
Doktori (PhD) értekezés

**ISMÉTELT FOURIER TRANSZFORMÁCIÓ ALKALMAZÁSA
A FA SŰRŰSÉG ELOSZLÁSI GÖRBÉIN**

Csóka Levente

Nyugat-Magyarországi Egyetem
Cziráki József Faanyagtudományi és Technológiák Doktori Iskola
Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratórium

Témavezetők:

Dr. Divós Ferenc

Dr. Katsuhiko Takata

2007

くりしたな

„Mert miképpen a fáról, azonképpen az emberről sem tudsz semmit,
ha életét szétszakítod folyamatában, ha változásaira darabolod.
A fa nem mag, nem vessző, hajlékony törzs, majd végül kiszáradt rönk.
Nem kell részekre bontani ahhoz, hogy megismerd.
A fa az az erő, amely lassan magába öleli az eget. „

Antoine de Saint-Exupery: Citadella

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS.....	- 6 -
2.	A KUTATÓMUNKA TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI A SZAKIRODALOMBAN	- 8 -
3.	A VIZSGÁLAT TÁRGYA ÉS MÓDSZEREI	- 13 -
3.1.	Fourier analízis	- 15 -
3.2.	Autókorreláció	- 20 -
3.3.	Hurst kitevő	- 23 -
3.4.	Wavelet transzformáció.....	- 24 -
3.5.	A rosthosszúság, mint független változó.....	- 25 -
4.	EREDMÉNYEK.....	- 26 -
4.1.	Ismételt Fourier transzformáció.....	- 26 -
4.2.	Fourier transzformációja egy tetszőleges abszolút-amplitúdó spektrumnak...-	27 -
4.3.	A minta hossza	- 30 -
4.3.1.	Ismételt Fourier spektruma a különböző korú sugi fák sűrűség függvényének...-	33 -
4.4.	Fourier vörös-zaj spektrum.....	- 35 -
4.5.	Hurst-kitevő	- 37 -
4.6.	Wavelet transzformáció.....	- 39 -
4.7.	A rosthosszúság, mint független változó.....	- 41 -
5.	AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA.....	- 44 -
6.	KONKLÚZIÓ.....	- 45 -
7.	IDÉZETT IRODALOM	- 46 -

ELŐSZÓ

Sokat használt fogalom napjaink tudományos életében a Fourier transzformáció. Megjelenése és alkalmazása a kutatásokban mindig valamilyen új eredményre vezetett. Ez a matematikai transzformáció születése óta jelentős életutat futott be. A Fourier sorok jelentősége nem csak elméletileg kiemelkedő, hanem a gyakorlati életben is. Kutatásaim során a Fourier transzformációt új megközelítésben használtam. Nem rezgések szétválasztására sin és cos sorokra, hanem rezgési állapotnak feltételezett sűrűség görbéken alkalmaztam. Ezeknek a görbéknek ismételt transzformálásával olyan eredményeket érhettem el, amely eredményekhez korábban hetek hosszú munkájára volt szükség. Továbbá olyan új összefüggésekre vezetett az ismételt Fourier transzformáció, amelyek segítségével jobban megérthetjük a fák növekedését. A vizsgálati módszer két különböző tudományterület összekapcsolásából született. Az egyik terület a matematika, azon belül a Fourier transzformáció, a másik pedig a faipari-anatómiai kutatások. A fák anatómiai felépítését mind makro, mind pedig mikro szinten jól ismerjük. Jellemezni tudjuk a sejtek formálódását, fejlődését, összességüket tekintve azonban mégis keveset tudunk a fák növekedését leíró szabályszerűségekről. A fák programozott génjei tudják mikor és milyen alakú leveleket kell növeszteniük, melyik fejlődési állapotban kell megállniuk ahhoz, hogy adott fajra jellemző levél képződhessen. A forma és a funkció adott fajra jellemző egységet alkot. Tudják, hogy mikor válnak éretté gyümölcs és termés érleléshez. A fák, mint élő fás növények évente egy növekedési zónát, azon belül két pásztát növesztenek szélességben, illetve növekednek magasságban, így hozva létre a fatörzset. Ebből megérthetjük, hogy a fatörzs nem egységes szerkezetű – a korai és késői pászták növekedéseinek megfelelően a külső tényezők – termőhely, éghajlat, csapadékmennyiség – jelentős hatást gyakorolnak a növekedésre. Ezek a különbségek a növekedésen keresztül fejeződnek ki. Fejlődésük az év kezdete folyamán felgyorsul, majd ősszel lelassul. A növekedésüknek ritmusa van. Ezt a ritmust matematikailag a Fourier és a Wavelet transzformációval jellemezni lehet. Ezt szeretném dolgozatommal bemutatni.

1. BEVEZETÉS

A faanyag bioszintetikus termék, aminek következtében növekedésük meghatározott gén funkció és bonyolult enzimatikus reakciók szerint következik be. Ahhoz, hogy megérthessük a fa növekedését, ismernünk kell a belső folyamatok nagy halmazából minden egyes komponenst, amelyek a radiális és magassági növekedésre hatással vannak (kémiai folyamatok, fizikai változások), és ezeknek a komponenseknek az egymásra gyakorolt hatását is át kell látnunk (*Savidge és munkatársai, 2000*). Elfogadott tény, hogy a fák adott körülmények között, optimális kambiumi növekedésre törekednek és az őket ért hatásokat ellensúlyozni próbálják. A fák növekedését erdészeti szempontból különböző tényezőkkel befolyásolni lehet, de a dolgozatomban leírtakkal a természet törvényszerűségének a megismerését tűztem ki célul, nem pedig annak megváltoztatását.

Napjaink egyre növekvő fa-felhasználását csak akkor tudjuk fenntartani a környezetvédelmi szempontokat is figyelembe véve, ha a fakészletek különböző ültetvényekről pótoljuk. Az ültetvényes fatermesztés vágási ideje rövidebb, mint a természetes erdőké éppen ezért a fatörzsön belül nagyobb arányú a juvenilis farész. Dolgozatom kísérleti egyedei mind természetes, mind pedig ültetvényes erdőkből származnak.

A probléma felvetése

A fatörzs szöveti felépítéséből adódó különbségeknek a vizsgálata, több szempont szerint is fontos megismerni:

- faipari szempontból, mert lehetővé teszi a fatörzs egyes részeinek a legalkalmasabb célra való felhasználását, különös tekintettel a juvenilis és érett farészekre. Továbbá az egyes farészek elkülönítésére az idő és pénz igényes kísérleteket csökkenteni lehet a dolgozat által bemutatott módszerekkel.

- erdészeti szempontból, mivel állománynevelő eljárások, klónok nemesítése során, a célnak megfelelő szöveti felépítés kialakulását irányítani lehet és a fatermék felhasználási tulajdonságait, bizonyos körülmények között modellezni lehet erdőterületenként.

Jelen dolgozat a japán ciprus (*Cryptomeria japonica D. Don, japánul: sugi*) fafaj e célból végzett vizsgálataival foglalkozik, olyan új módszerekkel, mint az ismételt Fourier transzformáció, autókorreláció, Hurst kitevő, Wavelet transzformáció, mely eljárásokat még nem használtak fák szöveti tulajdonságainak szétválasztására, jellemzésére. A vonatkozó szakirodalomból megismert sűrűség változás, évgyűrű szélesség, rosthosszúság és fibrilla

szög eloszlás adatok alapján – eddigi tudásunk és ismeretünk szerint – egy fatörzsön belül a juvenilis és érett fa átmenet fokozatos átmenettel jellemezhető. Shiokura 1982-ben elsőként próbált kísérletet tenni arra, hogy ezt a fatörzsön belüli átmenetet a szegmentált regressziós elmélete alapján határozott pontként állapítsa meg. Őt követte Zhu, 2005-ben publikált, hasonló eredményekből levont következtetések alapján. Munkájukban azonban még nem írtak konkrét átmenetet a két említett farész között.

Az előbb említett két kutató munkája alapján és a dolgozatban bemutatott módszerek arra engednek következtetni, hogy a fák radiális növekedésében az érettségi kor jól meghatározható időben kezdődik. A fák érettségi korát nagyon nehéz pontosan definiálni, de a fizikai, kémiai, mechanikai különbségekből adódóan – később részletezett – meghatározható egy bizonyos kor vagy évgyűrű szám, ami után ezek egyértelműen egyfajta szöveti jelleget jellemeznek.

2. A KUTATÓMUNKA TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI A SZAKIRODALOMBAN

Az erdészet és faipar talán legtöbbet kutatott területe a fák anatómiai felépítésének különbözősége fafajon és önálló egyedeken belül. Mindkét területen jelentős eredményeket értek el, amelyek segítségével az ipar számára jobb tulajdonságú fákat nevelhetünk. Mindez annak is köszönhető, hogy a fák kémiai, fizikai, mechanikai tulajdonságai jól átörökíthetők.

A fa, kambium gyűrűje által növesztett első évgyűrűi a bél közelében sajátos tulajdonságúak. Ezekből a fiatal évgyűrűkből álló farészt juvenilis fának nevezzük, amely a juvenilis kambium növekedéséből származik. A fenyők juvenilis és érett fa részei jelentős különbségeket mutatnak a bélhez és a kéreghez közelítve, továbbá a fa csúcsa és gyökere felé is. Éppen ezért nem beszélhetünk egységes faszerkezetről egy fatörzsön belül sem. Nincs egységes faszerkezet, azaz minden faj az őt ért különböző környezeti hatásoknak megfelelő, sajátos fejlődéssel rendelkezik. Számos publikáció foglalkozik a tulajdonságok változásával az egyes fafajon belül (*Zobel, Buijtenen 1989, Megraw 1985 és Koch 1985, Bendtsen 1978, 1986*).

A fenyőfélék legátfogóbb anatómiai jellemzésére a juvenilis és érett fa arányát tekinthetjük. Természetesen a lombosfáknál is megjelenik a juvenilis hatás, de kevésbé határozott módon, mint a fenyőknél. A juvenilis fa jelentőségét a gyakorlati élet szempontjából nem lehet eléggé hangsúlyozni. A fenyők juvenilis fája meghatározó jelentőségű a hasznosítás szempontjából, de problémát jelent az erdészetek számára (*Zobel 1984, Zobel és Kellison 1984*). Fontos azonban megjegyezni, hogy a juvenilis fa más típusú fa, mint az érett farész és nem rosszabb annál (*Zobel 1984*).

A juvenilis farésszel foglalkozó első publikációk már a XIX. század végén jelentek meg. Bary (német botanikus, 1884) könyvében már említ olyan kutatásokat, amelyek a juvenilis fával foglalkoznak. Ezek a korai írások nem használják még a juvenilis szót, sokkal inkább a belső vagy fiatal évgyűrűk megfogalmazást. A legtöbb publikáció azonban a XX. század derekán jelent meg, összegzi Zobel 1961-ben. Mindezekből jól látható, hogy a juvenilis fához kapcsolódó kutatások nagyon messze visszanyúlnak az időben, igazi aktualitását azonban csak az elmúlt 30 évben érte el.

A következő néhány cikk, könyv időrendben mutatja a juvenilis fával foglalkozó művek lajstromát - a fontosabbakat említve csak - napjainkig bezárólag a teljesség igénye nélkül. Külön figyelmet érdemelnek az 1967 és 1997-ben megjelent művek, amelyek egyetemünk tudományos tevékenységét összegzik a juvenilis fával kapcsolatban. Az időben korábban

keletkezett mű Gencsi Lászlónak erdei fenyővel végzett kutatásait összegzi, a későbbi pedig Mátyás Csaba és Peszlen Ilona közös munkája nyárfa klónokkal.

A megnevezett témával kapcsolatos irodalmi adat viszonylag sok, azonban ezek a felvetett problémakört inkább csak érintik, mintsem kimerítik.

1836 Jaccard, P. munkájában arról ír, hogy a szállítóelemek keresztmetszeti területe a törzs hosszában úgy alakul, hogy az időegység alatt, a törzs bármely magasságában, ugyanannyi vízmennyiséget bocsáthasson keresztül. Ezzel magyarázza a szállítófelület nagyobbodását a törzs vékonyabb, felső részén, ami kizárólag juvenilis farészt tartalmaz. Metzger (1893, 1908) elmélete az előbbivel szemben a fatörzset úgy fogja fel, mint az egyvégén befogott tartót, amely a korona súlyából és a szél hajlító hatásából eredő igénybevételt igyekszik felfogni, ezért a törzs alján elhelyezkedő farész külső része támasztó szerepet tölt be, éretté válása után. Ezzel a hajlító mechanikai igénybevétellel kapcsolatban alakult ki a *nyomott* és *húzott* fa fogalma is. Fenyő esetében a nyomott fa szélesebb évgyűrűjű, és – ahogy Jaccard leírta – benne a tracheidák ellipszis keresztmetszetek, rövidebbek, vastagfalúak és vörösbarna színűek. Ezek a megállapítások már ráillenek a később kialakult juvenilis fa fogalmi körére, bár még nem használják külön egységként.

Általános faanatómiai munkák közül leginkább érintik a témát 1860 Nördlinger, Hartig, R. (1852, 1892, 1896), Sanio, C. (1872), Strassburger, E. (1884), Schwarz (1899), hazai viszonylatban: Tuzson J. (1899), Hollendonner, F. (1913), Fehér-Mágócsy S. (1929), Greguss P. (1955) hivatkozott munkái – idézi Gencsi László 1967-ben megjelent tanulmányában.

Hartig R. 1892, az elsők között foglalkozott részletesen a különböző ökológiai viszonyok szerinti szöveti szerkezet alakulásával. Munkájában megállapítja, hogy a szabad állású és a törzssztyály szerinti magasabb fák több lignintartalommal és több bélsugárral rendelkeznek. A fajsúly szintén erősen változik aszerint is, hogy a fa melyik törzssztyályba tartozik. 1896-ban megjelent munkájának fontosabb megállapítása, hogy a legnagyobb sejtthosszak a nagy növekedés szakaszában keletkeznek.

Büsgen 1929-ben megjelent könyve egy nagyon korai összefoglalás az erdő fájának szerkezetéről, amely már foglalkozik a juvenilis farésszel. 1954-ben Hildebrandt részletezett tanulmányt írt a luc fenyőről és szöveti változásairól a fatörzsön belül. Rendle 1959-es munkája általános összefoglalót ad a juvenilis fáról és megjelenéséről a törzsön belül, hangsúlyozza továbbá, hogy a juvenilis fa kialakulásának nem feltétele a szélesebb évgyűrű szerkezet. Webb 1963-ban, általánosságban ír a juvenilis fáról, de munkájának érdeme, hogy tartalmaz már utalásokat a meghatározásáról és jellemzéséről is. 1965-ben Barefoot és munkatársai összehasonlító tanulmány készítenek a juvenilis és érett fáról, továbbá a juvenilis

fa papíripari hasznosításáról. Gencsi 1967-ben anatómiai különbségekről ír a fatörzsön belül a bétől a kéregig haladva erdei fenyő esetében. 1969-ben Larson a fa és ezen belül a juvenilis rész növekedésének alapvető kérdéseivel foglalkozik. Sok szerző által elfogadott és idézett munka. Ugyanebben az évben 1969-ben jelent meg Ellwood és munkatársai munkája a juvenilis fa rostosítási eljárásairól és sejt morfológiájáról. 1979-ben látott napvilágot Aday munkája, amelyben a juvenilis farész változásait mutatja be radiális és magassági irányokból szemlélve. Megállapította továbbá, hogy a nagyobb sűrűségi érték nem minden esetben jelentenek jobb farészt. 1980-ban Tutty dolgozatában ismét papíripari szempontok alapján kerül előtérbe a juvenilis farész. 1989-ben jelent meg Zobel és Buijtenen könyve, amely összefoglaló és kimerítő képet fest a juvenilis farészről, mind ipari, mind erdészeti szempontok alapján.

A juvenilis és érett farész növekedési különbségeit számos kutató vizsgálta környezeti és genetikai szempontok alapján is. A következőkben ezekből a kutatási eredményekből szeretnék idézni, a részletproblémákat illetően, a teljesség igénye nélkül.

Számos kutató kapcsolatba hozta a juvenilis farészt a fák fotoszintetizáló lombjának növekedésével (*Wareing 1958, Zobel és munkatársai 1959, Larson 1963, 1967, 1969, Zahner 1963, Sanwo 1988 – idézi Zobel 1998*). Ezek alapján Lindstrom 1996-ban megfogalmazott egy általános elképzelést, miszerint a földrajzi elhelyezkedés, éghajlat és erdészeti kezelések hatással vannak a lomb szerkezetre, ami következményeként hatással van a vaszkuláris kambiumra és tracheidák növekedésére is (ehhez a megállapításhoz hasonlót találunk már 1892-ben Hartig munkájában). Ezt a nézetet sokan elfogadták, de vannak olyan kutatók, akik megkérdőjelezték (pl. *Di Lucca 1989*).

A juvenilis fa formálódását röviden Clark és Saucier (1991) foglalta össze idézve más kutatók munkáit. Munkájukban leírják, hogy a radális növekedés a bél csúcsánál indul meg tavasszal, sok, vékonyfalú sejtet növesztve (korai pászta). Az átmeneti rész a vastagfalú sejtekhez (őszi pászta) a bél alsó részén indul meg, amely sejtek egyben az auxin forrásai is. A sejtfa vastagodás felfelé halad a nedvesség áramlásának megfelelően, az auxin pedig csökken a bélen lefelé haladva. Megállapítják továbbá, hogy: „Amint a fák magasabbak és öregebbek lesznek...a korona alsó, aktív része feljebb vándorol. Ennek következtében a bél körül kialakul egy olyan átmeneti réteg, ami a lombkorona fejlődési folyamatának eredménye felfelé haladása során... Mind a lombkorona, mind pedig az átmeneti rész fejlődését összességében juvenilis fának nevezzük.” Ennek eredményeképpen minden évben a kambium felfelé juvenilis fát, lefelé (szélességben) pedig érett farészt növeszt.

Az elmúlt évtizedben Gartner (1996) kapcsolatba hozta a juvenilis fa jelenlétét a törzsön belül az úgynevezett fotoszintetizáló kéreggel, miszerint az átmenet a fotoszintetizáló és nem-fotoszintetizáló kéreg között egybeesik a juvenilis és érett fa átmenettel. Gartner figyelmeztet azonban arra, hogy nem minden fajra igaz ez a megállapítás.

Yang és munkatársai (1994) szoros összefüggést talált a juvenilis fa évgyűrűinek száma és a kambium kezdeti állapota között sugi (*Cryptomeria japonica*) esetén. Ez az elgondolás hasonló volt Lantican és Hughes (1973) munkájával, *Pinus caribaea* fa vizsgálatainál. Más kutatók azonban nem találják elfogadhatónak az évgyűrűk korát, hanem előtérbe helyezik inkább a juvenilis rész távolságát a bétől (*Chalk 1959, Dodd és Fox 1991, Kucera 1994 – idézi Zobel 1998*).

Az eddig bemutatott elgondolások, kutatási eredmények mellett sem találunk egyértelműen olyant, amelyiket mindenki elfogadhatónak ítélné meg. Például Drow (1957) közel 50 évvel ezelőtt vizsgálta, hogy a távolságnak van meghatározó szerepe a bétől, a fa tulajdonságainak változásában, duglász fenyő (*Pseudotsuga menziesii*) esetében. Hasonlóan változásokat talált Chalk (1953) a sűrűség vonatkozásában szintén duglász fenyő vizsgálatainál.

