüggést feltárni.

7. Összefoglalás

Összefoglalva tehát, a szakdolgozatom célja az volt, hogy mérésekkel és azok elemzésével igazoljam azt a feltevést, miszerint, ha a Fakopp 3D akusztikus tomográf műszer alap érzékelői mellett Ludwig-szögeket is használunk, azzal pontosabb képet kapunk a fa vizsgált keresztmetszetének állapotáról.

Ennek alátámasztása érdekében a Szakirodalmi áttekintés című fejezetben összegyűjtöttem és ismertettem a témám szempontjából fontos szakirodalmi források megállapításait, hogy bemutathassam az általam végzett vizsgálatok tudományos háttérét és elhelyezhessem azokat a favizsgálati eljárások rendszerében, majd kifejtettem azokat a kulcsfogalmakat, amelyek a dolgozatom további részeiben használtam. Elsőkén az élő fa állékonyságáról és a szélterhelésről írtam részletesen, majd kifejtettem a biztonsági tényező fogalmát, hogy a későbbiekben részletezett műszeres favizsgálati módszerek és az ezekhez tartozó eszközök leírásánál elősegíthessem azok működésének megértését.

Ezután méréseket végeztem a műszerrel a Ludwig-szögekkel és azok nélkül. Az első mérés során az adott faegyeden hagyományos módon, csak az alap érzékelőkkel mértem, majd ugyanazon a keresztmetszeten ugyanazzal az érzékelőkiosztással új mérést végeztem, amelyhez már az alap érzékelők közeibe beütöttem a Ludwig-szögeket is. Az így kapott különböző eredményeket hasonlítottam össze és elemeztem a kiértékelés során minden fa esetében.

A vizsgálataim során arra jutottam, hogy ugyan nem fedezhető fel általános függvényszerű összefüggés, és általánosságban nincs kiugró különbség a hagyományos és a Ludwig szögekkel végzett mérések értékei között, mégis az rajzolódik ki az eredményekből, hogy az esetek 71%-ában nagyobb biztonsági tényezőt kapunk a vakszögek használatával, mintha csak az alap érzékelőkkel vizsgáltuk volna a fát. Ezekből az a következtetés vonható le, hogy bár a biztonsági faktor eltérések a kétfajta mérés között általában nem szignifikánsak, erősen leromlott állapotú és szabálytalan törzskeresztmetszetű fák esetében a megalapozottabb és pontosabb döntéshozatalhoz ajánlott a Ludwig-szögek alkalmazása a Fakopp 3D műszerhez. Különösen igaz ez a hagyományos mérés esetén a határértékek közelébe eső biztonsági faktorú fák esetében.

8. Irodalomjegyzék

- Bartha D. (1999): Magyarország fa- és cserjefajai. Mezőgazda kiadó, Budapest, pp 13-14, 129-130, 143-144, 157-158
- Bíró M. (2019): Akusztikus tomográf mérésnél választható geometriák adta mérési eredmények összehasonlítása. Szakdolgozat, Dísznövénytermesztési és Dendrológiai Tanszék, Budapest, pp 21, 27
- Csapody I., Csapody V., Rott F. (1966): Erdei fák és cserjék. Országos Erdészeti Főigazgatóság, Budapest, pp 86, 126, 128-129, 156-157, 205-206, 219-220, 277-278
- Divós F. (2018): Az élő fák stabilitása – mérnöki megközelítés, Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek. Előadás. Szent István Egyetem, Faápoló és favizsgáló szakmérnök képzés, 2019.04.08
- Divós F. (2020): Használati útmutató az ArborSonic3D akusztikus tomográfhoz. Felhasználói kézikönyv, Fakopp Bt., Ágfalva, pp 4-10, 13-16, 20-21, 24, 59-60, 62
- Divós P., Divós F. (2005): Akusztikus tomográfia élő fák vizsgálatára. FAIPAR, 53 (1), ISSN 0014-6897, pp 4-5
- Divós F., Buza Á. K., Bejő L., Jaroslav K. (2021): Haladó faápolás és favizsgálat- kézikönyv szakemberek számára, Haladó műszeres favizsgálatok. ERASMUS+ publikáció, Wroclaw, pp 11, 13-16, 19, 34, 37-43, 64
- Európai standard EN 1991-1-4:2005+A1, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. pp 22
- Gerőcs L., Vancsó Ö. (2010): Matematika, Akadémiai Kiadó, Budapest, pp 224, 808
- Haulik Á. (1988): Dendrológia. Egyetemi jegyzet kivonat, Soproni Egyetem, Erdőmérnöki kar, Erdőmérnöki szak, Sopron, pp 6, 8, 12-13, 16, 18, 35-37, 41-43
- Honfi P., Sütöriné D. M. (2023): Kertészeti dendrológia. Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Budai Campus, Budapest, pp 83, 91, 93-94, 162-163, 165, 185, 195, 200, 203, 206, 216
- Internetes forrás 1: A PiCUS akusztikus tomográf csomag részei.
<https://www.iml-electronic.com/product/picus-sonic-tomograph/>, letöltve: 2023.11.23
- Internetes forrás 2: Arbotom 2D/3D Sonic Tree Tomography.
<https://rinntech.info/products/arbotom/>, letöltve: 2023.11.23
- Internetes forrás 3: https://www.researchgate.net/figure/Using-the-PiCUS-Sonic-Tomograph-3-the-accuracy-of-sonic-tomography-was-examined-by_fig1_367221932, letöltve: 2023.11.23
- Internetes forrás 4: <https://treemeasurementsolutions.com/products/products-for-tree-stability-testing/arborsonic-3d-acoustic-tomograph/>, letöltve: 2023.11.23
- Internetes forrás 5: <https://support.microsoft.com/hu-hu/office/%C3%A1tl-elt%C3%A9rt%C3%A9s-f%C3%BCggv%C3%A9ny-58fe8d65-2a84-4dc7-8052-f3f87b5c6639>, letöltve: 2024.03.26

