

Nyugat-magyarországi Egyetem
Faipari Mérnöki Kar
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola
Bódig József Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratórium

FŰRÉSZÁRU SZILÁRDSÁGA ÉS FIZIKAI TULAJDONSÁGAINAK KAPCSOLATA

Doktori (PhD) értekezés

Sismándy-Kiss Ferenc
PhD jelölt

Témavezető:
Prof. Dr. Divós Ferenc
egyetemi tanár

Sopron
2012

Fűrészáru szilárdsága és fizikai tulajdonságainak kapcsolata

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében
*a Nyugat-magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák
Doktori Iskolája

Rosttechnika tudományok programja

Írta:
Sismándy-Kiss Ferenc

**Készült a Nyugat-magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és
Technológiák Doktori Iskola

Rosttechnika tudományok programja keretében

Témavezető: Prof. Dr. Divós Ferenc
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton %-ot ért el,
Sopron,

.....
Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen / nem)

Első bíráló (Dr.) igen / nem

.....
(aláírás)

Második bíráló (Dr.) igen / nem

.....
(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr.) igen / nem

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján%-ot ért el
Sopron,

.....
Bírálbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése

.....
EDT elnöke

KIVONAT

Fűrészáru szilárdsága és fizikai tulajdonságainak kapcsolata

A kutatásom célja az volt, hogy az általam meghatározott illetve mért roncsolásmentes paraméterek közül kiválasszam azokat, amelyekkel a faanyag statikus rugalmassági modulusza és hajlítószilárdsága a lehető legnagyobb pontossággal megbecsülhető. Azért ez a kettő, mivel a faszerkezetek méretezése során talán ez a két legfontosabb paraméter.

Ehhez 1307 db különböző keresztmetszetű és hosszúságú luc (*Picea abies*)- és vörösfenyő (*Larix decidua*) pallón illetve gerendán végeztem roncsolásmentes és roncsolásos méréseket.

A meghatározott mutatók közül a legjobb becslő paraméternek a csillapítás (logaritmikus dekrementum) és az általam bevezetett szegély göcsátmérő arány bizonyult (SZCKDR). Lucfenyő esetében a legjobb becslő formulával sikerült a statikus rugalmassági moduluszt $\pm 0,51$ GPa-os, a hajlítószilárdságot $\pm 6,82$ MPa-os hibával megbecsülni, míg vörösfenyő esetén a statikus rugalmassági moduluszt $\pm 0,75$ GPa-os, a hajlítószilárdságot $\pm 11,62$ MPa-os hibával sikerült megbecsülni.

ABSTRACT

Strength of structural lumbers in relation to physical properties

The general research objectives included the evaluation and selection of those non-destructive parameters that have the strongest influence on the static bending strength and modulus of elasticity. Thus, based on the measurements of these parameters the estimation of strength and stiffness properties with the possible highest precision may be achieved.

During the course of the project, I have performed non-destructive and destructive tests on 1307 pieces of coniferous specimens. The characteristic dimensions of the spruce (*Picea abies*) and larch (*Larix decidua*) planks were 5×10 cm in cross sections and 2 – 6 m in length.

Among the determined indicators damping (logarithmic decrement) and Knot Area Ratio on edge introduced by me were proved to be the best estimate parameters. Using the best prediction formula, the static modulus of elasticity was forecasted with a standard error of ±0,51 GPa and the bending strength of ±6,82 MPa in case of spruce. The static modulus of elasticity was estimated with a standard error of ±0,75 GPa and the bending strength of ±11,62 MPa in case of larch.

Tartalomjegyzék

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Bevezetés | 8 |
| 1.1 | Célkitűzés | 8 |
| 1.2 | Téma aktualitása..... | 8 |
| 2 | Vizsgálatok elméleti háttere | 10 |
| 2.1 | Roncsolásos mérések elméleti háttere..... | 10 |
| 2.1.1 | Statikus rugalmassági modulusz..... | 10 |
| 2.1.2 | Hajlítószilárdság | 12 |
| 2.2 | Roncsolásmentes mérések elméleti háttere..... | 13 |
| 2.2.1 | Dinamikus rugalmassági modulusz mérése longitudinális rezgéssel | 13 |
| 2.2.2 | Dinamikus rugalmassági modulusz mérése hajlító rezgéssel..... | 15 |
| 2.2.3 | Nyíró rugalmassági modulusz mérése torziós rezgéssel | 17 |
| 2.2.4 | Csillapítás mérése | 18 |
| 3 | Szakirodalom áttekintése..... | 20 |
| 3.1 | Vizuális szilárdsági osztályozás | 21 |
| 3.2 | Gépi szilárdsági osztályozás | 21 |
| 3.2.1 | Statikus rugalmassági modulusz mérése | 22 |
| 3.2.2 | Dinamikus rugalmassági modulusz mérése..... | 23 |
| 3.2.3 | Ultrahangos eljárás | 25 |
| 3.2.4 | Nukleáris módszerek, izotópos eljárások | 27 |
| 3.2.5 | Optikai eljárás..... | 29 |
| 4 | A vizsgálat alapanyagai, eszközei, módszerei, leírása, mérések hibái | 31 |
| 4.1 | Vizsgált faanyag..... | 31 |
| 4.2 | Vizuális felmérés..... | 32 |
| 4.2.1 | Göcsök felmérése | 34 |
| 4.2.2 | Rostlefutás | 40 |
| 4.2.3 | Évgyűrűszerkezet vizsgálata | 44 |
| 4.2.4 | Vizuális felmérés során meghatározott paraméterek..... | 44 |
| 4.3 | Mérés fűrészáru osztályozó berendezéssel..... | 44 |
| 4.3.1 | Fűrészáru osztályozó berendezéssel meghatározott paraméterek | 47 |
| 4.4 | Longitudinális rezgés frekvenciájának meghatározása..... | 47 |
| 4.4.1 | A longitudinális rezgés mérésekor meghatározott paraméter | 48 |
| 4.5 | Hajlítórengések frekvenciájának meghatározása | 48 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.5.1 | A hajlító rezgés mérésekor meghatározott paraméterek | 51 |
| 4.6 | Torziós rezgés frekvenciájának meghatározása | 51 |
| 4.6.1 | A torziós rezgés mérésekor meghatározott paraméter..... | 52 |
| 4.7 | Csillapítás meghatározása | 52 |
| 4.7.1 | A csillapítás mérésekor meghatározott paraméterek..... | 52 |
| 4.8 | Nedvességmérés..... | 52 |
| 4.8.1 | Nedvességmérés során meghatározott paraméter..... | 53 |
| 4.9 | Statikus mérések..... | 53 |
| 4.9.1 | A statikus mérések során meghatározott paraméterek | 56 |
| 4.10 | Mérésekhez használt eszközök hibái | 56 |
| 5 | Eredmények bemutatása | 60 |
| 5.1 | Mechanikai tulajdonságok meghatározása illetve becslése | 60 |
| 5.1.1 | I. csoport vizsgálata | 62 |
| 5.1.2 | II. csoport vizsgálata..... | 78 |
| 5.1.3 | I. és II. csoport összehasonlítása..... | 86 |
| 5.1.4 | III. csoport vizsgálata | 89 |
| 6 | Tézisek..... | 93 |
| 7 | Összefoglalás | 96 |
| 8 | Köszönetnyilvánítás | 97 |
| 9 | Jelölésjegyzék..... | 98 |
| 10 | Irodalomjegyzék | 101 |
| 11 | Mellékletek | I |

1 BEVEZETÉS

A roncsolásmentes faanyag vizsgálatok több évtizedes múltra tekintenek vissza. Már az első vizsgálatok is a faanyag szilárdságának becslésére irányultak. A roncsolásmentes faanyagvizsgálatok célja a fa olyan paramétereinek a gyors és pontos mérése, amelyek kapcsolatban állnak a faanyag mechanikai tulajdonságaival pl.: hajlítószilárdsággal, rugalmassági moduluszal, és segítségével ezek a paraméterek nagy pontossággal megbecsülhetők.

1.1 Célkitűzés

Elsődleges céлом az volt, hogy az általam meghatározott illetve mért roncsolásmentes paraméterek közül kiválasszam azokat, amelyekkel a faanyag statikus rugalmassági modulusza és hajlítószilárdsága a lehető legnagyobb pontossággal megbecsülhető. Ehhez kutatásom során 1307 db különböző keresztmetszetű és hosszúságú fenyő pallón illetve gerendán végeztem roncsolásmentes és roncsolásos méréseket. A pallók jellemző méretei 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszúságú luc (*Picea abies*)- illetve vörösfenyő (*Larix decidua*) volt.

A paraméterek között szerepeltek többek között az évgyűrűszerkezetre vonatkozó felmérések ún. átlag évgyűrűsége, maximális évgyűrűsége, több göcsparaméter ún. göcssterület arány, szegély göcssterület arány, göcsátmérő arány, szegély göcsátmérő arány, különböző rezgések frekvenciáiból meghatározott dinamikus rugalmassági modulusok, a csillapítás valamint a sűrűség.

További célom volt, hogy a mérathatás jelenségét vizsgáljam valós méretű próbatesteken, ehhez a már említett métereken kívül, 5x10 cm-es keresztmetszetű 4m hosszúságú, 7,5x15 cm-es keresztmetszetű 3 és 6 m hosszúságú pallókon illetve 10x10 cm-es keresztmetszetű 4 m hosszúságú gerendákon végeztem méréseket, melyek fafaja vörösfenyő volt.

1.2 Téma aktualitása

A téma aktualitását az adja, hogy 2010. év elejétől az MSZ 15025 (Építmények teherhordó faszerkezeteinek erőtani tervezése) szabvány helyett a jelenleg is már érvényben lévő EUROCODE 5 (Faszerkezetek tervezése) alapján kell a faszerkezeteket méretezni, illetve tervezni.

„Az Eurocode-szabványok bevezetése miatt 2010. március 31-ig vissza kell vonni az azonos tárgyú további nemzeti szabványokat, ezután csak az Eurocode-ok lesznek érvényben. Ha a tervező más szabványt alkalmaz, akkor a terve nem viselheti az „EN Eurocode-nak megfelelő terv” megjelölést.”; „2010. március 31. után a közbeszerzések esetében az Eurocode-ok alkalmazása kötelező. A közbeszerzést kiíró szervek olyan ajánlatokat is elfogadnak, amelyben az ajánlattevő nem Eurocode-ot alkalmaz, de ekkor bizonyítania kell, hogy megoldása az Eurocode szabvánnyal műszakilag egyenértékű.” (TT ülés 2009)

Az említett EUROCODE 5 az MSZ EN 338 előírásai szerint, a szilárdságuk alapján besorolt faanyaggal számol. Az MSZ EN 338 1994 óta honosított szabvány Magyarországon, melyet azóta többször is módosítottak. Jelenleg érvényben lévő legújabb változata 2010-ben jelent meg.

Az európai szabványosítás célja, hogy a szabványok európai szintű harmonizálásával megkönnyítse az áruk és szolgáltatások cseréjét, az eltérő műszaki követelményekből eredő kereskedelmi akadályok megszüntetésével. A CEN-nek (Comité Européen de Normalisation), Európa multiszektorális szabványosítási szervezetének a feladata olyan szabványok kidolgozása, amelyek megfelelnek az egyes irányelvekben megfogalmazott alapvető biztonsági követelményeknek. (IPOSZ 20.)

2 VIZSGÁLATOK ELMÉLETI HÁTTERE

Jelen fejezetben bemutatom az általam végzett roncsolásmentes és roncsolásos vizsgálatok elméleti hátterét.

2.1 Roncsolásos mérések elméleti háttere

2.1.1 Statikus rugalmassági modulusz

Az anyagok jelentős része, így a faanyag is tökéletesen rugalmasnak tekinthető abban az esetben, ha az alakváltozás nem halad meg egy bizonyos, az adott anyagra – jelen esetben fára – vonatkozó értéket. Az ideálisan rugalmas anyagmodell azt jelenti, hogy a test valamely pontjában keletkező feszültségállapot komponensei kizárólag a pillanatnyi és helyi alakváltozási állapot komponenseitől függenek és fordítva. A feszültségkomponenseket a

$$\sigma^{ij} = \sigma^{ij}(\varepsilon_{kl}) \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad [2.1]$$

ahol: σ^{ij} : a feszültségi állapot tenzora,
 ε_{kl} : az alakváltozási állapot tenzora.

függvénykapcsolat egyértelműen meghatározza (Szalai 1994).

A Hooke-törvény értelmében a feszültségkomponensek és az alakváltozási komponensek közötti kapcsolat lineáris.

Az anizotrop anyagok általános Hooke-törvénye mátrix egyenletként a következő:

$$[\varepsilon_{ij}] = [S_{ijkl}] [\sigma^{kl}] \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad [2.2]$$

ahol: $[\varepsilon_{ij}]$: az alakváltozási tenzor komponenseiből képzett egydimenziós mátrix,
 $[\sigma^{ij}]$: a feszültségi tenzor komponenseiből képzett egydimenziós mátrix,
 $[S_{ijkl}]$: alakíthatósági mátrix.

A [2.2] egyenletben szereplő $[S_{ijkl}]$ alakíthatósági mátrixban 81 anyagjellemző szerepel. Szerencsére az anyagjellemzők száma még általános anizotropia esetén is kisebb ennél. A feszültségi állapot szimmetriája és az alakváltozási állapot szimmetriája, valamint az ideálisan rugalmas test feltételezés miatt a független tenzorkomponensek száma lecsökken 21-re. A szimmetriaelemek alapján bizonyítható, hogy az általános 21 anyagjellemzőből csak 9 marad (Szalai 1994).

Természetes faanyag esetén az alakíthatósági mátrix a technikai állandókkal a következő alakot veszi fel:

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \quad [2.3]$$

ahol: E_i ($i=L,R,T$): a hosszváltozással kapcsolatos rugalmassági modulusz az i jelű anatómiai főirányban,

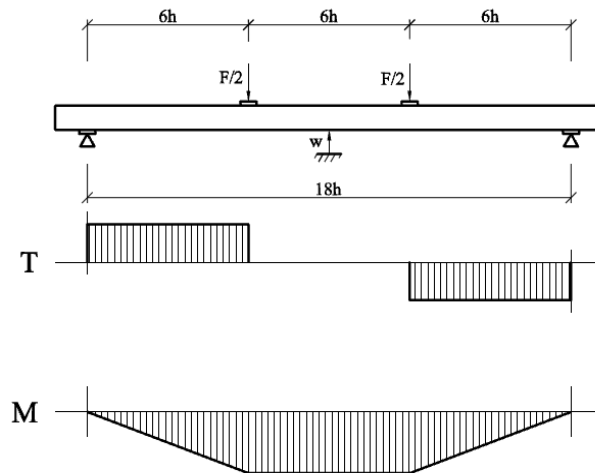
G_{ij} ($i,j= R,T$ v. T,L v. L,R): a szögváltozással kapcsolatos nyíró rugalmassági modulusz az i,j jelű anatómiai fősíkokban (az i normálisú síkon működő, j -vel párhuzamos hatásvonalú nyírófeszültség arányossági tényezője), a nyírófeszültségek dualitás tétele következményeként pedig $G_{ij}=G_{ji}$,

ν_{ij} : az interakciós hatás Poisson-tényezője ($i,j=R,T; T,R; T,L; L,T; L,R$ v. L,R irányában ható normálfeszültség hatására fellépő, a második index irányába eső hosszváltozás arányossági tényezője) (Szalai 1994, Wittmann 2001).

A fenti [2.3] mátrix ugyan 12 állandót tartalmaz, de a mátrix szimmetriája miatt a független technikai állandók száma 9. Nagyon gyakran csupán két rugalmas állandóról beszélünk (húzó- és nyíró rugalmassági modulusz, E és G), ami homogén és izotrop anyag esetén kielégítő is. Szerencsére a gyakorlatban nem találkozunk olyan pl. húzásra kitétt fa gerendával, amit rostirányra merőlegesen fűrészelték volna ki, mert ebben az irányban a rugalmas és szilárdsági jellemzők egy nagyságrenddel kisebbek, mint szálirányban. Így ha a fa vonatkozásában kicsit pongyolán E rugalmassági moduluszról beszélünk, az alatt az E_L -t értjük, illetve a fűrészáru hosszú élei által meghatározott anatómiai irányhoz tartozó rugalmassági moduluszt kell érteni, ami igen jó közelítéssel E_L -t jelent.

Kicsit összetettebb a helyzet a nyírás esetében. A faanyag vonatkozásában, ha csupán G nyíró rugalmassági moduluszról beszélünk, akkor ez alatt értjük a G_{TL} és G_{LR} értékeket. Azt, hogy éppen melyikről van szó az igénybevétel és az aktuális anatómiai irányok határozzák meg. Kicsit szépíti a helyzetet, hogy G_{TL} és G_{LR} nem nagyon térnek el egymástól, pl. lucfenyő esetében ez az eltérés 10 %-os, de pl. tölgyfa esetében a markáns bélsugarak miatt elérheti az 50 %-ot is. Általánosságban elmondható, hogy a faanyag esetében a G megjelölés alatt a G_{TL} és G_{LR} egy sajátos, nehezen definiálható átlagértékét kell értenünk. Megjegyzésül megállapítható az, hogy még laboratóriumi körülmények között is nehéz tisztán nyíró igénybevételt létrehozni (Divós 1999).

A hajlító rugalmassági modulusz mérését 4 pontos hajlítással az MSZ EN 408-as szabványnak megfelelően végezzük. A vizsgálat elrendezését a 2.1 ábra mutatja.



2.1 ábra: A négy pontos hajlítás vizsgálati elrendezése, valamint nyírőerő (T) és nyomatéki (M) ábrája

Forrás: MSZ EN 408 alapján saját szerkesztés

A vizsgálatok során a rugalmassági modulusz nagyságát a lineáris tartományon belül a terhelőerők különbsége és a hozzájuk tartozó valóságos lehajlások különbsége alapján határozhatjuk meg:

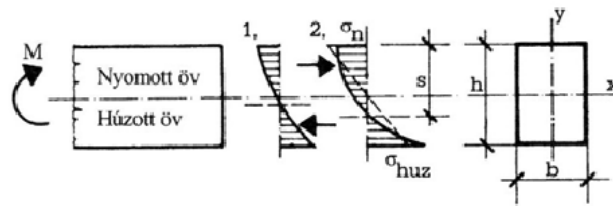
$$E_{m,g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad [2.4]$$

- ahol: $E_{m,g}$: teljes hajlítási rugalmassági modulusz [N/mm²],
 l : fesztávolság hajlítóvizsgálat esetén; $l = 18h$ [mm],
 $F_2 - F_1$: tehernövekmény a teher-alakváltozás lineáris szakaszán [N],
 b : a próbatest szélessége [mm],
 h : a próbatest magassága [mm],
 $w_2 - w_1$: az F2-F1-nek megfelelő alakváltozási növekmény [mm],
 a : a terhelés helye és a legközelebbi alátámasztás közötti távolság [mm].

2.1.2 Hajlítószilárdság

A mechanikai tulajdonságok jellemzői között a leglényegesebb a hajlítószilárdság, mivel meghatározása egyszerű, és a hajlító igénybevétel igen sokszor előfordul a gyakorlatban.

A hajlítófeszültségek húzó- és nyomófeszültségekből tevődnek össze, ezért a természetes faanyagok hajlítófeszültségét a húzó- (σ_{huz}) és nyomófeszültségek (σ_n) tulajdonságai, valamint egymáshoz való viszonyuk alapvetően meghatározza (2.2 ábra).



2.2 ábra: Feszültségi viszonyok hajlító igénybevételnél. 1, a terhelés kezdeti szakaszán; 2, a törés előtt
Forrás: Molnár 2000

A húzószilárdság nagy; általában mintegy kétszerese a nyomószilárdságnak. A húzó- és nyomófeszültségek különbözősége, valamint a nagy plasztikus alakváltozások hatására a semleges tengely nem megy át a keresztmetszet súlypontjára, hanem eltolódik a húzófeszültségek irányába, melynek a szélsőszáltól való távolsága számítható. A hajlítószilárdság meghatározására a Navier-féle képletet használjuk, azonban meg kell jegyezni, hogy a képlet csak abban az esetben adna helyes eredményt, ha a semleges tengely pontosan egybeesne a vizsgált próbatest szimmetriatengelyével. Ez a fánál, mint inhomogén anyagnál sosem áll fenn, így a Navier-féle képletet csak megközelítő pontossággal tudjuk használni (Molnár 2000).

A vizsgálatok során a legegyszerűbb terhelési sémát kell alkalmazni. Ez alapján kétféle eljárás ismert. Az egyik a hárompontos hajlítás. Ebben az esetben a próbatest két végén alátámasztott, és a terhelőerő a próbatest közepén hat, így az erőátadás egy helyen koncentráltan történik. A másik módszer a négy pontos hajlítás. A négy pontos hajlítás előnye, hogy a veszélyes szelvényben nem ébred nyírófeszültség (2.2 ábra), és hogy a törés a tartó leggyengébb pontján következik be (Molnár 2000).

A hajlítószilárdság kiszámítását négy pontos hajlítás esetében az MSZ EN 408 írja le az alábbi módon:

$$f_m = \frac{aF_{max}}{2W} \quad [2.5]$$

ahol: f_m : hajlítószilárdság [N/mm²],
 a : a terhelés helye és a legközelebbi alátámasztás közötti távolság [mm],

F_{max} : legnagyobb teher [N],

W : keresztmetszeti tényező [mm³]:

$$W = \frac{bh^2}{6}$$

ahol: b : próbatest szélesség [mm],

h : próbatest magasság [mm].

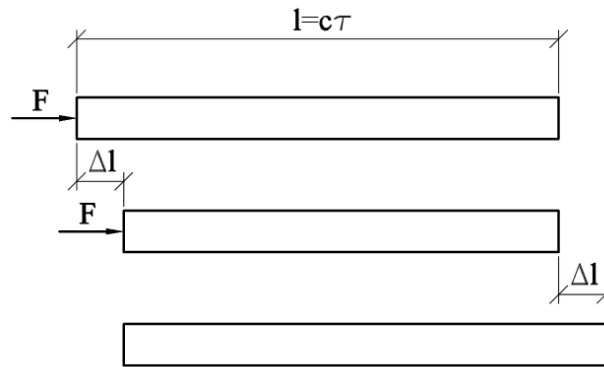
2.2 Roncsolásmentes mérések elméleti háttere

2.2.1 Dinamikus rugalmassági modulusz mérése longitudinális rezgéssel

A különböző anyagok rezgési karakterisztikájára nézve meghatározóak az elasztikus tulajdonságok. A megfelelő összefüggések ismeretében tehát a szerkezetek rezgéseiből következtetni lehet az anyag rugalmassági moduluszára. Az ilyen módon

meghatározott rugalmassági moduluszt dinamikus rugalmassági modulusznak nevezzük és mérésére több lehetőség kínálkozik. Ezek közül az egyik legegyszerűbb a longitudinális rezgések használata (Divós 1999). Ezt a módszert több kutató is vizsgálta már és megállapították, hogy a longitudinális rezgésből számított rugalmassági modulusz kiválóan korrelál a statikus rugalmassági moduluszal valamint a hajlítószilárdsággal (Gallagin, Pellerin 1964; Divos 2011).

A rugalmas hullámok terjedési sebessége bizonyos esetekben, így például hosszú rudak esetében egyszerű dinamikai megfontolásokkal meghatározható. Legyen a 2.3 ábrán látható rúd keresztmetszete A , sűrűsége ρ , rugalmassági modulusza pedig E . Ha a rúd bal oldali végére hosszirányban igen rövid ideig F erő hat, pl. a rúd végére kalapáccsal ráütünk, akkor ez a rúd összenyomódásában megnyilvánuló zavar longitudinális hullámként halad jobbra bizonyos c sebességgel, és τ idő alatt $l=c\tau$ távolságra jut el.



2.3 ábra: A véglap elemi elmozdulása F erő hatására

Forrás: Divós 1999 alapján saját szerkesztés

Az állandónak feltételezett F erő az l hosszúságú rudat Δl -el megrövidíti, azaz a Hooke-törvény szerint fennáll:

$$\Delta l = \frac{l \cdot F}{E \cdot A}, \text{ vagy } F = \frac{E \cdot \Delta l \cdot A}{l} \quad [2.6]$$

[2.7]

- ahol: Δl : a rúd hosszváltozása [m],
 l : a rúd hossza [m],
 F : erő [N],
 E : rugalmassági modulusz [N/m^2],
 A : a rúd keresztmetszete [m^2].

Másrészt, a 2.3 ábra szerint az $F\tau$ erőlkés hatására először a bal oldali véglap, majd egymás után valamennyi keresztmetszet elmozdul $v = \Delta l/\tau$ sebességgel, tehát végeredményben úgy számolhatunk, mintha ezzel a sebességgel az egész $m = \rho A c \tau$ tömegű rúd elmozdult volna. Ezért, az impulzustétel szerint:

$$F \cdot \tau = m \cdot v = \rho \cdot A \cdot c \cdot \tau \frac{\Delta l}{l} \quad [2.8]$$

Az F -et az előző egyenletből [2.7] behelyettesítve, egyszerűsítés után a dinamikus rugalmassági modulusz (Budó 1972):

$$E = c^2 \rho \quad [2.9]$$

ahol: c : hangsebesség [m/s],
 ρ : sűrűség [kg/m³].

Látszik, hogy a fenti képletből egyszerűen kiszámítható a dinamikus rugalmassági modulusz, azonban ismernünk kell a sűrűséget, melyet a későbbiekben leírt módszerrel egyszerűen meghatározhatunk. Az egyenlet másik tagja a hangsebesség. Ennek meghatározására a következőket mondhatjuk:

Ha egy rúd egyik végére ráütünk, abban tengely irányú longitudinális rezgés indul meg, majd a rúd végéhez érve onnan visszaverődik. A csillapodó rezgés frekvenciájának reciproka azzal az idővel lesz egyenlő, amely alatt a gerjesztett hullám a rúd ellentétes végéről való visszaverődés után visszatér. Ennek ismeretében a hang terjedési sebességét a következő egyenlettel írhatjuk le:

$$c = 2 \cdot \frac{f_n}{n} \cdot l \quad [2.10]$$

ahol: c : hangsebesség [m/s],
 f_n : a rezgés sajátfrekvenciája n -edik módusban [Hz],
 ρ : sűrűség [kg/m³],
 n : móduszsám.

A [2.9] és [2.10] *egyenleteket* összevonjuk, ekkor az alábbi képletet kapjuk, amellyel a longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági moduluszt egyszerűen meghatározhatjuk:

$$E_l = 4 \cdot l^2 \cdot \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \cdot \rho \quad [2.11]$$

ahol: E_l : rugalmassági modulusz [N/m²],
 l : a rúd hossza [m],
 f_n : a rezgés sajátfrekvenciája n -edik módusban [Hz],
 n : móduszsám,
 ρ : sűrűség [kg/m³].