Mindezeket összegezve az eltérések léteznek és ezekből adódóan a juvenilis fát különböző kémiai és fizikai vizsgálatokkal is meg lehet határozni. Fafajtól függően alacsonyabb sűrűségű (*Zobel és McElwee 1958, Pearson és Gilmore 1980, Clark és Saucier 1989, Tasissa és Burkhart 1998, Mora és munkatársai 2005*). Rövidebbek a tracheidák, nagyobbak a sejtüregek, a sejtjeinek vékonyabb a fala, nagyobb a másodlagos sejtfa második rétegének fibriláris szöge, érzékenyebb károsítókkal szemben, több mint 10%-kal nagyobb a lignin és hemicellulóz komponensek mennyisége és valamivel kevesebb a cellulóz tartalma, mint az érett fának (*Zobel, Buijtenen 1998*). Ez a farész a bél körül helyezkedik el a törzsön belül, 5-től 25 évgyűrű szélességben, magasságban kiterjed egészen a legmagasabb csúcsig (*Myers és munkatársai 1997*). A juvenilis fa alkalmatlan számos ipari felhasználásra és kedvezőtlen gazdasági szempontokból, eltérő mechanikai, fizikai, kémiai tulajdonságai miatt. Alacsonyabb értékű mechanikai tulajdonságait vizsgálta Koch 1966-ban, (*idézi Kretchmann 1992*) szerkezeti faanyagként való alkalmazásban. Fűrészipari termékek szárítása során vetemedik, zsugorodik (3-5%-ot élőnedves és szárított állapota között, *Williams 1999, Pearson és Gilmon 1971, Bendtsen 1978, Bendtsen és Senft 1986*), alacsony szilárdsági értékei vannak, nehezebben csiszolható és furnér készítés (hámozás, késeles) során kritikus tényező (*Senft és munkatársai 1985, Willits és munkatársai 1997*). Másrészt a rost- és papíriparban a juvenilis fából készült papírnak alacsonyabb a tépő szilárdsága, magasabb a

szakító és repesztő szilárdsága a magasabb lignin tartalomnak köszönhetően, mint az érett fából készült papír (Kirk 1972). Továbbá nehezebben fehéříthető a magasabb lignintartalom miatt. Hasonló feltárási körülmények között a rost hozam 25%-kal kevesebb juvenilis fából (Myers és munkatársai 1996, 1997, Myers 2002). Annak ellenére, hogy kevesebb hozam érhető el kitűnő alapanyaga a papíripari technológiáknak újságpapír, egészségügyi papír, minőségi író-, nyomópapíroknak.

Az előbb említett különbségekből adódik, hogy több mérési módszerrel is el lehet különíteni ezt a két farészt, habár ezek módszerek idő és költség igényesek. Ilyen szétválasztó módszer alapja például a lineáris (Loo és munkatársai 1985, Szymanski és Tauer 1991, Sauter és munkatársai 1999) vagy nem-lineáris szegmentált modell (Hodge és Purnell 1993, Tassisa és Bukhart 1998, Mora és munkatársai 2005), mely alapján valamilyen jellemző paramétert (sűrűség, rosthosszúság eloszlás stb.) ábrázolnak a bétől a kéregig haladva. A változásokra különböző típusú görbéket illesztenek, melyek alakjából, kereszteződéséből vonnak le következtetéseket. Az ilyen típusú mérések általában roncsolásos méréseken alapulnak, melyek során kiragadnak egy szöveti elemet a fatörzs évgyűrűiből, és azok kémiai, fizikai, mechanikai változásait jellemzik a bétől a kéreg felé haladva. Nem egységében vizsgálják a fatörzset, hanem felbontják elemeire. A másodlagos sejtfal fibrilláinak lefutását például, amit a rost hossz tengelyéhez viszonyítanak, különböző módszerekkel lehet meghatározni. Ezekhez a módszerekhez a rostokat fel kell tárnai, nagyszámú minta halmaza kell képezni, amihez nagy gyakorlottság szükséges. Általánosan elfogadott, hogy a fibrilla szög szoros kapcsolatban van faanyag szilárdságával (Nakada és munkatársai 1998, Bergander és Salmén 2002), ami a juvenilis és érett farész különbségeit még jobban szemlélteti a fent említett különbségeknek köszönhetően. A fibrilla szöget általában optikai, polarizációs, pásztázó elektron mikroszkópokkal, Röntgen diffrakciós méréssel vagy különböző cellulóz bontó gombákkal (*humicola alopallonella*, *trametes versicolor*) (Brändström és munkatársai 2003) határozzák meg.

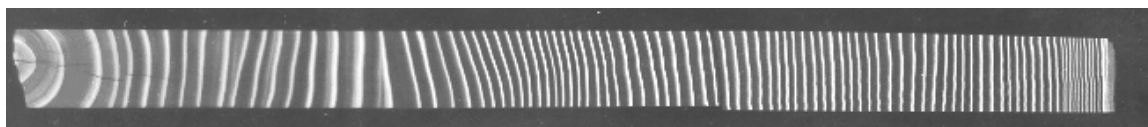
A dolgozatban bemutatott matematikai módszer a fatörzset egészként kezeli, nem bontja részeire, évgyűrűire szét. Az egységet megőrizve ad olyan információt a fák növekedéséről, amit korábban csak hosszadalmas mérésekkel és bonyolult berendezésekkel tudtak meghatározni.

3. A VIZSGÁLAT TÁRGYA ÉS MÓDSZEREI

A kutatás első lépéseként 18 azonos fafajból származó mintát gyűjtöttem Japán különböző területeiről, amelyek kor szerinti megoszlásban átfogóan jellemzik ezt a fafajt. A fák kora 28 és 221 év között változik. A 28 év körüliek ültetvényekről származó klónok. A fafaj neve sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). Gazdasági és ipari jelentősége egyaránt kiemelkedő Japánban.

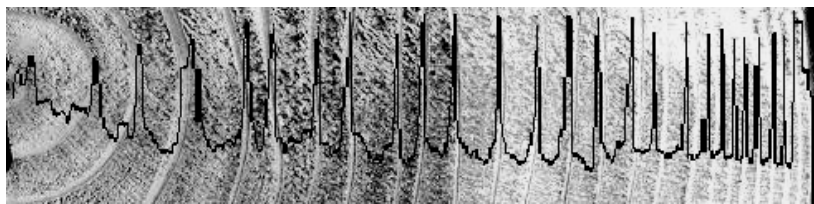
A kutatás második lépcsőjében közel 600 klónt vizsgáltam meg a dolgozatban bemutatott módszerrel, melyek vizsgálatát kevesebb, mint 1 hét alatt fejeztem be. 25 kiválasztott klón típust ültettek a '70-es évek elején Komenono, Takakuma, Tano és Ehime tartományokban, Japánban. Minden területen négy (X1, X2, Y1, Y2) kísérleti ültetvény volt és minden ültetvényben két azonos típusú klónt ültettek négyzethálós elrendezésben, melyben a fák egymástól 2 m-es távolságban voltak.

Kéregtől kéregig radiális szeleteket vágtam 5 mm vastagságban és 18 mm szélességben a fakorongokból. A fakorongok a fa mellátmérőjéből származnak. A mintákat szabványos körülményeknek megfelelően, 20 °C hőmérsékletű és 65% relatív páratartalmú kondicionáló helyiségbe tettem 5 napra, forró vizes extrakció nélkül. A próbatestekről ezt követően Röntgen filmet készítettem, 340 másodperces besugárzási idővel (1. ábra).



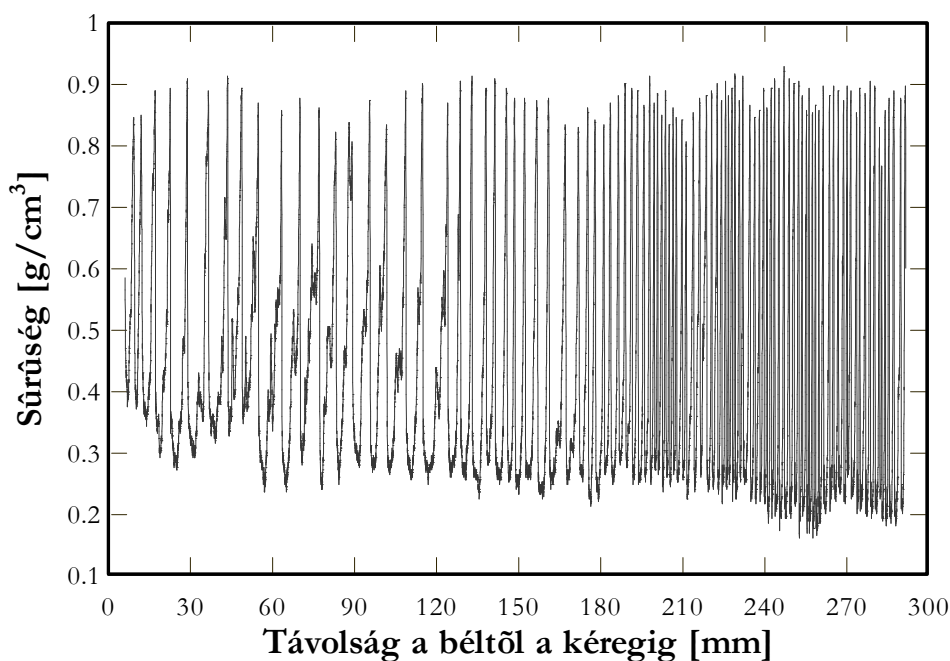
1. ábra. A 9-1-ES MINTA RÖNTGEN FELVÉTELE

A Röntgensugárzás intenzitása 14 mA, feszültsége 17 kV volt. A próbatestek a sugárforrástól 250 cm-re helyezkedtek el. Az előhívott Röntgen filmeket densitométerrel (JL Automation 3CS-PC) elemeztem és egy speciális szoftver segítségével sűrűség görbéket származtattam (2. a és b ábra). Az őszi pászta arányának meghatározásához Mork törvényét vettem alapul (Denne 1989).



2. a ábra. A SŰRŰSÉG VÁLTOZÁSAI EGY MINTATESTEN

A sűrűség függvény a fatest évenkénti radiális növekedését fejezi ki a távolság függvényében a bétől a kéregig (2.a ábra). A fák növekedése az évek folyamán dinamikusnak tekinthető, de a Röntgen besugárzás során nyert filmekből a sűrűség függvények statikusan mutatják az időbeni változásokat, amit könnyebben értelmezhetünk. Dolgozatomban a *sűrűség- függvény, ill. görbe* elnevezés alatt az előbb leírt fogalmat értem és nem a matematikai statisztikában jól ismert sűrűség függvényt különböző eloszlások esetén (2.b ábra).



2. b ábra. A 6-3-AS MINTA SŰRŰSÉG VÁLTOZÁSA

A sűrűség függvények Fourier vizsgálata lehetővé teszi, hogy a sűrűség változásait az évgyűrűkben együttesen, hullám-természetként kezelhessük a távolság változásában. Az eddigi kutatási eredmények nem találtak összefüggéseket az évgyűrű szélesség és a hozzá tartozó maximális sűrűség között. Ezért jelentős a Fourier analízis alkalmazása ezen a területen.

3.1. Fourier analízis

A Fourier analízis egy tetszőleges periodikus rezgést, harmonikus rezgések összegeként állít elő és csak folytonos függvényeken értelmezett. A transzformált (komplex) függvényértékek egy adott frekvencián azt mutatják meg, hogy azonos frekvenciájú sin és cos függvényekből milyen amplitúdójúakat kell összeadni, hogy az eredeti függvényt kapjuk meg. A transzformálás gyakorlatilag az eredeti függvény sorbafejtése a sin és cos függvények függvényterében. Ez a függvénytér végtelen dimenziós, minden valós frekvenciához létezik egy sin és egy cos függvény. A gyakorlatban azonban nem dolgozhatunk végtelen frekvencia felbontásban, ami azt jelenti, hogy a sorfejtésben nem minden frekvenciát nézünk meg, hanem csak bizonyosakat, azokból is véges sokat. Az egyes frekvenciáknál az amplitúdók azt jelentik, hogyha az FFT-ben (Fast Fourier Transformation) valahol csúcs van, akkor a csúcs maximumánál levő frekvencia közelében található valamilyen periodicitás az eredeti adatsorban.

Kutatásom alap gondolata az volt, hogy a Röntgen filmekből származtatott sűrűség görbéket (2. b ábra) rezgéseknek tekintettem és így a Fourier analízist elvégezhettem rajtuk.

A Diszkrét Fourier transzformáció matematikai alakja:

$$F\{x(s)\} = X(\nu) \quad 1$$

ahol $x(s)$ a sűrűség függvény.

Az F operátor matematikai jelentése:

$$X(\nu) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n \cdot \Delta l) e^{-i(2\pi\nu)(n \cdot \Delta l)}, \nu = k \cdot \Delta f \text{ ahol } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad 2$$

N - a diszkrét értékek száma (4000-től 40000-ig, a minta korának a függvényében)

L - a próbatest hossza a béltől a kéregig [mm]

Δl - távolság a diszkrét értékek között $\Delta l = \frac{L}{N}$ [mm] (0.015 mm minden esetben)

Δf - frekvencia növekmény a spektrumon $\Delta f = \frac{1}{L}$ [$\frac{1}{mm}$]

f_s - mintavételezési gyakoriság $f_s = \frac{1}{\Delta l}$ [$\frac{1}{mm}$]

Az adatsorban a független változó a távolság a középponttól haladva a kéreg felé (mm). A Fourier transzformáció alapfeltevése, hogy a vizsgált adatsor egy konstans spektrumú forrásból származik. A fa sűrűségét kialakító környezeti hatások tekinthetők konstans periódusúaknak, pl. az éves, napos, hónapos periódus és magát a növekedés ritmusát, amennyiben eltekintünk a trendszerű hatásoktól (pl. tápanyag folyamatos változása,

károkozók, rovarok pusztításának előrehaladása stb) illetve a nem periodikus, sztohasztikus hatásoktól (pl. adott időszak csapadékosságának, napsütés mennyiségének változásai). A növekedés a fa öregedésével lelassul, azaz egyre keskenyebb évgyűrűk jellemzik az érett farészt, igaz nagyobb átmérőben, így az időben állandó periódusok látszólag nem őrződnek meg a távolság szerinti változásban (lásd később a Wavelet analízis című fejezetben).

A Fourier transzformált definíció szerint pozitív és negatív frekvenciákra is szolgáltat értékeket. Valós függvény transzformáltja a negatív frekvenciáknál levő értékek komplex konjugáltjai a pozitív frekvencia párjuknál található értéknek. A gyakorlatban legtöbbször valós függvényeket vizsgálunk és "spektrum" alatt a pozitív frekvenciáknál található értékeket értjük (a negatív párjuk könnyen előállítható). A kiindulási sűrűség adatsort transzformálva megkapjuk, hogy milyen amplitúdójú és frekvenciájú periódusokból áll az eredeti függvényünk, a fent leírtak alapján. Kezdeti tapasztalatok alapján azonos korú fák esetében 15-20 olyan frekvenciát lehet megkülönböztetni, amelyek termőhelytől függetlenül minden mintában előfordulnak. A környezeti hatásokat és azok kölcsönhatását összegezve sem tudunk ennyi hatást elkülöníteni. A megegyező frekvenciák feltehetően kémiai anyagok változásából is következhetnek.

Az első spektrumot nehéz értelmezni a sok frekvencia miatt, ezért a Fourier transzformációt újra elvégeztem. Ez volt a kutatásom másik alapgondolata, hogy az ismételt transzformációval (nem inverz transzformáció!), milyen új elemzési lehetőségeket érhetünk el. Az amplitúdó spektrum ismételt Fourier transzformációja (gyakorlati esetünkben) a következő matematikai összefüggéssel írható le:

$$F\{X(\nu)\} = x'(s) \quad 3$$

A következőkben mutatom be, hogy az abszolút amplitúdó spektrum FT-jának zárt alakban való megadása milyen problémákat vet fel.

A szakirodalomban található levezetések között nem szerepel az abszolút amplitúdó spektrum FT-ja, mivel abszolút függvényt $|F(k)|$ transzformálni nem lehet. Éppen ezért a *Wiener-Khinchin* elméleti tétel azt mondja ki, hogy transzformáljuk inkább az amplitúdó spektrum négyzetét, ami konvolúciós integrállal kifejezhető. Ez az elméleti tétel matematikai megadása a kapcsolat a FT és az autókorreláció között, a következő alakban írható fel:

$$F_k[|F(k)|^2](x) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(\tau) f(\tau + x) d\tau \quad 4$$

ahol \bar{f} jelenti a komplex konjugáltját az f függvénynek. A 4-es egyenletből következő spektrum tartalmában nem az abszolút amplitúdó spektrum FT-ját jelenti, habár ez a közelítés jó törekvés a megoldás felé.

Monokromatikus sin és cos függvények második spektruma egy exponenciálisan csökkenő görbét mutat (egy konstans értékhez tart diszkrét esetben), ami a Dirac delta FT-jából következik.

$$F_x[\delta(x)](k) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{-2\pi i k x} dx = e^0 = 1 \quad 5$$

Az ismételt, diszkrét amplitúdó spektrum Fourier transzformációjának elméleti közelítését Fridli Sándor matematika professzortól kaptam (ELTE), melyet a következőkben szeretnék ismertetni. Fontos megjegyezni az ismertetés előtt, hogy ez a levezetés az amplitúdó spektrumot komplex számként kezeli és nem abszolút értékűnek!