- Internetes forrás 6: <https://support.microsoft.com/hu-hu/office/sz%C3%B3r-m%C3%BCggv%C3%A9ny-7d69cf97-0c1f-4acf-be27-f3e83904cc23>, letöltve: 2024.03.26
- Internetes forrás 7: <https://support.microsoft.com/hu-hu/office/medi%C3%A1n%C3%BCggv%C3%A9ny-d0916313-4753-414c-8537-ce85bdd967d2>, letöltve: 2024.03.26
- Johnson O., More D. (2007): Európa fái. Kossuth kiadó, Budapest, pp 162, 164, 216, 254, 258, 280, 348, 352, 354, 372, 378, 392, 410
- Kiss B. (1985): A plot-technikán alapuló kvantitatív karotázs interpretáció és logikája, Magyar geofizika XXVI. évfolyam, 4. szám, pp 121
- Korpás A. (1996): Általános statisztika I., Nemzeti tankönyvkiadó, Budapest, pp 24
- Lothar G. (2016): PiCUS Tree Tomography Methods at a Glance. Argus Electronic GmbH. Műszerismertető, Rostock, pp 3-5
- Lukács Z. (2017): Faápolás. Starkiss nyomda, Budaörs, pp 96, 101-102
- Lukács Z., Szaller V., Divós F., Kelemen G. (2017): Útmutató a vizuális és műszeres favizsgálatok elvégzéséhez dokumentálásához. Magyar Faápolók Egyesületének kiadványa, pp 175
- Nagy Cs. (2009): Erdészeti növénytan. FVM Vidékfejlesztési, Képzési és Szaktanácsadási Intézet, Budapest, pp 54, 67, 98-99
- Retkes J., Tóth I. (2006): Lombos fák, cserjék. Pauker nyomda, Budapest, pp 17-18, 35, 90-91, 96, 98, 111, 115, 121, 125
- Rinntech (2019): ARBOTOM 3-D Impulstomograph, Non-destructive inspection of the inner conditions of trees. Műszerismertető, Heidelberg, pp 2
- Schmidt G. (2003): Növények a kertépítészetben. Mezőgazda kiadó, Budapest, pp 140, 240
- Vida B. (2023): A Ludwig-szögek alkalmazásának előnyei és hátrányai az akusztikus tomográfus vizsgálatokban. Szakdolgozat, Dísznövénytermesztési és Dendrológiai Tanszék, Budapest, pp 9-10, 13-16

9. Ábrajegyzék

1. ábra: A PiCUS tomográf az érzékelőivel, valamint az általa készített tomogram a fa képére illesztve	11
2. ábra: PiCUS tomográf tomogramjának pontossága	12
3. ábra: Arbotom 3D akusztikus tomográf műszer	13
4. ábra: Az Arbotom 3D tomográf tomogramja	14
5. ábra: Fakopp 3D műszer és tomogramja	16
6. ábra: A Fakopp 3D tomográf tomogramjának pontossága	17
7. ábra: A vizsgált fák elhelyezkedése térképen, Főkert azonosítóval jelölve	26
8. ábra: A kétféle módszerrel mért korhadt részek területe faegyedenként	30
9. ábra: A kétféle módszerrel mért korhadt részek területének cross-plot elemzése	31
10. ábra: A kétféle módszerrel mért korhadási értékek hisztogramja	32
11. ábra: A korhadási értékek eltéréseinek hisztogramja a kétféle módszer esetében	33
12. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági faktor értéke faegyedenként	34
13. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági faktorok cross-plot elemzése	35
14. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági faktorok logaritmusának cross-plot elemzése	36
15. ábra: A kétféle módszerrel mért biztonsági tényezők hisztogramja	37
16. ábra: A biztonsági faktorok eltéréseinek hisztogramja a kétféle módszer esetében	38
17. ábra: A korhadt terület eltérések grafikonja és táblázata a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében	39
18. ábra: A biztonsági faktor eltérések grafikonja és táblázata a kétféle Ludwig-szög elhelyezés esetében	40
19. ábra: A 03GZGY0101017 azonosítójú fa tomogramjai és táblázata. Balra a hagyományos módon, míg jobbra a Ludwig-szögekkel mért tomogram látható	41
20. ábra: A 21RAKO0601005 azonosítójú fa tomogramjai és táblázata. Balra a hagyományos módon, míg jobbra a Ludwig-szögekkel mért tomogram látható	41

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Prónay Kristóf
A Hallgató Neptun kódja: MEBABF
A dolgozat címe: A Ludwig-szögek alkalmazásának előnyei szabálytalan törzsalak esetén
A megjelenés éve: 2024.
A konzulens intézetének neve: Tájépítészeti, Településtervezési és Díszkertészeti Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Dísznövénytermesztési és Dendrológiai Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: Budapest, 2024. április 23.


Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Prónay Kristóf (hallgató Neptun azonosítója: MEBABF) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: nem

Kelt: Budapest, 2024. április 17.

Sütőné Diczg. Gyöngyi
belső konzulens