2.2.2 Dinamikus rugalmassági modulusz mérése hajlító rezgéssel

A hajlító rugalmassági modulusz meghatározható egyrészt statikus, másrészt dinamikus módszerekkel. A rugalmassági modulusz dinamikus mérésére szintén több lehetőség adódik. Egyik megoldás a hajlítórezgések sajátfrekvenciájának mérése. Ez a módszer jó becslést ad mind a statikusan mért rugalmassági modulusz ($r > 0,99$; Gallagin et al. 1966), mind pedig a hajlítószilárdság ($r = 0,84$; Divos 1994) esetében. A hajlító rezgések frekvenciáját az anyagok elasztikus tulajdonságai határozzák meg. Prizmatikus

rudak esetén nagyon jó közelítéssel lehet alkalmazni a Timoshenko-elméletet (Weaver et al. 1990). Ez az elmélet a hajlítórezgések mozgásegyenletének negyedfokú sorbafejtéséből indul ki, és a következő differenciálegyenlettel jellemzi a rúd rezgését:

$$EI \frac{\partial^4 r}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - \rho I \left(1 + \frac{E}{\beta G} \right) \frac{\partial^4 r}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I}{\beta G} \frac{\partial^4 r}{\partial t^4} = 0 \quad [2.12]$$

ahol: β : nyíró faktor (1/1,2 prizmatikus rudak esetén),
 r : kitérés,
 x : a futópont koordinátája a rúd hosszirányában,
 t : idő,
 A : keresztmetszet,
 ρ : sűrűség,
 I : tehetetlenségi nyomaték,
 E : hajlító rugalmassági modulusz,
 G : nyíró rugalmassági modulusz.

A fenti egyenlet meglehetősen bonyolult, és a megoldáshoz legalább két rezgési módusban mért frekvenciára van szükség. A differenciálegyenletnek nincsen közvetlen megoldóképlete. Az eredmény csak iterációs módszerekkel számítható ki. A módszer előnye, hogy a nyírást figyelembe veszi, mely kis támaszközök esetén fontos szerepet játszik. A megoldást iterációs algoritmus program (DYNEG) segítségével számíthatjuk, mely szimultán határozza meg a hajlító rugalmassági moduluszt, és a nyíró rugalmassági moduluszt [Chui 1989].

A Timoshenko-egyenletnél egyszerűbb az Euler-féle közelítés, mely a nyírást elhanyagolja:

$$EI \frac{\partial^4 r}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = 0 \quad [2.13]$$

ahol: r : kitérés,
 x : a futópont koordinátája a rúd hosszirányában,
 t : idő,
 A : keresztmetszet,
 ρ : sűrűség,
 I : keresztmetszet másodrendű nyomatéka,
 E : hajlító rugalmassági modulusz,

de ez már közvetlenül megoldható:

$$E_h = \left(\frac{2f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{mL^3}{I} \quad [2.14]$$

ahol: E_h : rugalmassági modulusz [N/m²],
 f_n : hajlító rezgés frekvenciája n - edik módusban [Hz],

$$\gamma_n = \left(n + \frac{1}{2} \right)^2, \text{ de } \gamma_1=2,267; \gamma_2=6,249,$$

m : a rúd tömege [kg],

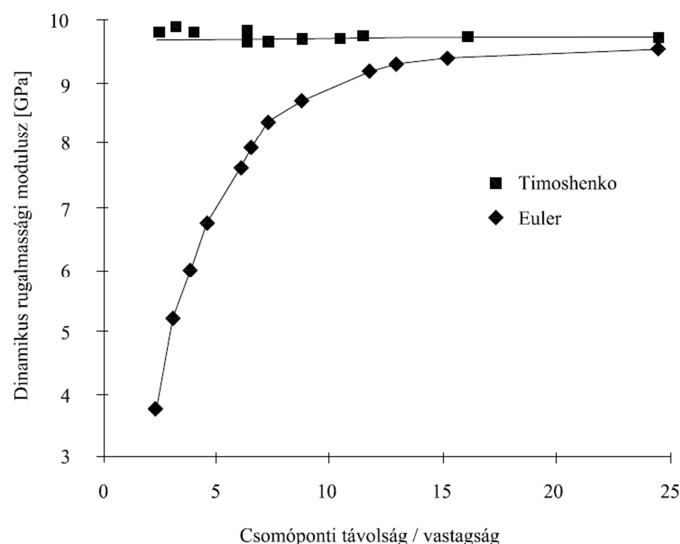
L : a rúd hossza [m],

I : keresztmetszet másodrendű nyomatéka [m⁴],

n : móduszsám.

A móduszsám megmutatja, hogy a mért frekvencia melyik móduszhoz tartozik. Az első az alapmódusz, a továbbiak a felharmonikusok.

Az Euler-egyenlet hibája, hogy a hajlító rezgéseknél szerepet játszó nyíró rugalmassági modulusz hatását nem veszi figyelembe. Emiatt a pontosabb eredményt, a bonyolultabb Timoshenko-féle egyenlet megoldása nyújtja. A nyíró rugalmassági modulusz szerepe annál fontosabb, minél kisebb az alátámasztási távolság vastagsághoz viszonyított értéke. A 2.4 ábráról jól leolvasható, hogy az eltérés nem túlzottan jelentős, ha a csomóponti távolság és a vastagság aránya nem kisebb, mint 15. Ezen érték alatt az Euler-egyenlet segítségével számított rugalmassági modulusz értéke exponenciálisan csökken, s így egyre pontatlanabbá válik (Divós 1999).



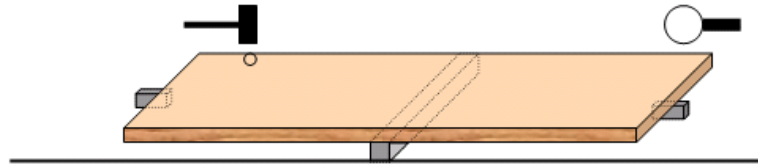
2.4 ábra: Az Euler és a Timoshenko módszerrel számított rugalmassági modulusz közötti különbség

Forrás: Divós 1999

2.2.3 Nyíró rugalmassági modulusz mérése torziós rezgéssel

A nyíró rugalmassági modulusz dinamikus meghatározására több módszer is alkalmazható. Az egyik a Timoshenko-egyenlet alkalmazásával történik, melyhez a hajlítórezgések, tömeg, és geometriai méretek szükségesek. A Timoshenko-egyenlet megoldása csak iterációs módszerrel lehetséges, mely művelet számítógéppel megoldható. Másik lehetséges megoldás a rudak torziós rezgés frekvenciájának mérése, melyből a G közvetlenül meghatározható (Hearmon 1966, Perstorper 1944), hasonlóan a csavarással történő statikus méréshez (Szalai 1994). A torziós mérés egy lehetséges összeállítását szemlélteti a 2.5 ábra. Egy viszonylag vékony középső alátámasztáson

egyensúlyoz a vizsgált faanyag. A faanyag két végén szükséges lehet két kisebb rugalmas alátámasztás alkalmazása, különösen akkor, ha hosszú próbatestről van szó.



2.5 ábra: A torziós rezgés méréséhez használatos egyik elrendezés

Forrás: Divós Ferenc

A fenti elrendezés esetén nem csak torziós rezgéseket, hanem hajlító rezgéseket is keltünk. Ezért ajánlatos előbb megbecsülni a várt torziós rezgés frekvenciáját. A nyíró rugalmassági modulus meghatározása a következő összefüggéssel történik:

$$G = \left(\frac{2Lf_n}{n} \right)^2 \frac{\rho I_p}{K_t} \quad [2.15]$$

- ahol: L : a rúd hossza [m],
 f_n : hajlító rezgés frekvenciája n - edik módusban [Hz],
 n : móduszsám,
 ρ : sűrűség [kg/m^3],
 I_p : a rúd poláris inerciája; $I_p = \frac{ab}{12}(a^2 + b^2)$ [m^4],
 K_t : a rúd keresztmetszeti tényezője; $K_t = c \cdot a \cdot b^3$, ($a \geq b$) [m^4],
 a, b : szélesség, vastagság [m],
 c : az 2.1 táblázatban megadott konstans.

2.1 táblázat: A c értéke az a/b arány függvényében

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| a/b | 1 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 10 | 20 |
| c | 0,141 | 0,172 | 0,196 | 0,214 | 0,229 | 0,249 | 0,263 | 0,281 | 0,291 | 0,312 | 0,323 |

Forrás: Divós 1999

2.2.4 Csillapítás mérése

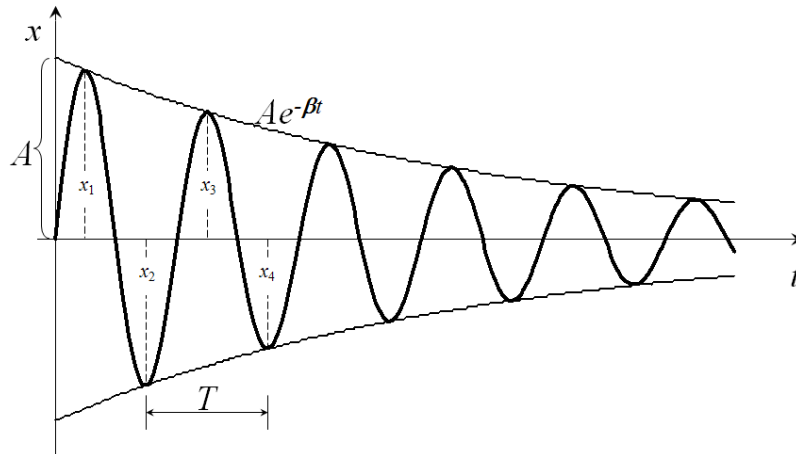
Valós esetben a lökéshullámok által keltet rezgés – akárcsak az összes többi rezgésfajta – nem pontosan harmonikus rezgés, mert az anyag belső súrlódása és egyéb tényezők hatására a rezgés amplitúdója csökken. Ezt a jelenséget csillapításnak nevezzük. A csillapításnak több fajtája van. Ezek közül a legegyszerűbb, amikor az amplitúdó mindig ugyanolyan arányban csökken az előzőhöz képest. Ebben az esetben a rezgést az alábbi egyenlet írja le (Divós 1999):

$$X(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha) \quad [2.16]$$

- ahol: X : a kitérés [m],
 A_0 : az amplitúdó értéke $t=0$ -ban [m],
 β : csillapítási tényező [1/s],

- ρ : sűrűség [kg/m³],
 t : az idő [s],
 ω : a rezgés körfrekvenciája ($2\pi f$) [1/s],
 α : a kezdőfázis.

Amint az a 2.6 ábrán látható a rezgési görbét egy exponenciális görbe burkolja, melynek egyenlete a fenti kifejezésben is szereplő $e^{-\beta t}$ függvény. Ebből a β értéke meghatározó a csillapítás mértékére nézve. A csillapítás jellemzésére gyakran használják a logaritmikus dekrementum $\Lambda = \beta T = \beta / f$ értéket (Divós 1999).



2.6 ábra: Időben csillapodó rezgés képe

Forrás: Divós 1999

A csillapító erők nem csak a rezgés amplitúdójára vannak hatással, hanem befolyásolják a periódusidőt és ezzel a frekvenciát is. Ezt a jelenséget a következő összefüggések írják le (Divós 1999):

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{\Lambda^2}{4\pi^2}}, \text{ vagy } f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \frac{\Lambda^2}{4\pi^2}}} \quad [2.17]$$

[2.18]

- ahol: T : csillapítatlan rezgés periódusideje [s],
 T_0 : az észlelt periódusidő [s],
 Λ : logaritmikus dekrementum,
 f : csillapítatlan rezgés frekvenciája [Hz],
 f_0 : az észlelt frekvencia [Hz].

A faanyag csillapítási tényezője nagyban függ a megfogási körülményektől. Például merev befogás esetén jelentősen növekszik, mivel a befogás nem engedi szabadon továbbterjedni a hullámokat.

3 SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

Az 1960-as évek elején amerikai kutatók felismerték, hogy a fa szilárdsága és rugalmassági modulusza között viszonylag szoros kapcsolat van. Ez jelentős eredménynek számított, hiszen lehetőséget biztosított a rugalmassági modulusz mérésén keresztül a szilárdság roncsolásmentes becslésére. A tudományos felismerést követően azonnal hozzáfogtak olyan gépek megalkotásához, melyek gyorsan képesek rugalmassági moduluszt mérni. Ezek a gépek görgősoron hajlítják meg az áthaladó faanyagot és így mérik a hajlító rugalmassági moduluszt. Ezeknek a gépeknek köszönhető, hogy az USA-ban már a 60-as évek derekán megjelent a piacon a szilárdság szerint osztályozott faanyag. A 70-es évek közepéig a faanyag felhasználók alapvetően nem értették, hogy mire jó az így osztályozott fűrészáru. Ezért átmenetileg felhalmozódtak eladhatatlan készletek nagy szilárdságú fából, amit kényszerűségből kiárusítottak. A felhasználók ekkor tapasztalták meg a géppel válogatott faanyag előnyeit. Ettől kezdve faszerkezetekbe csak géppel osztályozott anyagot építenek be. Az így osztályozott faanyagon, minden egyes darabon bélyegző tanúskodik a faanyag szilárdságáról és a fűrészüzemről.

A faanyagok osztályozása történhet manuálisan, vizuális úton, és géppel. Az osztályozás során rendszerint olyan tulajdonságokat figyelünk meg, amelyek közvetlenül befolyásolják a faanyag szilárdságát, vagyis az ezen tulajdonságok szerint történő besorolás közvetlenül értelmezhető szilárdsági besorolásként is. Gépi osztályozás esetén általában a rugalmassági modulusz ez a tulajdonság, vizuális osztályozás esetén általában fahibák, göcsök, évgyűrűszélesség, rostlefutás alapján történik a besorolás. A szilárdsági osztályozás, kategorizálás jelentős mértékben megkönnyíti, illetve segítő szándékkal behatárolja a faszerkezet tervezést. Ezáltal könnyebben választja ki a tervező a célra szükséges faanyagot, illetve keresztmetszeteket. Az egyes faanyagosztályokhoz tartozó szilárdsági- és rugalmassági tulajdonságok ismeretében könnyedén kiválasztható a szerkezethez leginkább szükséges faanyag, illetve azon belül a szilárdsági kategória. Természetesen nem minden esetben a szilárdság az egyetlen tulajdonság, amit figyelembe vesz a szerkezettervező. Fontos lehet a faanyag megjelenése, tartóssága, várható élettartama, faanyagvédőszerrel, felületkezelő anyagokkal való kezelhetősége, ragaszthatósága, feldolgozhatóság; ezek a tulajdonságok a szerkezet bekerülési költségét is alapvetően meghatározzák [1].

Sajnálatos módon Magyarországon nem működik egyetlen fűrészüzemben sem szilárdsági osztályozó berendezés, azonban az EU egységesített szabványosítása miatt vélhetően egyre több helyen megjelenhet a fűrészáru-osztályozás. Jelenleg is vannak olyan, pl. faházakat gyártó cégek, amelyek Ausztriából vásárolnak minősített fűrészárut, mivel a hazai piacon nem kapható.

A fűrészáru osztályozás egy olyan kitörési pont lehetne a fűrészüzemeknek – nem csak a hazai, hanem a külföldi piacon is –, amellyel a kínált termékeik számát növelni tudnák. Az osztályozott, jó minőségű faanyag nagyobb haszonnal értékesíthető, amely

talán a legfontosabb a cégek számára. Ezáltal megnyílna az európai piac is a fűrészüzemek előtt.

A következő néhány pontban bemutatom a jelenlegi gyakorlatban elterjedt szilárdsági osztályozásokat. Amint korábban említettem ez sajnos nem a magyar, hanem főleg az Észak- ill. Nyugat-Európára és Amerikára vonatkozó gyakorlat.

A fűrészáru osztályozáson belül két alapvető módszert különböztetünk meg. Az egyik a **vizuális**, a másik a **gépi** szilárdsági osztályozás.

3.1 Vizuális szilárdsági osztályozás

A vizuális értékelés a faanyagok szilárdsági tulajdonságai és a különböző jellemzők között meglévő összefüggéseken alapszik. A legfontosabb ilyen tényezők: göcsösség, ferdeszálúság, csavart növés, repedezettség, gyantatáskák jelenléte, alaki hibák, évgyűrűszélesség, fagömbösség, keresztmetszeti hiányok, rovarrágás, gombakárosítás.

A vizuális értékelés gyakorlat számára talán legelterjedtebb módja a vizuális fűrészáru osztályozás. Magyarországon a vizuális fűrészáru osztályozásra vonatkozó előírásokat az MSZ 10144-es szabvány tartalmazza. Az itt meghatározott szilárdsági osztályok alapján történik a faszerkezetek méretezése az MSZ EN 15025-ös szabvány szerint.

A vizuális szilárdsági osztályozás európai követelményeit az MSZ EN 14081-es szabványsorozat határozza meg. Ez a szabvány az MSZ EN 338-nak megfelelően két csoportra osztja a fafajokat, ún. C csoport, amelybe a fenyők és a nyárok tartoznak, valamint a D csoport, amelybe a lombos fafajok, majd ezeken belül határoz meg különböző szilárdsági osztályokat. Az egyes osztályokba sorolás kritériumait nem írja le, mivel minden országnak megvannak a saját alapanyagai és minősítési gyakorlata, csupán azt határozza meg, hogy az egyes országok osztályozási szabványaiban milyen tulajdonságok alapján történjen a besorolás. Így megmarad minden országnak a sajátos besorolási rendszere. Az MSZ EN 1912 szabvány pedig leírja, hogy a különféle nemzeti szabványok szerint osztályozott anyagokat melyik C illetve D kategóriába lehet besorolni az MSZ EN 338 szerint [2]. Magyarországon jelenleg nincs az MSZ EN 338-al harmonizált nemzeti osztályozási szabvány. Ez azt jelenti, hogy Magyarországon jelenleg nem lehet vizuálisan az MSZ EN 338-nak megfelelő szilárdsági osztályokba sorolni a faanyagot.

A faszerkezetek tervezésére vonatkozó nemzeti szabványt (MSZ 15025) 2010. március 31-én visszavonták, helyette az Eurocode 5 szabvány van érvényben.

A vizuális szilárdsági osztályozás alkalmazása meglehetősen bonyolult, fokozott szakmai felkészültséget és nagy gyakorlatot igényel, valamint hazánkban, ahogy azt már említettem nem áll rendelkezésünkre a hazai (MSZ 10144) és európai (MSZ EN 338) szabvány közötti megfeleltetés, ami szintén megnehezíti a vizuális osztályozást.

3.2 Gépi szilárdsági osztályozás

A gépi szilárdsági osztályozó berendezések között több kifejlesztett berendezést is alkalmaznak. Ezeket működési elveik alapján csoportosítva mutatom be. A gépi

osztályozás követelményeit szintén az MSZ EN 14081-es szabványsorozat írja le. A szabványsorozat 1. része tartalmazza az általános követelményeket. A 2. rész írja le az első típusvizsgálat követelményeit. A 3. rész az üzemi gyártásellenőrzés követelményeit tartalmazza. A 4. rész tartalmazza a gyakorlatban is használható berendezések beállítási értékeit, különböző szilárdsági osztályok kombinációira, és bizonyos termőhelyről származó fafajokra vonatkozóan (MSZ EN 14081-1,2,3,4).

3.2.1 Statikus rugalmassági modulusz mérése

Ez az eljárás volt az első, ami a gyakorlatban széles körben elterjedt. Alapja a hajlító rugalmassági modulusz és az anyag hajlítószilárdsága közti jó korreláció ($R^2=0.675$ Divos 2011). Ez a hajlító rugalmassági modulusz mért értékei alapján szilárdsági kategóriákba való besorolást tesz lehetővé. Két alapvető eljárás van, amely a hajlító rugalmassági modulusz folyamatos mérésén alapul:

- Egy adott, állandó erőhatás következtében fellépő lehajlási adatokat mérik
- Egy adott lehajlás előidézéséhez szükséges terhelő erőt mérik

A mérés elméleti alapja

Ha egy rudat F erővel meghúzzunk vagy összenyomunk, a rúd a keresztmetszete függvényében alakváltozást szenved. Az adott mennyiségek közötti összefüggés alapján meghatározhatjuk a rugalmassági modulusz értékét a következőképpen:

$$E = \frac{F}{\varepsilon \cdot A} \quad [3.1]$$

- ahol: E : a rugalmassági modulus értéke [N/mm^2],
 F : a rúdra ható erő [N],
 A : a rúd keresztmetszete [mm^2],
 ε : az F erő hatására bekövetkező relatív hosszváltozás.

Abban az esetben, ha egy rudat a két vége közelében alátámasztunk és a közepén adott nagyságú F erővel megnyomjuk, a rúd lehajlik. A hajlító rugalmassági modulus meghatározható a következő összefüggésekkel:

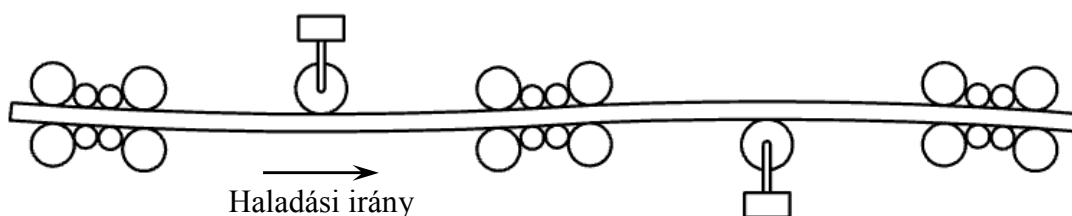
$$E = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot l^3}{a \cdot I} \quad [3.2]$$

- ahol: E : a rugalmassági modulus értéke [N/mm^2],
 F : a rúdra ható erő [N],
 l : az alátámasztási köz [mm],
 a : az F erő hatására a rúd lehajlása a középpontban [mm],
 I : a keresztmetszet másodrendű tehetetlenségi nyomatéka [mm^4].

Mivel az osztályozó gépek a lehajlást (ε) vagy az adott lehajláshoz szükséges erőt (F) mérik, a többi változó a gépbeállításból (l) vagy az osztályozni kívánt fűrészáru méreteiből (I) adódik, a rugalmassági modulusz a [3.2] képlet segítségével meghatározható.

Gyakorlati alkalmazás

Mára már a hajlító rugalmassági modulusz meghatározására különböző konstrukciókat dolgoztak ki, amelyeknek eltérő a pontossága. Az előtolási sebesség géptípustól függően 50 és 300 m/perc között változik. Az első berendezéseket 1963-ban Észak-Amerikában alkalmazták. Ilyen rendszer például az 3.1 ábrán bemutatott CLT folyamatos faanyagvizsgáló gép (Metriguard Inc., USA).



3.1 ábra: Folyamatos anyagvizsgáló berendezés működési vázlat

Forrás: www.hsz.bme.hu¹ alapján saját szerkesztés

További osztályozó gépek:

- COMPUTERMATIC (Anglia),
- RAUTE TIMGRADER (Finnország),
- COOK BOLINDERS (Finnország),
- STRESS-O-MATIC (USA).

A statikus rugalmassági modulusz meghatározásán alapuló görgős rendszerek előnyei, hogy nagy sebességgel osztályoznak, a technológiába jól beépíthetőek, azonban meg kell említeni, hogy ezek a berendezések viszonylag drágák, a fűrészáru végei nem minősíthetők vele, valamint egy adott vastagságnál (70-80 mm) nagyobb keresztmetszetre nem alkalmazhatóak és igen nagy a karbantartásigényük is.

3.2.2 Dinamikus rugalmassági modulusz mérése

A dinamikus rugalmassági modulusz meghatározására két elterjedt módszer van:

- hajlítórezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz,
- longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz.

Mindkét rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz jó korrelációt mutat a statikus rugalmassági moduluszsal. Hajlító rezgésnél ez az érték: $R^2=0,968$, míg longitudinális rezgésnél $R^2=0,927$ (Divos 2011).

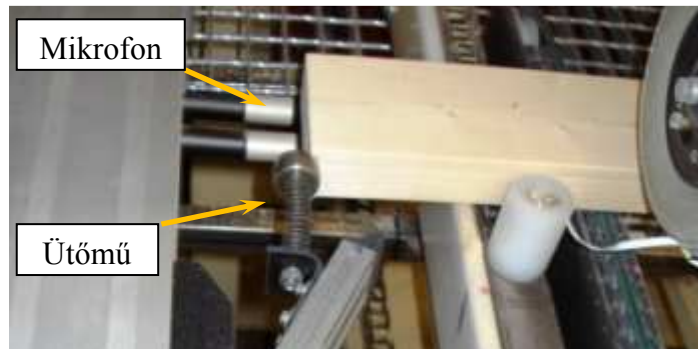
A mérés elméleti alapja

A mérések elméleti alapjai analógiát mutatnak a már korábban tárgyalt 2.2.1 és 2.2.2-es fejezetekben tárgyaltakkal.

Egy tipikus osztályozó berendezés működése a következő. A faanyag elhalad egy mikrofon előtt, ahol a bütüre történő koppintás után a mikrofon méri a fűrészáru

¹ A forrás pontos meghatározása az irodalomjegyzékben szerepel.

sajátfrekvenciáját, majd ebből hangsebességet számol (lásd: [2.10]-es *egyenlet*). Mivel a dinamikus rugalmassági modulusz meghatározásához a sűrűség is elengedhetetlen paraméter (lásd: [2.9]-es *egyenlet*), ezért a sűrűséget vagy különböző módszerekkel mérik, vagy egy az adott fafajra és termőhelyre meghatározott átlag sűrűséggel számolnak. A meglévő adatokból a dinamikus rugalmassági modulusz meghatározható. Ezután a gép a rugalmassági modulusz alapján a megfelelő szilárdsági osztályba sorolja a fűrészárut. A 3.2 ábrán a svéd Dynalyse AB által gyártott műszer mikrofonja és ütőműve látható.



3.2 ábra: A Dynalyse AB Dynagrader nevű berendezése működés közben
Forrás: www.woodguide.nl²

Létezik olyan megoldás is, ahol a frekvenciát nem egy mikrofon rögzíti, hanem pl. lézerral mérik. A koppintás helyett egyes cégek elektromágneses lökéshullámot alkalmaznak.

Gyakorlati alkalmazás

A hajlító rezgéssel működő berendezéseket a gyakorlat nem igazán alkalmazza a nagyobb mérési idő miatt. Rengeteg osztályozó gépet alakítottak ki főként a longitudinális rezgésből meghatározott rugalmassági modulusz mérésén alapuló eljárásra. Előnyük, hogy a technológiába jól beépíthetőek, teljes hosszban történik a mérés és minden keresztmetszet osztályozható velük, valamint kellően gyorsak. Egyes gépek 2-300 db/perc-es előtolással is működnek. Az ilyen nagy előtolással működő berendezések általában teljesen automatizáltak, amely a költségeket nagyban növeli. A nagy kapacitású berendezések mellett vannak kisebb áteresztő képességű műszerek, melyek néhány db/perc-es előtolással működnek, ezek ára is jóval alacsonyabb.

Néhány cég, amely a gyakorlat számára is elérhető gépeket kínál:

Longitudinális rezgést alkalmazó eljárások:

- Dynalyse AB – Precigrader, Dynagrade (Svédország),
- Brookhuis Micro-Electronics BV - Timber Grader MTG (Hollandia),
- MiCROTEC GmbH/srl – VISCAN (Olaszország).

² A forrás pontos meghatározása az irodalomjegyzékben szerepel.