Legyen az alapintervallum $[0,1]$. Ekkor N egyenlő részre osztás után kapjuk a $\left\{ \frac{k}{N} : k = 0, \dots, N-1 \right\}$ alappontokat. A k -adik alappontban jelöljük a függvényértéket $f(k)$ -val. A megfelelő diszkrét komplex trigonometrikus rendszer $\{e_j : j = 0, \dots, N-1\}$ ahol

$$e_j(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{2\pi i j \frac{k}{N}} \quad 6$$

A $\frac{1}{\sqrt{N}}$ együttható a normálás miatt kell. Ezek után f diszkrét Fourier-transzformáltja

$$F(f)(j) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-2\pi i j \frac{k}{N}} \quad (j = 0, \dots, N-1) \quad 7$$

Végezzük most el a Fourier-transzformációt a kapott $F(f)$ -re:

$$F(F(f))(l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=0}^{N-1} F(f)(j) e^{-2\pi i l \frac{j}{N}} \quad 8$$

$$= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=0}^{N-1} \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-2\pi i j \frac{k}{N}} \right) e^{-2\pi i l \frac{j}{N}}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \sum_{j=0}^{N-1} e^{-2\pi i j \frac{k}{N}} e^{-2\pi i l \frac{j}{N}} \quad 9$$

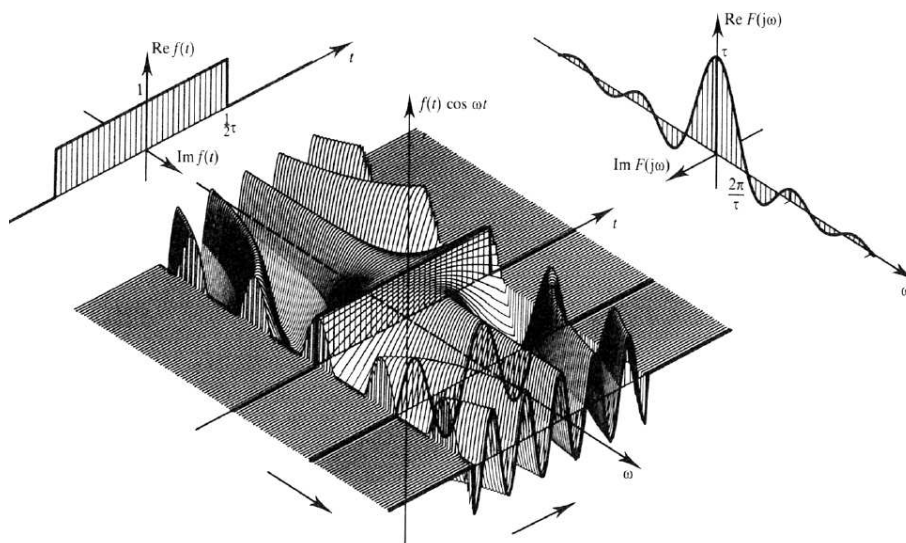
$$= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \sum_{j=0}^{N-1} e^{-2\pi i k \frac{j+l}{N}} \quad (j = 0, \dots, N-1)$$

A geometriai sorozat első N tagjának összegére vonatkozó formulából azonnal adódik, hogy

$$\sum_{j=0}^{N-1} e^{-2\pi i k \frac{j+l}{N}} \text{ összeg } 0, \text{ ha } j+l \neq 0. \text{ Ha } j+l=0, \text{ azaz } j=-l \text{ esetén az összeg } N.$$

Következésképpen $F(F(f))(l) = f(-l)$. 10

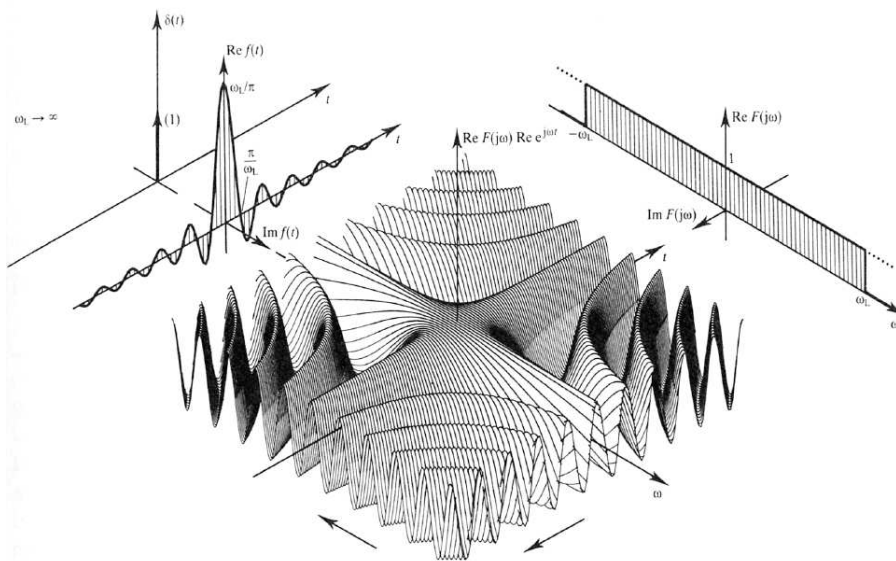
A következő 3. ábra jól szemlélteti az eddig leírt matematikai levezetést. Vegyünk kiindulásként egy négyszög jelet és transzformáljuk Fourier szerint.



3. ÁBRA. GRAFIKUS SZEMLÉLTETÉSE A FOURIER TRANSZFORMÁCIÓNAK (FORRÁS: DR. CHARLES UNSWORTH, UA,NZ)

Az omega-idő sík minden pontjához egy értéket számolva kapjuk a 3. ábrán látható felületet. Egy adott frekvenciánál, ha készítünk egy metszetet és integráljuk az idő szerint, kapjuk az első Fourier spektrumot, ami $\frac{\sin x}{x}$ alakú függvény szerint változik (3. ábra jobb oldala).

Ha az első spektrumon levő impulzus vektor, omega végtelenhez tart ($F(i\omega)=1$ minden omega esetén), akkor a magassága az impulzusnak növekszik a végtelen felé, miközben a szélessége elenyészően kicsi lesz. Ismét omega-idő síkon ábrázolva jól láthatjuk, hogyha az első spektrumon (4. ábra bal oldala) egy impulzus vektor van, akkor annak a továbbvezetett, inverz FT spektrumán visszakapjuk a kiindulási négyszög jelünket.



4. ÁBRA. GRAFIKUS SZEMLÉLTETÉSE AZ ISMÉTELT FOURIER TRANSZFORMÁCIÓNAK (FORRÁS: DR. CHARLES UNSWORTH, UA,NZ)

Jól látható mindebből, hogy elméleti szinten az ismételt FT-nak nincs jelentősége. Mivel azonban a gyakorlatban abszolút amplitúdó spektrumok tovább transzformálásáról van szó, a korábban leírtak alapján megérthető, hogy olyan új eredményekhez vezet az ismételt FT, amit elméleti közelítésben csak nagyon hosszadalmasan érthetünk meg.

3.2. Autókorreláció

A természetben lejátszódó folyamatokból származtatott fasűrűség görbék jellegzetessége, hogy gyakran nem adnak egyértelmű információt. Hagyományos módon explicit függvénnyel általában nem érdemes leírni, mert a sűrűség görbét kialakító növekedési mechanizmusban számottevő a véletlen elem. Összehasonlítva a különböző korú fák sűrűség görbéit azt tapasztaljuk, hogy ugyanaz a görbe csak igen kis valószínűséggel jön létre újból. A görbéket kialakító mechanizmusok viszont minden esetben hasonlóak, csak az adott fa egyed másképpen reagál az őt ért hatásokra. A következő matematikai elemzések egyik alapkérdése arra vonatkozik, hogy a vizsgált sűrűség görbékben felfedezhető-e valamilyen szabályszerűség, a vizsgált jelenség függ-e korábbi értékétől, öröklődik-e valamilyen növekedési jellegzetesség, ami beépül az évgyűrű szerkezetbe, vagy pedig véletlenszerűnek mondható-e a fák növekedése. Szabályszerűség esetén az egymás után következő évgyűrű változások adatai egymáshoz hasonlóak lesznek, vagy éppen ellenkezőleg, teljesen különböznek egymástól.

Ilyen módszerek például az autókorreláció számítás vagy a Hurst kitevő elemzése, melyek közül az első olyan módszert jelent, amely azt tanulmányozza, hogy ugyanazok a változók megfelelő intervallumok eltelte után mennyire hasonlítanak egymásra. Autókorrelálatlanság esetén az egyes értékek véletlenszerűen szóródnak, a különbségek nem rajzolnak ki szabályos mintázatot. Ha egy adathalmaznak az autókorrelációjának hosszú a csillapodása (matematikailag végtelen), akkor Gauss-féle rendszerről beszélünk.

Az előbb említett két matematikai operátor közül elsőként az autókorrelációt mutatom be.

A fa sűrűség görbéit stacionáriusnak tekinthetjük, hiszen a stacionárius folyamatok olyan folyamatokat jelölnek, melyek statisztikus karakterisztikái (pl. eloszlásfüggvény, gyakoriság) függetlenek attól, hogy a folyamatot mely időszakában mintavételezzük. Azért, hogy eldönthessük, hogy ezek a sűrűség görbék véletlen ingadozásúak az átlaguk körül, esetleg valamilyen háttéren, a sűrűség függvényeket autókorrelációs vizsgálatnak vettem alá. A sűrűség görbék lognormális eloszlást követnek, alul és felül jól meghatározható korláttal.

Egy egyszerű vörös-zajra vonatkozó feltétel formálisan a következő matematikai összefüggéssel vizsgálható:

$$x_n = \alpha x_{n-1} + z_n \quad 11$$

Az x_n változó így kapcsolatban áll az előzővel, egy z_n eltérésváltozóval és egy α paraméterrel. A 11-es egyenletben az α -az autókorreláció első maradékának ($lag - 1$) értéke, $x_0 = 0$, a z_n pedig Gauss típusú fehér-zaj. Mivel α egy időben korábbi változó együtthatója, elsőrendű autókorrelációs együtthatónak nevezzük. A 11-es egyenlet által leírt folyamat elsőrendű autoregresszív folyamat, ismertebb nevén AR(1).

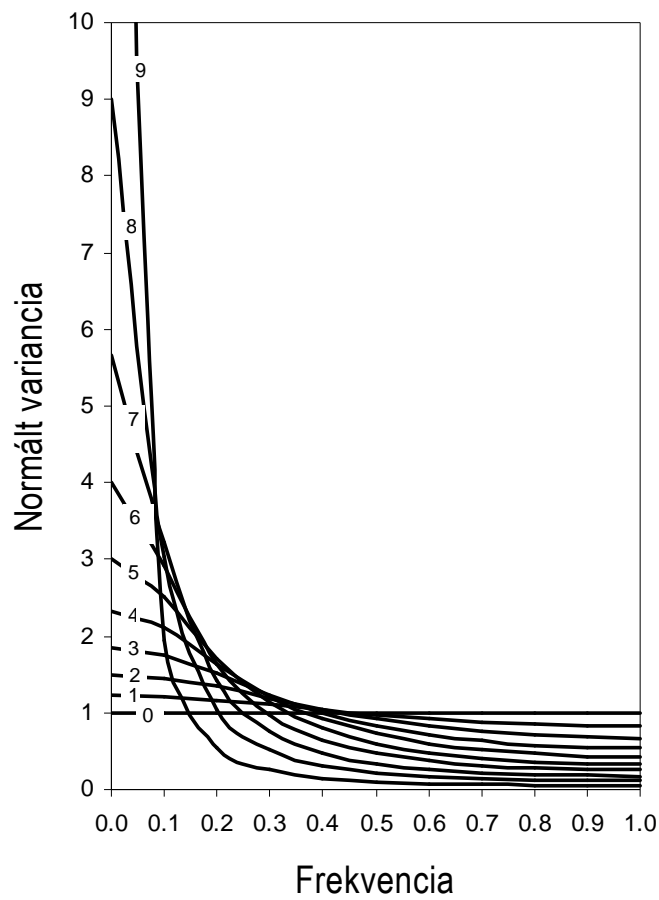
A fehérzaj olyan folyamat ($E(z_n) = 0$, $E(z_n^2) = \sigma_z^2 < \infty$ és $E(z_n z_{t-s}) = 0$, $s \neq 0$ esetén), melynek alakulása az idő előrehaladtával csupán a „véletlentől” függ, és nem függ a korábban bekövetkezett eseményektől. Azt is mondhatjuk, hogy nincs a folyamat fejlődésében a múltból örökölt információ. Célkitűzéseink megértése szempontjából ez a fogalom alapvető. Gilman és társai munkájukban találhatjuk a diszkrét Fourier spektrumát a 11-es egyenletnek, ahol normalizálás után kapjuk:

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(\pi k / N)} \quad 12$$

ahol, $k = 0 \dots N/2$ a frekvencia index. Megfelelő autókorrelációs értéket figyelembe véve a 12-es egyenlet vörös-zaj függvényt ír le. Ha $\alpha = 0$, a 12-es egyenlet a fehér-zaj spektrumot eredményezi.

Az 5. ábrán ábrázoltam a 12-es egyenletet különböző α esetén, amit felhasználhatunk megfelelő háttér spektrum választáshoz, mivel szemléletesebb függvényt mutat, mint egy fehér-zaj spektrum, ami ennek egy speciális esete, $\alpha = 0$ esetén.

Az így előállított spektrumokat már összehasonlíthatjuk a sűrűség görbék első Fourier spektrumával és eldönthetjük, hogy mely évgyűrű szélességek vannak kapcsolatban a fa növekedésével és melyek azok, amelyek csak véletlenszerűen jelennek meg.



5. ábra. VÖRÖS-ZAJ SPEKTRUMOK, KÜLÖNBÖZŐ AUTÓKORRELÁCIÓS α ESETÉN A 12-ES EGYENLET SZERINT. A FÜGGŐLEGES TENGELEN SZÓRÁSNÉGYZET LETT ÁBRÁZOLVA KÜLÖNBÖZŐ FEHÉR-ZAJ ÉRTÉKEKNEK MEGFELELŐEN. A VÍZSZINTES TENGEY A MAXIMUM FREKVENCIA TIZED RÉSZÉINEK MEGFELELŐ OSZTÁSA, EGYENLŐ AZ ADATSOR MINTAVÉTELEZÉSI FREKVENCIÁJÁNAK FELÉVEL.

3.3. Hurst kitevő

A következő módszer az alkalmazott matematikában jól ismert tudományterülettel, a fraktálokkal van közvetlen kapcsolatban (Hurst kitevő), amit ott durvasági (roughness) kitevőnek is neveznek.

Hurst (1900-1978), angol hidrológus, munkásságát a Nílus folyó vizsgálatának és víztárolási problémáinak szentelte. Bevezetett egy új statisztikai módszert, *rescaled range* (R/S) elemzés néven, amelyet bővebben a *Long-Term Storage: An Experimental Study* (Hurst *et. al.* 1965) című munkájában fejtett ki.

A Hurst kitevő matematikai megfogalmazása:

$$\frac{R}{S} = (c \cdot \tau)^H \quad 13$$

ahol: τ -az idősor, a c -együttható értéke 0.5 (Hurst szerint), H -Hurst kitevő.

Az R és S meghatározása:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad 14$$

és

$$S = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{ \xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau} \}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad 15$$

ahol:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad 16$$

normált, kumulatív adatsort jelent és

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{ \xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau} \} \quad 17$$

A H értéke 0 és 1 között változhat. Ha az adott idősorunknak a H értéke 0.5 és 1 közé esik, akkor az a függvény úgy jellemezhető, hogy tartalmaz hosszútávú-memória elemeket, tehát a fejlődés változása hasonlít önmagára a kezdetekben és végében egyaránt, habár a két pont között látszólag változatos pályát fut be.

3.4. Wavelet transzformáció

Olyan jelenségek vizsgálatánál, melyeknél a frekvencia időben változik – mint pl. a sűrűség függvény esetében is –, időfüggő frekvencia-analízist is alkalmazhatunk. Ilyen például a Wavelet transzformáció, ami egy lineáris operátor. A Wavelet transzformáció továbbfejlesztett Fourier transzformáció, amely nem csak a jel frekvencia tartalmát mutatja meg, hanem azok időbeni elhelyezkedését is. Egy egyváltozós függvényt, a mi esetünkben a sűrűség függvényt, egy kétváltozós függvénné alakít, mely a függvény komponenseit adja meg, különböző felbontásban. Tehát megmutatja, hogy az egyes komponensek mikor fordulnak elő a jelben.

A folyamatos Wavelet transzformáltja egy diszkrét sűrűség szekvenciának $x(s)$ a következőképp definiálható:

$$W_n(s) = FFT^{-1} \left[\sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \left(\sqrt{\frac{2\pi s}{\delta t}} \hat{\psi}_0 * (s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t} \right) \right] \quad 18$$

ahol:

N - a diszkrét értékek száma (4.000-től 40.000-ig, a minta korának a függvényében)

s - wavelet skála érték (esetünkben: 6)

δt - távolság a diszkrét értékek között (0.015 mm minden esetben)

x_k - diszkrét Fourier transzformáció

$\hat{\psi}_0(s\omega_k)$ - (alaphullám) kernel függvény, jelen esetben Paul és Morlet típusú (módosított Gauss-görbe), melyeket a következő alakban írhatjuk fel:

Paul kernel függvény esetén: $\frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} H(\omega) (s\omega)^m e^{-s\omega}$ 19

Morlet kernel függvény esetén: $\pi^{1/4} H(\omega) e^{-(s\omega-m)^2/2}$ 20

ahol:

m - hullámszám, $H(\omega)$ - Heaviside lépés függvény, $H(\omega) = 1$ ha $\omega > 0$, $H(\omega) = 0$ egyébként.

A Wavelet transzformáció a sűrűségfüggvény karakterisztikáit egyértelműen meghatározza a választott alaphullám és a skálaparaméter értéke mellett.

A módszer segítségével vizsgáltam, milyen új lehetőségeket nyújt a Wavelet transzformáció a fák növekedését leíró sűrűség görbék évgyűrű szélesség és a teljes növekedési idő együttes ábrázolása esetén. A gyakorlatban a magas frekvenciás (nagyon rövid évgyűrű szélességek) hatások nem homogén módon jelentkeznek. Az egyes komponensek pedig csak ott lesznek magas értékűek, ahol az azonos hatások (évgyűrűszélességek) koncentrálódnak. Az eredmények fejezetben bemutatott Wavelet spektrumokból a szélhatás (cone of influence) jelenség ki lett zárva.

3.5. A rosthosszúság, mint független változó

Az eredmények hitelességének bemutatásához kiválasztottam egy olyan módszert – független változóként tekintve rá –, amivel Fourier, Wavelet transzformációs eredményeimet összehasonlíthattam, és amely széles körben elfogadott módszer a tudományterületen. A rosthosszúság mérést választottam, amivel viszonylag könnyen, de hosszú idő alatt sikerült meghatároznom a juvenilis átmenetet. A legújabban elfogadott tudományos eredmények alapján, a logaritmikus regressziós modell tűnt leginkább alkalmazhatónak az átmeneti pont meghatározására a juvenilis és érett fa között. Ez a módszer a rosthosszúság eloszlását veszi alapul a távolság függvényében (*Zhu és társai, 2005, Shiokura 1982*). A regressziós módszerhez minden évgyűrű kései pászttájából legalább 40 db különböző rosthosszúságot mértem meg, ami a koros fáknál nagyon hosszadalmas művelet volt. Az eloszlásokra logaritmikus görbéket illesztettem. A regressziós modell azt jelenti, hogy az illesztett görbe 1, 2 ill. 3% alá való csökkenését vizsgálják a juvenilis és érett farész meghatározásához. Shiokura 1982-ben megjelent cikkében az illesztett görbe 1%-os csökkenést állapított meg a két fő farész (juvenilis – érett rész) elkülönítéséhez és ezt vettem én is alapul.

4. EREDMÉNYEK

A következő fejezetben foglalom össze kutatásom eredményeit, melyet az ismételt Fourier transzformáció levezetésével kezdek. Ez a matematikai levezetés nem található meg az elérhető szakirodalomban.

Az eredmények további bemutatásánál kiválasztottam 3 olyan sugi mintát, mellyel jól jellemezhettem a fák növekedését különböző koruknál fogva, később, az összefoglaló táblázat azonban tartalmazza mind a 18 minta adatait.

4.1. Ismételt Fourier transzformáció

Mint azt korábban bemutattam egy komplex trigonometrikus rendszer ismételt Fourier transzformációja a kiindulási függvény tükörképét adja eredményül, mivel az első spektrumot komplex számként lehet csak tovább transzformálni. Így a komplex spektrumból képzett abszolút amplitúdó spektrum ($\sqrt{\Re^2 + \Im^2}$) ismételt transzformációjához más úton juthatunk csak el.

Megjegyzés: Ha az amplitúdó spektrumot tovább transzformáljuk, akkor mivel a spektrum egysége a frekvencia, azaz hullám/egység, a második transzformált egysége a hullám/frekvencia, azaz a hullám/(hullám/egység), vagyis visszakapjuk az eredeti egységet.