A hajlító rezgéseket kevésbé alkalmazzák, mivel a hosszú rudak hajlító sajátfrekvenciája alacsony, így megnöveli a mérés idejét, valamint a technológiába való beépíthetősége is bonyolultabb.

Hajlító rezgést alkalmazó eljárások:

- Metriguard Inc. - Model 340 Transverse Vibration E-Computer (USA).

3.2.3 Ultrahangos eljárás

Az ultrahang használata sok tekintetben megegyezik a hallható hangéval. Szilárd anyagban ultrahang segítségével is kelthetünk longitudinális és transzverzális hullámokat, bár ezek közül többnyire csak a longitudinális hullámokat használják a gyakorlatban. Az ultrahangnak is van frekvenciája, hullámhossza, amplitúdója és sebessége. Valódi (belső súrlódással rendelkező) anyagok esetében itt is fellép a megfelelő csillapítás.

Fontos különbséget jelent a hallható rezgésekkel szemben az, hogy az ultrahangos vizsgálatoknál minden esetben ún. kényszerrezgéseket alkalmaznak. Ez azt jelenti, hogy ebben az esetben nem hagyják az anyagot saját frekvenciájával rezegni (miképpen a longitudinális, vagy transzverzális sajátrezgések esetében), hanem valamilyen állandó, periodikus rezgést fejtenek ki rá. Ezt például úgy lehetne modellezni, mintha az anyag egyik végét valamilyen, oszcilláló mozgást végző felülethez (pl. egy hangszóró membránjához) ragasztanánk. Ha ezek után ez a felület rezgésbe jön, rezgésbe hozza a mereven hozzáragasztott anyagrészt. Mivel az anyag nem teljesen merev, hanem rugalmas, a vibráció nem terjed azonnal tovább a szomszédos anyagrészekbe, ún. *fáziskéséssel* követi az előző sík rezgését. Ha az oszcillációt fenntartjuk, a rezgés szinusz hullámok formájában terjed tovább az anyagban. Ekkor elmondható, hogy ezeknek a hullámoknak a frekvenciája nem függ az anyagtól, állandó marad bármilyen közegben. A hullámhossz fordítottan arányos a frekvenciával, nagy frekvenciához kis hullámhossz tartozik, és viszont. A kettő közötti arányossági tényező a **hangsebesség**, mely nem függ a frekvenciától, *a közegre jellemző állandó* (Divós 1999).

A kényszerrezgésekkel végzett anyagvizsgálatok során kétféle időtartamú hullámmal dolgozhatunk: *tartós* és *impulzushangokkal*.

A hang viselkedése határfelületen (detektorfejek akusztikus csatolása)

A hang más közegbe való átviteléhez határfelületeket kell leküzdeni. Amikor egy hanghullám merőlegesen érkezik két különböző anyag között lévő határfelületre, akkor nem csak reflexió, hanem a másik közegbe való behatolás is bekövetkezik. Az átbocsátó és visszavert energia nagysága mindkét anyag hanghullám-ellenállásától az ún. akusztikai keménységtől függ. Az akusztikai keménység a következőképpen számítható:

$$Z = c \cdot \rho \quad [3.3]$$

ahol: c : a hullám terjedési sebessége [m/s],
 ρ : sűrűség [kg/m³].

A két különböző közeg határfelületén visszavert és átteresztett hangnyomás részarányait a következő képletekkel számíthatjuk ki:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \Leftrightarrow \text{visszaverődés}; \quad D = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \Leftrightarrow \text{átbocsátás} \quad [3.4]$$

Ha a két közeg akusztikai keménység értéke megegyező, akkor reflexió nem következik be ($R=0$), és az átteresztés maximális ($D=1$).

Az ultrahangos faanyagvizsgálatok tekintetében legnagyobb jelentősége a fa-levegő határrétegen jelentkező visszaverődésnek van.

Például egy átlagos fenyő próbatest esetében ($c = 5000 \text{ m/s}$; $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$) az akusztikai keménység:

$$Z_{FA} = 5000 \cdot 500 = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

Ugyanez levegő esetében ($c = 330 \text{ m/s}$; $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$):

$$Z_{LEV} = 330 \cdot 1,3 = 429 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

A fenti képlet szerint az átteresztés tehát:

$$D = \frac{2 \cdot Z_{LEV}}{Z_{LEV} + Z_{FA}} = \frac{2 \cdot 429}{2,5 \cdot 10^6 + 429} = 3,43 \cdot 10^{-4}$$

Amint látható, az átteresztés igen kicsi, ezért faanyagok vizsgálata esetében nagyon gondosan kell ügyelni arra, hogy a mérőfejek és az anyag közötti kapcsolat (csatolás) szoros legyen, azaz ne lehessen légrés a kettő között. A fémiparban a detektorfejek akusztikus csatolására vizet, olajokat ill. zsírokat alkalmaznak. A fa viszont porózus anyag és emiatt a nedvesítő anyagokat magába szívja, ezért nehéz kiválasztani a megfelelő lehetőséget az ilyen jellegű vizsgálatokhoz. Ennek ellenére az USA-ban Kent McDonald a Forest Product Laboratoryban vizes csatolású ultrahangos fűrészáru vizsgálatokkal foglalkozott.

A faiparban az ultrahang terjedési idejét szinte kizárólag hangsebesség mérésre használják, és mindig impulzushangokkal dolgoznak. Faanyagok esetében minden esetben longitudinális lökéshullámokkal dolgozunk. Az ultrahangos vizsgálatok nem sokban térnek el a hallható hangos (sajátrezgéses) longitudinális vizsgálatoktól, így az ott leírtak jórészt alkalmazhatók az ultrahangos vizsgálatok esetében is. Az ultrahang alkalmazásával kapcsolatban azonban meg kell említeni néhány sajátosságot:

- A faanyag terjedési időn alapuló ultrahangos vizsgálatánál rendszerint meglehetősen alacsony frekvenciát alkalmaznak. J. és H. Krautkramer (1990) 250-500 kHz-es frekvenciát javasolnak bükk próbatestek átsugárzással történő méréséhez.

- A faanyag mikrostruktúrájának következtében a csillapítás minden esetben igen jelentős, tehát ultrahanggal csak viszonylag kisméretű próbatesteket tudunk vizsgálni.
- Csillapítás tekintetében jelentős eltérések mutatkoznak az egyes anatómiai irányok esetében. A csillapító hatás rostirányban a legkisebb, így ebben az irányban viszonylag hosszabb próbatestek is vizsgálhatók.

Gyakorlati alkalmazás

Ultrahanggal történő fűrészáru osztályozással a CBS-CBT francia-svájci érdekeltségű cégcsoport foglalkozik. Az általuk forgalmazott Triomatic névre keresztelt osztályozó berendezés – melynek elődje a Sylvatest Duo, kifejlesztője Jean-Luc Sandoz – 22 kHz-es frekvencián működik. A mérési idő jóval magasabb (4s) mint a longitudinális rezgéssel működő berendezéseknél, mivel itt a detektorokat a bütübe kell nyomni a jó akusztikai csatolás miatt. A 3.3 ábrán a Triomatic ultrahangos osztályozó berendezés látható működés közben (Sandoz, Benoit 2007).



3.3 ábra: Triomatic ultrahangos osztályozó berendezése működés közben

Forrás: Sandoz, Benoit 2007

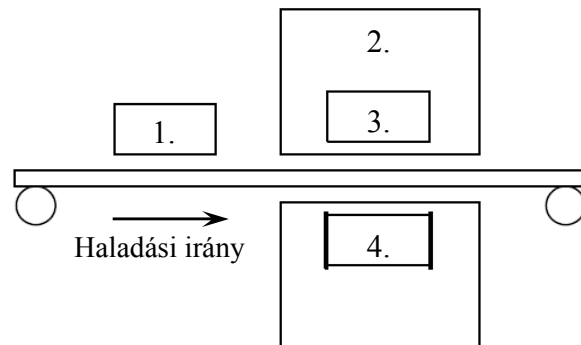
Triomatic elődje a Sylvatest Duo melynek kifejlesztője Jean-Luc Sandoz.

3.2.4 Nukleáris módszerek, izotópos eljárások

Az eljárás a sűrűség és a hajlítószilárdság kapcsolatán alapszik. A hibamentes faanyagok hajlítószilárdságával egyenes arányban változó sűrűség meglehetősen pontos becslést biztosít a hajlítószilárdságra. A sűrűség és a hajlítószilárdság között viszonylag jó a kapcsolat. A sűrűség növekedésével a hajlítószilárdság is nő. Mivel a sűrűség befolyásolja a rugalmassági moduluszt és a rugalmassági modulusz összefügg a hajlítószilárdsággal, ebből következik, hogy a sűrűség és a hajlító szilárdság között is jó kapcsolatnak kell lennie. Ez a gondolatsor természetesen a másik oldalról való megközelítéssel is érvényes. A sűrűség mérésén alapuló eljárásoknál a faanyag a sugárforrás és a sugárdetektor között halad át. A sugárzás áthaladásának mértékéből számolható a sűrűség, amelyből következtetnek a szilárdsági tulajdonságokra (Divós 1999).

A mérést jellemzően röntgensugárzással vagy γ sugárzással végzik. A sugárzásos eljárás alapján működő berendezések nagyon gyorsak, teljes hosszban és minden

keresztmetszetben mérnek, valamint az egyéb fahibák nagyon jól meghatározhatóak velük, azonban igen költségesek. A mérés sematikus elrendezése látható a 3.4 ábrán, mely az ISO-GRECOMAT nevű műszert szemlélteti. A műszer a sűrűség mérésén kívül automatikus nedvességmérést valamint göcsmeghatározást is végez egy időben (Wittmann 2000).

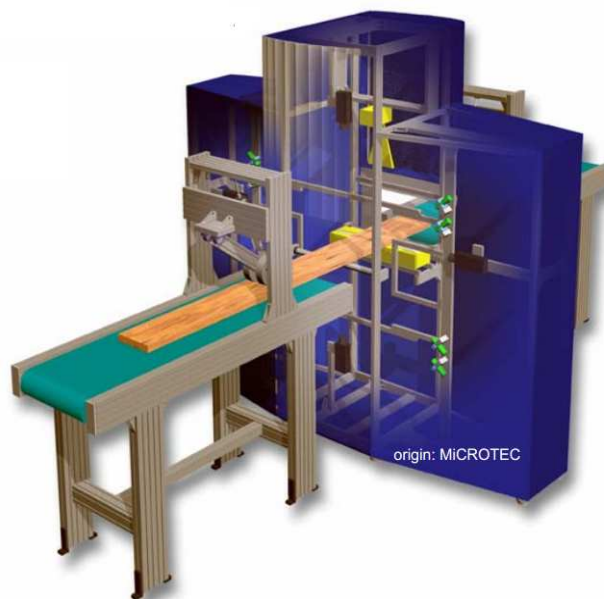


3.4 ábra: ISO-GRECOMAT elvi sémája

1. automatikus nedvességmérés; 2. göcs-és sűrűségmérés; 3. gamma-sugárforrás; 4. ionizációs kamra

Forrás: Wittmann 2000 alapján saját szerkesztés

Költségességük ellenére vannak olyan fűrészáru osztályozó berendezések, melyek ilyen eljárással működnek. Ilyen berendezést mutat a 3.5 ábra.



3.5 ábra: A Microtec által gyártott Goldeneye nevű berendezése

Forrás: www.coste53.net³

Gamma-sugárzással történő sűrűségmérést alkalmaznak pl. a Németországban bevezetett ISO-GRECOMAT, valamint a Finnországban bevezetett FINNOGRADER nevű berendezésekkel.

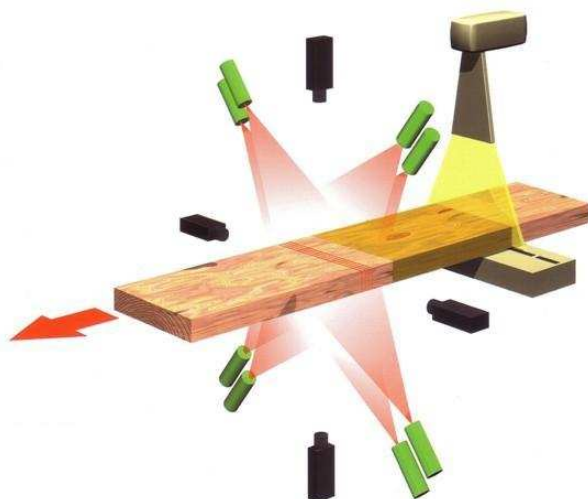
³ A forrás pontos meghatározása az irodalomjegyzékben szerepel.

További géptípusok:

- Euro-GreComat (Németország),
- X-Ray Lumber Gauge - Newnes Machine Ltd (USA).

3.2.5 Optikai eljárás

Már a kereskedelmi forgalomban is beszerezhetők a fűrészáru vizuális osztályozását üzemi sebességgel elvégző képfeldolgozó számítógépes rendszerek. A faanyagot négy oldalról négy kamera figyeli és egy nagy teljesítményű számítógép a képeket digitalizálja és értékeli. Vannak olyan kamerás rendszerek, amelyekben lézertífennel (több egymás mellett elhelyezkedő lézerfolttal) világítják meg a fűrészáru felületét, majd a lézerfoltok változásából következtetnek a göcsök jelenlétére, a ferdeszálúságára, vagy egyéb fahibára. Lézerrel való megvilágítással a vetemedések, a csavarodottság is felismerhető. A kamerás és a már korábban bemutatott sugárzásos rendszereket együtt is alkalmazzák. Egy ilyen hibrid rendszert mutat a 3.6 ábra.

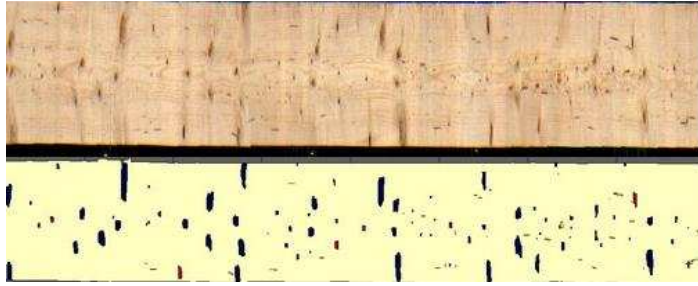


3.6 ábra: Lézeres optikai rendszer röntgen sugárzással kiegészítve

Forrás: <http://www.microtec.eu>⁴

Ezen kívül a kamerás rendszerek alkalmasak szinte minden, a felületen érzékelhető fahiba vagy elváltozás azonosítására (pl. göcsök, repedések, korhadások, gombakárosítások). A 3.7 ábrán egy optikai rendszer által készített kép látható.

⁴ A forrás pontos meghatározása az irodalomjegyzékben szerepel.



3.7 ábra: Eredeti fűrészáru felülete valamint az optikai rendszer által készített kép

Forrás: <http://www.microtec.eu>⁴ alapján saját szerkesztés

Optikai rendszert forgalmaz pl. az olaszországi MICROTEC. Az ilyen rendszerek a technológiába jól beépíthetőek, gyorsak, azonban költségességük miatt nem annyira elterjedtek mint a „rezgéses” műszerek.

4 A VIZSGÁLAT ALAPANYAGAI, ESZKÖZEI, MÓDSZEREI, LEÍRÁSA, MÉRÉSEK HIBÁI

Jelen fejezetben bemutatom az általam végzett mérésekhez használt faanyagokat, a méréshez használt eszközöket, valamint a mérések leírásáról adok összefoglalót. Ezen kívül a mérőeszközök és a mérések hibáit is részletezem.

4.1 Vizsgált faanyag

Méréseim során összesen 1343 db valós méretű pallón illetve gerendán végeztem méréseket. Különböző fafajú és növekedési területről származó, többféle keresztmetszetű és eltérő szilárdsági osztályba tartozó faanyagot vizsgáltam. A 4.1 táblázat tartalmazza a próbatestek eloszlását.

4.1 táblázat: A mért faanyagok paraméterei és próbatest számok

| | Keresztmetszet (cm) | Hossz [m] | Fafaj | Növekedési terület | Próbatest szám [db] | |
|------------------|---------------------|-----------|-------------|--------------------|---------------------|-------------|
| | | | | | Roncsolásmentes | Roncsolásos |
| 1. | 5x10 | 2 | lucfenyő | Szlovákia | 432 | 432 |
| 2. | 7,5x15 | 3 | lucfenyő | Szlovákia | 12 | 12 |
| 3. | 5x10 | 2 | erdei fenyő | Szlovákia | 24 | 24 |
| 4. | 5x10 | 2 | vörösfenyő | Szlovákia | 143 | 143 |
| 5. | 5x10 | 4 | vörösfenyő | Szlovákia | 41 | 0 |
| 6. | 5x10 | 4 | vörösfenyő | Szlovákia | 51 | 51 |
| 7. | 5x10 | 2 | vörösfenyő | Oroszország | 432 | 432 |
| 8. | 7,5x15 | 6 | vörösfenyő | Szlovákia | 50 | 0 |
| 9. | 7,5x15 | 3 | vörösfenyő | Szlovákia | 100 | 100 |
| 10. | 10x10 | 4 | vörösfenyő | Szlovákia | 58 | 58 |
| Összesen: | | | | | 1343 | 1252 |

Forrás: saját szerkesztés

Az 1343 mérésből 1252 próbatesten végeztem statikus méréseket. A különbség abból adódik, hogy a táblázat 5. illetve 8. sorában szereplő fűrészárúk 4 illetve 6 m-esek voltak. Ezeket először 4 illetve 6 méteres hosszban mértem roncsolásmentesen, majd kétfelé vágtam; ezután ismét elvégeztem a roncsolásmentes méréseket, majd következett a statikus mérés. Erre a mérethatás vizsgálata miatt volt szükség, melyet az 5. fejezetben mutatok be részletesen. Az alapanyag minden esetben fűrészelt palló illetve gerenda volt. A 4.1 ábrán a mérésre váró faanyagok egy része látható.

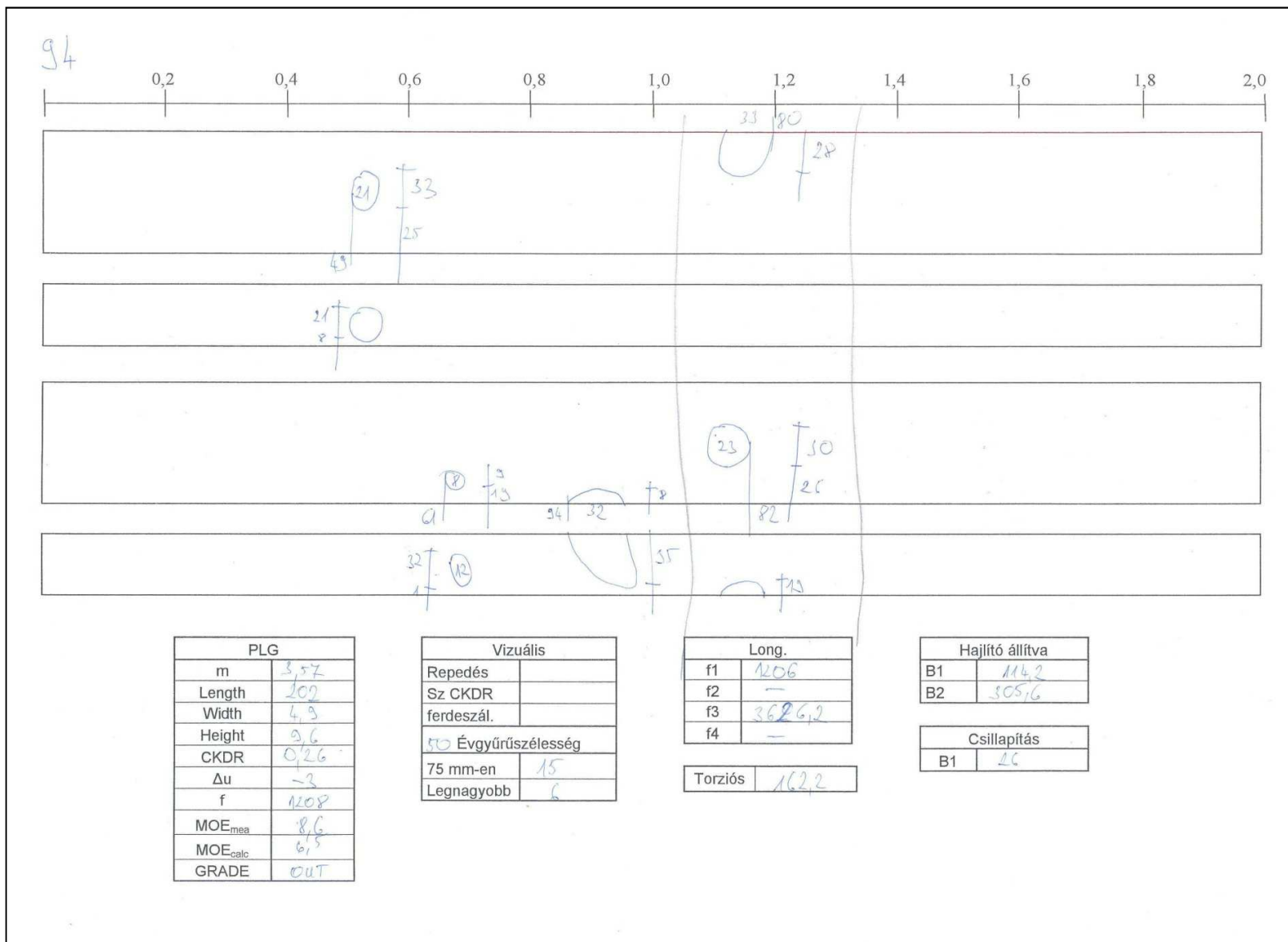


4.1 ábra: Mérésre váró rakatok egy része

Forrás: saját szerkesztés

4.2 Vizuális felmérés

Mielőtt akár egy műszeres mérést is elvégeztem volna, először vizuálisan felmértem az összes pallót illetve gerendát. A méréseket a 4.2 ábrán látható osztályozólapon rögzítettem. Az osztályozólapon egy próbatest kiterített felülete látható, amelyre berajzoltam és beméreteztem az elhelyezkedő göcsöket. Az osztályozólap alján lévő kis táblázatokban a további számított illetve mért adatokat rögzítettem.



4.2 ábra: Egy palló felmérése osztályozólapon

Forrás: saját szerkesztés

Minden fűrészáruról összesen 6 képet készítettem. 3 képet a később fellépő esetleges problémák ellenőrzésére, törésvizsgálat előtt. Miután megtörtént a statikus vizsgálat szintén 3 képet készítettem a törési kép elemzése céljából. A 4.3 ábrán egy próbatestről készült képek láthatóak.



4.3 ábra: Egy próbatestről készült képek. (fent: törés előtt; lent: törés után)

Forrás: saját szerkesztés

Vizuálisan a következő néhány pontban bemutatott adatokat rögzítettem.

4.2.1 Göcsök felmérése

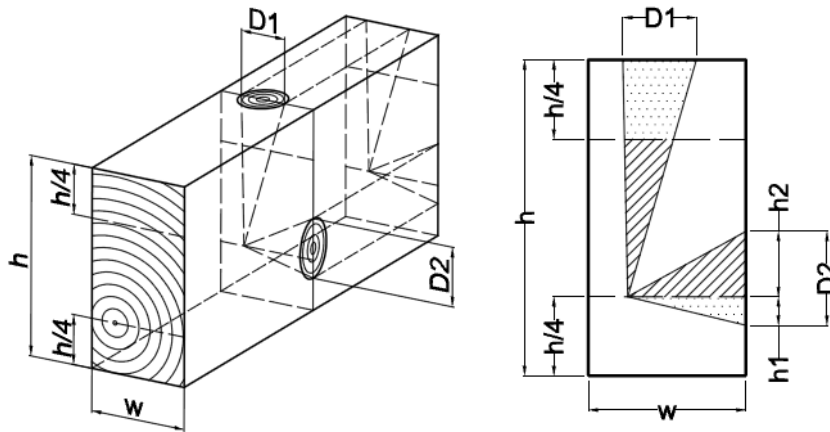
Berajzoltam a pallón elhelyezkedő összes göcsöt (4.2 ábra), majd meghatároztam a következő göcsparamétereket, melyeket az alábbiakban mutatok be.

Teljes és szegély göcsterült arány (GTA, SZGTA)

A teljes és szegély göcsterület arány az MSZ 10144-es szabványban meghatározott paraméter. A szerkezeti fűrészáru vizuális szilárdsági osztályozásánál alkalmazandó egyik paraméter. A göcsterület arányok meghatározása manuálisan kissé nehézkes, munkaigényes feladat. Ennek ellenére azért határoztam meg ezeket a paramétereket 420 db próbatesten, mivel ha arra az eredményre jutok, hogy felhasználható a statikus rugalmassági modulusz vagy a hajlítószilárdság becsléséhez, akkor az osztályozó gép algoritmusába is be tudjam építeni. Ez akkor lenne igazán jól használható, ha a göcsterület arányokat automatizáltan lehetne meghatározni, pl. egy kamerás vagy lézeres berendezéssel, majd a szoftver automatikusan kiszámolná és beillesztené az osztályozó gép algoritmusába. Meghatározásuk az alábbiak szerint történik:

A teljes GTA a keresztmetszetre vetített göcs, illetve göcsök összterületének és a teljes keresztmetszeti területnek az aránya. A szegély GTA a keresztmetszet $\frac{1}{4}$ magasságnyi sávjába eső göcsök területének és a szegély területének aránya (MSZ 10144).

Meghatározását a 4.4 ábra szemlélteti.



4.4 ábra: A GTA és SZGTA meghatározása

Forrás: saját szerkesztés

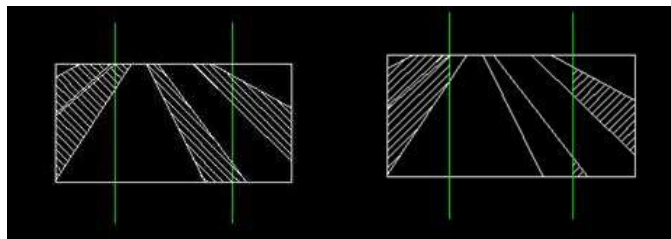
Számítása:

$$GTA = \frac{T_{göcs}}{T_{Km}}, \text{ és } SZGTA = \frac{T_{göcs}}{T_{Km}/2} \quad [4.1]$$

[4.2]

ahol: $T_{göcs}$: göcsterület (teljes vagy szegély) [mm^2],
 T_{Km} : teljes keresztmetszet területe [mm^2].

A göcsterületek meghatározásához AutoCad-et használtam. Az osztályozólapon felmért adatok alapján megrajoltam a göcsök elhelyezkedését, majd kiszámoltam a területeket. A 4.5 ábra egy, az AutoCad-del készített GTA és SZGTA rajzot mutat. A sraffozott részek a meghatározott göcsterületeket mutatják.