Azon túl, hogy visszakaptam az eredeti távolság tengelyemet, a transzformáció új eredményeket mutatott az így kapott spektrumon. Az elérhető szakirodalom nem tesz említést arról, hogy eddig valaki alkalmazta volna a Fourier transzformációt ezeken a sűrűség görbéken és arról sem, hogy a transzformáció ismételt elvégzése milyen új eredményeket hozott. Általánosan elmondható, ha a FT-ban valahol csúcs van, akkor a csúcs maximumánál levő frekvencia közelében található valamilyen periodicitás az eredeti adatsorban. Tehát, ha a második FT-ban valahol csúcs van, az azt jelenti, hogy az amplitúdó spektrumban periodicitás nem volt, mert ezek a csúcsok lokális minimumokat jelölnek. Az évgyűrű növekedése szempontjából ez azt jelenti, hogy különböző növekedési ritmusok megszűnnek az ismételt Fourier spektrum csúcsai közelében, illetve kioltódnak.

4.2. Fourier transzformációja egy tetszőleges abszolút-amplitúdó spektrumnak

Tekintsünk egy valós számokon értelmezett függvényt $x(t)$ -t, amiből csak egy L hosszúságú Dirac delta többszörösein értelmezett függvényrészlet áll rendelkezésünkre. Egy valós számokon értelmezett függvényből formailag a következő képpen tudunk előállítani végtelen diszkrét idősort:

$$x_s(t) = x(t) \cdot (T \cdot \Delta_T(t)) \quad 21$$

ahol: $x_s(t)$ végtelen hosszúságú diszkrét függvény,

$\Delta_T(t)$ mintavételezési operátor: Dirac függvény T periódussal.

Fourier transzformáltja a mintavételezési operátornak:

$$F[T \cdot \Delta_T(t)] = T \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) = T \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{i2\pi k t/T} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{i2\pi k f_s t} \quad 22$$

ahol: f_s mintavételezési frekvencia és egyben alaphfrekvenciája a $\Delta_T(t)$ periódikus függvénynek. $\delta(t - nT)$ Dirac delta impulzus, nT -vel késleltetve. A Dirac delta impulzus nulla, kivéve ha az argumentuma nulla, azaz $\Delta_T(t) = 0$ és kivéve t helyeken, ahol a folytonos jel minta értékével azonos. $nT \rightarrow n$ egész szám. Tehát $x_s(t) = 0$ minden t -től különböző helyen.

Így egy adott valós számokon értelmezett függvény Fourier transzformáltját a következő összefüggés jellemzi:

$$F[x_s(t)](k) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{i2\pi k f_s t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t) e^{i2\pi k f_s t} \quad 23$$

Ennek a diszkrét idősortnak egy adott L hosszúságú függvényrészletét úgy kapjuk, hogy a 23. egyenletet beszorozzuk egy ablakfüggvénnyel:

$$\Pi(t) \equiv \begin{cases} 1 & \text{ha } 0 \leq t \leq L \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad 24$$

Függvények szorzatának Fourier transzformáltja a Fourier transzformáltak konvolúciója, ami $\delta(f \pm nf_0)$ Dirac impulzus helyeken centrált ablakfüggvény transzformáltak összegét jelenti és ha az ablakfüggvény a t -tengelyen $0-L$ között helyezkedett el, akkor valós értékű.

$$F[x(t)\Pi(t)] = F(x(t)) * F(\Pi(t)) = A \delta(f \pm nf_0) + \frac{\text{sinc}(\pi f t)}{\pi f} \quad 25$$

Vegyük most a Dirac impulzus helyeken centrált ablakfüggvény transzformáltak közül azokat, amelyek a pozitív frekvencia térben vannak. Ez egy újabb ablakfüggvénnyel való szorzást jelent (itt most nem konvolúció). Az ablakfüggvény most nem szimmetrikus az origóra, hanem el van tolva pozitív irányban az eredeti mintavételezési frekvencia negyedével.

Végezzük most újra el a Fourier transzformációt a pozitív frekvencia téren. A második transzformációra is igaz, hogy a függvények Fourier transzformáltja a transzformáltak konvolúciója.

A Dirac impulzusok analitikus transzformáltjai komplex kitevőjű exponenciális függvények:

$$F(\delta(f - f_0)) = \sum_{k=0}^{1/2\Delta t} \delta(f - f_0) e^{-i2\pi f k} = e^{-i2\pi f_0 k} \quad 26$$

Illetve, több Dirac függvény esetén ezek összege, ahol f_0, f_1, \dots, f_k az eredeti függvények frekvenciái, k pedig a második Fourier transzformáció változója.

Az eltoló ablakfüggvény analitikus transzformáltja az az origóban centrált függvény analitikus transzformáltja. Ez van megszorozva egy komplex kitevőjű exponenciális függvénnyel, aminek a kitevőjében az eltolás mértéke szerepel. Ezeknek a konvolúciós integrálja ℓ darab komplex kitevőjű exponenciális függvény összege:

$$e^{-2\pi f_0 k} + e^{-2\pi f_1 k} + \dots + e^{-2\pi f_\ell k} \quad 27$$

Ebből a függvényösszezből képzett amplitúdó spektrum írja le az abszolút Fourier amplitúdó spektrum transzformációját egy tetszőleges idősortnak.

Összesítve:

$$F(F(x[t]))(\ell) = \sum_{\ell=0}^{1/2\Delta t} e^{-i2\pi \left| \sum_{t=0}^{N-1} x[t] e^{-i2\pi n t / N} \right| k} = \sum_{\ell=0}^{1/2\Delta t} e^{-i2\pi f_\ell k} \quad 28$$

A 28-as egyenlet által definiált spektrumot, mint az abszolút amplitúdó spektrum Fourier transzformáltját az *Applied Mathematics and Computaton* című szakfolyóirat elfogadta új tudományos eredménynek.

Példa:

$$x[t] := A \cos(t) + A \cos(2t)$$

$$F(x[t])(n) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i2\pi nt/N} x[t] = A\delta(f + f_1) + A\delta(f - f_1) + A\delta(f + f_2) + A\delta(f - f_2)$$

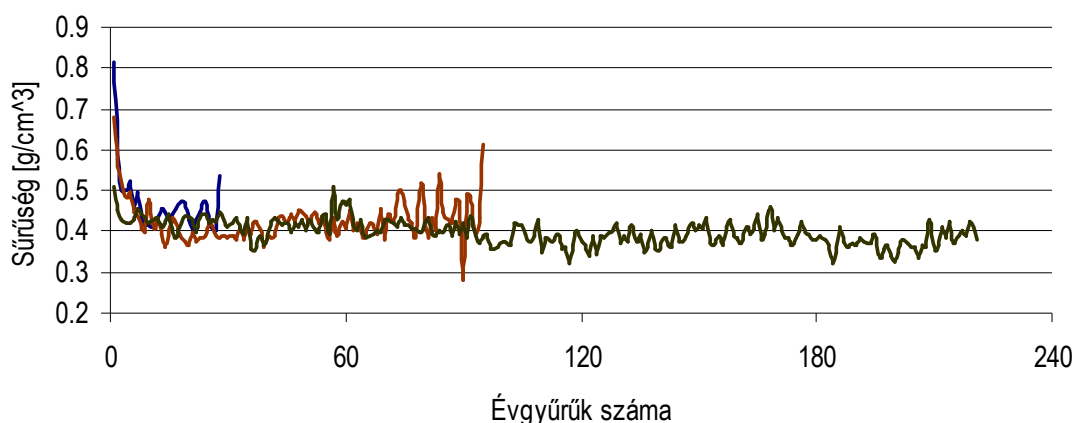
$$F(F(x[t])(n))(\ell) = F(A\delta(f + f_1) + A\delta(f + f_2)) = |e^{-i2\pi f_1 k} + e^{-i2\pi f_2 k}| = |e^{-ik} + e^{-i2k}|$$

A két komplex függvény összegéből képzett amplitúdó spektrumon ott jelentkeznek lokális minimumok, ahol az eredeti összetett függvénynek zérus helyei vannak. Tehát az első Fourier amplitúdó spektrum megadja az eredeti összetett függvény frekvencia helyeit. A reciprok művelet miatt az ismételt spektrumon a csúcsok jól láthatóak és értelmezhetőek. Azt azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a csúcsok a lokális minimum helyeket jelölik, tehát pontosan azokat a helyeket mutatják, ahol eredetileg nincsen hullám periodicitás. Ez két esetben fordulhat elő, ha adott rezgések maximum vagy minimum helyei találkoznak és kioltják egymást illetve, ha csomópontjuk egybeesik. Az ismételt amplitúdó spektrum az eredeti idő térben van értelmezve, ezért lokális minimum helyek mutatják a zérushelyeket, mivel $s \rightarrow 1/s$ (első spektrum egysége) $\rightarrow 1/(1/s) = s$ (A nyílak a Fourier transzformációt jelentik).

Mivel azonban az ismételt spektrumon a csúcsok magassága egyforma, ebből arra tudunk következtetni, hogy az alapfrekvencia egészszámú többszörösét szintén tartalmazza az első spektrum. Hiszen csak ebben az esetben oltják ki egymást a függvények duzzadási helyei. Minden olyan frekvencia, amely az alapfrekvenciától eltérő helyen jelentkezik már kialakítja az ismételt spektrum eltérő csúcs magasságú spektrumát. Ha ezek az eltérő helyen jelentkező frekvenciák magasak és kis amplitúdójúak, akkor szintén nem jelentkezik az általunk várt csúcsos spektrum, hiszen ezt a magas frekvenciát, az alapfrekvencia kiegyenlíti!

4.3. A minta hossza

A másik fontos kérdés, amit mindenképpen meg kell említenem, az adatsor hosszának a helyes megválasztása, ami kiemelkedő fontosságú ebben az eljárásban. Minden famintánál az első 4 évgyűrű és a kéreg előtti utolsó évgyűrű maximális sűrűség értékei eltérést mutatnak a fatest közepéhez viszonyítva (6. ábra). Statisztikai feldolgozás során ezeket az évgyűrűket nem vesszük figyelembe. Az ismételt Fourier transzformációs spektrumon ezeknek az évgyűrűknek megfelelően, a legmagasabb csúcs helye szintén változást mutat, viszont minden egyes mintánál létezik egy olyan minta hosszúság, amelyen elvégezve a transzformációt, a csúcs a megfelelő helyen jelentkezik.



6. ábra. A KÜLÖNBÖZŐ KORÚ MINTÁK MAXIMÁLIS- SŰRŰSÉGEINEK RADIÁLIS VÁLTOZÁSA A BÉLTŐL A KÉREGIG (kék vonal 28 éves minta; barna vonal 100 éves minta; sötétzöld vonal 221 éves minta kéreg előtti sűrűség értékét elhagyva (a Röntgen technika hiánya miatt))

A FFT és a Fourier transzformáció is bázistranszformáció és végtelen sok adat esetén a végeredményük ugyanaz a folytonos transzformált, de véges adatsor esetén a Fourier transzformáció közelítésnek felel meg, az FFT pedig interpolációnak. Ebből következik az, hogy egy tiszta harmonikus jel adatsorának FFT-je változik az adatsor hosszával. Más $n \Rightarrow$ más bázis \Rightarrow más együtthatókkal adható meg a lineáris kombináció, és/vagy az adatsorban lévő hullámszakasz fázisától (más együtthatókkal jön ki a lineáris kombináció); míg a Fourier transzformált elvileg független a hosszától, az amplitúdó spektrum még a fázistól is független. Az FFT mégis jól tükrözi a Fourier transzformáltat, ha kellően hosszú adatsort vizsgálunk. A sűrűség függvényt kialakító diszkrét értékek száma 4 ezertől 40 ezerig terjed, a fa korától függően. A méréseim azt igazolják, hogy ilyen mennyiségű adathalmazból álló függvény

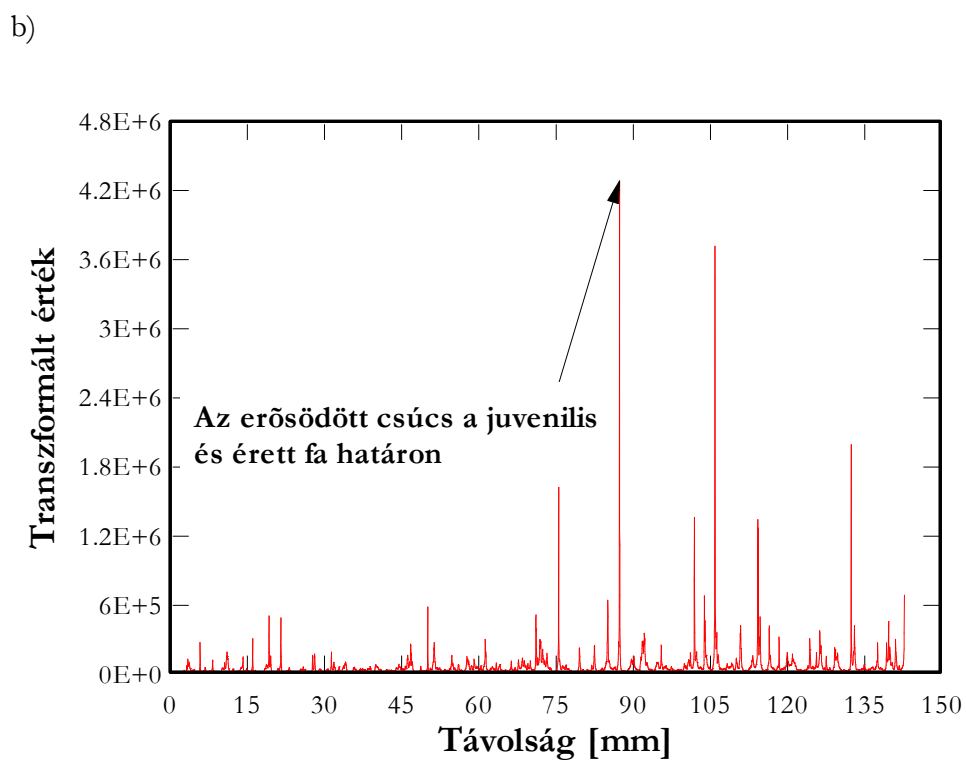
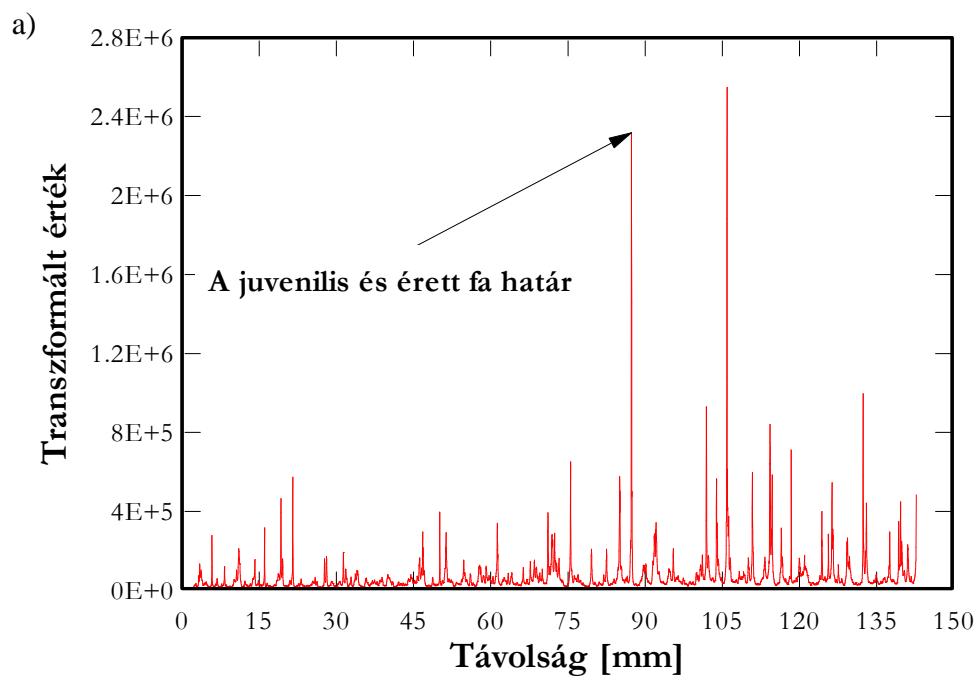
transzformáltja jól jellemezhető az FFT-val. A második spektrumon jelentkező lokális minimumok változásai nagyon kis méretűek, első közelítésben hibának, elektromos zajnak is tekinthetnénk. Az ebből képzett reciprok spektrumon azonban már jól kivehető, hogy ezek a változások jelentős mértékűek, egymáshoz képest megjelenésük nem tekinthető véletlenszerűnek.

A valóságban azonban csak ritkán dolgozhatunk olyan hullámokkal, amelyek rezgésképe egész, tiszta harmonikus jel. A sűrűség görbe sem ilyen jel. A csúcsok helyének meghatározásában csak a tiszta, harmonikus jelek modellezéséből következtethetünk. Ha a forrásadat hosszát egyetlen adatsorral rövidítettem, a második spektrum egyik jellemző csúcsának az erősödését figyelhettem meg. Ez az erősödés a Fourier transzformáció bázistranszformáció jellegéből következhet. Az *1. táblázat* adatain egy 95 éves fa forrásadat végét láthatjuk.

19429	291.405	0.873955	
19430	291.42	0.858134	
19431	291.435	0.830448	
19432	291.45	0.78694	
19433	291.465	0.743433	
19434	291.48	0.668284	
19435	291.495	0.601045	
19436			
19437			
19438			

1. táblázat. A IV3-AS MINTA UTOLSÓ SŪRŰSÉG ÉRTÉKEI A KÉREGHEZ KÖZELÍTVE

Ez a minta 19.435 független adatból áll, a középső oszlop a távolságot mutatja a bétől a kéreg felé haladva mm-ben, a harmadik pedig az ehhez a pontokhoz tartozó sűrűség értékeket (g/cm^3 -ben). Bár a levágott adatsor elhanyagolhatónak tűnik sűrűség értékét tekintve, azonban a reciprokhatás miatt igen jelentőssé vált. Az erősödés pedig pont azon a helyen következett be, ahol a juvenilis és érett fa határ várható volt. A *7. a* és *b ábrán* látható két reciprok spektrum jól szemlélteti a változásokat. Az utolsó elem elhagyása csak abban az esetben hoz jelentős erősítést, ha a juvenilis zóna határán jelenik meg.



7. a és b ábra. AZ ISMÉTELTELT FOURIER SPEKTRUMON LÁTHATÓ AMPLITÚDÓ EMELKEDÉS AZ UTOLSÓ SŰRŰSÉG ÉRTÉK ELHAGYÁSÁNAK FÜGGVÉNYÉBEN

4.3.1. A különböző korú sugi fák sűrűség függvényének ismételt Fourier spektruma

A sűrűség függvények ismételt Fourier transzformációs spektrumán jelentkező legmagasabb csúcs helyileg nagyon fontos anatómiai részeket választ szét (7. b. ábra). Méréseim alapján elmondhatom, hogy ennek a csúcsnak a helye a juvenilis és érett fa határát jelenti. Ezek az eredmények a rosthosszúságon alapuló, logaritmikus regressziós modell és a Wavelet transzformációs vizsgálatok eredményeivel is megegyeznek. A legnagyobb csúcs mellett több más csúcs is megjelenik, amelyek a fa összetett növekedéséből származhatnak. A spektrumon jelentkező többi csúcs értelmezése a kutatás következő lépése lesz. A jellemző hatásokról azonban a kutatás ezen fázisában is számot lehet adni.