4.5 ábra: A GTA és SZGTA területeinek meghatározása AutoCad-del

Forrás: saját szerkesztés

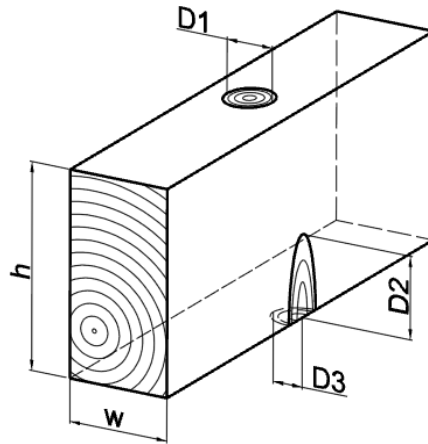
Koncentrált göcsátmérő arány (CKDR)

Az elnevezés a Concentrated Knot Diameter Ratio-ból adódik, ami magyarul „koncentrált göcsátmérő arányt” jelent. Ezt a paramétert a japán szabvány alkalmazza göcsparaméterként (JAS 1991).

A göcsátmérő (KD - Knot Diameter), a fűrészáru két párhuzamos éle között található göcs nagysága ($D1$, $D2$, $D3$). Amennyiben a göcs kisebbik átmérője 2,5-szer kisebb a nagyobb átmérőjénél, abban az esetben ez az érték megfelelendő. A göcsátmérő arány (KDR - Knot Diameter Ratio) az az érték, amelyet akkor kapunk, ha a

göcsátmérőt (KD) osztjuk a kerülettel. Amennyiben ezeket az értékeket (KDR) összegezzük egy adott felületre vonatkozóan, megkapjuk a koncentrált göcsátmérő arányt (CKDR).

Meghatározását a 4.6 ábra szemlélteti.



4.6 ábra: A CKDR meghatározása

Forrás: saját szerkesztés

Számítása:

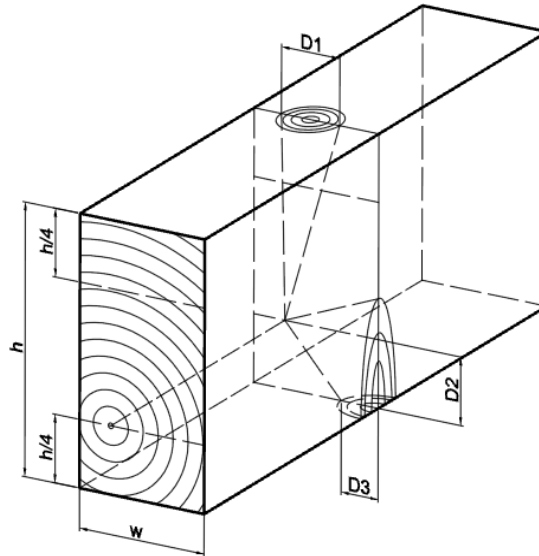
$$CKDR = \frac{D1 + D2 + D3}{2 \cdot (h + w)} \quad [4.3]$$

ahol: $D1, D2, D3$: a göcsátmérők [mm],
 h : fűrészáru szélessége [mm],
 w : fűrészáru vastagsága [mm].

Szegély koncentrált göcsátmérő arány (SZCKDR)

Ezt a paramétert a SZGTA analógiájára vezettem be. A SZCKDR esetében a keresztmetszet $\frac{1}{4}$ magasságyi sávjába eső felületen elhelyezkedő göcsök átmérőjét osztottam a keresztmetszet $\frac{1}{4}$ magasságyi sávjába eső területével [4.4].

A SZCKDR meghatározását a 4.7 ábra mutatja.



4.7 ábra: A SZCKDR meghatározása
Forrás: saját szerkesztés

Számítása:

$$SZCKDR = \frac{D1 + D2 + D3}{h + 2w} \quad [4.4]$$

- ahol: $D1, D2, D3$: a göcsátmérők [mm]
 h : fűrészáru szélessége [mm]
 w : fűrészáru vastagsága [mm]

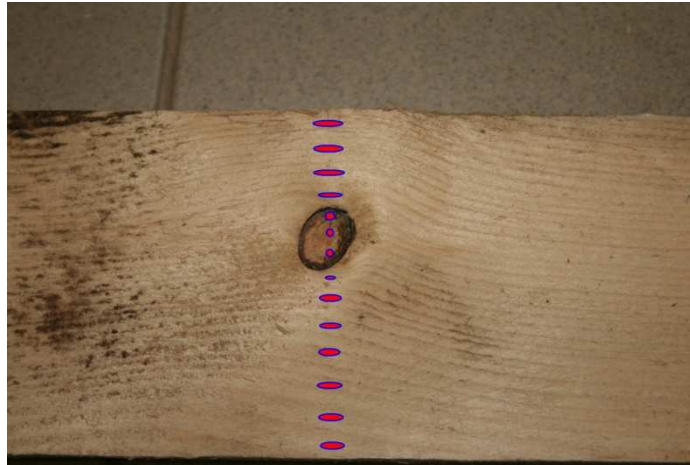
Mindegyik göcsparamétert úgy határoztam meg, hogy vettem a palló teljes hosszának középső 2/3-át – ahol a tönkremenetel a legnagyobb valószínűséggel bekövetkezik – majd ebből a szakaszból kiválasztottam a legrosszabb (leggöcsösebb) 20 cm-es szakaszt. Erre a 20 cm-es részre határoztam meg a göcsparamétereket. A göcsparaméterek meghatározása azért szükséges, hogy a későbbiekben bemutatott statisztikai vizsgálatokkal meghatározzam, hogy felhasználható-e a statikus rugalmassági modulusz vagy a hajlítószilárdság becsléséhez

4.2.1.1 Göcsfelmérés „automatizálása”

Ebben a kísérletben csupán egy pallót vizsgáltam, hogy alkalmas-e az optikai rendszer a göcsök helyzetének és méretének meghatározására. Mivel csak egy pallót vizsgáltam messzemenő következtetéseket nem lehet levonni, az eredmény csupán útmutatóként szolgál.

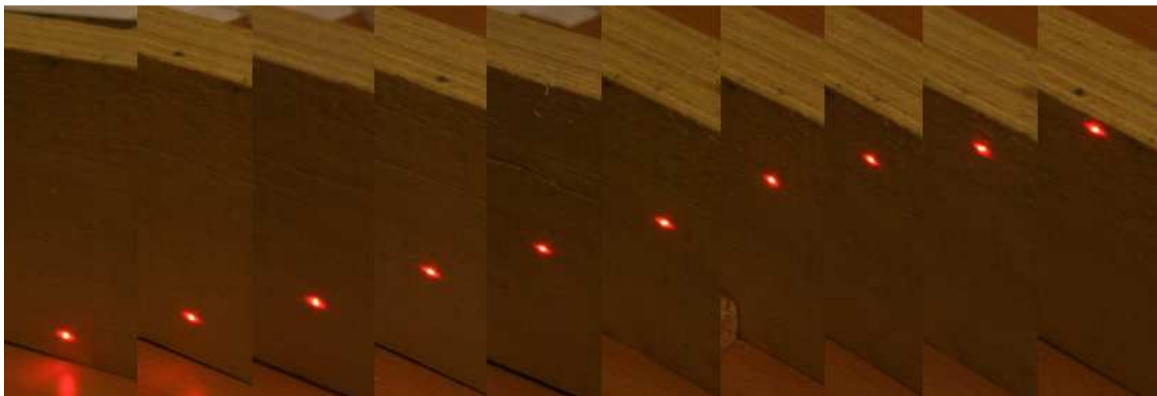
Az említett módszer alkalmas a faanyagban elhelyezkedő göcsök „feltérképezésére”, oly módon, hogy több, egymás felett 0,5 cm-es távolságban a faanyag rostirányára merőlegesen elhelyezkedő lézervoltot vizsgálunk (4.8 ábra), majd ezeket egy nagy sebességű kamerával rögzítjük. Egy képfeldolgozó szoftver segítségével a göcsök helye meghatározható a faanyag teljes hosszában illetve

keresztmetszetében. A „feltérképezés” történhet egy oldalon vagy akár több oldalon is, ebben az esetben a faanyagban elhelyezkedő göcsökről 3D-s kép készíthető.



4.8 ábra: Göcs kimutatása lézer pontsor segítségével (sematikus)
Forrás: saját szerkesztés

A mérés során a fűrészárut egy lézerforrás előtt húztuk el többször egymás után úgy, hogy a lézerfoltot minden mérés után 0,5 cm-el megemeltük. Az egyenletes előtolást egy erre a célra kialakított vonszólo biztosítja. A lézerforrást He-Ne lézer biztosítja, azért mert ennek a lézernek a foltja teljesen kör alakú amennyiben homogén felületre irányítjuk. A nagysebességű kamera rögzíti a képet, amit egy erre alkalmas szoftver dolgoz fel. A különböző magasságokban elhelyezkedő lézerfolt-sorozat a 4.9 ábrán látható.



4.9 ábra: Lézerpont-sorozat
Forrás: saját szerkesztés

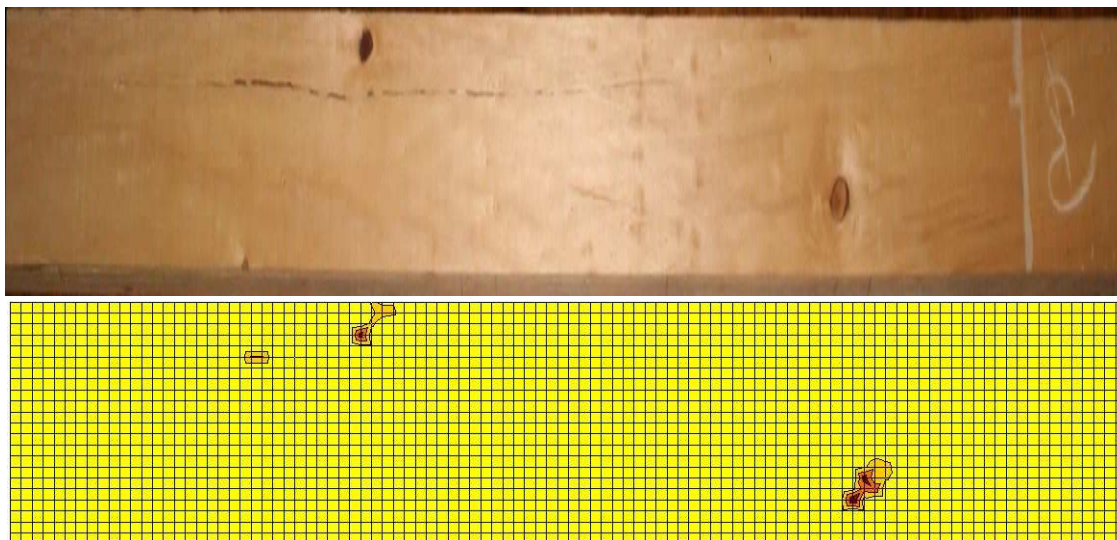
Az alábbi adatokat rögzítettem a már bemutatott szoftver segítségével:

- ellipszis kisátmérője,
- ellipszis nagyátmérője,
- az ellipszis szöge a vízszinteshez viszonyítva.

Ezekből az adatokból meg lehet állapítani, hogy a göcs hol helyezkedik el a faanyagban. Két módszert dolgoztam ki a göcsök helyének meghatározására.

1. módszer

Amint már fent említettem, a szoftver a rostlefutás szögét méri és rögzíti. A faanyag göcseinek közvetlen közelében a rostlefutás szöge jóval nagyobb, mint az „ép” fatestben. Ezt a megnövekedett szögeltérést használjuk ki a göcsök „feltérképezéséhez”. A 4.10 ábrán látható a felmért faanyag fényképe, valamint a szögeltérésekből meghatározott göcsök elhelyezkedése.



4.10 ábra: Göcsök meghatározása a szögeltérésekből

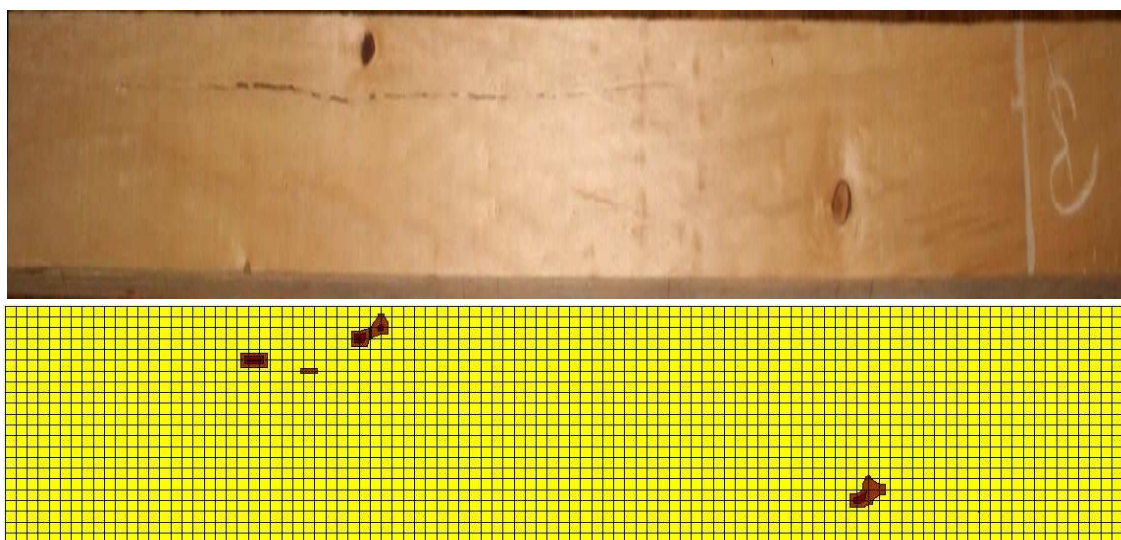
Forrás: saját szerkesztés

A 4.10 ábrán jól látszik, hogy a fénykép és az általunk meghatározott göcsök ugyanott helyezkednek el. Az 1. sz. melléklet tartalmazza a mérés során rögzített adatokat. Az oszlopok jelentik, hogy hány magassági mérés történt, a sorok pedig, hogy a kamera hány adatot rögzített a faanyag hosszában. A pirossal jelzett értékek a göcsök helyét mutatják. Ezt a mátrixot ábráztuk, amely a 4.10 ábrán látható. Az „ép” felület szögértéke 10° -ig terjed. Ebben az esetben a 4.10 ábrán látható sárga felületet értjük. Ahol az érték 10° feletti, ott göcsnek kell lennie. Az értékek fafajonként változhatnak. Látható, hogy a bal felső göcs mellett balra látható egy kisebb folt. Ezt a próbatest repedése okozza.

2. módszer

A második módszer hasonló az előzőhöz, csak itt nem a rostlefutás szögét használjuk fel a göcsök helyének meghatározásához, hanem a kialakult lézerfolt ellipszisének arányait. A módszer lényege – amint már fent említettük –, hogy amennyiben a faanyag „ép” felületére (ahol nincs göcs) vetül a lézerfolt, egy ellipszis képe jelenik meg. Amennyiben egy göcsre vetül a fényforrás, az fokozatosan egy körbe megy át. Tehát ha a kis- és nagytérő hányadosa egy kicsi, 0-hoz közelebb eső érték, az azt jelenti, hogy ott nagy valószínűséggel „ép” felület van, azonban ha az érték 1-hez közeledik, vagyis az ellipszis egy körre „alakul át”. Abban az esetben ott nagy valószínűséggel egy göcs található. A 4.11 ábrán látható a felmért faanyag fényképe, valamint az ellipszis arányaiból meghatározott göcsök elhelyezkedése.

A 2. sz. mellékletben láthatóak a mérés során rögzített értékek.



4.11 ábra: Göcsök meghatározása az ellipszis arányaiból

Forrás: saját szerkesztés

Az „ép” felület „arányértéke” 0,85-ig terjed. Ebben az esetben a 4.11 ábrán látható sárga felületet értjük. Ahol az érték 0,85 feletti, ott göcsnek kell lennie, hiszen az ellipszis kis- és nagytérjének aránya nagy, vagyis kezd körhöz hasonlítani a lézerfolt. Az értékek fajonként változhatnak. Itt is látható, hogy a bal felső göcs mellett balra látható egy kisebb folt. Ezt a próbatest repedése okozza.

Jelen esetben a próbatest hossza 205,9 cm volt, a kamera által rögzített képek száma egy mérés alatt 103 db, ebből következik, hogy a faanyag hosszát $205,9/103 = 1,999 \approx 2$ cm-es pontossággal határozhatjuk meg. A magasság felbontása 0,5 cm. Ez azt jelenti, hogy jelen esetben a próbatestet 0,5x2 cm-es pontossággal „feltérképezhetjük”.

A vonszolás sebességének csökkentésével valamint a kamera képrögzítésének gyorsításával a pontosságot növelni lehet.

Ha a göcsparamétereket nem manuálisan kéne meghatározni, hanem automatizálni lehetne valamilyen optikai módszerrel, abban az esetben az osztályozást fel lehetne gyorsítani. Ez a gyakorlatban működik is, hiszen vannak cégek, amelyek gyártanak ipari körülmények között is működő berendezéseket (pl. Microtec). Ezeknek a gépeknek a működési alapjai, az algoritmusok kivétel nélkül ipari titkok. Ezért tettem kísérletet lézerrel való göcsparaméterek meghatározására. Természetesen a módszer hagy kívánnivalót maga után. A mérési módszerek leírásával a célom csupán annyi, hogy bemutassam, az esetleges további vizsgálatokban rejlő lehetőségeket.

4.2.2 Rostlefutás

A rostlefutás mérésére két módszert használtam. Az egyik az MSZ EN 1310-es szabványban is leírt jelölőtűvel történt, a másik pedig a göcsfelmérés során bemutatott optikai módszer volt.

Mindkét esetben csak egy lapfelületen történtek a mérések. Ennek az volt az oka, hogy egy műszerfejlesztésbe kezdtük 2010-ben, mely a *Baross Gábor Program K+F projektek támogatása című Fűrészáru osztályozó berendezés fejlesztése tárgyú pályázat*

keretein belül került sor. Mivel az optikai módszerrel történő mérésnél egy lapfelületen történő mérést terveztünk, illetve fejlesztettünk, ennek következtében a kézi jelölőtű mérésnél is csak egy lapfelületen történt a mérés.

Jelölőtűvel történő mérés

A jelölőtű egy csuklókaros pálca, amelynek az egyik végén forgó nyél, a másik végén pedig a tartókarral néhány fokos szöget bezáró tű van. A jelölőtű a 4.12 ábrán látható.



4.12 ábra: Jelölőtű

Forrás: saját szerkesztés

Mivel nem állt rendelkezésemre jelölőtű, készítettem egyet, melyet a vizsgálatok során használtam. A jelölőtűt a rostlefutás látható irányába kisebb nyomást alkalmazva húztam, ennek következtében a jelölőtű egy vonalat karcol a felületre (4.13 ábra).



4.13 ábra: Jelölőtű által karcolt vonal

Forrás: saját szerkesztés

A karcolt vonalat méreteztem a palló éléhez képest a 4.14 ábrán bemutatottak alapján, majd egyszerű matematikai összefüggésekkel kiszámoltam a rostlefutás szögét.



4.14 ábra: Jelölőtű által karcolt vonal méretezése

Forrás: saját szerkesztés

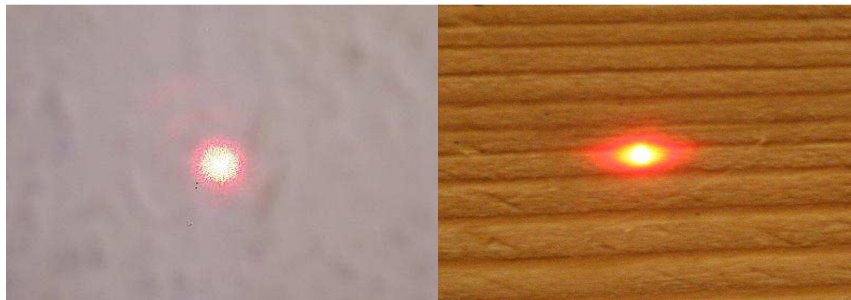
A számítást a 4.14 ábra alapján mutatom be.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{21-14}{53} \Rightarrow \alpha = 7,52^\circ \quad [4.5]$$

A rostlefutást a próbatestek középső részén határoztam meg, abból a megfontolásból, hogy hajlító vizsgálat esetén itt a legnagyobb a valószínűsége a tönkremenetelnek, ezáltal itt lehet a legnagyobb szerepe a rostkifutásnak.

Optikai módszer

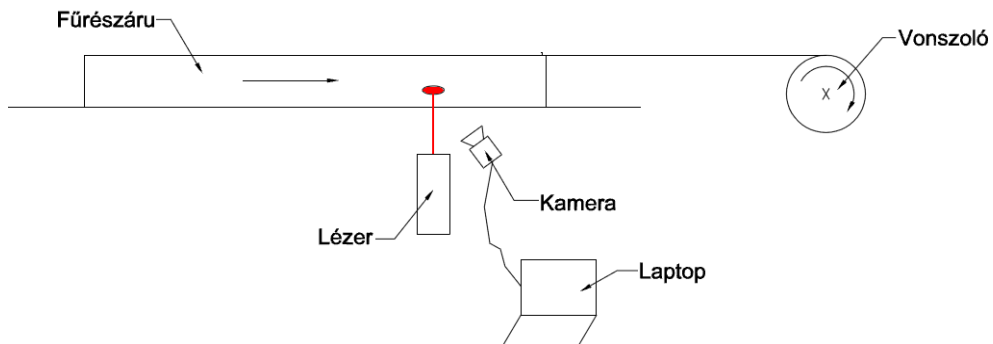
Az eljárás lényege, hogy a faanyagra egy lézerforrással rávilágítunk. A megjelenő foltnak, amennyiben egy homogén felületre érkezik (4.15 ábra bal oldali képe), tökéletes körnek kell lennie. Azonban amikor a faanyag felületére világítunk a farostok torzítják a képet, „elhúzzák” a kört és egy ellipszist látunk. (4.15 ábra jobb oldali képe)



4.15 ábra: Lézerfolt homogén és fűrészáru felületén

Forrás: saját szerkesztés

A mérés során a fűrészárut egy lézerforrás előtt húzzuk el. Az egyenletes előtolást egy erre a célra kialakított vonszoló biztosítja. A lézerforrást He-Ne lézer biztosítja, mert ennek a lézernak a foltja teljesen kör alakú amennyiben homogén felületre irányítjuk. A nagysebességű kamera rögzíti a képet, amit egy erre alkalmas szoftver dolgoz fel. A mérés elrendezése a 4.16 ábrán látható.

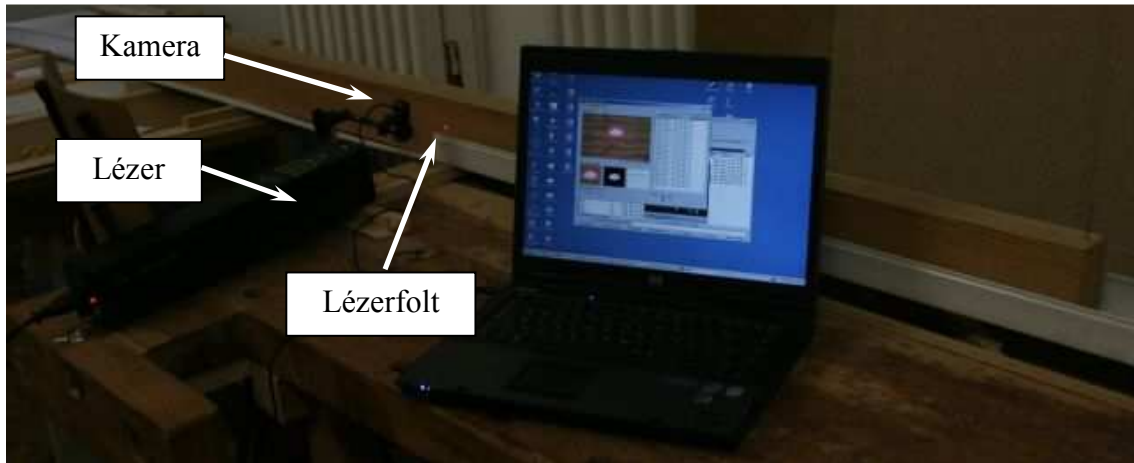


4.16 ábra: Rostlefutás mérésének elrendezése

Forrás: saját szerkesztés

Az ellipszis főtengely irányának mérésével lehet meghatározni a rostlefutás szögét. A kamera másodpercenként 30 adatot rögzít. Ezáltal a vonszoló sebessége úgy lett beállítva, hogy a fűrészárurol 1 cm-es felbontásban kapjunk adatot.

Az egyetem B épületének egyik ritkán járt hosszú pincefolyosóján kiépítettem egy vizsgálópadot, ahol a méréseket végeztem. A 4.17 ábrán látható egy mérésről készült kép, ahol a lézer, a kamera és a laptop látható, melyen éppen az adatgyűjtést végző szoftver fut.



4.17 ábra: Rostlefutás mérésének elrendezése

Forrás: saját szerkesztés

Az adatgyűjtés során a szoftver rögzítette az ellipszis főtengely irányát, valamint az ellipszis kis- és nagytérjének nagyságát, mivel az értékelés során csak azokat az adatokat vettük figyelembe, amelyeknél a nagytérjő 10 %-kal nagyobb volt mint a rövid. Erre azért van szükség, mert ha a lézerfolt éppen göcsön halad át, abban az esetben az ellipszis „visszaalakul” körre (4.18 ábra). Ebben az esetben a szoftver egy értékelhetetlen adatot ír ki. Ezt az átmérők arányának mérésével küszöböltük ki, ugyanis a szoftverrel ezeket az adatokat ki lehet szűrni.



4.18 ábra: Lézerfolt egy göcs felületén

Forrás: saját szerkesztés

A kétféle rostlefutás mérési eljárás adatainak összehasonlítása során nem volt szignifikáns kapcsolat. Ez valószínű annak köszönhető, hogy a jelölőtűvel való mérés során csak egy kis szakaszra határoztam meg a rostlefutás mértékét, az optikai módszerrel azonban a teljes hosszban, valamint a mintaszám is kicsi volt ($N^5=61$).

Ahogy a göcsfelmérésnél, itt is azért írtam le a módszereket, hogy bemutassam az esetleges további vizsgálatok lehetőségének létjogosultságát.

⁵ N: elemszám

4.2.3 Évgyűrűszerkezet vizsgálata

Az évgyűrűszerkezet vizsgálatára két paramétert határoztam meg:

- átlag évgyűrűszélesség valamit
- maximális évgyűrűszélesség.

A bütüfelületen radiális irányban a lehető leghosszabb szakaszon (l) megszámloltam az évgyűrűket (z); e kettő hányadosából adódik az átlag évgyűrűszélesség (átlag évgyűrűszélesség = l/z).

A maximális évgyűrűszélesség, a bütüfelületen mért legszélesebb évgyűrű nagysága.

A mérés alapjául az MSZ 10144-et használtam. Ugyan az említett szabvány 75 mm-en határozza meg az évgyűrűszámot, esetemben nem volt lehetőség mindig 75 mm-en mérni a próbatestek keresztmetszeti méretei miatt, ezért alkalmaztam a fenti módszert.

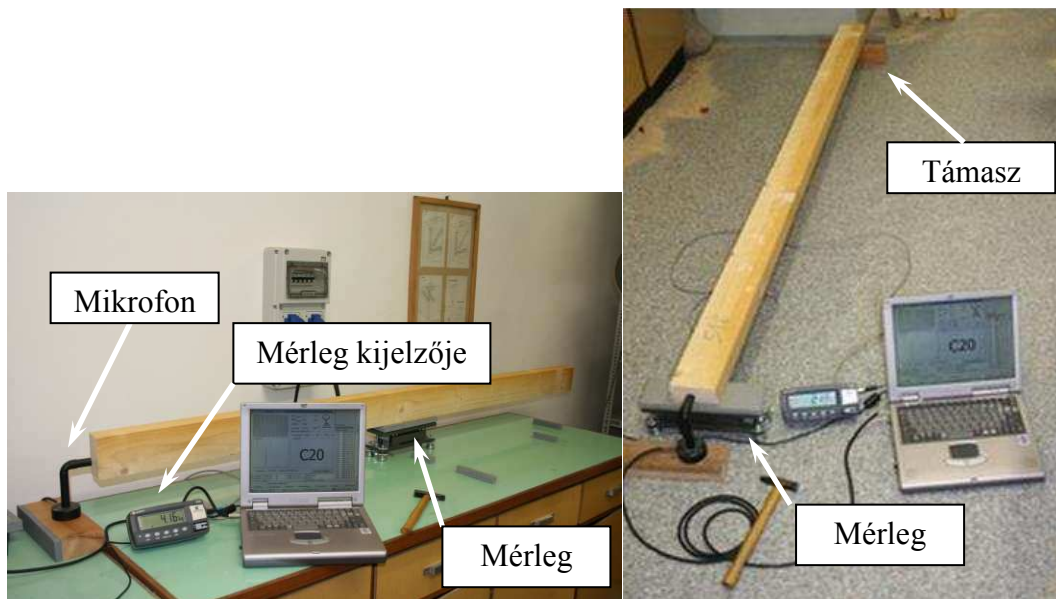
4.2.4 Vizuális felmérés során meghatározott paraméterek

A fent bemutatott paramétereket összefoglalva, az alábbi vizuális paramétereket határoztam meg:

- Geometriai adatok:
 - Vastagság,
 - Szélesség,
 - Hosszúság.
- Évgyűrűszerkezet vizsgálata:
 - Átlag évgyűrűszélesség,
 - Maximális évgyűrűszélesség.
- Göcsparaméterek:
 - Teljes göcsterült arány (GTA),
 - Szegély göcsterült arány (SZGTA),
 - Koncentrált göcsátmérő arány (CKDR),
 - Szegély koncentrált göcsátmérő arány (SZCKDR).
- Rostlefutás:
 - Jelölőtűvel történő mérés,
 - Optikai módszer.

4.3 Mérés fűrészáru osztályozó berendezéssel

A méréseim során a legalapvetőbb műszer a PLG (Portable Lumber Grader – hordozható fűrészáru osztályozó) elnevezésű berendezés volt. Ez egy, a Nyugat-magyarországi Egyetemen Bódig József Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratóriuma és a FAKOPP Bt. által kifejlesztésre került szilárdsági osztályozó berendezés (4.19 ábra), amely meghatározza az anyag longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusát és sűrűségét, majd szilárdsági osztályba sorolja az MSZ EN 338 szerint.



4.19 ábra: PLG berendezés

Forrás: saját szerkesztés

A faanyag méreteit (hossz, szélesség, vastagság), a korábban bemutatott CKDR göcsparamétert, és a nedvességet a szoftverbe kell írni. A vizsgált faanyagot mérlegre kell helyezni, majd a bütüre mért kalapácsütéssel be is fejeződik a mérés. A kalapácsütés hangját mikrofon rögzíti. A kiértékelés 1 másodpercen belül megtörténik, az eredmény a képernyőn megjelenik. A képernyőn megjelenik a longitudinális rezgésének képe is, a rezgés frekvencia összetevőit jellemző spektrum. A számítógép meghatározza a longitudinális rezgés frekvenciáját. Ebből, a mért tömegből és a méretekből kiszámítja a dinamikus rugalmassági moduluszt (E) és a sűrűséget (ρ). Ezen adatok alapján a megfelelő algoritmus segítségével szilárdsági osztályba sorolja a vizsgált faanyagot: C14 – C50.

A Baross Gábor Program K+F projektek támogatása című Fűrészáru osztályozó berendezés fejlesztése tárgyú pályázat keretein belül ennek a műszernek a továbbfejlesztését végeztük, melyet PLG+-nak kereszteltünk. A fejlesztés során kisebb módosításokat végeztünk a műszeren.

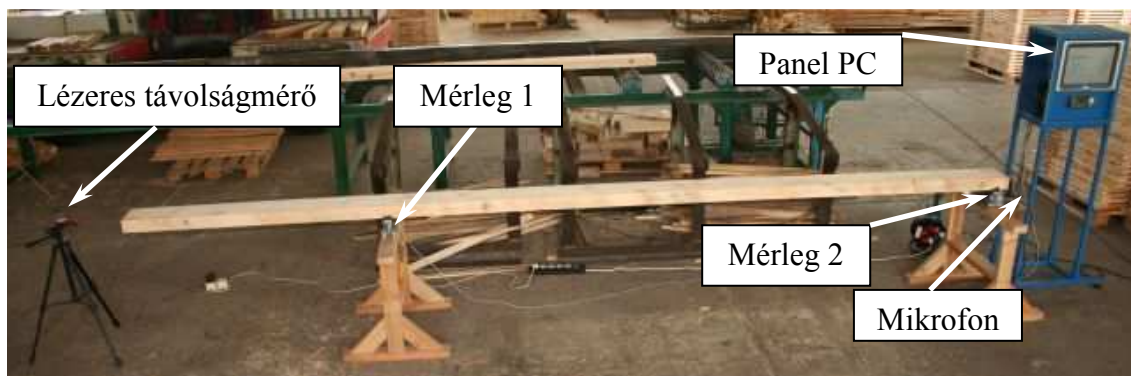
Egy mérleg helyett kettő

A „rég” berendezés egy mérleggel mérte a fűrészáru tömegét. Ez, abban az esetben, amikor a fűrészáru rövid, nem okoz problémát (4.19 ábra bal oldali képe); ha viszont hosszabb anyagot mértünk egy támaszt használtunk (4.19 ábra jobb oldali képe) és a fűrészáru tömegének a felét mértük. Ekkor a fűrészáru végeket pontosan kell beállítani mind a mérlegen, mind a támasz felőli oldalon, hogy valóban a tömeg felét tudjuk mérni. Ez a gyakorlat számára kicsit nehézkes, valamint csökkenti a pontosságot is. Ezért az „új” műszernél egy mérleg helyett kettőt alkalmaztunk, a pontosabb és gyorsabb mérés érdekében (4.20 ábra).

Hossz mérése lézeres távolság mérővel

A „rég” műszernél a fűrészáru hosszát mérőszalag segítségével kellett mérni. Abba az esetben, ha a fűrészáru hosszmérete nem változna, nem is lenne probléma, hiszen egyszeri mérés után a szoftver rögzíti az adott hosszt és ezt használja a további számításokhoz. Azonban a hazai fűrésziparban sokszor akár 10 cm-es különbségek is lehetnek egy rakaton belül is, ami a dinamikus rugalmassági modulus kiszámításánál hibát vinne a rendszerbe, hiszen a longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulus képletében a hossz a négyzetben szerepel.

Emiatt a hosszmerést minden egyes darabon elvégezzük egy lézeres távolság mérővel, mely bluetooth-al kapcsolódik a számítógéphez, és valós időben szolgáltatja az adatokat a szoftvernek a számítások elvégzéséhez. Az új műszer kép látható a 4.20 ábrán. A kép a soproni TAEG fűrészüzemben készült.

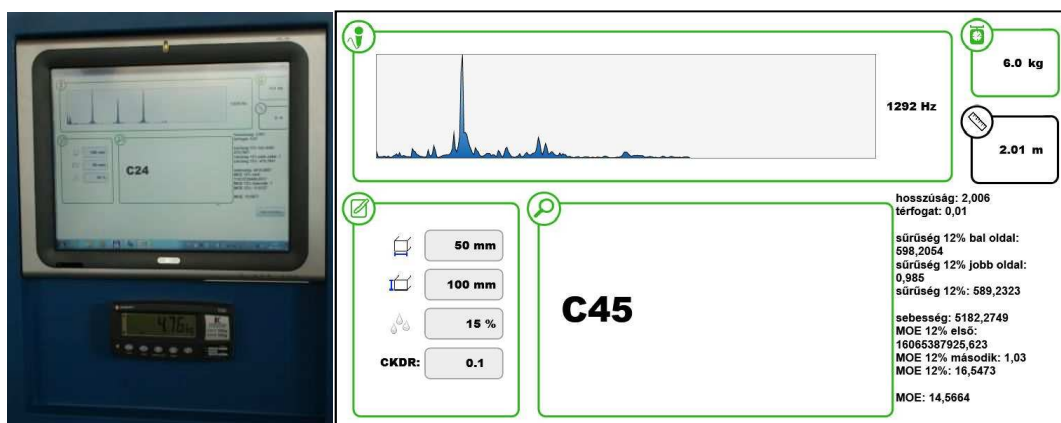


4.20 ábra: PLG+ berendezés

Forrás: saját szerkesztés

Szoftvermódosítások

A szoftveres felületet is megváltoztattuk, hogy a gyakorlat számára egy könnyebben kezelhető berendezést kapjunk. Ennek érdekében egy Panel PC-t építettünk be a rendszerbe, melynek érintőképernyős kijelzője megkönnyíti a kezelést. A 4.21 ábra az ipari környezetben is használható Panel PC-t, valamint az új osztályozó szoftver felületét mutatja.



4.21 ábra: PLG+ Panel PC és szoftver felület

Forrás: saját szerkesztés

Az első 870 mérést a régi műszerrel, a többi 473 mérést már az új műszerrel végeztem. Ebből kifolyólag lehetnének különbségek a két műszer által mért adatok között. A műszerfejlesztésnél figyeltünk arra, hogy alapjában véve ne változzon a műszer működése. Az alábbi pontokban felsorol megállapítások alapján elmondható, hogy a két műszer azonos eredményeket ad.

- A frekvencia mérésére használt algoritmus mindkét műszer esetében azonos.
- A hossz mérését a régi műszernél minden palló esetében megmértem, a második műszer pedig automatikus méri a lézeres távolságmérő segítségével.
- A keresztmetszeti adatokat mindkét esetben ugyanúgy határoztam meg.
- A mérlegek ugyanattól a cégtől származnak, valamint mindegyik mérleg etalonnal kalibrált.

4.3.1 Fűrészáru osztályozó berendezéssel meghatározott paraméterek

A fűrészáru osztályozó berendezéssel (PLG és PLG+) meghatározott paraméterek a következők voltak:

- Longitudinális rezgés frekvencia 1. módusban
A rezgés frekvenciájából a 2.2.1-es fejezetben bemutatott [2.11]-es képlet segítségével kiszámolható a **dinamikus rugalmassági modulusz (E)**.
- Tömeg
A tömeg és a geometriai adatok segítségével a **sűrűség (ρ)** határozható meg.

4.4 Longitudinális rezgés frekvenciájának meghatározása

A fűrészáru osztályozó berendezés által rögzített longitudinális frekvencián kívül mértem a magasabb móduszokat is.

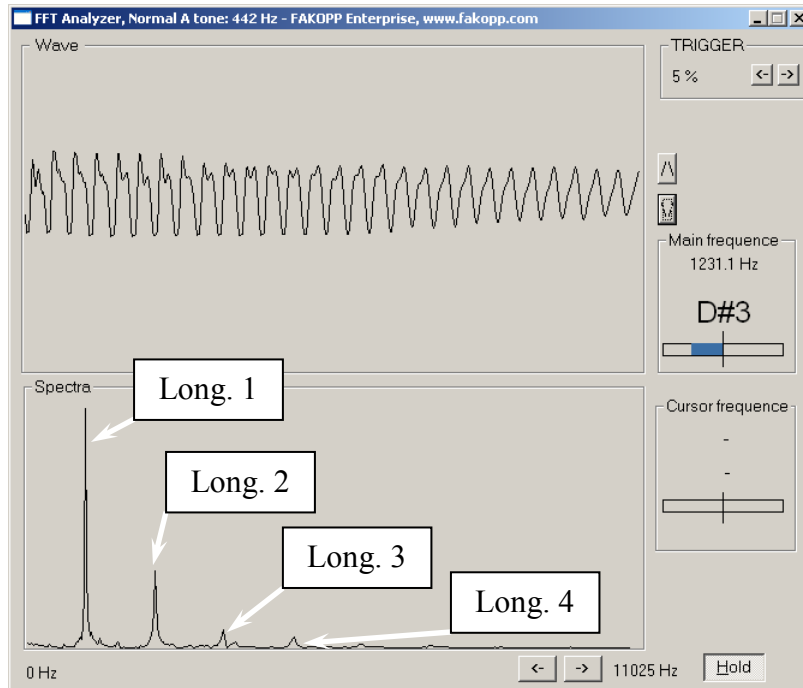
A mérések során egy PC alapú FFT (Fast Fourier Transformation) programot használtam. A szoftverrel egyszerre több rezgési módusz egyidejűleg vizsgálható. A PC alapú program hőmérséklet független hardverigénye egy Windows kompatibilis hangkártya, illetve a szükséges frekvenciatartományt lefedő mikrofon. A hangoló program Fourier transzformációt hajt végre. Felbontja a hanghullámokat és a rezgésképet szinusz hullámok soraként állítja elő (Horváth 2010). A periodikus jelek elemzésére széles körben elterjedt. Így elengedhetetlen eszköz az akusztikában, elektronikában és az optikában (Divós 1999). A 4.22 ábrán látható a mérési elrendezés.



4.22 ábra: A longitudinális rezgés frekvenciájának mérési összeállítása

Forrás: saját szerkesztés

A mérés során a mikrofont a bütü közelébe kell helyezni, majd megkoppintani a felületet. A mérések során az első négy módot határoztam meg a már említett FFT szoftver segítségével. A program kijelzőjéről a frekvenciaértékek könnyen leolvashatóak az adott csúcs kijelölésével. A longitudinális rezgések és a spektrum képe a 4.23 ábrán látható.



4.23 ábra: A longitudinális rezgések

Forrás: saját szerkesztés

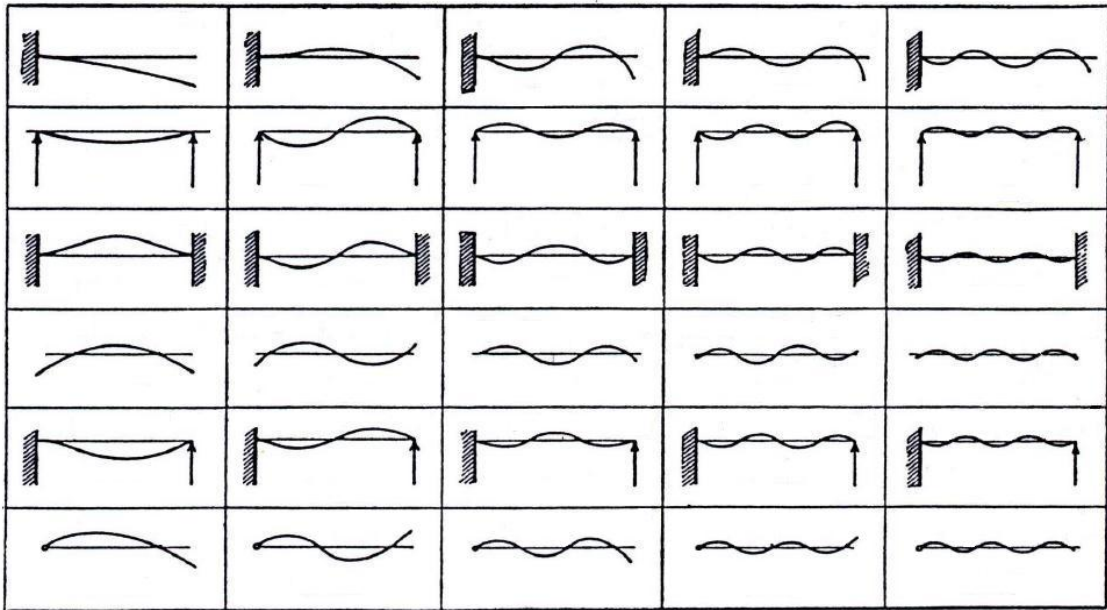
4.4.1 A longitudinális rezgés mérésekor meghatározott paraméter

- Longitudinális rezgés frekvenciája 1. módozban
- Longitudinális rezgés frekvenciája 2. módozban
- Longitudinális rezgés frekvenciája 3. módozban
- Longitudinális rezgés frekvenciája 4. módozban

A rezgés frekvenciájából a 2.2.1-es fejezetben bemutatott [2.11]-es képlet segítségével kiszámolható a **dinamikus rugalmassági modulusz (E_d)** különböző módozokban.

4.5 Hajlítórengések frekvenciájának meghatározása

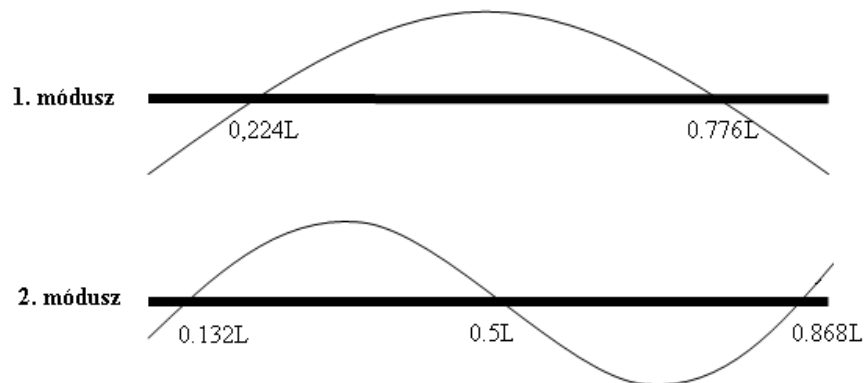
A Young-féle rugalmassági modulusz dinamikus meghatározásához egy másik lehetséges megoldás a hajlítórengések frekvenciájának mérése. Az Euler-egyenlettel elméletileg bármely, az 4.24 ábrán felvázolt peremfeltétel mellett mérhető a dinamikus rugalmassági modulusz értéke. A gyakorlatban a legegyszerűbb a 4. sor, a szabad-szabad (befogás és alátámasztás nélküli) rezgési séma használata. A mérések során alkalmaztunk ugyan alátámasztást, de e rugalmas alátámasztások – amennyiben pontosan a helyükre kerülnek –, nem befolyásolják nagy mértékben az eredményeket (Divós 1999).



4.24 ábra: Különböző rezgési módusok rezgésképei különböző befogási és alátámasztási feltételek mellett

Forrás: Freberg 1944 alapján saját szerkesztés

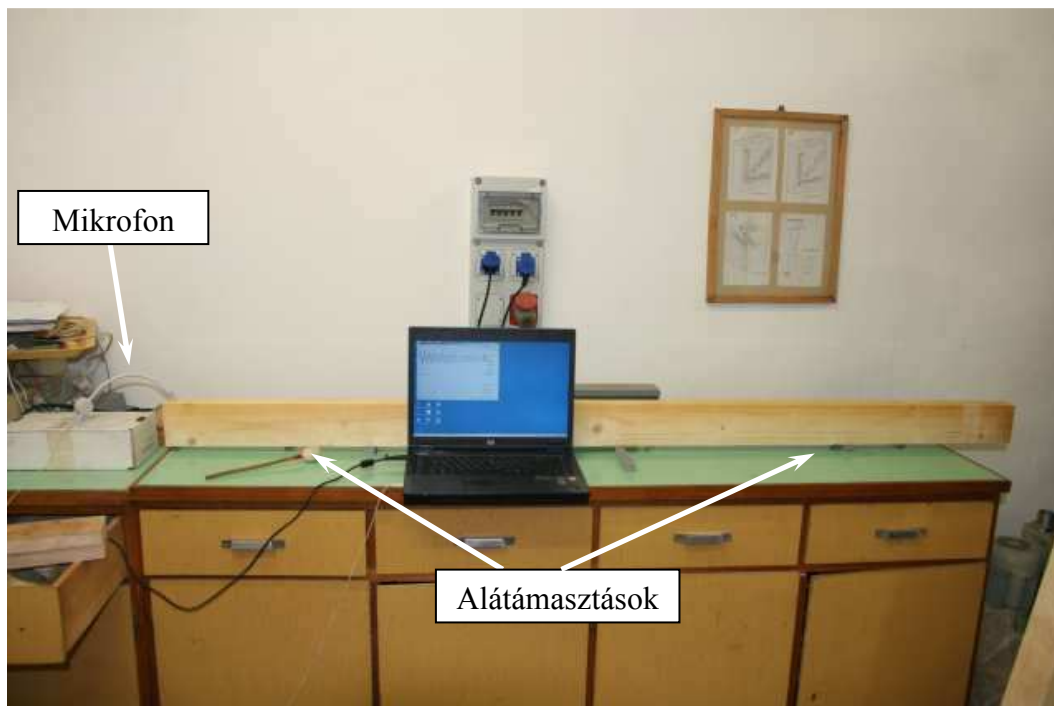
A hajlítórezgések mérésekor egyszerre több rezgési módusz frekvenciája gerjesztődik. A móduszsám azt mutatja meg, hogy a mért frekvencia melyik rezgési módusznak tartozik. Az elsőt alpmódusznak, a többit második-, harmadik-, stb. módusznak nevezzük. Az elsőtől eltérő móduszokat gyűjtőnéven felharmonikusoknak is nevezzük. Az egyes rezgési móduszok jól gerjeszthetők, ha a 4.24 ábra szerint az egyes csomópontokban rugalmas alátámasztásokat helyezünk el, s a próbatestet az amplitúdó-maximumok helyén koppintjuk meg.



4.25 ábra: Hajlító rezgések mérésének sematikus ábrázolása 1. és 2. móduszban

Forrás: saját szerkesztés

Méréseim során a hajlító rezgés alap illetve második móduszát mértem. Ennek sematikus elrendezését mutatja a 4.25 ábra. Az ábrán látható az alátámasztások helyeinek pontos meghatározása is (L – a rúd hossza).

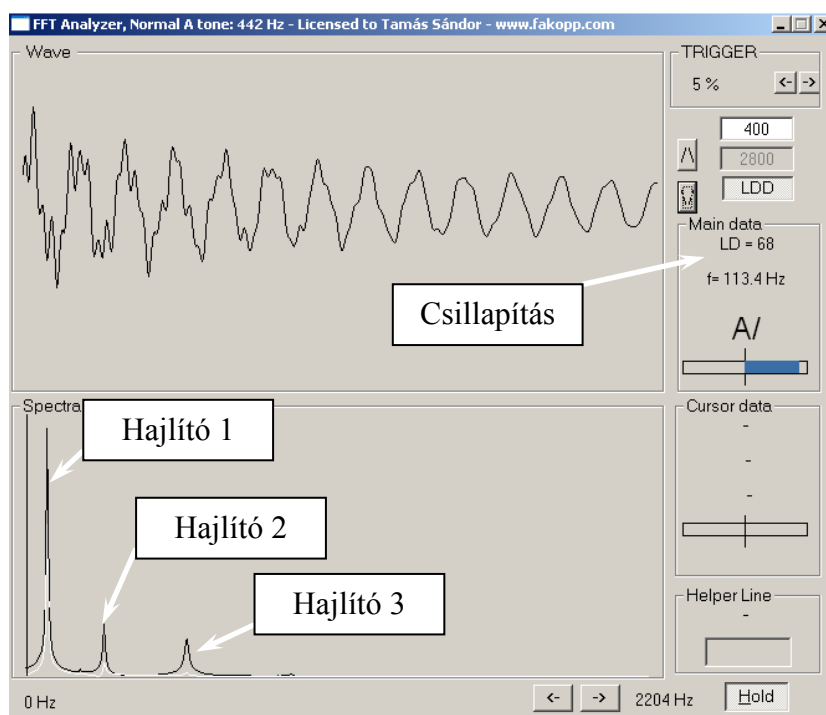


4.26 ábra: Hajlító rezgések mérésének elrendezése

Forrás: saját szerkesztés

A 4.26 ábra a mérési elrendezést, a mikrofont és laptopot – amelyen az FFT szoftver fut – valamint az alátámasztásokat mutatja. Az ábrán, a mérést az 1. módusznak megfelelő elrendezésben szemléltetem.

A koppintást az amplitúdó maximum helyén végeztem. A frekvencia értéke az FFT szoftverről közvetlenül leolvasható – ugyanúgy, mint a longitudinális rezgés esetében – az adott csúcs kijelölésével.



4.27 ábra: FFT szoftveren megjelenő kép

Forrás: saját szerkesztés

A 4.27 ábra mutatja az FFT szoftver által megjelenített képet, melyen jól látható a hajlító rezgések alap- illetve magasabb módusjai.

4.5.1 A hajlító rezgés mérésekor meghatározott paraméterek

- Hajlító rezgés frekvenciája 1. módusban
- Hajlító rezgés frekvenciája 2. módusban

A rezgés frekvenciájából a 2.2.2-es fejezetben bemutatott [2.14]-es képlet segítségével kiszámolható a **dinamikus rugalmassági modulusz (E_h)** különböző módusokban.

4.6 Torziós rezgés frekvenciájának meghatározása

A torziós rezgésekkel meghatározott G mérése a 4.28 ábrán látható elrendezéssel történt. A mérés a 2.2.3 fejezetben szereplő 2.5 ábrán látható elrendezéssel azonos.

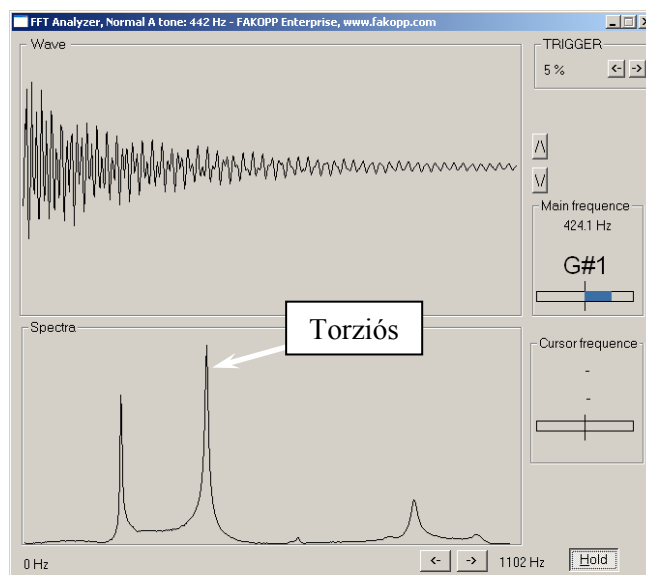
A mérés során a palló közepén keresztirányban, valamint a tartó végén egy kis rugalmas alátámasztást alkalmaztam. A mikrofon és a koppintás helyzete is az említett ábrával.



4.28 ábra: Torziós rezgések mérésének elrendezése

Forrás: saját szerkesztés

A méréskor ügyelni kellett arra, hogy nem csak a torziós rezgés frekvenciája, hanem a hajlító rezgések frekvenciái is megjelenjenek. Ebből kifolyólag a torziós rezgés méréséhez kis gyakorlat szükséges.