Az eredményeket a 2. táblázatban foglaltam össze. A harmadik és negyedik oszlop tartalmazza azokat az értékeket, amelyek a juvenilis zóna határát jelentik a szegmentált regressziós módszer eredményeként évgyűrűben és ennek távolságában a bétől mm-ben. Az eredmények egy részét Zhu Jianjun bocsátotta rendelkezésemre, saját mérései alapján a munkám kezdetén, a másik része saját rosthosszúság méréseim. Az ötödik és hatodik oszlop az előbbihez hasonló bontásban mutatják azokat az eredményeket, amelyeket az ismételt Fourier transzformációs spektrumból kaptam. Ezeket az eredményeket az eredeti sűrűség függvények alapján származtattam. Az értékek 2 tizedes pontossággal vannak kiszámolva, amit a Fourier transzformáció matematikai precizitása biztosít, de a fák, mint élő szervezetek esetében nincs szükség és nem is lehet ilyen pontossággal meghatározni semmit. A számok nagyságrendjei azt mutatják, hogy akörül az érték körül változik meg a szöveti formálódás olyan mértékben, hogy az ismételt Fourier spektrumon jellemző érzékenységgé válik.

Minta száma	Csoka 2005 és Zhu <i>et. al.</i> eredményei /logaritmusos regressziós görbe alapján/			Ismételt FFT spektruma a sűrűség görbéknek	
	A minták életkora [év]	Évgyűrűszám a bélből [db]	Távolság a bélből [mm]	Évgyűrűszám a bélből [db]	Távolság a bélből [mm]
C1	28	21-22	96-98	21-22	97.65
C29	28	21-22	83-86	20-21	81.8
C33	30	21-22	110-113	21-22	110
C36	29	20-21	100-105	19-20	95.82
C39	29	18-19	94-99	18-19	98.68
T6	75	21-22	71-74	21-22	73.15
T8	71	24-25	61-64	24-25	63.43
T9	73	22-23	54-56	22-23	55.14
T10	73	16-17	40-43	17-18	44.03
IV1	93	10-11	36-41	10-11	40.30
IV2	94	14-15	40-43	15-16	44.80
IV3	95	14-15	59-64	15-16	66.25
VII	100	14-15	58-62	13-14	56.20
VI2	94	15-16	44-51	16-17	55.10
VI3	102	17-18	89-96	16-17	87.32
VI4	96	16-17	44-57	17-18	57.80
NRNT T1	216	15-16	54-57	13-14	49.14
NT 11C	221	22-23	97-101	22-23	100.75

2. táblázat. AZ ISMÉTELT FOURIER SPEKTRUMBÓL ÉS A LOGARITMIKUS REGRESSZIÓS GÖRBÉBŐL SZÁRMAZÓ JUVENILIS ÉS ÉRETT FA ÁTMENETEK SUGI ESETÉN

A Fourier transzformációs eljárás hasonló eredményeket mutat, mint a regressziós modell. Néhány minta esetében 1 évgyűrű eltérést látunk, de ez ebben a mérésben nem számottevő. A mintákból jól kitűnik, hogy a juvenilis hatás a 10. és a 25. évgyűrű között változik. Ezeket a változásokat mindkét módszer jól szemlélteti, tehát a Fourier spektrumon jelentkező legnagyobb csúcs nem tekinthető véletlenszerűnek. A többi csúcs megjelenésének a gyakorisága valamilyen ritmus szerint váltakozik, ami az évgyűrű szerkezettel hozható kapcsolatba. Az előző fejezetek alapján elmondható, hogy a legmagasabb csúcs legalább két függvény kölcsönhatásának a következménye. A görbék ezen a helyen összegződnek, talán

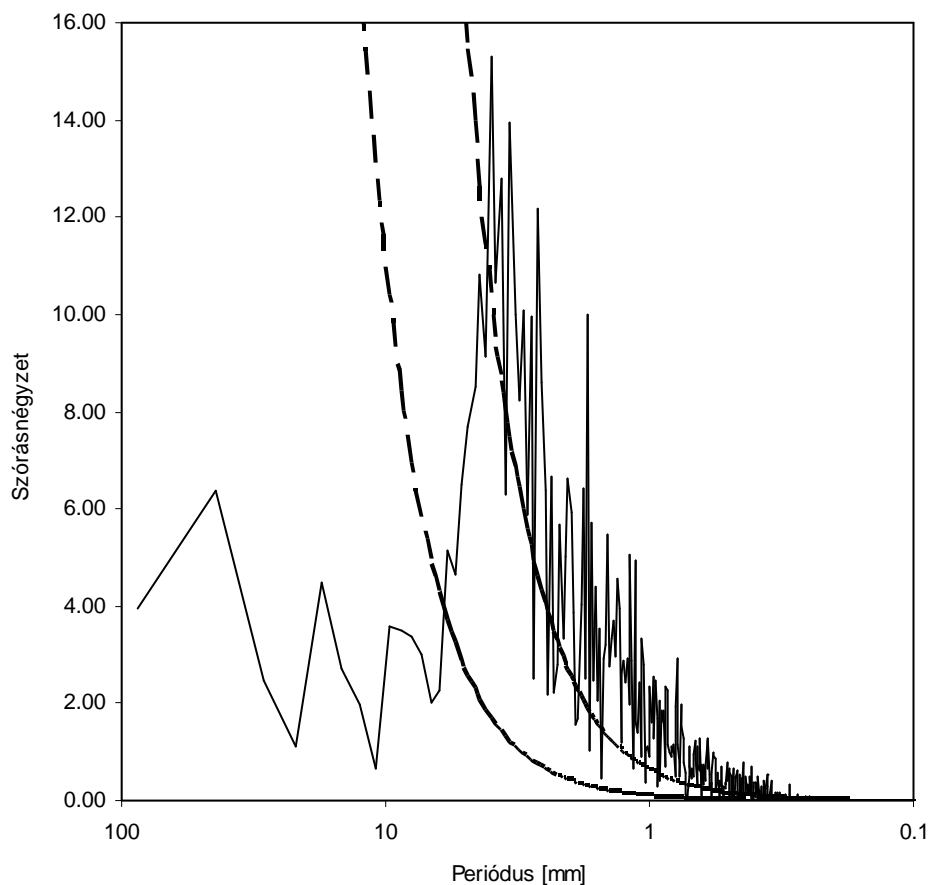
azonos fázisban, ezért ezen a helyen jelenik meg legnagyobbként. A kutatás jelen fázisában kijelenteni, hogy melyik két hatás összegződéséént jött létre a csúcs, lehetetlen feladat volna.

Az ismételt Fourier spektrum értelmezése még nyitott kérdéseket hagy maga után, de bízom benne, hogy ezzel a módszerrel új lehetőségek tárulnak fel a fa anatómiai fejlődésének a megértésében és minden olyan más tudományterületen, ahol az állandósult változásokat az időben jól szemlélteti a sűrűség görbéhez hasonló függvény.

4.4. Fourier vörös-zaj spektrum

A következő, 8. ábrán jól látható a 12-es egyenlet alapján számolt háttér spektrum változása a sűrűség görbék első Fourier spektrumán, amelynek alapján eldönthetjük, hogy mely évgyűrű szélességek vannak kapcsolatban a fa növekedésével és melyek azok, amelyek csak véletlenszerűen jelennek meg. Így, ennek alapján, a 10 mm feletti periódusok véletlenszerűnek mondhatók, mivel a háttérgörbe alatt (bal oldalán) helyezkednek el, míg a 10 mm alatti csúcsok nagy része a vörös-zaj spektrum fölött található. A sűrűség görbét leíró pontok halmaza lognormális eloszlást mutat, ezért az első Fourier spektrum valós és képzetes részei is lognormális eloszlásúak (Chatfield 1989). Lognormális eloszlás négyzete *khí négyzet* eloszlás lesz 1 szabadság fokkal, ezért az első Fourier spektrum négyzete is *khí négyzet* eloszlás lesz 2 szabadság fokkal, χ_2^2 (Jenkins és Watts 1968). Ahhoz, hogy a 95%-os megbízhatósági szintet definiálni tudjuk, a 12-es egyenlet alapján leírt háttér spektrumot meg kell szorozni χ_2^2 megfelelő értékével. Az ábra alapján látható az is, hogy ez a művelet a háttérspektrumot jobb irányba tolta el, ezzel szűkítve le a megfelelőségi tartományt. A csúcsok nagy része még a 95%-os konfidencia spektrum fölé is nyúlnak, jelezvén, hogy ezek a jelek adják a sűrűség görbe valódi jellegzetességét, jól definiálható megbízhatósági szint felett.

Mindezzel jól szemléltethető, hogy az első amplitúdó spektrumból képzett második spektrum nem véletlenszerű jelekből képzett spektrum. Éppen ezért a fák növekedését befolyásoló tényezők nem véletlenszerű változásokat okoznak, hanem a gének, sejtek válaszai az őket ért hatásokra nyomon követhető, megőrzik periodikus jellegüket. A sűrűség görbék első Fourier spektruma azonban nem ad mélyebb tartalmat a növekedésről.

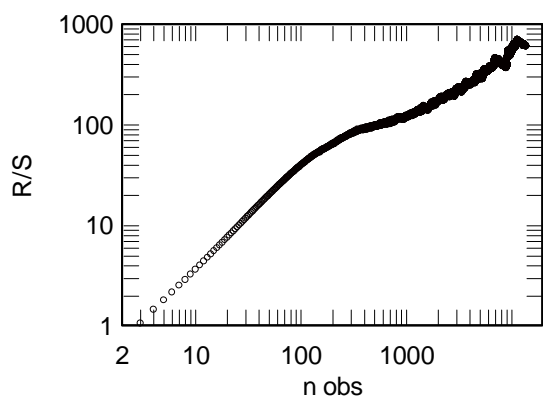


8. ábra. SZÓRÁSNÉGYZETTEL NORMÁLT FOURIER POWER SPEKTRUMA A C29-ES KLÓNNAK. A BAL OLDALI SZAGGATOTT GÖRBE A 12-ES EGYENLET ALAPJÁN SZÁMOLT VÖRÖS-ZAJ HÁTTÉR SPEKTRUM AZ AUTOKORRELÁCIÓS LAG-1 $\alpha = 0.9995$ ÉRTÉK ALAPJÁN. A JOBB OLDALI SZAGGATOTT GÖRBE PEDIG A 95%-OS KONFIDENCIA SPEKTRUM.

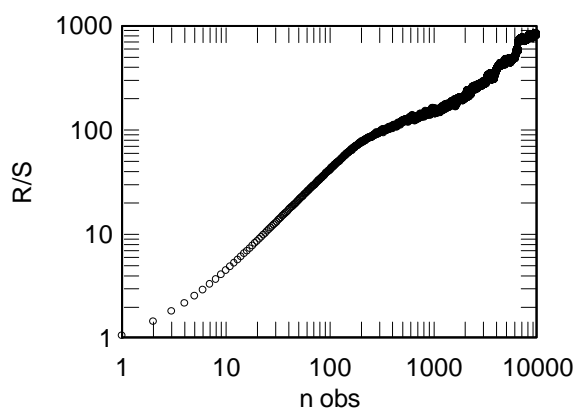
4.5. Hurst-kitevő

A sűrűség függvény alapján véve homogén jellegű oszcillációs görbe, az évgyűrűk váltakozása azonban csak kis azonosságot mutat. Az egymást követő évgyűrűk korai pásztáinak sűrűség felfutása nagyon változatos, a kései pászták hirtelen letörése sokkal egyenletesebb rajzolatú a különböző korú minták esetén. A Hurst-kitevő értékei a 28, 95 és 221 éves kiválasztott minták esetén 0.5 fölé emelkedik. Ezek rendre 0.76, 0.93 és 0.882 (9.a, b és c ábrák, kor szerint emelkedő rendben). Az ábrákon a vízszintes tengely jelenti a megfigyelések számát ($n\ obs$), a függőleges pedig az újraszkalázott értékeket ($R/S\ egység\ rescaled\ range$). A görbék alakjai azt mutatják, hogy a periodikus sűrűség változás jelleg szoros kapcsolatban van a kezdeti sűrűség változásokkal, azaz, önmagához hasonló lesz a növekedési változás a kor előre haladtával, a fákat ért hatások ellenére őrződnek meg ezek a jellegek. Az adott mintára jellemző növekedés már a fiatal korban végbement tulajdonságokat viszi tovább az éveken keresztül. A görbék alakja azt is jól mutatja, hogy az adathalmaz megkülönböztethető az úgynevezett Gauss vagy fehér-zajtól (Gauss vagy fehér zaj Hurst képe vízszintes vonalhoz hasonlító görbe alak). A 0.5 és 1 közötti Hurst-kitevő értékek fekete-zaj eljárásokként ismertek, amelyek előfordulása természeti jelenségekre és hosszútávú, ciklikus folyamatokra utalnak (Peters 1994). Az évgyűrűk sűrűség változásainak alakjai nem jellemezhetők egzakt matematikai modellekkel, mivel azonban összességében vizsgáljuk őket, egymáshoz viszonyítottságuk a Hurst rendszerben jól reprezentálható.

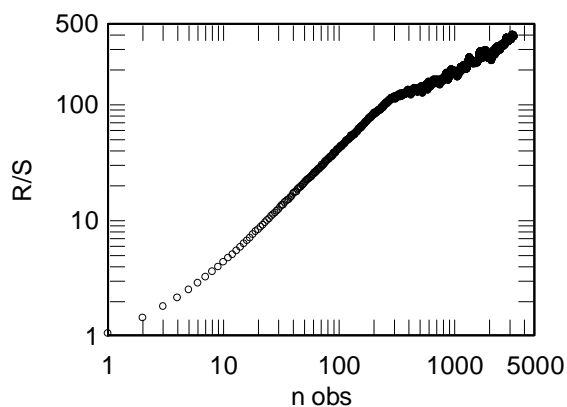
a)



b)



c)

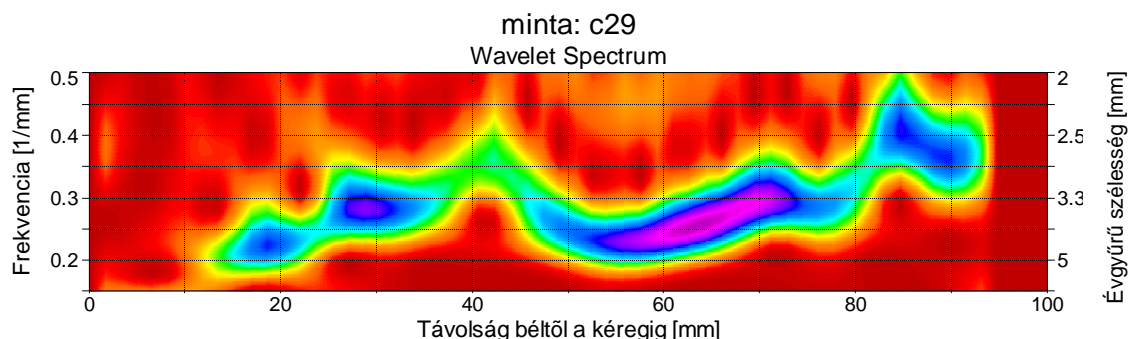


9. ábra. HURST-KITEVŐK: A) 221 ÉVES, B) 95 ÉVES, C) 28 ÉVES MINTA ESETÉN. BAL OLDALI TENGELY: *RESCALED* TARTOMÁNY (FÜGGŐ VÁLTOZÓ), VÍZSZINTES TENGELY: MEGFIGYELÉSEK SZÁMA (N OF OBS, FÜGGETLEN VÁLTOZÓ). AZ ILLESZTETT GÖRBE TÍPUSA: EGYENES; ILLESZTÉS TARTOMÁNYA: TELJES TARTOMÁNY; $R^2=$ 0.9957, 0.93 ÉS 0.94 RENDRE A FENT FELSOROLTAK ALAPJÁN.

4.6. Wavelet transzformáció

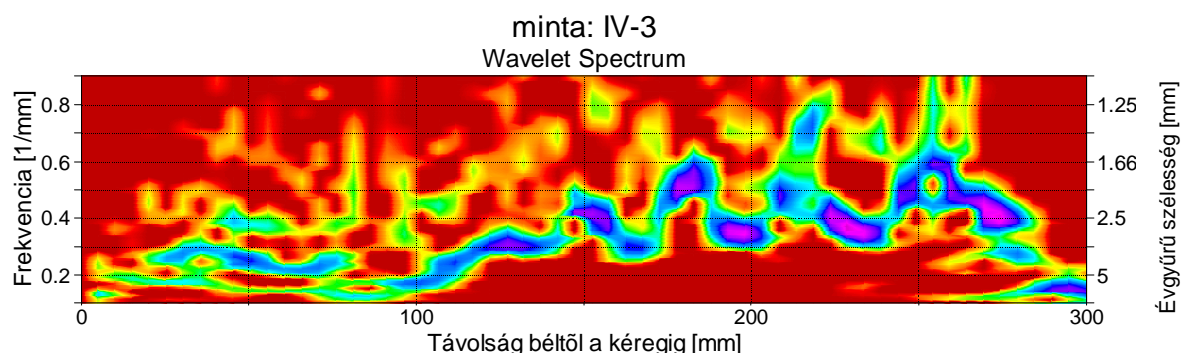
A fák növekedését befolyásoló környezeti hatások újlenyomatát végig követhetjük a sűrűség görbe változásain keresztül. A görbéket szemlélve látható, hogy néhol sűrűbb, keskenyebb évgűrűk követik egymást, egy másik helyen pedig hirtelen szélesebbek következnek. A sűrűség görbék Wavelet transzformációja, a sűrűség oszcillációt két dimenziós, frekvencia-távolság tartományon rajzolja újra és a spektrális komponenseket, jól elkülöníthető színes skálás gradiensként ábrázolja. Különböző növekedési ciklusok figyelhetők meg a következő 10. a,b és c Wavelet ábrákon, mely csoportokra bonthatóak a frekvencia és távolság tartományon. Egy-egy csoportba tartozó évgűrűk a távolság tengelyen jól elkülöníthetőek, a frekvencia felbontás kárára.

A 10.a. ábra szemlélteti a kiválasztott c29-es jelű, 28 éves faminta wavelet spektrumát. A spektrális komponensek 0.2 és 0.35 1/mm tartományon belül helyezkednek el főként, amely értékek megfelelnek 5-2.8 mm évgűrű szélességnek. A kiemelkedő amplitúdók (kék és lila színekkel határolt poligonok) nagy vonalakban két csoportra bonthatók. Az első csoport 14 évgűrűt tartalmaz (25-75 mm között), a következő 7-et (76-93 mm között). 40 és 55 mm között szakadás látható az első frekvencia folyamban valamilyen környezeti hatásnak megfelelően, ugyanis itt szélesebbek az évgűrűk, mint előtte vagy utána. Az első frekvencia csoport befejeződése után 80 mm körül egy magasabb frekvenciás folytatás figyelhető meg, amely ennek a következő résznek az egységét is jelenti egyben. Ez az átmenet a két évgűrű csoport között, megfeleltethető a juvenilis és érett farész átmenetével, a szöveti jellemzők határozottan, különböző növekedési jelleget öltenek.