4.29 ábra: Torziós rezgés mérésének FFT által megjelenített képe

Forrás: saját szerkesztés

A 4.29 ábrán látható, hogy nem csak a torziós rezgés frekvenciája, hanem egyéb hajlító és torziós rezgési csúcsok is megjelennek. Amikor a rezgéskép a fent láthatóhoz hasonló, akkor a torziós rezgés frekvenciájának megállapítása nem nehéz.

Azonban előfordulhat olyan eset is, amikor nem a torziós rezgés csúcsa volt a legmagasabb, hanem egyéb rezgési frekvencia csúcsa. Ilyenkor a megfelelő csúcs kiválasztása kissé nehézkes.

4.6.1 A torziós rezgés mérésekor meghatározott paraméter

- Torziós rezgés frekvenciája 1. módusban

A torziós rezgés frekvenciájából a 2.2.3-es fejezetben bemutatott [2.15]-ös képlet segítségével kiszámolható a *dinamikus nyíró rugalmassági modulusz (G)*.

4.7 Csillapítás meghatározása

A csillapítási tényezőt a rezgést burkoló exponenciális görbe határozza meg. A mérésekhez két egymás utáni Fourier-transzformáció elvégzésére van szükség időben eltolva egymástól. Először kiválasztjuk a vizsgált módot és a hozzá tartozó frekvenciát. A csúcsamplitúdók aránya valamint az időeltolás ismeretében a csillapítási tényező meghatározható az alábbi képlettel:

$$\beta = (-1) \frac{\ln \frac{A2}{A1}}{dt} \quad [4.6]$$

ahol: β : csillapítási tényező [1/s],
 $A1$: amplitúdó [m],
 $A2$: amplitúdó [m]; ($A1 > A2$).

A gyakorlatban a 0-es fejezetben bemutatott logaritmusos dekrementum (Λ) ezerszerese közvetlenül leolvasható az FFT program kijelzőjéről (4.27 ábra).

4.7.1 A csillapítás mérésekor meghatározott paraméterek

- Csillapítás – Logaritmusos dekrementum (Λ) x 1000

4.8 Nedvességmérés

A fanedvességnek gyorsabb, de esetenként kevésbé pontos mérése elektromos mérőeszközökkel történik. Ezek a faanyag nedvességét közvetve mérik és azon a felismerésen alapszanak, hogy a fa elektromos ellenállása vagy kapacitása a nedvességtartalmától függ.

Az ellenállás-típusú elektromos nedvességmérő műszerek működési elve a következő: a faanyag fajlagos elektromos ellenállása egyenárammal szemben annál nagyobb, minél kisebb a kötött víz tartalma. Ezért az ellenálláson alapuló műszerek csak a kötött víz 5-25%-os tartományában használhatók (Molnár 2000).



4.30 ábra: Humitest 200 típusú nedvességmérő készülék

Forrás: saját szerkesztés

Méréseim során a 4.30 ábrán látható Nardi által gyártott Humitest 200 típusú beütős, ellenállás-típusú elektromos nedvességmérő műszert használtam. Minden próbatesten 3 mérést végeztem. Egyet a próbatest közepén a másik kettőt a végétől körülbelül, 30-50 cm-es távolságban. A három mérés átlagából határoztam meg a nedvességet.

4.8.1 Nedvességmérés során meghatározott paraméter

- Nedvességtartalom (u)

4.9 Statikus mérések

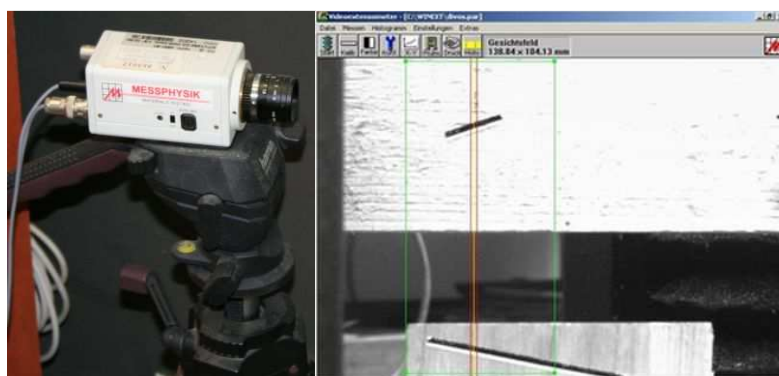
A roncsolásmentes mérések után közvetlenül elvégeztük a statikus törővizsgálatot, ezzel kiküszöbölve a nedvességváltozásból adódó változásokat. A két mérés között maximum néhány perc telt el. A statikus méréseket két anyagvizsgáló berendezéssel végeztük. Az egyik az FPZ 100/1 típusú anyagvizsgáló berendezés (4.31 ábra). A berendezés mechanikus meghajtású, 0-100kN-os határig mérő berendezés. A vizsgált anyag maximális hossza hajlítás esetén 2 m.



4.31 ábra: FPZ 100/1 típusú anyagvizsgáló berendezés

Forrás: saját szerkesztés

Az alakváltozás mérésére a 4.32 ábrán látható ME 46 típusú videoextensométert használtunk. Ennek a rendszernek az egyik fő eleme az állványon elhelyezhető videokamera. A kamera képének felbontása 795×596 Pixel (összesen $\sim 0,5$ MPixel). A kamerán különböző lencsákat (objektív) helyezhetünk el, amelyek tovább növelik a felbontás mértékét, illetve segítik a szükséges képfelbontás és a megfelelő fókusztávolság beállítását. A kamera által látott kép élességét és a fényviszonyokat a lencse beállítási lehetőségeivel lehet szabályozni.



4.32 ábra: Videoextensométer és szoftvere

Forrás: saját szerkesztés

Az alakváltozás mérését egy, az extensométerhez tartozó szoftver segítségével végeztük. A szoftver a kijelölt területen mérőjeleket keres. A mérőjelek egyértelmű és pontos felismerésének érdekében a próbatesteken és egy referenciafelületen is egy vékony, fekete-fehér csíkot kell elhelyezni. Ezen kívül nagyon fontos, hogy a kép élessége és a fényerő megfelelő módon legyen beállítva. A mérőjelek egymáshoz

viszonyított elmozdulását, távolságuk megváltozását a számítógép automatikusan, nagy pontossággal dolgozza fel (Karácsonyi 2011). A mérőcelláról érkező erőadatokat és a videoextensométerről érkező adatokat egy számítógép szoftvere rögzíti. A meglévő adatokból számítható a statikus rugalmassági modulusz illetve a hajlítószilárdság.

A másik berendezés a Faszerkezet Vizsgáló Laboratóriumban található MTS típusú anyagvizsgáló gép (4.33 ábra).



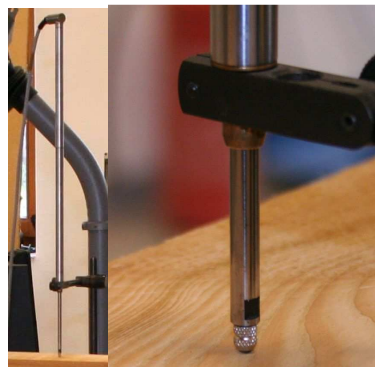
4.33 ábra: MTS típusú anyagvizsgáló berendezés

Forrás: saját szerkesztés

Azért volt szükséges áttérni egy másik berendezésre, mert a korábban bemutatott FPZ által maximálisan vizsgálható anyaghossz 2 m volt, viszont vizsgálataim során 3 illetve 4-es próbatesteken is végeztem méréseket.

A berendezés hidraulikus meghajtású 200 bar-os üzemi nyomáson működő, 2 db 250kN-ig terhelhető nyomófejjel rendelkezik. A maximális befogási hossz 12 m.

Az alakváltozás mérését a MTS géppel történő mérés során egy, a 4.34 ábrán látható VA/100-as induktív elmozdulásmérővel végeztük.



4.34 ábra: VA/100-as elmozdulásmérő

Forrás: saját szerkesztés

A mérőcelláról és az elmozdulásmérőről érkező adatokat egy számítógép rögzítette. Az adatokból számítható a statikus rugalmassági modulusz illetve a hajlítószilárdság.

A vizsgálatokat minden esetben az MSZ EN 408-as szabvány követelményeinek megfelelően végeztük.

4.9.1 A statikus mérések során meghatározott paraméterek

- Teljes hajlítási rugalmassági modulusz ($E_{m,g}$)

A 2.1.1 fejezetben bemutatottak alapján a [2.4] egyenlettel meghatározható a teljes hajlítási rugalmassági modulusz 4 pontos hajlítás esetén az MSZ EN 408-nak megfelelően.

- Hajlítoszilárdság (f_m)

A 2.1.2 fejezetben leírtak alapján a [2.5] egyenlettel meghatározható a hajlítoszilárdság 4 pontos hajlítás esetén az MSZ EN 408-nak megfelelően.

4.10 Mérésekhez használt eszközök hibái

Jelen fejezetben felsorolom a korábban már bemutatott, általam használt eszközöket, valamint feltüntettem a mérési hibáikat. A 4.2 táblázatban láthatóak azok az eszközök, melyekkel egy adott mennyiséget közvetlenül mértem. A táblázatokban feltüntettem a mérések **abszolút hibáját**, valamint a gyakorlat számára talán kicsit beszédesebb **relatív hibát** is.

Mivel azonos abszolút hiba különböző nagyságrendű mennyiségekhez tartozhat, a táblázatokban az átlagos értékekhez tartozó hibákat tüntettem fel.

4.2 táblázat: Eszközök nevei valamint mérési hibájuk

| Eszköz neve, mennyiség megnevezése | Mérés abszolút hibája | Mérés relatív hibája (%) |
|--|-----------------------|--------------------------|
| 1. Mérőszalag: vastagság: | 50±1 mm | ±2% |
| szélesség: | 100±1 mm | ±1% |
| hossz mérése: | 2000±1 mm | ±0,05% |
| 2. Lézeres távolság mérő: hossz mérése | 2000±1 mm | ±0,05% |
| 3. Tolómérő: | | |
| vastagság: | 50±0,5 mm | ±1% |
| szélesség mérése: | 100±0,5 mm | ±0,5% |
| 4. Elmozdulásmérő: lehajlás mérése | 10±0,1mm | ±1% |
| 5. Extensométer: lehajlás mérése | 10±0,2mm | ±2% |
| 6. Mérleg: tömeg mérése | 5,1±0,02 kg | ±0,4% |
| 7. FFT szoftver, mikrofon: hajlító frekvencia: | 120±1 Hz | 0,8% |
| longitudinális frekvencia mérése | 1150±1 Hz | 0,1% |
| 8. Erőmérőcella (FPZ, MTS): erő mérése | 10000±100N | 1% |
| 9. Nedvességmérő: nedvesség mérése | 12±0,5% | 4% |

Forrás: saját szerkesztés

A közvetlenül mért mennyiségeket általában különböző összefüggések alapján újabb mennyiség kiszámítására használjuk. Fontos annak ismerete, hogy a méréskor jelentkező hibák hogyan hatnak a számítással kapott mennyiségek pontosságára, vagyis hogyan „terjednek” a hibák. Ha a meghatározandó mennyiség (y) az x_1, x_2, x_3, \dots közvetlenül mért mennyiségekből számítható az $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ összefüggés alapján, akkor az egyes mennyiségek abszolút hibájából az eredményben várható hibát az alábbi módon kapjuk meg (Jánossy 1967, [3]):

$$\Delta y = |\Delta y_1| + |\Delta y_2| + |\Delta y_3| + \dots \quad [4.7]$$

$$\text{ahol } \Delta y_1 = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1; \Delta y_2 = \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2; \dots \text{ stb.}$$

Használható a közepes hibákkal megadott összefüggés:

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_3} \Delta x_3 \right| + \dots \quad [4.8]$$

Minthogy ebben a kifejezésben a parciális differenciálhányadosok abszolút értéke szerepel, a legrosszabb esetet tételeztük fel, amikor valamennyi hiba egyszerre és azonos irányban lép fel.

A Gauss-féle hibaterjedési törvény figyelembe veszi, hogy az egyes mennyiségek hibái részben kompenzálják egymást. A kvadratikusan abszolút hiba az alábbi módon fejezhető ki (Jánossy 1967, [3]):

$$\Delta y' = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_3} \Delta x_3 \right)^2 + \dots} \quad [4.9]$$

Közvetett mérések esetén a **relatív hiba**:

$$\frac{\Delta y'}{y} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_3} \Delta x_3 \right)^2 + \dots}{y(x_1, x_2, x_3 \dots)^2}} \quad [4.10]$$

A differenciálást csak a számottevő relatív hibával rendelkező mennyiségekre kell elvégezni. Az alábbi táblázatban bemutatom azoknak a méréseknek a hibáját, amelyeket nem közvetlenül mértem, hanem több közvetlenül mért paraméter hibájából adódnak.

4.3 táblázat: Egy tipikus próbatestenen végzett vizsgálatok mérési hibái

| Mennyiség megnevezése | Mérés abszolút hibája (Gauss féle) | Mérés relatív hibája (%) |
|--|------------------------------------|--------------------------|
| 10. Sűrűség | $510 \pm 11,58 \text{ kg/m}^3$ | $\pm 2,3\%$ |
| 11. Long. din. rug. mod. | $11,5 \pm 0,25 \text{ GPa}$ | $\pm 2,2\%$ |
| 12. Hajl. din. rug. mod. | $11,5 \pm 0,18 \text{ GPa}$ | $\pm 1,6\%$ |
| 13. Nyíró rug. mod. | $0,26 \pm 0,01 \text{ GPa}$ | $\pm 3,9\%$ |
| 14. Statikus rug. mod (lehajlás elmozdulásmérővel mérve) | $11 \pm 0,43 \text{ GPa}$ | $\pm 3,9\%$ |
| 15. Statikus rug. mod (lehajlás extensometerrel mérve) | $11 \pm 0,43 \text{ GPa}$ | $\pm 3,9\%$ |
| 16. Hajl. szil. | $45 \pm 0,68 \text{ MPa}$ | $\pm 1,5\%$ |

Forrás: saját szerkesztés

A 4.2 és 4.3 táblázatokban megadott adatokat a [4.9] és [4.10] egyenletről valamint a mérések elméleténél (2. fejezetben) bemutatott képletek alapján számítottam ki. Egy példa alapján bemutatom a számítás menetét. A hibát olyan próbatestre számolom, amelyből a legtöbbet mértem, azaz 2 m hosszú, 5x10 cm-es keresztmetszetű pallóra. Tömegének egy átlag értéket veszek melynek nagysága 5,1 kg, sűrűsége 510 kg/m^3 . Törőerő 10000 N, lehajlás a rugalmas szakaszban 10 mm.

A sűrűség meghatározása:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{sz \cdot v \cdot h} \quad [4.11]$$

ahol: m : tömeg [kg]

sz, v, h : szélesség, vastagság, hossz [m]

A Gauss-féle hibaterjedés a [4.9] képlet alapján:

$$\Delta\rho' = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial sz} \Delta sz\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial v} \Delta v\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial h} \Delta h\right)^2} \quad [4.12]$$

Az 4.2 táblázatból az abszolút hibák ($\Delta m, \Delta sz, \Delta v, \Delta h$) meghatározhatóak:

$\Delta m = 0,02 \text{ kg}; \Delta sz = \Delta v = \Delta h = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$.

A derivált értékek a következőképpen alakulnak:

$$\frac{\partial\rho}{\partial m} = \frac{1}{sz \cdot v \cdot h} = \frac{1}{0,1 \cdot 0,05 \cdot 2} = 100 \text{ m}^3 \quad [4.13]$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial sz} = \frac{-m}{sz^2 \cdot v \cdot h} = \frac{-5,1}{0,1^2 \cdot 0,05 \cdot 2} = -5100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \quad [4.14]$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial v} = \frac{-m}{sz \cdot v^2 \cdot h} = \frac{-5,1}{0,1 \cdot 0,05^2 \cdot 2} = -10200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \quad [4.15]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} = \frac{-m}{sz \cdot v \cdot h^2} = \frac{-5,1}{0,1 \cdot 0,05 \cdot 2^2} = -255 \frac{kg}{m^4} \quad [4.16]$$

a [4.12] [4.13] [4.14] [4.15] [4.16] *egyenleteket* összevonva azt kapjuk, hogy:

$$\begin{aligned} \Delta \rho' &= \sqrt{(100 \cdot 0,02)^2 + (-5100 \cdot 0,001)^2 + (-10200 \cdot 0,001)^2 + (-255 \cdot 0,001)^2} \\ &= \sqrt{4 + 26,01 + 104,04 + 0,065} = 11,58 \frac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

Ebből következik, hogy az abszolút hiba 11,58 kg/m³, a relatív hiba pedig:

$$\frac{\Delta \rho'}{\rho} = \frac{11,58}{510} \cdot 100 \cong 2,3\%$$

A többi, a táblázatban szereplő érték kiszámítását terjedelmi okok miatt nem részletezem.

5 EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A kutatásom alapvető célja az volt, hogy a faanyag mechanikai tulajdonságait a lehető legpontosabban meghatározzam roncsolásmentes módszerekkel, a legjobb algoritmust találjam meg eme tulajdonságok mérésére illetve becslésére. A mechanikai tulajdonságok közül talán a méretezés szempontjából legfontosabb paraméterek a rugalmassági modulusz és a hajlítószilárdság.

5.1 Mechanikai tulajdonságok meghatározása illetve becslése

A továbbiakban a két mért statikus paraméter (teljes hajlítási rugalmassági modulusz ($E_{m,g}$) és hajlítószilárdság (f_m)) mérését illetve becslését mutatom be az általam mért adatok statisztikai kiértékelésével.

Vizsgálataimat alapjában véve 2 részre osztottam. Kutatásaim elején a faanyagról mind vizuálisan, mind pedig műszeresen a lehető legtöbb adatot próbáltam gyűjteni.

A kutatásom második felében az ezzel párhuzamosan zajló fűrészáru osztályozó berendezés fejlesztéséhez szükséges adatokat rögzítettem. Mivel a – már bemutatott – PLG berendezést fejlesztettük, amelynél a geometriai adatok, a CKDR, a tömeg és a longitudinális frekvencián kívül más adatra nincs szükség, ezért csak ezeket rögzítettem. Ezzel egyidőben, amikor lehetőség nyílt nem csak 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m-es pallók, hanem nagyobb keresztmetszetű és hosszúságú pallók illetve gerendák vizsgálatára, akkor egyéb adatokat is mértem a PLG+ berendezéshez szükséges adatokon kívül, azért, hogy a későbbiek során kiértékelhessem és felhasználhassam a doktori disszertációmhoz.

Néhány megállapítás az adatok elemzésével kapcsolatban

A 4.1 fejezetben bemutatott táblázatban (4.1 táblázat) az összes általam végzett mérés darabszáma szerepel. Ezekből 3 csoportot különböztetek meg fafaj valamint származási hely szerint. A csoportok a következőképpen alakulnak:

- I. csoport: Szlovákiából származó lucfenyő
- II. csoport: Oroszországból származó vörösfenyő
- III. csoport: Szlovákiából származó vörösfenyő

A 4.1 táblázatban szereplő erdei fenyő (*Pinus sylvestris*), valamint a 7,5x15 cm-es lucfenyő adatainak elemzésével nem foglalkozom, hiszen nagyon alacsony mintaszámom volt. A csoportok megoszlását az 5.1 táblázat mutatja.

5.1 táblázat: Csoportok megoszlása

| | Kereszt- metszet (cm) | Hossz [m] | Fafaj | Növekedési terület | Próbatest szám [db] | |
|------------------|--------------------------|--------------|------------|-----------------------|---------------------|-------------|
| | | | | | Roncsolásmentes | Roncsolásos |
| I. | 5x10 | 2 | lucfenyő | Szlovákia | 432 | 432 |
| II. | 5x10 | 2 | vörösfenyő | Oroszország | 432 | 432 |
| III. | 5x10 | 2 | vörösfenyő | Szlovákia | 143 | 143 |
| | 5x10 | 4 | | | 41 | 0 |
| | 5x10 | 4 | | | 51 | 51 |
| | 7,5x15 | 6 | | | 50 | 0 |
| | 7,5x15 | 3 | | | 100 | 100 |
| | 10x10 | 4 | | | 58 | 58 |
| Összesen: | | | | | 1307 | 1216 |

Forrás: saját szerkesztés

A próbatestek száma a statisztikai elemzés során csökken, ugyanis nem mindegyik mérés volt „használható”. Azok tartoznak a használható adatok közé, amelyeken a roncsolásmentes és roncsolásos méréseket is maradéktalanul el tudtam végezni, ugyanis előfordultak olyan mérések, amelyeknél megpróbáltuk elvégezni a törővizsgálatot, azonban a mérés közben a nagy kihajlás, a próbatestek csavarodottsága, térgörbesége miatt „kiugrott” és nem tudtuk az anyagot törésig vizsgálni. Ilyen esetben nem kaptam megfelelő adatot az adott próbatest hajlítózilárdságáról.

A statikus rugalmassági modulusz (E_{mg}) értékét a teher-alakváltozás görbe egyenes regressziójából kell számolni. A korrelációs együttható négyzetének (R^2) 0,99-nél nagyobbak kell lennie. Ezeket az előírásokat az MSZ EN 408-as szabvány határozza meg. Előfordult olyan eset, amikor a nem megfelelő beállítás miatt nem lehetett a statikus rugalmassági moduluszt 0,99-es vagy nagyobb korrelációval meghatározni. Az ilyen próbatestet a szabvány szerint el kell dobni.

A roncsolásmentes mérések között is akadt olyan, hogy pl. nem a megfelelő frekvenciát írtam le a mérés során. Ez a kutatásom kezdeti szakaszában fordult inkább elő a rutintalanságom miatt.

A vizsgálatokat csoportonként mutatom be. Az első két csoportnál, csak 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszúságú anyagokat vizsgáltam. A III. csoportban többféle keresztmetszetű és hosszúságú anyagot vizsgáltam, ezért ott több kisebb csoportra osztva mutatom be a vizsgálati eredményeket. Az I. és II. csoport vizsgálatánál az volt célom, hogy szignifikáns kapcsolatot állapítsak meg az egyes roncsolásmentes paraméterek és a mechanikai tulajdonságok között, valamint megvizsgáljam, hogy a paraméterek segítségével a statikus rugalmassági modulusz és a hajlítózilárdság becslésének hibája csökkenthető-e, és ha igen, milyen mértékben. A III. csoport vizsgálata során a mérethatás vizsgálatát mutatom be.

Ahol egy új fogalmat vezetek be, ott egy kis elmélet vagy gyakorlati példa magyarázatával szemléltetem a fogalom jelentőségét, valamint azt, hogy miért fontos az adott paraméter vizsgálata. Néhány statisztikai fogalom magyarázata ugyanis elengedhetetlen az elemzések során.

A 4.2.2 fejezetben bemutatott rostlefutás vizsgálatból származó adatokat a statikus rugalmassági modulusz és a hajlítózilárdság becslésének javítására nem tudtam

felhasználni, mivel nem kaptam használható eredményt a statisztikai vizsgálatok során, valószínűsíthetően az alacsony mintaszám miatt (N=61). Ezért a rostlefutásra vonatkozó paramétereket kihagyom az elemzésből.

Több fontos megjegyzést kell tenni a nedvességgel kapcsolatban is. A nedvességtartalom befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat és a sűrűséget is. Ezt a kapcsolatot vizsgálni nem tudtam, hiszen az egy próbatesten végzett mérések roncsolásmentesen és roncsolásosan is csak egy nedvességtartalom mellett történtek. A roncsolásmentes vizsgálatok és a statikus vizsgálatok között néhány perc telt el, a nedvességtartalom hatásának kiküszöbölése érdekében. A statisztikai elemzések során megállapított eredmények az adott csoportban feltüntetett nedvességtartalom mellett érvényesek.

A nedvességtartalom hatásának kiküszöbölésére az MSZ EN 384-es szabvány ad útmutatást, azonban itt egy adott tételre vonatkoznak a követelmények.

Egy tétel az a faanyag, amelyre a karakterisztikus értékek vonatkoznak. A tételt meghatározó paraméterek a fafaj vagy fafajcsoport, a származási hely és a feldolgozási eljárás, valamint a szilárdsági osztály. Azaz itt nem egy darab próbatestről, hanem egy nagyobb mintaszámú csoportról van szó. Például egy olyan rakat, amely azon faanyagok összessége, amelyek egy fafajúak egy a származási helyük és ugyanaz a szilárdsági osztályuk.

A szabvány a következőket írja le:

A referencia-nedvességtartalom feleljen meg a 20 °C hőmérséklet és 65% relatív páratartalom melletti nedvességtartalomnak. Ez a legtöbb fenyő faanyag esetében kb. 12% nedvességtartalomnak felel meg. Azoknak a mintáknak, amelyeket nem a referencia-feltételek között vizsgáltak, de az átlagos nedvességtartalmuk 10-18%, az alsó 5%-os kvantilisét vagy a középértékét a 12% nedvességtartalomra módosítani kell a következők szerint:

- Hajlító- és húzószilárdság: nem kell módosítani.
- Rugalmassági modulusz: 1%-os módosítás a nedvességtartalom minden 1%-os eltérése esetén.
- Sűrűség: Ha a nedvességtartalom 12%-nál nagyobb, a sűrűséget 0,5%-kal csökkenteni, ha pedig 12%-nál kisebb, 0,5%-kal növelni kell minden 1%-os eltérés esetén (MSZ EN 384).

A fent leírt szabvány szerinti módosításokat a fűrészáru osztályozó berendezés minősítése során elvégeztük, ugyanis ott már szilárdsági osztály alapján meghatározott csoportokról (tégelekről) van szó.

5.1.1 I. csoport vizsgálata

Az I. csoportba a Szlovákiából származó 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszú lucfenyő pallók tartoznak. A nedvességtartalom $13\pm 2\%$. Néhány jellemző adatot az 5.2 táblázatban mutatok be, hogy egy átfogó képet adjak a vizsgált anyag tulajdonságairól.

5.2 táblázat: I. csoport tulajdonságai

| | GTA | SZGTA | SZCKDR | CKDR | Nedvesség [%] | Csillapítás | long1 MOE ⁶ [GPa] | Sűrűség [kg/m ³] | Statikus MOE [GPa] | HSZIL [MPa] |
|--------|-------|-------|--------|-------|---------------|-------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------|
| Átlag | 0,245 | 0,253 | 0,238 | 0,232 | 12,7 | 26,6 | 10,5 | 421,8 | 10,2 | 38,5 |
| Szórás | 0,145 | 0,180 | 0,178 | 0,140 | 2,5 | 4,4 | 2,7 | 42,2 | 2,3 | 12,5 |

Forrás: saját szerkesztés

Jelölésmagyarázat:

| | |
|---------------|--|
| GTA: | Göcsterület arány, |
| SZGTA: | Szegély göcsterület arány, |
| SZCKDR: | Szegély göcsátmérő arány, |
| CKDR: | Göcsátmérő arány, |
| long1 MOE: | longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 1. móduszban, |
| Statikus MOE: | Statikus rugalmassági modulusz, |
| HSZIL: | Hajlítószilárdság. |

A „rugalmassági modulusz” kiírása helyett sok esetben a MOE (Modulus of Elasticity) mozaikszót alkalmazom, mely a nemzetközi szakirodalomban elterjedt rövidítése.

A statisztikai elemzést azzal kezdtem, hogy megállapítottam, hogy az általam mért paraméterek milyen kapcsolatban vannak a statikus rugalmassági moduluszal, valamint a hajlítószilárdsággal. Először bemutatom a statikus rugalmassági moduluszra, majd a hajlítószilárdságra vonatkoztatott eredményeket. Minden esetben a STATISTICA szoftvert és többparaméteres lineáris regressziót alkalmaztam.

5.1.1.1 Statikus rugalmassági modulusz meghatározása

Az 5.3 táblázatban látható a roncsolásmentes paraméterek és a statikus rugalmassági modulusz korrelációja és a becslés standard hibája. A táblázat 4. oszlopában a regresszió vizsgálat elemszámát tüntetem fel.

⁶ MOE: Modulus of Elasticity – rugalmassági modulusz

5.3 táblázat: Korreláció és standard hiba a becslőparaméterek és a statikus rugalmassági modulusz között

| Statikus rugalmassági modulusz becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba () | Elemsszám (N) |
|---|-----------------------------|-------------------|---------------|
| Átlag évgyűrűszélesség | 0,53 | 2,13 | 209 |
| Maximális évgyűrűszélesség | 0,53 | 2,12 | 209 |
| GTA | 0,42 | 2,22 | 231 |
| SZGTA | 0,47 | 2,16 | 231 |
| SZCKDR | 0,45 | 2,02 | 282 |
| CKDR | 0,46 | 2,02 | 283 |
| long1 MOE | 0,96 | 0,66 | 283 |
| long2 MOE | 0,95 | 0,77 | 195 |
| long3 MOE | 0,96 | 0,69 | 200 |
| long4 MOE | 0,96 | 0,73 | 158 |
| hajl1 MOE | 0,97 | 0,53 | 281 |
| hajl2 MOE | 0,94 | 0,84 | 207 |
| (G) | 0,93 | 0,92 | 210 |
| Csillapítás | 0,66 | 1,70 | 282 |
| Sűrűség | 0,67 | 1,69 | 283 |

Forrás: saját szerkesztés

Jelölésmagyarázat:

long1,2,3,4 MOE: longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 1., 2., 3., 4. módusban,

hajl1,2 MOE: hajlító rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 1., 2., módusban.

Korrelációs együttható fogalma

Gyakran előfordul, hogy két változó mennyiség közötti kapcsolatot vizsgálunk. A kapcsolat szorosságát célszerű egy mérőszámmal jellemezni. Nagyon sok ilyen mérőszám létezik, ezek közül a legelterjedtebb az ún. korrelációs együttható, vagy Pearson-féle korrelációs együttható. Az együtthatót R-rel jelöljük, és a mérések közötti lineáris kapcsolat szorosságát méri. Az R értékét az alábbi képlettel határozhatjuk meg:

$$R = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad [5.1]$$

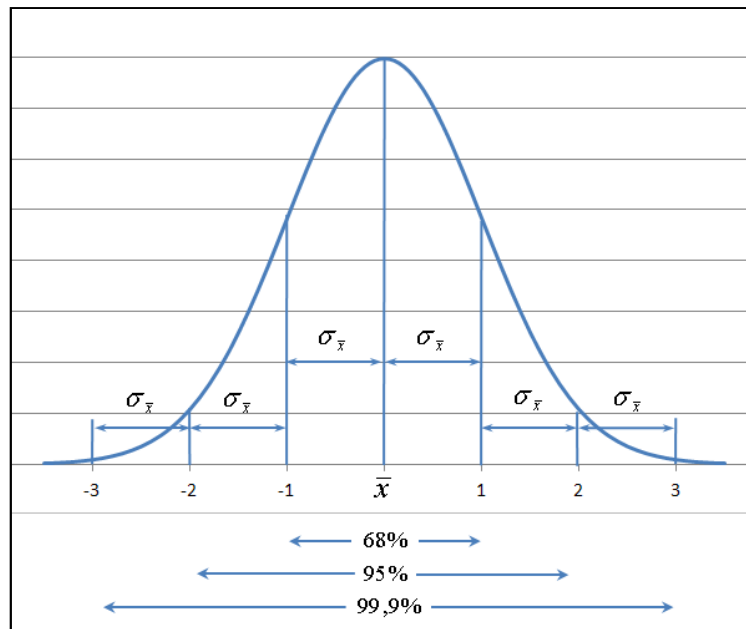
- ahol: x : egyik minta értékei,
- \bar{x} : egyik minta értékeinek átlaga,
- y : másik minta értékei,
- \bar{y} : másik minta értékeinek átlaga.

R mindig -1 és +1 közé esik. Ha a pontok nem fekszenek egy egyenes mentén, akkor azt mondjuk, hogy nincs korreláció közöttük (R=0), vagy gyenge korreláció van közöttük (R közel van 0-hoz). Ha a pontok egy egyenes mentén fekszenek, akkor R

közel van +1-hez vagy -1-hez, ekkor azt mondjuk, hogy a két változó között szoros vagy magas korreláció van. Ha a pontok pontosan rajta vannak egy növekvő egyenesen, akkor $R=1$, ha pedig egy csökkenő egyenesen vannak pontosan rajta, akkor $R=-1$. [5]

Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) fogalma

A standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) megmutatja, hogy a mintából származó becslések milyen mértékben szóródnak a populációs paraméter körül, vagyis megmondhatjuk, hogy a populációs paraméter körüli bizonyos intervallumokba a mintabecslések mekkora hányada fog esni. A mintából származó becsléseknek közelítőleg 68%-a esik a paraméter körüli 1 standard hiba szélességű sávba (± 1 standard hibányi távolságra), a becsléseknek közelítőleg 95%-a a paramétertől ± 2 standard hibányi távolságra, és a becsléseknek közelítőleg 99,9%-a esik a paraméter körüli 3 standard hiba szélességű sávba [6]. Ezt szemlélteti az 5.1 ábra.



5.1 ábra: Standard hiba eloszlása

Forrás: saját szerkesztés

Az alábbi képlettel számolható a standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) :

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{N - 2}} \quad [5.2]$$

- ahol: Y : a függő változó valós értéke,
- Y' : a függő változó lineáris regresszióval becsült értéke,
- N : elemszám.

A standard hibát a STATISTICA szoftver mindig az adott függő változó (Dependent Variable) mértékegységében adja meg.

Az 5.3 táblázatban több egymástól nem független paraméter is szerepel, pl. a különböző módusokban mért dinamikus rugalmassági modulusok. Ezt az 5.4

táblázatban szereplő korrelációs mátrixszal is alá lehet támasztani. A korrelációs mátrix megmutatja az egyes paraméterek közötti összefüggést. A világoskékkel jelölt paraméterek korrelációs koefficiense 1-hez közelít. Ebből arra következtethetünk, hogy ezek nem független paraméterek. A mátrixból ezen kívül azt is ki lehet olvasni, hogy az adott paraméterek között pozitív, avagy negatív korreláció áll fenn. Szemléltetésként nézzük pl. a statikus rugalmassági modulusz és a hajlítószilárdság közötti kapcsolatot, melynek értéke +0,84. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogyha a statikus rugalmassági modulusz értéke nő, akkor a hajlítószilárdság értéke is nagy valószínűséggel nőni fog. A gyakorlatból tudjuk, hogy ez tényleg így is van, hiszen nagyobb rugalmassági moduluszú faanyaghoz nagyobb hajlítószilárdság tartozik. Ezzel ellentétben, ha vizsgáljuk az átlag évgyűrűszélesség és a hajlítószilárdság kapcsolatát, azt látjuk, hogy a korrelációs koefficiens értéke -0,54, azaz ha az évgyűrűszélesség nő a hajlítószilárdság nagy valószínűséggel csökkeni fog, vagy fordítva. Ez szintén belátható, hiszen a sűrűbb szöveti szerkezettel rendelkező faanyag hajlítószilárdsága valóban nagyobb, mint egy kevésbé sűrűé.

Itt megjegyezném, hogy az *5.3 táblázatban* és a korrelációs mátrixban egyes értékek azért nem egyeznek meg, mert a mátrixban a korrelációt a STATISTICA szoftver csak azokra a paraméterekre tudja meghatározni, amelyeknél minden, a mátrixban is szereplő paraméter szerepel. Ezért a mátrix 145 db-os elemszámra van meghatározva. A fenti táblázatban szereplő kapcsolatokat pedig párosával vizsgáltam, hogy az elemszámot növelni tudjam, ezzel is pontosítva az eredményt a statikus rugalmassági modulusz becslésénél.

5.4 táblázat: Korrelációs mátrix

| N ⁷ =145 | Átlag évgyűrű- szélesség | Max. évgyűrű- szélesség | GTA | SZGTA | SZCKDR | CKDR | long 1 MOE | long 2 MOE | long 3 MOE | long 4 MOE | hajl 1 MOE | hajl 2 MOE | G | Csill. | HSZIL | SŰR | STAT MOE |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|-------|--------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|--------|-------|-------|-------------|
| Átlag évgyűrűsz. | 1,00 | 0,88 | 0,37 | 0,26 | 0,20 | 0,29 | -0,59 | -0,58 | -0,59 | -0,58 | -0,59 | -0,58 | -0,61 | 0,41 | -0,54 | -0,62 | -0,59 |
| Max. évgyűrűsz. | 0,88 | 1,00 | 0,34 | 0,22 | 0,20 | 0,27 | -0,56 | -0,56 | -0,56 | -0,56 | -0,56 | -0,56 | -0,58 | 0,37 | -0,51 | -0,57 | -0,57 |
| GTA | 0,37 | 0,34 | 1,00 | 0,70 | 0,49 | 0,69 | -0,43 | -0,40 | -0,42 | -0,41 | -0,41 | -0,37 | -0,39 | 0,46 | -0,60 | -0,22 | -0,45 |
| SZGTA | 0,26 | 0,22 | 0,70 | 1,00 | 0,78 | 0,70 | -0,38 | -0,35 | -0,38 | -0,37 | -0,42 | -0,35 | -0,33 | 0,53 | -0,62 | -0,15 | -0,46 |
| SZCKDR | 0,20 | 0,20 | 0,49 | 0,78 | 1,00 | 0,89 | -0,34 | -0,31 | -0,34 | -0,33 | -0,40 | -0,31 | -0,27 | 0,51 | -0,48 | -0,11 | -0,42 |
| CKDR | 0,29 | 0,27 | 0,69 | 0,70 | 0,89 | 1,00 | -0,39 | -0,35 | -0,38 | -0,37 | -0,42 | -0,34 | -0,32 | 0,50 | -0,52 | -0,16 | -0,43 |
| long 1 MOE | -0,59 | -0,56 | -0,43 | -0,38 | -0,34 | -0,39 | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,97 | -0,62 | 0,79 | 0,79 | 0,97 |
| long 2 MOE | -0,58 | -0,56 | -0,40 | -0,35 | -0,31 | -0,35 | 0,99 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | -0,60 | 0,77 | 0,79 | 0,96 |
| long 3 MOE | -0,59 | -0,56 | -0,42 | -0,38 | -0,34 | -0,38 | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,98 | -0,62 | 0,79 | 0,80 | 0,97 |
| long 4 MOE | -0,58 | -0,56 | -0,41 | -0,37 | -0,33 | -0,37 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 0,97 | 0,96 | 0,97 | -0,60 | 0,78 | 0,79 | 0,96 |
| hajl 1 MOE | -0,59 | -0,56 | -0,41 | -0,42 | -0,40 | -0,42 | 0,98 | 0,97 | 0,98 | 0,97 | 1,00 | 0,97 | 0,96 | -0,66 | 0,80 | 0,80 | 0,98 |
| hajl 2 MOE | -0,58 | -0,56 | -0,37 | -0,35 | -0,31 | -0,34 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 1,00 | 0,96 | -0,64 | 0,77 | 0,81 | 0,94 |
| G | -0,61 | -0,58 | -0,39 | -0,33 | -0,27 | -0,32 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 1,00 | -0,59 | 0,75 | 0,81 | 0,93 |
| Csill. | 0,41 | 0,37 | 0,46 | 0,53 | 0,51 | 0,50 | -0,62 | -0,60 | -0,62 | -0,60 | -0,66 | -0,64 | -0,59 | 1,00 | -0,71 | -0,29 | -0,69 |
| HSZIL | -0,54 | -0,51 | -0,60 | -0,62 | -0,48 | -0,52 | 0,79 | 0,77 | 0,79 | 0,78 | 0,80 | 0,77 | 0,75 | -0,71 | 1,00 | 0,58 | 0,84 |
| SŰR | -0,62 | -0,57 | -0,22 | -0,15 | -0,11 | -0,16 | 0,79 | 0,79 | 0,80 | 0,79 | 0,80 | 0,81 | 0,81 | -0,29 | 0,58 | 1,00 | 0,75 |
| STAT MOE | -0,59 | -0,57 | -0,45 | -0,46 | -0,42 | -0,43 | 0,97 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,98 | 0,94 | 0,93 | -0,69 | 0,84 | 0,75 | 1,00 |

Forrás: saját szerkesztés

Jelölésmagyarázat:

STAT MOE: Statikus rugalmassági modulusz

⁷ N: elemszám

Ha a statikus rugalmassági moduluszt szeretnénk a lehető legpontosabban megbecsülni, a függő paraméterek közül egyet kiválasztunk, majd a többi paramétert függetlennek tekintve többparaméteres lineáris regresszióval statisztikailag elemezzük az adatokat. Erre az egymástól való függőség miatt van szükség. Ahhoz, hogy a legjobb becslést meg tudjam határozni, rengeteg kombináció vizsgálatára van szükség. Ezt a szoftver segítségével el is végeztem, melyek közül a legjobbkat mutatom be. Egy kis elmélet szükséges a vizsgálat megértéséhez, amelyet a következőkben írok le.

A p-érték az első fajta hiba (nullhipotézis hibás elvetése) valószínűségét adja meg. A szokásos hibahatárnak megfelelően, ha a p-érték 5%-nál kisebb, vagy egyenlő ($p \leq 0,05$), akkor a H_0 -t (nullhipotézis) elvetjük, ha pedig nagyobb ($p > 0,05$), akkor megtartjuk. Akkor mondjuk, hogy egy megfigyelt hatás, különbség stb. statisztikailag szignifikáns, ha a hatásra (különbségre, hányadosra stb.) vonatkozó nullhipotézist (H_0) a megfigyelés alapján el kell utasítanunk. Ez szemléletesen azt jelenti, hogy a mintában megfigyelt jelenség bizonyíthatóan (természetesen egy bizonyos, hagyományosan $\leq 5\%$ tévedési valószínűség, pontosabban első fajta hiba fenntartásával) nem a véletlen műve, hanem a populáció szintjén is fennáll. Ezzel szemben a „statisztikailag nem szignifikáns” azt jelenti, hogy a mintában tapasztalt tulajdonság számottevő valószínűséggel (hagyományosan $> 5\%$; lehet más értéket is választani, esetemben a hagyományos 5 %-os értékkel dolgoztam) lehet a véletlen műve is [4].

A fenti elmélet alapján kerestem a legjobb kapcsolatot a statikus rugalmassági modulusz és az általam meghatározott becslő paraméterek között, valamint egyes kombinációjuk között. Ugyanígy jártam el a továbbiakban bemutatott eredményeknél is, a hajlítószilárdság esetében.

A statisztikai elemzés menete a fent bemutatott elmélet alapján a következő volt. Vettem egy kombinációt és néztem az egyes paraméterek p-értékét. A legrosszabb p-értéket kivettem a vizsgálatból és újra lefuttattam a vizsgálatot, majd újra megvizsgáltam az értékeket és újra kivettem a legmagasabb p-értékű paramétert. Ezt addig csináltam, amíg az összes p-érték nem csökkent a meghatározott 5% alá. Ezen kívül figyeltem azt is, hogy az adott kombináció vizsgálata hogyan befolyásolja a mérés standard hibáját, valamint milyen hatással van a korrelációra.

Ugyan a vizsgálatok elvégzése időigényes, de szerencsére a STATISTICA szoftverrel ez a művelet viszonylag könnyen elvégezhető annak ellenére, hogy rengeteg kombináció vizsgálatára van szükség. Dolgozatomban a több száz vizsgálat közül természetesen csak azt mutatom be, amelyek a legkedvezőbb értékeket adták.

A becslések során két dinamikus rugalmassági moduluszt (első módusban mért hajlító rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz és első módusban mért longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz) vettem be a statisztikai vizsgálatba, valamint a göcsparamétereket és a csillapítást. Azért döntöttem ezek mellett, mert a hajlító modulusz korrelál a legjobban a statikus rugalmassági modulussszal, a longitudinális pedig széles körben elterjedt a gyakorlatban, a fűrészáru osztályozás miatt. A többi független paraméter vizsgálata során pedig a célom az volt, hogy szignifikáns kapcsolatot mutassak ki eme paraméterek és az egyes mechanikai tulajdonságok között, valamint a becslés hibáját csökkentsem.

Az 5.5 táblázatokban látható a STATISTICA szoftver által készített lineáris regresszió vizsgálat eredménye, amelyet a statikus rugalmassági modulusz és az első módusban mért hajlítórezgésből számított dinamikus rugalmassági modulusz illetve az első módusban mért longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz között hajtottam végre.

5.5 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító illetve longitudinális modulusz és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,97257309 R2= ,94589842 Adjusted R2= ,94570451 F(1,279)=4878,0 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,52824 | | | | | | |
|---|----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(279) | p-value |
| Intercept | | | 0,895718 | 0,136581 | 6,55815 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,972573 | 0,013925 | 0,911754 | 0,013054 | 69,84244 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,95728372 R2= ,91639213 Adjusted R2= ,91609459 F(1,281)=3079,9 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,65760 | | | | | | |
|---|----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(281) | p-value |
| Intercept | | | 1,519919 | 0,160673 | 9,45970 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,957284 | 0,017249 | 0,797044 | 0,014362 | 55,49710 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

A megjelenő adatok közül a p-érték (p-value) a korrelációs koefficiens (R) valamint a standard hiba (Std. Error of estimate) a legfontosabb adatok, ami alapján a vizsgálatokat felépítettem. Látható, hogy a hajlító modulusz vizsgálatával a hiba 0,52 GPa, a longitudinális moduluszal kicsivel rosszabb, 0,65 GPa. A hibaadatokat a szoftver mindig az adott függő változó (Dependent Variable) – jelen esetben a statikus rugalmassági modulusz (STAT. MOE) – mértékében adja meg.

A következő táblázatokban látható, hogy a hajlító rugalmassági modulusz és egy további paraméter hozzáadásával végzett többparaméteres lineáris regresszió milyen eredményeket ad.

5.6 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, GTA és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,97602390 R2= ,95262265 Adjusted R2= ,95220339 F(2,226)=2272,1 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,53150 | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|-----------|------------------|----------|----------|
| | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(226) | p-value |
| Intercept | | | 1,292743 | 0,188545 | 6,85641 | 0,000000 |
| GTA | -0,051238 | 0,015723 | -0,887791 | 0,272430 | -3,25879 | 0,001291 |
| hajl 1MOE | 0,954905 | 0,015723 | 0,891419 | 0,014678 | 60,73242 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

5.7 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, SZGTA és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,97662442 R2= ,95379526 Adjusted R2= ,95338637 F(2,226)=2332,6 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,52488 | | | | | | |
|---|-----------|----------------|-----------|---------------|----------|----------|
| N=229 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(226) | p-value |
| Intercept | | | 1,370771 | 0,183525 | 7,46914 | 0,000000 |
| szeg.GTA | -0,064557 | 0,015833 | -0,879983 | 0,215823 | -4,07735 | 0,000063 |
| hajl 1MOE | 0,947157 | 0,015833 | 0,884187 | 0,014780 | 59,82172 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

5.8 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, CKDR és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,97349723 R2= ,94769685 Adjusted R2= ,94732057 F(2,278)=2518,6 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,52032 | | | | | | |
|---|-----------|----------------|-----------|---------------|----------|----------|
| N=281 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(278) | p-value |
| Intercept | | | 1,268146 | 0,180581 | 7,02260 | 0,000000 |
| CKDR | -0,047134 | 0,015245 | -0,759092 | 0,245521 | -3,09176 | 0,002192 |
| hajl 1MOE | 0,952002 | 0,015245 | 0,892469 | 0,014292 | 62,44652 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

5.9 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, SZCKDR és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,97321955 R2= ,94715629 Adjusted R2= ,94677475 F(2,277)=2482,4 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,51988 | | | | | | |
|---|-----------|----------------|-----------|---------------|----------|----------|
| N=280 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(277) | p-value |
| Intercept | | | 1,245748 | 0,174438 | 7,14150 | 0,000000 |
| SZCKDR | -0,050260 | 0,015291 | -0,649448 | 0,197588 | -3,28687 | 0,001144 |
| hajl 1MOE | 0,950595 | 0,015291 | 0,892367 | 0,014354 | 62,16653 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

5.10 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, csillapítás és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,97462616 R2= ,94989616 Adjusted R2= ,94953440 F(2,277)=2625,8 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,50717 | | | | | | |
|---|-----------|----------------|-----------|---------------|----------|----------|
| N=280 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(277) | p-value |
| Intercept | | | 2,518274 | 0,374004 | 6,73329 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,922959 | 0,017319 | 0,862990 | 0,016194 | 53,29174 | 0,000000 |
| csill B1 | -0,078942 | 0,017319 | -0,043020 | 0,009438 | -4,55811 | 0,000008 |

Forrás: saját szerkesztés

Mivel egy esetben sem éri el a p-érték a 0,05 értéket, megállapítható, hogy mindegyik paraméter független és szignifikáns kapcsolatban van a statikus rugalmassági modulusszal, valamint egyes esetekben a mérés korrelációja növelhető és hibája csökkenthető.

A fent bemutatottakat az 5.11 táblázatban foglalom össze.

5.11 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a hajlító modulusz és egyéb becsülő paraméterekkel együtt

| Statikus rugalmassági modulusz becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemsszám (N) |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|---------------|
| hajl1 MOE | 0,973 | 0,528 | 281 |
| hajl1 MOE+GTA | 0,976 | 0,532 | 229 |
| hajl1 MOE+SZGTA | 0,977 | 0,525 | 229 |
| hajl1 MOE+CKDR | 0,973 | 0,520 | 281 |
| hajl1 MOE+SZCKDR | 0,973 | 0,520 | 280 |
| hajl1 MOE+Csillapítás | 0,975 | 0,507 | 280 |

Forrás: saját szerkesztés

A fentiek alapján újból elvégeztem a többparaméteres regressziót, csak nem a hajlító, hanem a longitudinális moduluszt vettem be a statisztikai vizsgálatba; ekkor az alábbi táblázatban összefoglalt értékeket kaptam. Ebben az esetben is minden p-érték 0,05 alatt van. Itt a csillapítást kihagytam a regresszió számításból, hiszen longitudinális rezgés során tettem ugyan próbálkozást a csillapítás mérésére, de használható adat hiányában ezt elvettem.

5.12 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a longitudinális modulusz és egyéb becsülő paraméterekkel együtt

| Statikus rugalmassági modulusz becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemsszám (N) |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|---------------|
| long1 MOE | 0,957 | 0,658 | 283 |
| long1 MOE+GTA | 0,960 | 0,681 | 231 |
| long1 MOE+SZGTA | 0,965 | 0,639 | 231 |
| long1 MOE+CKDR | 0,960 | 0,637 | 283 |
| long1 MOE+SZCKDR | 0,962 | 0,621 | 282 |

Forrás: saját szerkesztés

Látható, hogyha csak egy dinamikus rugalmassági moduluszal közelítjük a statikus rugalmassági moduluszt, a mérés hibája 0,528 GPa hajlító, és 0,658 GPa longitudinális rugalmassági modulusz esetén. Ezt javíthatjuk, ha a rugalmassági moduluszok mellé bevesszük a SZGTA-t, CKDR-t, SZCKDR-t, vagy a csillapítást, mint becsülő paraméter. A legjobb hibacsökkentő paraméter a hajlító modulusz mellett a csillapítás, longitudinális modulusz mellett a SZCKDR.

Ha nem csak kettő, hanem egyszerre több paramétert is beleveszünk a vizsgálatba annak érdekében, hogy a hibát csökkenteni tudjuk, azaz az eddigi paramétereket különböző kombinációkban is megvizsgáljuk lineáris többparaméteres regresszióval, nem érhető el jobb eredmény sem a hajlító, sem pedig a longitudinális rugalmassági modulusz és egyéb paraméterek kombinációjaként. A hajlító rugalmassági modulusznál az 5.10 táblázatban és az 5.11 táblázat utolsó sorában bemutatott eredmények adják a legjobb becslést, míg longitudinális esetben az 5.13 táblázatban és az 5.12 táblázat utolsó sorában bemutatott eredmények.

5.13 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a longitudinális modulusz, SZCKDR és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| R= ,96172167 R2= ,92490858 Adjusted R2= ,92437029 | | | | | | |
| F(2,279)=1718,2 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,62065 | | | | | | |
| N=282 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(279) | p-value |
| Intercept | | | 2,21352 | 0,190755 | 11,60402 | 0,000000 |
| SZCKDR | -0,106612 | 0,017688 | -1,38213 | 0,229304 | -6,02748 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,916775 | 0,017688 | 0,76328 | 0,014726 | 51,83139 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

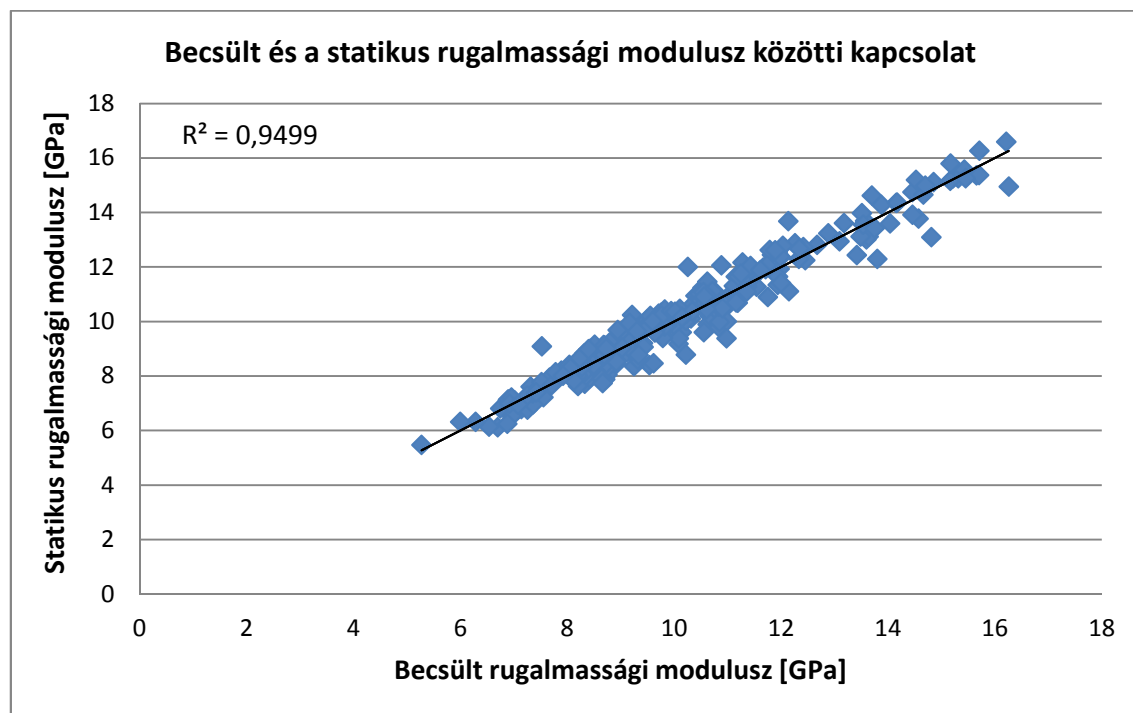
A statisztikai elemzés során lefuttatott rengeteg többparaméteres lineáris regresszió esetében ezekkel a paraméterekkel lehet a legpontosabban megbecsülni a statikus rugalmassági moduluszt. A szoftverből kiolvashatóak az egyes paraméterek együtthatói is (b), mellyel meghatározhatóak a becslések egyenletei. A dinamikus hajlító rugalmassági moduluszt és a csillapítást használva a becsléshez, az egyenlet az alábbi szerint alakul:

$$E_{\text{becsült}} = 0,863 \cdot \text{hajl1MOE} - 0,043 \cdot \text{Csillapítás} + 2,512 \quad [5.3]$$

ahol: *hajl1MOE*: hajlító rezgésből számolt rugalmassági modulusz első módusban [GPa],

Csillapítás: logaritmikus dekrementum ezerszerese.