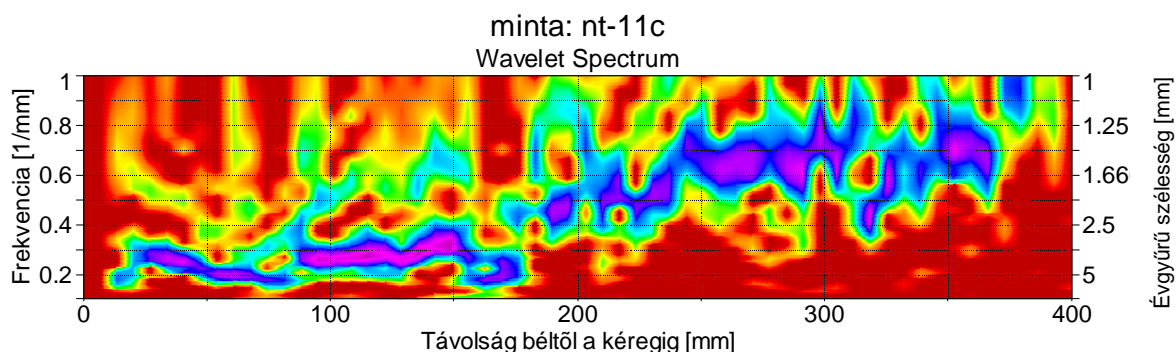
10. a. ábra. WAVELET AMPLITÚDÓ SPEKTRUMA A C29-ES MINTÁNAK, PAUL TÍPUSÚ KERNELT HASZNÁLVA. A LILA GRADIENS JELENTI A LEGNAGYOBB AMPLITÚDÓ TARTOMÁNYT, AMI A 95% OS KONFIDENCIA SZINTET JELÖLI. A SZÍNEK SORRENDJE EMELKEDŐ AMPLITÚDÓ SZINTET JELÖLVÉ: PIROS (HÁTTÉR), SÁRGA, ZÖLD, VILÁGOSKÉK, SÖTÉTKÉK, LILA.

A következő *10.b. ábra* mutatja a 95 éves minta wavelet spektrumát. Ez a spektrum szélesebb frekvencia tartományt ölel fel, 0.15-0.6 1/mm-ig és sokkal jellemzőbb karakterisztikát mutat, mint a fiatalabb minta spektruma. Az elkülönülő csoportok jellemzően 7 évgyűrűt (sötétkéssel határolt területek az ábra jobb oldalán) tartalmaznak 34 év (150 mm) felett, de rövidebb periódusok is találhatóak. Ez utóbbi periódusok a környezeti hatások hirtelen 1-2 éven belüli jelentős változásából erednek. 34 év alatt a spektrális komponensek sokkal rendezetlenebbek és látszólagos szakadás figyelhető meg a növekedési ritmusban 75-90 mm között. Az első frekvencia folyam vége, amely 3 jellemző amplitúdó területet ölel fel (25-75 mm között), megfeleltethető a juvenilis kor végének.



10. b. ábra. WAVELET AMPLITÚDÓ SPEKTRUMA A IV-3-AS MINTÁNAK, MORLET TÍPUSÚ KERNELT HASZNÁLVA. A LILA GRADIENS JELENTI A LEGNAGYOBB AMPLITÚDÓ TARTOMÁNYT, AMI A 95% OS KONFIDENCIA SZINTET JELÖLI. A SZÍNEK SORRENDJE EMELKEDŐ AMPLITÚDÓ SZINTET JELÖLVE: PIROS (HÁTTÉR), SÁRGA, ZÖLD, VILÁGOSKÉK, SÖTÉTKÉK, LILA.

A *10.c. ábra* jellemzi a 221 éves minta növekedési változásait. Az első elhatárolható frekvencia menet a távolság tartományon radiális irányban 90 mm-ig terjed és 23 évgyűrűt ölel fel. Ebben a csoportban az évgyűrűk szélessége folyamatosan szélesedik, ezt mutatja a frekvencia folyam lejtős rajzolata a bétől távolodva. Vizsgálataimban, ennek a tartománynak a vége egyezik meg a juvenilis-érettfa átmenettel. A következő frekvencia csoport 25 évgyűrűt tartalmaz és a növekedés ritmusa kiegyenlítettebb. Ez a folyam igazolja a fák radiális növekedésének azt a jellegét, hogy a bétől távolodva egyre keskenyebb évgyűrűket növesztenek a fák, egyre nagyobb átmérővel. Az amplitúdók legnagyobb része 0.9-2.3 mm és 2.5-5.8 mm évgyűrű szélességi tartományokban találhatóak a 221 éves sugi minta esetén.



10.c. ábra. WAVELET AMPLITÚDÓ SPEKTRUMA AZ NT-11C-AS MINTÁNAK, MORLET TÍPUSÚ KERNELT HASZNÁLVA. A LILA GRADIENS JELENTI A LEGNAGYOBB AMPLITÚDÓ TARTOMÁNYT, AMI A 95% OS KONFIDENCIA SZINTET JELÖLI. A SZÍNEK SORRENDJE EMELKEDŐ AMPLITÚDÓ SZINTET JELÖLVE: PIROS (HÁTTÉR), SÁRGA, ZÖLD, VILÁGOSKÉK, SÖTÉTKÉK, LILA.

Az eddig bemutatott wavelet spektrumok karakterisztikái ellentmondanak a szakirodalom eddigi állításaival, miszerint a juvenilis és érett fa átmenet fokozatosan megy végbe. Sokkal inkább eltérő növekedési jelleg jellemzi a xylemnek ezt a két részét, mint azt korábban a szakirodalomban bemutatták. Erre egyelőre biológiai magyarázatot nehéz adni, de a különböző génfunkciók lehet, hogy választ adnak a későbbi kutatások során. A különbségek nyilvánvalóak, jellemezhetőek. A fák évenkénti növekménye periodikus jelleggel bír, minden egyedre külön jellemző gén-kódolással, de azonos funkcióval. A növekedéskor fellépő környezeti hatások szintén megnyilvánulnak benne jól értelmezhető módon, de a juvenilis zóna határára nincsenek hatással.

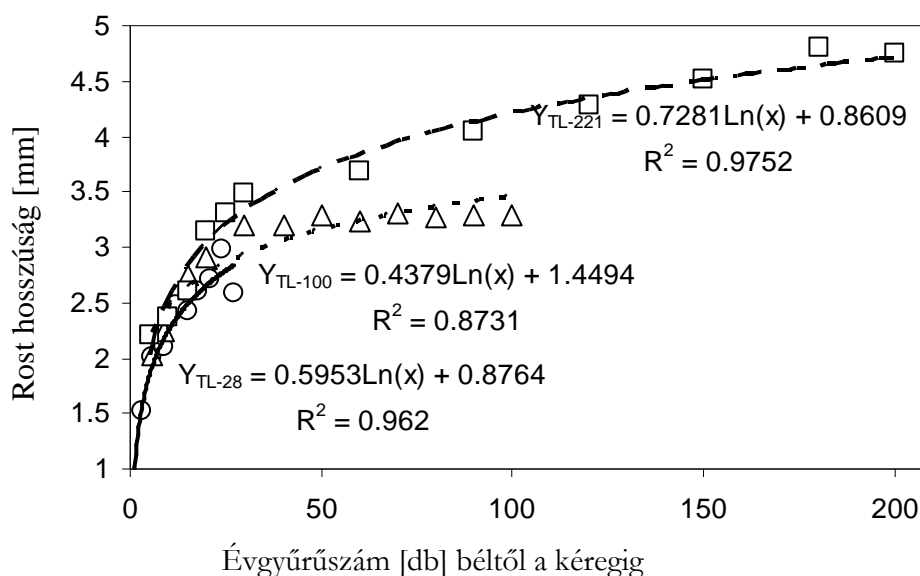
4.7. A rosthosszúság, mint független változó

A korábban ismertett eredmények azt mutatják, hogy az ismételt Fourier spektrumon jelentkező legmagasabb csúcs a visszakapott 'mm' skálán, a juvenilis és érett fa határát jelenti.

A rosthosszúság eloszlás bemutatásához az eddigiekben kiválasztott 3 mintát használtam. Az eloszlásokra illesztett logaritmikus görbék hasonló tendenciát mutatnak mind a 3 minta esetén. A 11. ábrán látható a 28 éves klón, a 95 és a 221 éves minta rosthosszúság eloszlása az évgyűrű változás függvényében. Az adatok mellmagassági átmérőből vett mintákat reprezentálják. A rosthosszúsági görbéknek minimuma van a bél körül elhelyezkedő

gyűrűknél és folyamatosan növekedő tendenciát mutatnak az évgűrűk számának növekedésével a kéreg felé haladva.

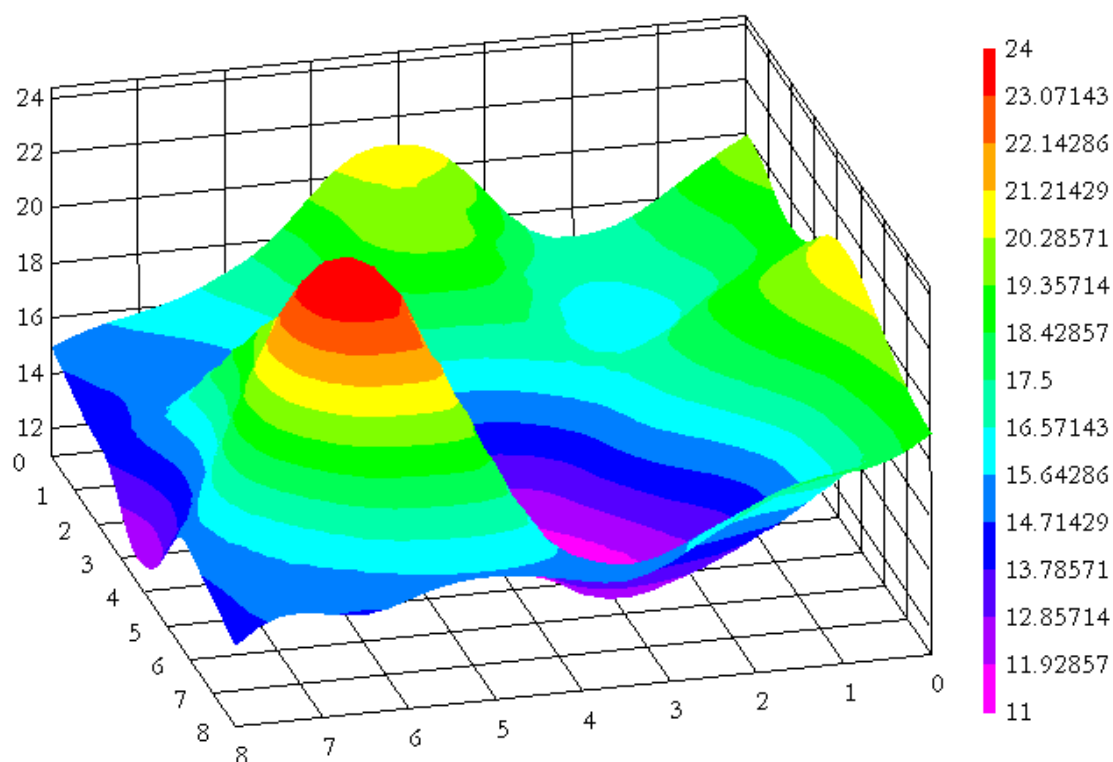
A logaritmusos görbék illesztéséből származó adatok szerint az átmenet a 28 éves klón c29-es minta esetén 21-22 év között, a 95 éves IV3-as, természetes erdőből származó minta esetén 14-15 év között és a 221 éves nt-11c jelű, szintén természetes erdőből származó minta esetén 22-23 év között adódott. Ezek az eredmények mind az ismételt Fourier transzformációval, mind pedig a Wavelet transzformációval egyező ponton jelölik meg az átmenetet a xylem két fontos anatómiai része között.



11. ábra. RADIÁLIS VÁLTOZÁSA A ROSTHOSSZÚSÁGNAK A BÉLTŐL A KÉREGIG (TL-28 ÉVES KLÓN, TL-100 ÉVES ÉS TL-221 ÉVES EGYEDEKET JELÖLNEK)

A kutatás második lépcsőjében elvégzett közel 600 mintából álló elemzés eredményeit a *Mellékletek* rész külön táblázataiban foglaltam össze. Az elemzést a 28-as egyenlet felhasználásával írt számítógépes algoritmus segítségével végeztem el, mely gyorsan és precízen segítette munkámat. A táblázatok alapján kitűnik, hogy az azonos területen található klónok átmeneti pontjai sok esetben azonos évgűrű számot jelölnek meg, bár a vizsgálatot minden egyes minta esetén külön végeztem el, mindenféle statisztikai módszer nélkül. A következő 12. ábrán Komenono terület egy kiválasztott kísérleti parcelláját mutatom be, erdészeti szempontok figyelembevételével. Az ábra alapja egy 5 x 5 fából álló négyzetháló, melyben a fák egymástól 2 m-re helyezkednek el, minden irányban. A függőleges skálán a juvenilis kort vettem fel és feleltettem meg egy színskálát a 3 dimenziós kép jobb megértése

érdekében. Amint az várható, a széleken elhelyezkedő klónok magasabb juvenilis évgyűrűszámot mutatnak, mivel a szélhatás miatt több napfény és csapadék érte ezeket az egyedeket. Az állományszerkezet szélén a kedvező hatások miatt a juvenilis kor éppen ezért kitolódott, míg az állományon belül sokkal alacsonyabb értéket mutat. A növekedési adatok ilyen irányú elemzését összekapcsolhatjuk az adott helyre jellemző klíma és egyéb meteorológiai modellekkel, melyben összetett formában szemlélhetjük a környezeti hatások és a fák növekedésének jellegzetességeit.



A két, szögben elhelyezkedő tengely (0-8-ig skálázva) által kifeszített sík a fák elhelyezkedéseinek négyzethálója (az egységek méterben értendők)

12. ábra. KOMENONO TERÜLET EGY KIVÁLASZTOTT KÍSÉRLETI ERDŐRÉSZLETE. 25 KLÓN 2X2 M-ES HÁLÓBAN FELVETT JUVENILIS KORAI. (A JOBB OLDALI SZÍNSKÁLA ÉVEKBEN ÉRTENDŐ)

5. AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A doktori értekezésemben összefoglalt kutatómunkám során a juvenilis és érett fa matematikai vizsgálataival a következő új tudományos eredményeket értem el:

- 1) Elsőként fogalmaztam meg zárt formában az abszolút amplitúdó spektrum Fourier transzformációját, a következő alakban: $\sum_j \cos(2\pi k_{0j} x) \Rightarrow \left| \sum_j e^{-i2\pi k_{0j} \ell} \right|$
- 2) Komplex, folytonos függvények esetén, az ismételt Fourier spektrumon jelentkező lokális minimum helyek olyan periódusokat jeleznek, ahol az eredeti adatsorban nincs periodicitás.
- 3) Miután igazolódott a sűrűség függvények vizsgálata során, hogy az ismételt Fourier transzformációs spektrumnak kapcsolata van az eredeti függvénnyel, megállapítottam, hogy ez az eljárás egy lehetséges eszköz lehet a fa anatómiai kutatások területén.
- 4) Megállapítottam, hogy a Wavelet transzformációs elemzés meghatározó jellegű lépcsője a faipari kutatásoknak. Ezt bizonyítja, hogy a különböző korú fák esetén is lehetséges az érettségi szakasz elhatárolása a sűrűség görbék alapján.
- 5) Igazoltam az autokorrelációs vizsgálatok és a Hurst kitevő alapján, hogy a Röntgen filmes technika hiteles képet ad a fák növekedését leíró törvényszerűségekről.
- 6) Megállapítottam, hogy adott kísérleti területen, a különböző helyeken nevelt azonos klónok tulajdonságaikat megőrzik a környezeti hatások eltérő váltakozása ellenére is. Ez magyarázható a klónok azonos reakciójával az őket ért hatásokra.
- 7) Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a juvenilis és érett kor jól elkülöníthető, ellentétben az eddigi ismereteinkkel, miszerint a juvenilis kor fokozatosan fordul át érett korba.

6. KONKLÚZIÓ

A Fourier transzformáció említésére bonyolult matematikai képletek, összefüggések kavarnak bennünk. A transzformáció eredményeként létrejövő spektrumok azonban már sokkal jobban értelmezhető dolgokat állítanak elénk. A mindennapi életben rádióhullámok, atomok gerjesztett állapotának, illetve geofizikai jelenségek jellemzésénél használjuk ezt a matematikai transzformációt. A dolgozatomban szereplő sűrűség függvények biológiai törvényszerűségek 'megkövült' eredményei. A különböző biológiai folyamatok szintén visszavezethetők atomi állapotokra. A sűrűségfüggvényekből származtatott spektrumok a természet titkaiba engednek bepillantást nyújtani. A dolgozatban leírt matematikai módszer a fák évenkénti radiális növekedését egy-egységben kezeli, annak minden változására érzékenyen reagál és lehetőséget teremt az elemzések idejének mennyiségi csökkentésére.

A fák belső fejlődése, évenkénti növekedése szigorú genetikai törvények szerint megy végbe, amit matematikai módszerekkel jellemezni lehet. Az ismételt Fourier spektrumon szereplő azonosított csúcsok meghatározott rendszerben jelentkeznek. Arányuk értelmezhető.

Sopron, 2007. május

Csóka Levente

A DOLGOZAT TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK:

Tudományos folyóiratokban megjelent cikkek:

1) L. Csoka, J. Zhu, K. Takata

Application of the second order Fourier transform on the density function of sugi trees

Faipar (2004/3). 52:12-18

2) L. Csoka, J. Zhu, K. Takata

Application of the Fourier analysis to determine the demarcation between juvenile and mature wood

J Wood Sci (2005) 51:309-311

3) L. Csoka, F. Divos, K. Takata

Utilization of Fourier transform of the absolute amplitude spectrum in wood anatomy

Applied Mathematics and Computation

(under publishing: doi: 10.1016/j.amc.2007.03.073)

Tudományos előadások, konferencia előadások:

1) L. Csoka, J. Zhu, K. Takata

Application of the second order Fourier transform on the density function of sugi trees

IWT, Akita Prefectural University, Noshiro, Japan. 11. May. 2004.

2) S. Feher, K. Takata, L. Csoka

Variation of wood density and MOE in plus tree clones planted in different sites

55th Annual Meeting of the Japan Wood Res. Society, Kyoto, Japan. March 16-18, 2005

3) Csóka L.

Fourier transzformáció alkalmazása a fa sűrűség eloszlási görbéin

NyME-FMK, MTA-VEAB, STT 2006. Március 14. Sopron

4) L. Csoka, f. Divos, K. Takata, M. Grabner

Evaluate the demarcation between the juvenile and mature wood with different methodologies

JSPS Japan and Hungary Research Cooperative Program/Joint Seminar. Oct. 16-19, 2006. IWT, Akita Prefectural University, Noshiro, Japan. IUFRO Unit 5.02.01 and 5.01.06

5) D. Varga, K. Takata, S. Feher, P. Kitin, L. Csoka

Wood density and growth ring structure in *Cryptomeria japonica*

JSPS Japan and Hungary Research Cooperative Program/Joint Seminar. Oct. 16-19, 2006. IWT, Akita Prefectural University, Noshiro, Japan. IUFRO Unit 5.02.01 and 5.01.06

7. IDÉZETT IRODALOM:

- ADAY, J.U. Juvenile wood – its significance in wood research. FORPRDECOM Tech. Note 199, 2pp. 1979.
- BAREFOOT, A. C., HITCHINGS, R. G., ELLWOOD, E. L. Wood characteristics of kraft paper properties of four selected loblolly pines III. Effect of fiber morphology on pulp. Tappi 49:137-147. 1965.
- DE BARY, A. Comparative anatomy of the vegetative organs of the phanerogams and ferns. Oxford Univ Press (Clarendon), London, New York 1884.
- BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. Forest Products Journal. 1978. 28:(10): 61-72.
- BENDTSEN, B. A. Quality impacts of the changing timber resource on solid wood products. Managing and marketing the changing timber resource. Proceedings 47349. Madison, WI: Forest Products Research Society. 1986 March 18-20. Fort Worth, TX.
- BENDTSEN, B.A.; SEFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. Wood and Fiber Science. 18(1): 23-38. 1986.
- BENDTSEN, B. A.; PLANTINGA, P. L., SNELLGROVE, T. A. The influence of juvenile wood on the mechanical properties of 2 x 4's cut from Douglasfir plantations. In: Proceedings of 1988 International conference on timber engineering; 1988 September 19-22. Seattle, WA, Vol. 1.
- BERGANDER, A., SALMÉN, L. Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibres. J. Material Sci 37:151-156. 2002.

- BRÄNDSTRÖM, J., BARDAGE, S.L., DANIEL, G., NILSON, T. The structural organisation of the S1 cell wall layer of norway spruce tracheids. *IAWA Journal*, 24(1):27-40. 2003.
- BÜSGEN, M., MÜNCH, E., THOMSOM, T. The structure and life of forest trees. Chapman and Hall, London 1929.
- CHALK, L. Specific gravity variation on the core of Douglas-Fir. *Forestry* 26(1):33-36. 1953.
- CHALK, L. The development of pulp and particle board industries and their effect on forest management (b) The “juvenile” period. *Discussions Lyndhurst Sandwell Rep*, 29-30. 1959.
- CHATFIELD, C. The analysis of time series: An introduction. 4th Ed. Chapman and Hall, 241 pp. 1989.
- CLARK, A., SAUCIER, J. R. Influence of initial planting density, geographic location and species on juvenile wood formation in southern pine. *For Prod J* 39(7/8):42-48. 1991.
- DENNE, M. P. Definition of latewood according to Mork (1928). *International Association of Wood Anatomists Bulletin* 1989. 10(1):59–62
- DI LUCCA, C. M. Juvenile-mature wood transition. In: Kellogg R.M. ed pp. 23-38. *Second growth Douglas-fir: Its management and conversion for value*. Publ SP-32 Forintek Canada Corp, Vancouver, British Columbia. 1989.
- DODD, R. S., FOX, P. Kinetics of tracheid differentiation in Douglas-fir. *Ann Bot* 65:649-657. 1991.
- DROW, J. T. Relationship of locality and rate of growth to density and strength of Douglas-fir. *For Prod Lab US For Ser* 2078, 56 pp. 1957.
- FEHÉR, D. – MÁGÓCSY, S. Erdészeti növénytan I. Sopron, 1929.

- GARTNER, B. L. Does photosynthetic bark have a role in the production of cores vs. Outer wood? *Wood Fiber Sci* 28:51-61. 1996.
- GENCSI, L. A szöveti felépítés változása az erdei fenyő fatörzsének különböző részeiben. *Az Erdészeti és Faipari Egyetem Tudományos közleményei*, 1967. év 1-2 szám.
- GILMAN, D.L., F.J.,
FUGLISTER, AND J.M.
MITCHELL JR. On the power spectrum of "red noise". *J. Atmos. Sci.*, 20, 182-184. 1963
- GREGUSS P. Xylotomische Bestimmung der heute lebenden Gymnospermen. Budapest, 1955
- HARTIG, R. Vollständige Naturgeschichte der Forstlichen Culturpflanzen Deutschlands. Berlin 1852
- HARTIG, R. Die Verschiedenheit in d. Qualität und anat. Bau d. Fichtenholzes. *Forstl. naturwissenschaftl. Zeitschr.* 1892/1.
- HARTIG, R. Wachstum Untersuchungen an Fichten. *Forstl. naturw. Z. S.* 42. 1896/2
- HILDEBRANDT, G. Study of the increment and pure wood content of spruce stands. *Deutscher Verlag der Wissenschaften*. Berlin, 133 p. 1954.
- HODGE, G.R., PURNELL, R.C. Genetic parameter estimates for wood density, transition age and radial growth in slash pine. *Can. J. For. Res.* 23:1881-1891. 1993.
- HOLLENDONNER F. N. A fenyőfélék fájának összehasonlító szövettana. Budapest, 1913.
- HURST, H. E. Long - term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng .*, 116, 770. 1951
- HURST, H.E., BLACK, R.P.
AND SIMAIKA, Y.M. Long-Term Storage: An Experimental Study. Constable, London. 1965

- JENKINS, G. M., WATTS, D. G. Spectral analysis and its applications. Holden-Day, 525 pp. 1968.
- KIRK, D.G., BREEMAN, L.G., ZOBEL., B.J. A pulping evaluation of juvenile loblolly pine. Tappi J. 55(11):1600-1604. 1972.
- KOCH, P. Utilization of hardwoods growing on southern pine sites. Agr Hand No 605 I The raw material, II Processing, III Products and Prospective. US For Serv, Washington DC, 3710 pp. 1985.
- KOCH, P. Straight studs from southern pine veneer cores. Res. Pap. SO 25. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Exp. Sta., New Orleans, L.A. 1966.
- KRETSCHMANN, D.E., BENDTSEN, B. A. Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation loblolly pine lumber. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 53705-2398. General Technical Report 1991.
- KRETSCHMANN, D.E., MOODY, R. C., PELLERIN R.F., BENDTSEN, B. A., CAHILL, J.M., MCALLISTER, R.H., SHARP, D.W. Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber. US For Ser Res Pap FPL-RP-521:30 pp. 1993.
- KUCERA, B. A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce. Wood Fiber Sci 26:152-167. 1994.
- LANTICAN, C.B., HUGHES, J.F. Variation of tracheid widths and wall thicknesses of *P. caribaea* from British Honduras. Trop Prov Prog Res Inter Coop Nairobi, Kenya, 528-531. 1973.
- LARSON, P. R. Stem form development of forest trees. For Sci Mono 5, 42 pp. 1963.
- LARSON, P. R. Silvicultural control of the characteristics of Wood used for furnish. 4th For Biol Conf of TAPPI Pointe Claire, Quebec, 143-151. 1967.

- LARSON, P. R. Wood formation and the concept of wood quality. School of For Yale Univ New Haven, Connecticut, Bull 74, 54 pp. 1969.
- LINDSTROM, H. Basic density in Norway spruce Part III. Development from the pith outwards. Wood Fiber Sci 28: 391-405. 1996.
- LOO, J.A., TAUER, C.G.,
MCNEW, R.W. Genetic variation in the time of transition from juvenile to mature wood in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Silvae Genet.* 34(1):14-19. 1985.
- MATYAS, C. PESZLEN, I. Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. *Silvae Genetica* 46, 64-72. 1997.
- MEGRAW, R. A. Wood quality factors in loblolly pine. Tappi Press Atlanta, Georgia, 89 pp. 1985.
- MORA, C.R., DANIELS, R.F.,
ALLEN, H.L., CLARK, A. Effects of early intensive silviculture on the juvenile-mature wood transition age and proportion of juvenile wood in loblolly pine trees. *Forest Sci.* 2005.
- MYERS, G.C. Thermomechanical pulping of loblolly pine juvenile wood. *Wood and F. Sci.* 34(1):108-115. 2002.
- MYERS, G.C., KUMAR, S.,
GUSTAFSON, R.R., BARBOUR,
R.J., ABUBAKR, S. Pulp quality from small-diameter trees. Role of Wood Production in Ecosystem Management Proceedings of the Sustainable Forestry Working Group at the IUFRO All Division 5 Conference, Pullman, Washington, July 1997.
- MYERS, G. C., RODGER, A.
A., HORN, R., WEGNER, T. H. Chemical and mechanical pulping of aspen chunkwood, mature wood and juvenile wood. *Tappi* 79(12):161-167. 1996.
- NAKADA, R., FUJUSAWA, Y.,
NISHIMURA, K., HIRAKAWA, Y. Variation in S₂ microfibril angle of latewood among plus-tree clones and test stands in *Cryptomeria japonica* D. Don. In: Butterfield BG, ed. *Microfibril angle in wood*. Christchurch: University of Canterbury. 1998.

- NÖDLINGER, H. Die techn. Eigenschaft der Hölzer. 1960.
- PEARSON, R.G., GILMORE, R.C. Characterization of the strength of juvenile wood of loblolly pine. *Forest Prod. J.* 21(1):23-31. 1971.
- PETERS, E.E. *Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics*. Brisbane: John Wiley and Sons Inc. 1994.
- RENDLE, B. J. Juvenile and adult wood. *J. Inst Wood Sci* 1(5): 58-61. 1959
- SANIO, C. Über d. Grösse d. Holzzellen b. d. gem. Kiefer (*Pinus silvestris*) Pringsh Jahrb. 8.1872.
- SANWO, S. K. The characteristics of the crown-formed and stem-formed wood in plantation grown teak (*Tectona grandis*) in Nigeria. *J Inst Wood Sci* 11:85-88. 1988.
- SAVIDGE R. A, BARNETT J. R, NAPIER, R. /EDITED/ *Cell and Molecular Biology of Wood Formation*. BIOS, Biddles Ltd, Guilford, UK pp.2-7. 2000
- SAUTER, U.H.R., MUTZ., MUNRO, B.D. Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density. *Wood Fiber Sci.* 31(4):416-425. 1999.
- SCHWARZ, F. Dickenwachstum von *Pinus silvestris*. 1899.
- SENF, J.F., BENDTSEN, B. A., GALLIGAN, W. L. Weak wood: Fast-grown trees make problem lumber. *J. Forestry* 83(8): 477-484. 1985.
- SHIOKURA, T. Extent and differentiation of the juvenile wood zone in coniferous tree trunks (in Japanese). *Mokuzai Gakkaishi* 28:85-90. 1982
- SZYMANSKI, M.B., TAUER, C.G. Loblolly pine provenance variation in age of transition from juvenile to mature wood specific gravity. *Forest Sci.* 37(1):160-174. 1991.
- STRASSBURGER, E. *Das bot. Practicum I-V*. Jena, 1884-1913.
- TASSISSA, G., BURKHART, H.E. Juvenile-mature wood demarcation in loblolly pine trees. *Wood Fiber Sci.* 30(2):119-127. 1998.
- TUTTY, R.W. Symposium on juvenile wood. *FRI Rotorua NZ (Appita)* 34(5):358-359. 1980.

- WARENING, P. F. The physiology of cambial activity. *J Inst Wood Sci* 1:34-42. 1958.
- WEBB, C. D. Juvenile-mature tree relationships. *Proc South Conf For Tree Improv.* Gulfport, Mississippi, 55-58. 1963.
- WILLIAMS, R. S. FEIST, W. C. Selection and Application of Exterior Stains for Wood. Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin. General Technical Report 1999.
- WILLITS, S. A., LOWELL, E. Lumber and veneer yield from small-diameter trees. Role of Wood Production in Ecosystem Management Proceedings of the Sustainable Forestry Working Group at the IUFRO All Division 5 Conference, Pullman, Washington, July 1997
- C., CHRISTENSEN, G. A.
- ZAHNER, R. Internal moisture content stress and wood formation in conifers. *For Prod J* 6: 240-247. 1963.
- ZOBEL, B. J. The changing quality of the world wood supply. *Wood Sci Technol* 18: 1-17. 1984.
- ZOBEL, B. J., VAN BUIJTENEN, J. R. Wood variation, its cause and control. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1989.
- ZOBEL, B. J., KELLISON, R. C. Wood – Where it come from, where will it go? (A comparison the southern United States with South America). *Utiliz Changing Wood Res.* South US Raleigh, North Carolina, 12 pp. 1984.
- ZOBEL, B.J., MCELWEE, R.L. Natural variation in wood specific gravity of loblolly pine and an analysis of contributing factors. *Tappi* 414(4):158-161. 1958.
- ZOBEL, B. J., SPRAGUE, J. P. Juvenil wood in forest trees. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1998.
- ZOBEL, B. J., WEBB, C., HENSON, F. Core of juvenile wood of loblolly and slash pine. *Tappi* 42(5):345-355. 1959.

ZHU, J., TADOOKA, N.,
TAKATA, K., KOIZUMI, A.

Growth and wood quality of sugi (*Cryptomeria japonica*) planted in akita Prefecture (II). Juvenil/mature wood determination of aged trees. *Journal of Wood Science* 51:95-101. 2005.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka létrejöttében nyújtott segítségéért szeretnék köszönetet mondani mindenk előtt konzulensemnek, Divós Ferencnek a szüntelenül kritizáló, jobbitó észrevételeiért és kérdéseiért, melyek megválaszolása mindig segített előbbre jutnom.

Köszönöm bátyámnak, Csóka Barnabásnak a programozási segítségét, megértését a sokszor kusza algoritmusok kibogozása és végleges formába öntése terén.

Köszönöm a matematikai kérdések megvitatásában nyújtott segítségét Polgár Rudolfnak. Köszönöm továbbá Bór Józsefnek, aki időt és türelmet nem sajnálva vitatta meg velem a Fourier transzformáció rejtjelmeit, akinek ösztönzése nélkül nem tudtam volna zárt alakban megadni az ismételt Fourier transzformációt.

Köszönöm az Intézetigazgatónak, munkatársaimnak türelmét, akik a munka izgalmi között nem zaklattak napi feladatok elvégzésével, hanem azokat átvállalva segítették munkám.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm családom csendes biztatását és kiállítását mellettem a munka elvégzésének teljes ideje alatt. -

MELLÉKLETEK:

Komenono

Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet	Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet	
X 1	1	1-2	c-43	19-20	X 2	1	1-4 c-53	17-18
X 1	1	1-7	c-44	20-21	X 2	1	1-12 c-54	14-15
X 1	2	2-6	c-41	22-23	X 2	2	2-8 c-51	20-21
X 1	2	2-8	c-42	19-20	X 2	2	2-11 c-52	23-24
X 1	3	3-5	c-35	19-20	X 2	3	3-7 c-55	18-19
X 1	3	3-11	c-36	19-20	X 2	3	3-9 c-56	19-20
X 1	4	4-5	c-49	17-18	X 2	4	4-5 c-59	20-21
X 1	4	4-3	c-50	17-18	X 2	4	4-11 c-60	20-21
X 1	5	5-7	c-33	18-19	X 2	5	5-8 c-57	15-16
X 1	5	5-12	c-34	17-18	X 2	5	5-10 c-58	18-19
X 1	6	6-6	c-3	21-22	X 2	6	6-5 c-73	16-17
X 1	6	6-1	c-4	19-20	X 2	6	6-7 c-74	15-16
X 1	7	7-8	c-1	20-21	X 2	7	7-4 c-77	17-18
X 1	7	7-6	c-2	21-22	X 2	7	7-9 c-78	15-16
X 1	8	8-7	c-7	14-15	X 2	8	8-5 c-75	12-13
X 1	8	8-2	c-8	14-15	X 2	8	8-12 c-76	12-13
X 1	9	9-8	c-9	15-16	X 2	9	9-3 c-79	15-16
X 1	9	9-11	c-10	12-13	X 2	9	9-11 c-80	17-18
X 1	10	10-7	c-5	20-21	X 2	10	10-5 c-71	14-15
X 1	10	10-5	c-6	15-16	X 2	10	10-11 c-72	17-18
X 1	11	11-7	c-23	17-18	X 2	11	11-2 c-93	19-20
X 1	11	11-5	c-24	17-18	X 2	11	11-7 c-94	18-19
X 1	12	12-6	c-29	21-22	X 2	12	12-4 c-95	20-21
X 1	12	12-4	c-30	23-24	X 2	12	12-5 c-96	20-21
X 1	13	13-7	c-21	16-17	X 2	13	13-1 c-97	12-13
X 1	13	13-5	c-22	17-18	X 2	13	13-7 c-98	13-14
X 1	14	14-2	c-27	15-16	X 2	14	14-1 c-91	17-18
X 1	14	14-9	c-28	17-18	X 2	14	14-8 c-92	19-20
X 1	15	15-7	c-25	13-14	X 2	15	15-12 c-100	18-19
X 1	15	15-5	c-26	15-16	X 2	15	15-3 c-99	17-18
X 1	16	16-6	c-15	12-13	X 2	16	16-1 c-63	17-18
X 1	16	16-12	c-16	21-22	X 2	16	16-12 c-64	15-16
X 1	17	17-4	c-17	24-25	X 2	17	17-2 c-67	22-23
X 1	17	17-7	c-18	17-18	X 2	17	17-12 c-68	18-19

X 1	18	18-10	c-11	13-14	X 2	18	18-6	c-69	14-15
X 1	18	18-7	c-12	21-22	X 2	18	18-8	c-70	15-16
X 1	19	19-2	c-13	15-16	X 2	19	19-6	c-61	15-16
X 1	19	19-7	c-14	19-20	X 2	19	19-12	c-62	19-20
X 1	20	20-7	c-19	16-17	X 2	20	20-3	c-65	16-17
X 1	20	20-12	c-20	15-16	X 2	20	20-8	c-66	17-18
X 1	21	21-7	c-37	18-19	X 2	21	21-2	c-81	13-14
X 1	21	21-2	c-38	15-16	X 2	21	21-10	c-82	18-19
X 1	22	22-3	c-39	18-19	X 2	22	22-4	c-87	14-15
X 1	22	22-8	c-40	20-21	X 2	22	22-7	c-88	19-20
X 1	23	23-12	c-47	20-21	X 2	23	23-2	c-85	22-23
X 1	23	23-2	c-48	20-21	X 2	23	23-8	c-86	16-17
X 1	24	24-8	c-31	25-26	X 2	24	24-2	c-83	21-22
X 1	24	24-2	c-32	22-23	X 2	24	24-5	c-84	17-18
X 1	25	25-1	c-45	20-21	X 2	25	25-3	c-89	18-19
X 1	25	25-12	c-46	14-15	X 2	25	25-10	c-90	18-19

Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet	Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet
Y 1	1	1-6 c-119	18-19	Y 2	1	1-2 b-35	14-15
Y 1	1	1-9 c-120	14-15	Y 2	1	1-4 b-36	14-15
Y 1	2	2-6 c-101	22-23	Y 2	2	2-7 b-45	18-19
Y 1	2	2-11 c-102	21-22	Y 2	2	2-4 b-46	19-20
Y 1	3	3-8 c-121	19-20	Y 2	3	3-12 b-29	15-16
Y 1	3	3-10 c-122		Y 2	3	3-9 b-30	17-18
Y 1	4	4-3 c-147	21-22	Y 2	4	4-1 b-17	14-15
Y 1	4	4-5 c-148	11-12	Y 2	4	4-9 b-18	13-14
Y 1	5	5-2 c-135	19-20	Y 2	5	5-10 b-3	19-20
Y 1	5	5-12 c-136	20-21	Y 2	5	5-1 b-4	19-20
Y 1	6	6-3 c-111		Y 2	6	6-5 b-33	16-17
Y 1	6	6-5 c-112	15-16	Y 2	6	6-8 b-34	16-17
Y 1	7	7-4 c-109		Y 2	7	7-8 b-41	16-17
Y 1	7	7-5 c-110	21-22	Y 2	7	7-6 b-42	14-15
Y 1	8	8-2 c-125	13-14	Y 2	8	8-7 b-25	14-15
Y 1	8	8-7 c-126	15-16	Y 2	8	8-2 b-26	12-13
Y 1	9	9-2 c-141	15-16	Y 2	9	9-5 b-13	12-13
Y 1	9	9-11 c-142	12-13	Y 2	9	9-7 b-14	13-14
Y 1	10	10-2 c-133	15-16	Y 2	10	10-12 b-9	13-14
Y 1	10	10-8 c-134	14-15	Y 2	10	10-9 b-10	21-22
Y 1	11	11-7 c-113	20-21	Y 2	11	11-8 b-39	16-17
Y 1	11	11-12 c-114	14-15	Y 2	11	11-3 b-40	16-17
Y 1	12	12-1 c-105	18-19	Y 2	12	12-7 b-47	16-17
Y 1	12	12-7 c-106	19-20	Y 2	12	12-5 b-48	15-16
Y 1	13	13-2 c-129	17-18	Y 2	13	13-6 b-23	11-12
Y 1	13	13-5 c-130	14-15	Y 2	13	13-1 b-24	11-12
Y 1	14	14-3 c-143	17-18	Y 2	14	14-6 b-11	16-17
Y 1	14	14-9 c-144	14-15	Y 2	14	14-3 b-12	15-16
Y 1	15	15-1 c-139	21-22	Y 2	15	15-7 b-1	12-13
Y 1	15	15-6 c-140	15-16	Y 2	15	15-4 b-2	12-13
Y 1	16	16-6 c-117	18-19	Y 2	16	16-10 b-37	17-18
Y 1	16	16-11 c-118	20-21	Y 2	16	16-5 b-38	17-18
Y 1	17	17-6 c-103		Y 2	17	17-12 b-43	17-18
Y 1	17	17-8 c-104	21-22	Y 2	17	17-2 b-44	15-16
Y 1	18	18-2 c-127	16-17	Y 2	18	18-7 b-21	14-15

Y 1	18	18-11	c-128	10-11	Y 2	18	18-5	b-22	11-12
Y 1	19	19-5	c-149	13-14	Y 2	19	19-2	b-19	18-19
Y 1	19	19-11	c-150	16-17	Y 2	19	19-11	b-20	20-21
Y 1	20	20-3	c-131	16-17	Y 2	20	20-8	b-5	14-15
Y 1	20	20-9	c-132	14-15	Y 2	20	20-10	b-6	15-16
Y 1	21	21-5	c-115	21-22	Y 2	21	21-5	b-31	13-14
Y 1	21	21-8	c-116	16-17	Y 2	21	21-3	b-32	14-15
Y 1	22	22-1	c-107	16-17	Y 2	22	22-7	b-49	16-17
Y 1	22	22-12	c-108	21-22	Y 2	22	22-5	b-50	20-21
Y 1	23	23-3	c-123	17-18	Y 2	23	23-11	b-27	22-23
Y 1	23	23-6	c-124	18-19	Y 2	23	23-5	b-28	17-18
Y 1	24	24-2	c-145	15-16	Y 2	24	24-3	b-15	16-17
Y 1	24	24-11	c-146	15-16	Y 2	24	24-5	b-16	16-16
Y 1	25	25-1	c-137	15-16	Y 2	25	25-2	b-7	16-17
Y 1	25	25-10	c-138	14-15	Y 2	25	25-5	b-8	16-17

Takakuma

Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet	Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet
X 1	1 E727(11B)	402	20-21	X 2	1 306(12A)	403	15-16
X 1	1 E731(6A)	404	17-18	X 2	1 310(2B)	405	15-16
X 1	2 E687(2A)	409	12-13	X 2	2 E615(3A)	410	18-19
X 1	2			X 2	2 E611(5B)	411	12-13
X 1	3 E703(8B)	420	18-19	X 2	3 E595(5B)	418	15-16
X 1	3 E699(3A)	421	19-20	X 2	3 E599(3A)	419	17-18
X 1	4			X 2	4 E607(6A)	424	15-16
X 1	4			X 2	4 E603(8B)	425	18-19
X 1	5 E735(3A)	431	16-17	X 2	5 314(11A)	430	20-21
X 1	5 E739(10B)	432	18-19	X 2	5 318(3B)	553	15-16
X 1	6			X 2	6		
X 1	6			X 2	6		
X 1	7 E671(2A)	438	18-19	X 2	7 E623(8A)	436	17-18
X 1	7 E667(10B)	439	16-17	X 2	7 E619(10B)	437	20-21
X 1	8			X 2	8 326(3B)	441	15-16
X 1	8			X 2	8 322(6A)	442	14-15
X 1	9			X 2	9		
X 1	9			X 2	9		
X 1	10			X 2	10		
X 1	10			X 2	10		
X 1	11 E683(4A)	548	16-17	X 2	11 E563(10B)	448	14-15
X 1	11			X 2	11 E567(7A)	449	17-18
X 1	12 E747(5A)	450	16-17	X 2	12 278(8A)	452	20-21
X 1	12 E743(10B)	451	19-20	X 2	12 282(5B)	453	17-18
X 1	13 E691(7B)	457	17-18	X 2	13 E571(12B)	459	14-15
X 1	13 E695(4A)	458	18-19	X 2	13 E575(1A)	544	15-16
X 1	14 E679(2A)	462	17-18	X 2	14 E559(6A)	463	14-15
X 1	14 E675(10B)	D570	19-20	X 2	14 E555(8B)	557	13-14
X 1	15			X 2	15 290(6B)	468	16-17
X 1	15			X 2	15 286(12A)	542	17-18
X 1	16 E651(1A)	476	18-19	X 2	16 334(4B)	475	15-16
X 1	16 E655(12B)	477	20-21	X 2	16 330(12A)	556	13-14
X 1	17 366(5B)	489	16-17	X 2	17 338(11A)	482	16-17
X 1	17 362(11A)	533	20-21	X 2	17 342(9B)	483	22-23
X 1	18			X 2	18 E627(6A)	488	16-17
X 1	18			X 2	18 E631(8B)	489	19-20
X 1	19 E647(4A)	495	19-20	X 2	19 E635(6A)	493	16-17

X 1	19	E643(7B)	496	18-19	X 2	19	E639(11B)	494	17-18
X 1	20	358(8B)	502	15-16	X 2	20	350(3B)	500	15-16
X 1	20	354(11A)	503	18-19	X 2	20	346(11A)	501	16-17
X 1	21				X 2	21			
X 1	21				X 2	21			
X 1	22	E711(4A)	509	19-20	X 2	22	E583(7A)	507	18-19
X 1	22	E715(10B)	510	15-16	X 2	22	E579(11B)	508	17-18
X 1	23	370(8A)	516	16-17	X 2	23	298(3B)	514	15-16
X 1	23	E707(3B)	517	17-18	X 2	23	294(11A)	515	17-18
X 1	24	E663(5A)	523	18-19	X 2	24	E591(3A)	521	20-21
X 1	24	E659(9B)	524	20-21	X 2	24	E587(8B)	522	14-15
X 1	25	E719(5A)	526	16-17	X 2	25	302(8A)	541	15-16
X 1	25	E723(6B)	527	13-14	X 2	25			

Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet	Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet
Y 1	1 B949(6A)	406	16-17	Y 2	1 E872(3A)	408	20-21
Y 1	1 B953(7B)	407	15-16	Y 2	1 E868(7B)	539	19-20
Y 1	2 E920(5A)	412	13-14	Y 2	2 E767(8B)	414	14-15
Y 1	2 E924(6B)	413	16-17	Y 2	2 E771(7A)	536	20-21
Y 1	3 B981(5A)	416	19-20	Y 2	3 E815(2A)	415	18-19
Y 1	3 B985(8B)	417	18-19	Y 2	3 E819(8B)	558	15-16
Y 1	4 E960(7A)	547	16-17	Y 2	4 E880(11B)	422	12-13
Y 1	4			Y 2	4 E888(1A)	423	13-14
Y 1	5 B929(10B)	428	15-16	Y 2	5 E843(1A)	426	20-21
Y 1	5 B933(8A)	429	14-15	Y 2	5 E847(11B)	427	18-19
Y 1	6 B941(4A)	550		Y 2	6		
Y 1	6			Y 2	6		
Y 1	7 E932(5A)	435	20-21	Y 2	7 E775(3A)	433	19-20
Y 1	7 E928(6B)	537	18-19	Y 2	7 E779(8B)	434	16-17
Y 1	8 B969(9A)	543	14-15	Y 2	8 E791(6A)	440	12-13
Y 1	8			Y 2	8		
Y 1	9			Y 2	9		
Y 1	9			Y 2	9		
Y 1	10 E988(3A)	443	14-15	Y 2	10 E807(9B)	445	18-19
Y 1	10 E984(12B)	444	15-16	Y 2	10 E839(3A)	546	14-15
Y 1	11 B937(8A)	447		Y 2	11 E876(8A)	446	18-19
Y 1	11			Y 2	11		
Y 1	12 E944(5A)	454	20-21	Y 2	12 E763(3A)	455	16-17
Y 1	12 E948(6B)	545	19-20	Y 2	12 E755(11B)	456	15-16
Y 1	13 B965(5A)	460	17-18	Y 2	13 E827(1A)	461	14-15
Y 1	13			Y 2	13 E823(3B)	552	16-17
Y 1	14 E952(6B)	464	18-19	Y 2	14 E908(2A)	466	15-16
Y 1	14 E956(3A)	465	14-15	Y 2	14 E904(5B)	467	19-20
Y 1	15			Y 2	15 E855(1A)	469	12-13
Y 1	15			Y 2	15 E851(7B)	470	17-18
Y 1	16 B995(7B)	473	11-12	Y 2	16 E859(6B)	471	12-13
Y 1	16 B945(6A)	474	17-18	Y 2	16 E863(3A)	472	16-17
Y 1	17 E912(7A)	480	15-16	Y 2	17 E783(8B)	478	17-18
Y 1	17 E916(8B)	481	14-15	Y 2	17 E787(4A)	479	15-16
Y 1	18 B977(6A)	487	14-15	Y 2	18 E803(5A)	485	17-18
Y 1	18			Y 2	18 E811(8B)	555	13-14
Y 1	19 E972(10B)	491	14-15	Y 2	19 E884(9B)	490	18-19
Y 1	19 E976(8A)	520	15-16	Y 2	19 E892(1A)	538	13-14
Y 1	20 E996(8A)	498	15-16	Y 2	20 E835(6A)	497	13-14

Y 1	20	E992(11B)	499	20-21	Y 2	20	E831(7B)	535	15-16
Y 1	21	B957(12A)	551	8-9	Y 2	21			
Y 1	21				Y 2	21			
Y 1	22	E936(6B)	505	17-18	Y 2	22	E759(3A)	504	18-19
Y 1	22	E940(1A)	506	21-22	Y 2	22	E751((10B)	530	19-20
Y 1	23	B961(9B)	513	19-20	Y 2	23	E799(3A)	511	14-15
Y 1	23	B973(8A)	529	18-19	Y 2	23	E795(11B)	512	18-19
Y 1	24	E968(5A)	492	20-21	Y 2	24	E900(5A)	518	17-18
Y 1	24	E964(11B)	519	19-20	Y 2	24	E896(10B)	554	17-18
Y 1	25	E980(7A)	525	13-14	Y 2	25			
Y 1	25				Y 2	25			

Tano

Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet	Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet		
X 1	1	1-8	113	19-20	X 2	1	1-6	522	21-22
X 1	1	1-10	118	17-18	X 2	1	1-10	529	22-23
X 1	2	2-2	74	21-22	X 2	2	2-4	511	21-22
X 1	2	2-12	84	21-22	X 2	2	2-6	513	20-21
X 1	3	3-4	64	22-23	X 2	3	3-1	485	19-20
X 1	3	3-10	70	18-19	X 2	3	3-9	493	13-14
X 1	4	4-4	88	18-19	X 2	4	4-9	504	16-17
X 1	4	4-7	90	16-17	X 2	4	4-11	506	21-22
X 1	5	5-3	99	22-23	X 2	5	5-6	476	16-17
X 1	5	5-10	106	20-21	X 2	5	5-7	479	16-17
X 1	6	6-8	201	18-19	X 2	6	6-9	352	16-17
X 1	6	6-12	206	20-21	X 2	6	6-10	354	19-20
X 1	7	7-2	208	17-18	X 2	7	7-4	314	18-19
X 1	7	7-12	218	21-22	X 2	7	7-12	318	19-20
X 1	8	8-1	219	15-16	X 2	8	8-5	325	20-21
X 1	8	8-3	221	16-17	X 2	8	8-10	332	17-18
X 1	9	9-8	190	19-20	X 2	9	9-7	339	18-19
X 1	9	9-9	193	16-17	X 2	9	9-9	341	17-18
X 1	10	10-1	177	16-17	X 2	10	10-3	357	19-20
X 1	10	10-7	180	20-21	X 2	10	10-5	359	18-19
X 1	11	11-7	42	20-21	X 2	11	11-1	431	22-23
X 1	11	11-9	45	17-18	X 2	11	11-3	433	17-18
X 1	12	12-6	19	20-21	X 2	12	12-3	424	15-16
X 1	12	12-12	24	20-21	X 2	12	12-9	428	17-18
X 1	13	13-8	53	21-22	X 2	13	13-1	442	20-21
X 1	13	13-6	55	22-23	X 2	13	13-5	446	20-21
X 1	14	14-6	7		X 2	14	14-1	464	17-18
X 1	14	14-9	9	22-23	X 2	14	14-6	467	21-22
X 1	15	15-3	27	20-21	X 2	15	15-5	457	15-16
X 1	15	15-10	34	16-17	X 2	15	15-9	461	
X 1	16	16-3	243	18-19	X 2	16	15-5	382	17-18
X 1	16				X 2	16	15-12	387	22-23
X 1	17	17-1	244	20-21	X 2	17	17-5	394	20-21
X 1	17	17-3	246	22-23	X 2	17	17-11	400	16-17
X 1	18	18-1	248	12--13	X 2	18	18-3	404	19-20
X 1	18	18-3	250	15-16	X 2	18	18-7	408	17-18
X 1	19	19-3	230	15-16	X 2	19	19-1	367	22-23
X 1	19	19-11	238	13-14	X 2	19	19-11	376	17-18

X 1	20	20-1	239	18-19	X 2	20	20-4	417	18-19
X 1	20				X 2	20	20-9	420	17-18
X 1	21	21-2	122	20-21	X 2	21	21-7	256	16-17
X 1	21	21-4	124	18-19	X 2	21	21-9	258	22-23
X 1	22	22-8	171	17-18	X 2	22	22-7	291	22-23
X 1	22	22-9	174	20-21	X 2	22	22-12	294	22-23
X 1	23	23-5	139	23-24	X 2	23	23-1	262	24-25
X 1	23	23-11	142	17-18	X 2	23	23-9	270	22-23
X 1	24	24-2	145	19-20	X 2	24	24-4	279	20-21
X 1	24	24-12	155	18-19	X 2	24	24-8	281	20-21
X 1	25	24-5	160	18-19	X 2	25	25-4	302	18-19
X 1	25	25-7	162	20-21	X 2	25	25-11	307	19-20

Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet	Terület	Klón	Minta szám	Juv-érett fa átmenet		
Y 1	1	1-3	576	20-21	Y 2	1	1-3	863	15-16
Y 1	1	1-4	578	15-16	Y 2	1	1-12	872	15-16
Y 1	2	2-3	667	17-18	Y 2	2	2-2	712	16-17
Y 1	2	2-4	669	22-23	Y 2	2	2-9	716	19-20
Y 1	3	3-10	579	15-16	Y 2	3	3-1	806	15-16
Y 1	3				Y 2	3	3-7	811	16-17
Y 1	4	4-3	645	19-20	Y 2	4	4-8	779	22-23
Y 1	4	4-9	651	20-21	Y 2	4	4-11	784	15-16
Y 1	5				Y 2	5	5-8	925	21-22
Y 1	5				Y 2	5	5-11	930	24-25
Y 1	6	6-7	588	20-21	Y 2	6	6-7	855	21-22
Y 1	6				Y 2	6	6-5	857	13-14
Y 1	7	7-1	671	16-17	Y 2	7	7-3	721	15-16
Y 1	7	7-5	674		Y 2	7	7-10	728	16-17
Y 1	8	8-6	602	11--12	Y 2	8	8-3	830	21-22
Y 1	8				Y 2	8	8-12	839	15-16
Y 1	9				Y 2	9	9-1	766	16-17
Y 1	9				Y 2	9	9-10	772	16-17
Y 1	10	10-8	627	18-19	Y 2	10	10-8	906	12-13
Y 1	10	10-10	631	16-17	Y 2	10	10-10	910	21-22
Y 1	11	11-6	533	20-21	Y 2	11	11-3	842	19-20
Y 1	11	11-9	534	20-21	Y 2	11	11-12	850	19-20
Y 1	12				Y 2	12	12-9	695	17-18
Y 1	12				Y 2	12	12-11	697	21-22
Y 1	13	13-6	537	15-16	Y 2	13	13-6	802	19-20
Y 1	13	13-12	539	19-20	Y 2	13	13-12	805	15-16
Y 1	14				Y 2	14	14-6	760	15-16
Y 1	14				Y 2	14	14-11	764	13-14
Y 1	15	15-5	543	15-16	Y 2	15	15-2	894	20-21
Y 1	15	15-11	547	16-17	Y 2	15	15-8	897	21-22
Y 1	16	15-6	569	19-20	Y 2	16	16-3	875	16-17
Y 1	16	15-4	571	17-18	Y 2	16	16-11	881	16-17
Y 1	17				Y 2	17	17-2	700	17-18
Y 1	17				Y 2	17	17-10	708	17-18
Y 1	18	18-6	612	17-18	Y 2	18	18-8	821	18-19
Y 1	18	18-4	614	14-15	Y 2	18	18-11	826	18-19
Y 1	19	19-8	551	20-21	Y 2	19	19-8	735	14-15
Y 1	19	19-12	553	14-15	Y 2	19	19-6	737	14-15

Y 1	20	20-4	581	17-18	Y 2	20	20-6	938	20-21
Y 1	20	20-10	583	15-16	Y 2	20	20-12	943	15-16
Y 1	21	21-6	592	19-20	Y 2	21	21-1	883	12--13
Y 1	21	21-11	598	15-16	Y 2	21	21-12	892	
Y 1	22	22-2	557		Y 2	22	22-2	677	22-23
Y 1	22	22-8	563	16-17	Y 2	22	22-11	686	20-21
Y 1	23				Y 2	23	23-7	791	16-17
Y 1	23				Y 2	23	23-5	793	18-19
Y 1	24	24-4	660	18-19	Y 2	24	24-5	749	16-17
Y 1	24	24-8	662	19-20	Y 2	24	24-10	751	17-18
Y 1	25	25-1	632	20-21	Y 2	25	25-7	916	20-21
Y 1	25	25-7	637	20-21	Y 2	25	25-9	918	20-21