Az 5.2 ábrán látható a becült és a statikus rugalmassági modulusz közötti összefüggés.



5.2 ábra: A becült és a statikus rugalmassági modulusz közötti kapcsolat

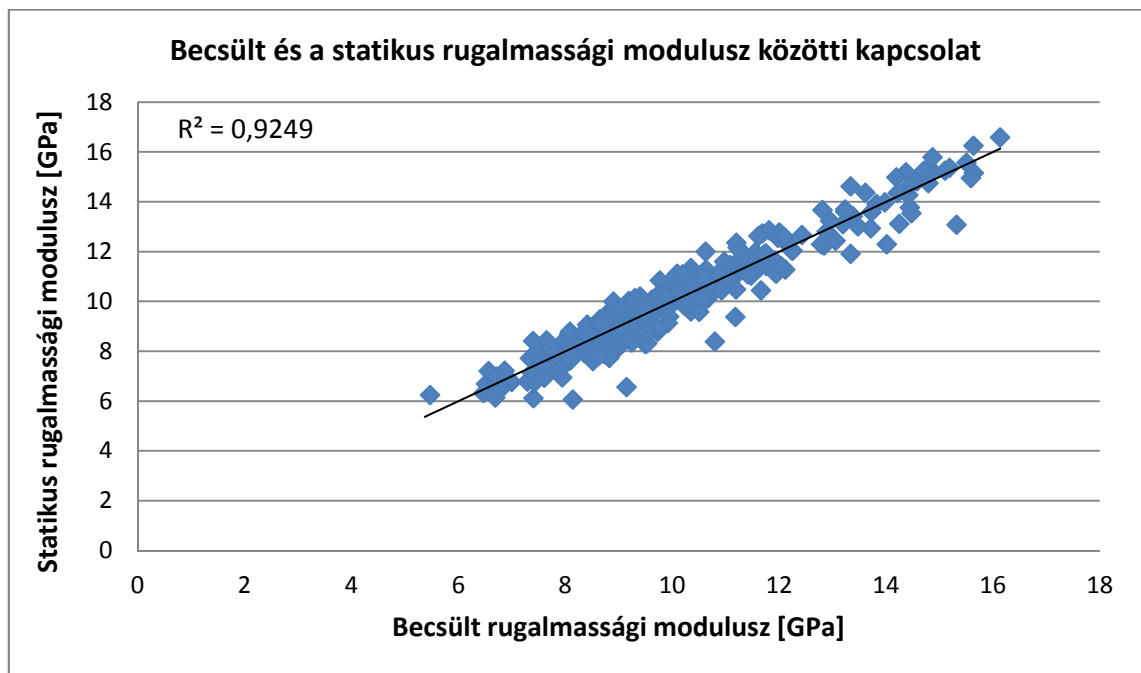
Forrás: saját szerkesztés

Ha a dinamikus longitudinális rugalmassági moduluszt és a SZCKDR-t használjuk a becsléshez, az egyenlet az alábbi szerint alakul:

$$E_{\text{becsült}} = 0,763 \cdot \text{long1MOE} - 1,382 \cdot \text{SZCKDR} + 2,214 \quad [5.4]$$

ahol: *long1MOE*: longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulusz első módusban [GPa],
SZCKDR: szegély göcsátmérő arány.

Az 5.3 ábrán látható a becsült és a statikus rugalmassági modulusz közötti összefüggés.



5.3 ábra: A becsült és a statikus rugalmassági modulusz közötti kapcsolat

Forrás: saját szerkesztés

A hajlító rezgéssel meghatározott rugalmassági modulussszal történő becslés esetén kicsit jobb korreláció figyelhető meg, mint a longitudinálissal. Ez azonban nem olyan nagy különbség, hogy a fűrészáru osztályozó berendezések áttérjenek a hajlítórezgés mérésére, ugyanis a hajlító rezgés frekvenciája lényegesen alacsonyabb, mint a longitudinálisé, ezzel lassítva a mérést, valamint a magasabb frekvenciát mérés technikailag könnyebb detektálni.

Az átlag évgyűrűszélesség és a maximális évgyűrűszélességet nem említettem a vizsgálatok során, mivel az elemzések egy esetben sem adtak megfelelő értéket. A regresszió-vizsgálat során a p-érték minden kombinációnál a 0,05-os érték alatt volt. Ebből arra lehet következtetni, hogy a statikus rugalmassági modulusz becslésénél, mint független paraméter nem használható, annak ellenére, hogy a korrelációja meghaladja mindegyik göcsparaméter korrelációját (5.3 táblázat).

5.1.1.2 Hajlítósíllárdság beclése

Az előzőekben bemutatottak alapján megállapítottam a korrelációs értékeket és standard hibákat a hajlítósíllárdság és a roncsolásmentes paraméterek között is. Az értékeket az 5.14 táblázat tartalmazza.

5.14 táblázat: Korreláció, standard hiba és az elemszám a beclőparaméterek és a hajlítósíllárdság között

| Hajlítósíllárdság beclése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Darabszám (db) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Átlag évgyűrűszélesség | 0,48 | 12,30 | 240 |
| Maximális évgyűrűszélesség | 0,46 | 12,44 | 240 |
| GTA | 0,57 | 11,37 | 266 |
| SZGTA | 0,59 | 11,24 | 266 |
| SZCKDR | 0,51 | 10,81 | 375 |
| CKDR | 0,55 | 10,45 | 376 |
| long 1 MOE | 0,79 | 7,76 | 376 |
| long 2 MOE | 0,79 | 8,69 | 224 |
| long 3 MOE | 0,80 | 8,60 | 228 |
| long 4 MOE | 0,81 | 8,60 | 181 |
| hajl 1 MOE | 0,80 | 7,52 | 373 |
| hajl 2 MOE | 0,78 | 8,84 | 239 |
| (G) | 0,76 | 9,14 | 242 |
| Csillapítás | 0,68 | 9,19 | 374 |
| Sűrűség | 0,43 | 11,31 | 376 |
| Statikus rug. mod. | 0,80 | 7,46 | 282 |

Forrás: saját szerkesztés

A vizsgálatokat itt is elvégeztem az előző fejezetben bemutatottakra analóg módon. Itt is az 1. módusban mért hajlítórengés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági moduluszt és az 1. módusban mért longitudinális rengés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz volt a vizsgálat alapparamétere. Az átlag évgyűrűszélesség és a maximális évgyűrűszélesség vizsgálatával itt sem kaptam használható eredményeket. A göcsparaméterekkel és a csillapítással történő vizsgálat eredményeit az alábbi táblázatban foglalom össze. A STATISTICA szoftver által készült vizsgálatok táblázatai a 3. sz. mellékletben láthatóak.

5.15 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a dinamikus hajlító rugalmassági modulusz és egyéb becslő paraméterek valamint a hajlítószilárdság között

| Hajlítószilárdság becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemzés (N) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| hajl1 MOE | 0,801 | 7,524 | 373 |
| hajl1 MOE+GTA | 0,853 | 7,269 | 263 |
| hajl1 MOE+SZGTA | 0,855 | 7,233 | 263 |
| hajl1 MOE+CKDR | 0,831 | 7,009 | 373 |
| hajl1 MOE+SZCKDR | 0,825 | 7,121 | 372 |
| hajl1 MOE+Csillapítás | 0,830 | 7,000 | 371 |

Forrás: saját szerkesztés

Az eredményekből megállapítható, hogy az 1. módusban mért hajlítórezgés frekvenciából számolt dinamikus rugalmassági modulusz mellett mindegyik göcsparaméter, valamint a csillapítás is használható a hajlítószilárdság becslés hibájának csökkentésében. Mindegyik kapcsolat szignifikánsnak mondható: a p-érték minden esetben 0,05 alatti.

Ha analóg módon végrehajtom a regresszió számítását, de most alapparaméternek az 1. módusban mért longitudinális frekvenciából számolt rugalmassági moduluszt veszem és mellé becslő paraméterekként a göcsparamétereket az alábbi táblázatban összefoglalt eredményeket kapom. A STATSTICA-val készült eredményeket a 4. sz. melléklet tartalmazza.

5.16 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a dinamikus longitudinális rugalmassági modulusz, a göcsparaméterek valamint a hajlítószilárdság között

| Hajlítószilárdság becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemzés (N) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| long1 MOE | 0,786 | 7,760 | 376 |
| long1 MOE+GTA | 0,839 | 7,557 | 266 |
| long1 MOE+SZGTA | 0,851 | 7,313 | 266 |
| long1 MOE+CKDR | 0,823 | 7,142 | 376 |
| long1 MOE+SZCKDR | 0,820 | 7,197 | 375 |

Forrás: saját szerkesztés

Az eredmények hasonlóak a hajlító rezgésnél bemutatottaknál. Itt is mindegyik göcsparaméter felhasználható a szilárdságbecslés hibájának csökkentésére. Mindegyik paraméter p-értéke 0,05 alatti, ezáltal a kapcsolat szignifikánsnak mondható.

Itt is próbáltam a lehető legkisebb hibával megbecsülni a hajlítószilárdságot több paraméter együttes vizsgálatával, mind hajlító, mind pedig longitudinális rugalmassági modulusz esetén. Hajlító rezgés esetén a legjobb eredményt akkor kaptam, ha a rugalmassági modulusz mellé becslő paraméterként a GTA-t, a SZGTA-t valamint a csillapítást vettem be a többparaméteres lineáris regresszióba. Az 5.17 táblázatban látható a regresszió eredménye hajlító rezgés esetén.

5.17 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, GTA, SZGTA, csillapítás és a hajlítószilárdság között

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| R= ,87259379 R2= ,76141993 Adjusted R2= ,75769211 | | | | | | |
| F(4,256)=204,25 p<0,0000 Std.Error of estimate: 6,8194 | | | | | | |
| N=261 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(256) | p-value |
| Intercept | | | 29,7056 | 5,011081 | 5,92797 | 0,000000 |
| GTA | -0,166043 | 0,043507 | -16,1029 | 4,219340 | -3,81645 | 0,000170 |
| szeg.GTA | -0,134917 | 0,045292 | -10,4226 | 3,498930 | -2,97880 | 0,003172 |
| hajl 1MOE | 0,569684 | 0,041272 | 2,9457 | 0,213407 | 13,80326 | 0,000000 |
| csill B1 | -0,177533 | 0,044469 | -0,5469 | 0,136996 | -3,99229 | 0,000086 |

Forrás: saját szerkesztés

A hajlítószilárdság becsléséhez használt egyenlet az alábbiak szerint alakul:

$$\sigma_{\text{becsült}} = 2,946 \cdot \text{hajl1MOE} - 16,103 \cdot \text{GTA} - 10,423 \cdot \text{SZGTA} - 0,547 \cdot \text{Csill} + 29,706 \quad [5.5]$$

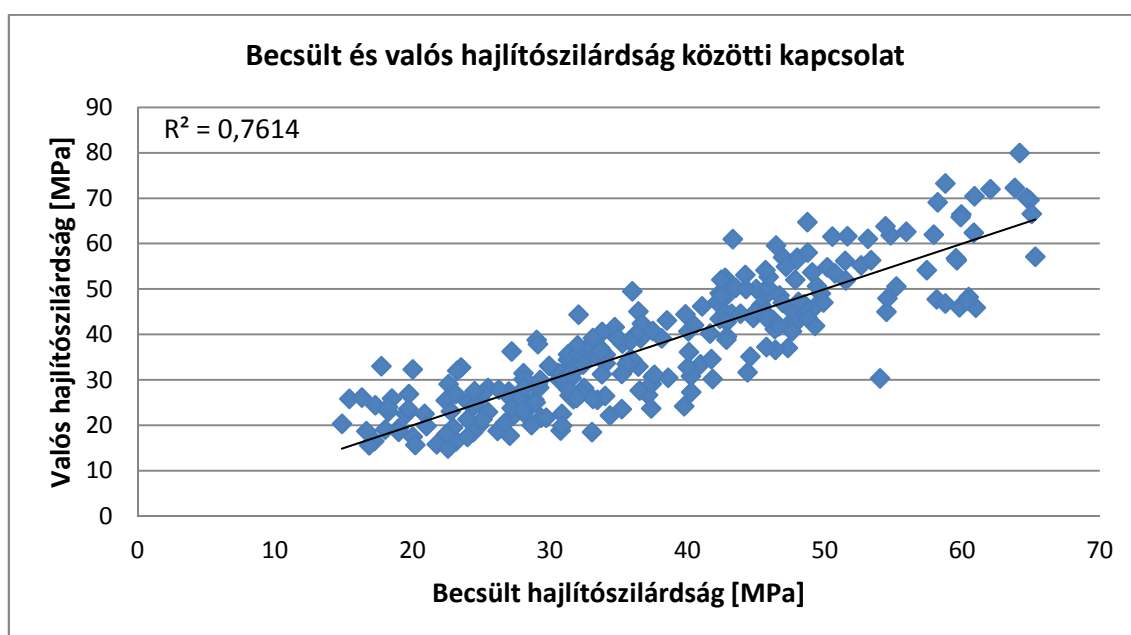
ahol: *hajl1MOE*: hajlító rezgésből számolt rugalmassági modulusz első módusban [GPa],

GTA: göcsterület arány,

SZGTA: szegély göcsterület arány,

Csill: logaritmusos dekrementum ezerszerese.

Az 5.4 ábrán látható a becslt és a valós hajlítószilárdság közötti összefüggés.



5.4 ábra: A becslt és a valós hajlítószilárdság közötti kapcsolat hajlító-rezgés esetén

Forrás: saját szerkesztés

A longitudinális rezgés esetén, ha több paramétert is beveszek a lineáris regresszióba, nem kapok jobb eredményt, mintha csak a CKDR-t veszem bele, így a regresszió eredménye longitudinális rezgés esetén az 5.18 táblázatban látható módon alakul.

5.18 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a longitudinális modulusz, CKDR és a hajlítószilárdság között

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| R= ,82302445 R2= ,67736924 Adjusted R2= ,67563932 F(2,373)=391,56 p<0,0000 Std. Error of estimate: 7,1416 | | | | | | |
| N=376 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(373) | p-value |
| Intercept | | | 10,9380 | 2,021065 | 5,41198 | 0,000000 |
| CKDR | -0,268831 | 0,032476 | -24,1221 | 2,914052 | -8,27786 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,672173 | 0,032476 | 3,1602 | 0,152685 | 20,69753 | 0,000000 |

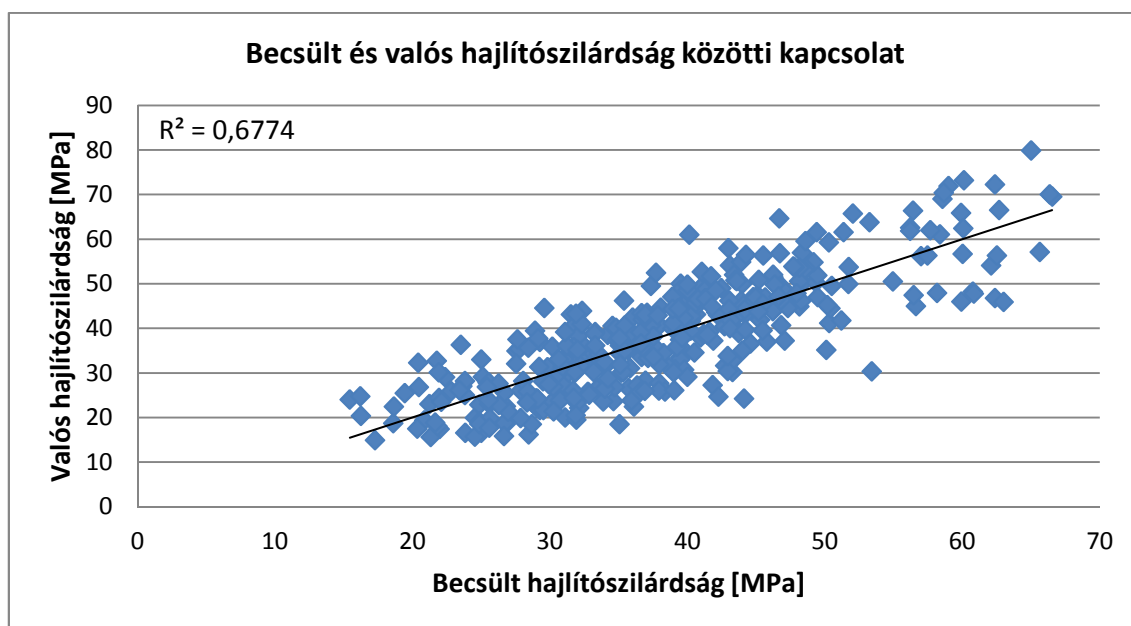
Forrás: saját szerkesztés

A longitudinális becsléséhez használt egyenlet az alábbiak szerint alakul:

$$\sigma_{becsült} = 3,160 \cdot long1MOE - 24,122 \cdot CKDR + 10,938 \quad [5.6]$$

ahol: *long1MOE*: longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz első módusban [GPa],
 CKDR: göcsátmérő arány.

Az 5.5 ábrán látható a becst és a valós hajlítószilárdság közötti összefüggés.



5.5 ábra: A becst és a valós hajlítószilárdság közötti kapcsolat longitudinális rezgés esetén

Forrás: saját szerkesztés

A hajlító rezgésből számolt rugalmassági modulusz esetén itt is jobb korreláció figyelhető meg. Mindkét ábrán látható egy kiugró pont. Ugyanarról a próbatestről van szó mindkét esetben. A próbatest adatait az 5.19 táblázatban foglalom össze.

5.19 táblázat: A 164-es próbatest becült és valós adatai

| 164-es próbatest | Rugalmassági modulusz [GPa] | | | Hajlítószilárdság [MPa] | | |
|---------------------|-----------------------------|----------------|----------|-------------------------|----------------|-------|
| | Hajlító | Longitudinális | Statikus | Hajlító | Longitudinális | Valós |
| | 12,67 | 12,89 | 12,82 | 54,01 | 55,97 | 30,36 |
| Eltérés | -0,14 | 0,08 | - | 23,66 | 25,61 | - |
| Eltérés %-ban | -1,1% | 0,6% | - | 77,9% | 84,4% | - |

Forrás: saját szerkesztés

Érdekes, hogy a rugalmassági moduluszok becslése kimondottan jónak mondható, 1% körüli hibával történt. A szilárdság ennek ellenére mégis igencsak elmarad a becült szilárdság értéktől. A próbatest törésképe alapján elmondható, hogy hosszában repedt meg az adott palló. A képek az 5. sz. mellékleten láthatóak. Feltételezhetően egy olyan jelentéktelennek tűnő bütürepedés volt a próbatesten, amit korábban a vizuális felmérés során nem vettem észre. Ez is azt bizonyítja, hogy vannak olyan tönkremenetelek, amelyek nem lehet számítani, amit nem lehet előre jelezni.

5.1.2 II. csoport vizsgálata

A II. csoportba az Oroszországból származó 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszú vörösfenyő pallók tartoznak. A nedvességtartalom $13\pm 3\%$. Néhány jellemző adatot az 5.20 táblázatban mutatok be, hogy egy átfogó képet adjak a vizsgált anyag tulajdonságairól.

5.20 táblázat: II. csoport tulajdonságai

| | GTA | SZGTA | SZCKDR | CKDR | Nedv. [%] | Csill. | longl MOE [GPa] | Sűrűség [kg/m ³] | Statikus MOE [GPa] | HSZIL [MPa] |
|--------|-------|-------|--------|-------|-----------|--------|-----------------|------------------------------|--------------------|-------------|
| Átlag | 0,115 | 0,118 | 0,116 | 0,120 | 13,1 | 38,9 | 13,5 | 653,9 | 12,1 | 52,5 |
| Szórás | 0,116 | 0,125 | 0,114 | 0,123 | 2,9 | 16,0 | 2,9 | 66,0 | 2,4 | 19,7 |

Forrás: saját szerkesztés

Ebben a csoportban már kevesebb adatot rögzítettem a korábban említett osztályozó berendezés fejlesztése miatt, valamint a bemutatott adatok közül – pl. az évgűrűszerkezetre vonatkozó felmérések, a longitudinális rezgés 2., 3., 4. módusza, hajlító rezgés 2. módusza, valamint a torziós rezgés – nem hoztak számomra kedvező eredményeket, ezért azokat nem mértem a továbbiakban. A GTA, SZGTA és SZCKDR göcsparamétereket is csak néhány pallón határoztam meg. A csillapítás hozta a legjobb eredményeket, ezért azt egy nagyobb mintán mértem. Ahogy az előző csoportnál, itt is megállapítottam, hogy az általam mért paraméterek milyen kapcsolatban vannak a statikus rugalmassági moduluszal, valamint a hajlítószilárdsággal. Először bemutatom a statikus rugalmassági moduluszra, majd a hajlítószilárdságra vonatkoztatott eredményeket.

5.1.2.1 Statikus rugalmassági modulusz meghatározása

Az 5.21 táblázatban látható a roncsolásmentes paraméterek és a statikus rugalmassági modulusz korrelációja és standard hibája. A táblázat 4. oszlopában a regresszió vizsgálat elemszámát tüntetem fel.

5.21 táblázat: Korreláció, standard hiba és az elemszám a becslőparaméterek és a statikus rugalmassági modulusz között

| Statikus rugalmassági modulusz becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemszám (N) |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|
| GTA | 0,43 | 2,15 | 52 |
| SZGTA | 0,36 | 2,23 | 52 |
| SZCKDR | 0,42 | 2,22 | 68 |
| CKDR | 0,50 | 2,13 | 359 |
| longl MOE | 0,93 | 0,91 | 360 |
| hajl1 MOE | 0,95 | 0,77 | 278 |
| Csillapítás | 0,66 | 1,89 | 283 |
| Sűrűség | 0,24 | 2,38 | 360 |

Forrás: saját szerkesztés

Ebben a csoportban is két részre osztottam az elemzés menetét. Alapparaméterként itt is az első módusban mért hajlító rezgésből számolt rugalmassági moduluszt, valamint az első módusban mért longitudinális rezgésből számolt rugalmassági moduluszt vettem. Ezután vizsgáltam az egyéb becslő paraméterek függetlenségét és a becslés hibáját valamint korrelációját. Az 5.22 táblázatban összefoglaltam a hajlító modulusz és egyéb becslő paraméterek együttes regresszió vizsgálatát. A STATISTICA szoftver által készült adatokat a 6. sz. melléklet tartalmazza.

5.22 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a hajlító rugalmassági modulusz és egyéb becslő paraméterekkel együtt

| Statikus rugalmassági modulusz becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemszám (N) |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|
| hajl1 MOE | 0,950 | 0,771 | 278 |
| hajl1 MOE+GTA | 0,925 | 0,902 | 50 |
| hajl1 MOE+SZGTA | 0,929 | 0,881 | 50 |
| hajl1 MOE+CKDR | 0,953 | 0,748 | 277 |
| hajl1 MOE+SZCKDR | 0,934 | 0,869 | 65 |
| hajl1 MOE+Csillapítás | 0,950 | 0,768 | 277 |

Forrás: saját szerkesztés

A regresszió-számítás során egy esetben volt a p-érték 0,05-nél egy kicsit nagyobb, a hajlító modulusz és a csillapítás (0,057) együttes vizsgálatánál. Ennek ellenére, mivel az érték csak néhány század eltérést mutat kijelenthető, hogy az összes göcsparaméter és a csillapítás is egyértelműen független paraméter, és szignifikáns

kapcsolatban van a statikus rugalmassági moduluszal. Továbbá a táblázatból kivehető, hogy két esetben érhető el hibajavulás: ha a CKDR-t vagy a csillapítást is figyelembe vesszük a vizsgálat során. A többi esetben hibajavulás nem figyelhető meg. Ez azonban valószínűsíthetően az alacsony darabszám miatt lehetséges, ugyanis a standard hiba fordítottan arányos a darabszámmal.

Itt megjegyezném, hogy az I. csoport vizsgálatánál is előfordult sok esetben, hogy nem azonos darabszámon végeztem a regresszió-vizsgálatot, azonban ezekben az esetekben a darabszámcsökkenés ellenére javulás volt megfigyelhető.

A longitudinális modulusz és egyéb paraméterek kombinációit az 5.23 táblázatban foglalom össze. A 7. sz. melléklet tartalmazza a STATISTICA szoftverből származó adatokat.

5.23 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a longitudinális rugalmassági modulusz és egyéb becslő paraméterekkel együtt

| Statikus rugalmassági modulusz becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemzés (N) |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| long1 MOE | 0,928 | 0,911 | 360 |
| long1 MOE+GTA | 0,917 | 0,960 | 52 |
| long1 MOE+SZGTA | 0,930 | 0,887 | 52 |
| long1 MOE+CKDR | 0,933 | 0,881 | 359 |
| long1 MOE+SZCKDR | 0,916 | 0,989 | 68 |

Forrás: saját szerkesztés

Itt is minden esetben a p-érték 0,05 alatti, tehát megállapítható, hogy a kapcsolat szignifikáns. Két esetben a darabszámcsökkenés ellenére hibajavulás érhető el ahhoz az esethez viszonyítva, ha csak a longitudinális rugalmassági moduluszt viszonyítjuk a statikus rugalmassági moduluszhoz.

Statikus rugalmassági modulusz becslésénél nem érhető el jobb eredmény semmilyen más többparaméteres regresszió-vizsgálattal.

A legjobb becslés eredményét a STATISTICA szoftverrel történő vizsgálat során hajlító rugalmassági modulusz esetén az 5.24 táblázat mutatja.

5.24 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, CKDR és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,95292968 R2= ,90807497 Adjusted R2= ,90740399 F(2,274)=1353,3 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,74835 | | | | | | |
|---|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=277 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(274) | p-value |
| Intercept | | | 0,53630 | 0,295321 | 1,81598 | 0,070466 |
| CKDR | -0,088850 | 0,020456 | -1,68304 | 0,387490 | -4,34343 | 0,000020 |
| hajl 1MOE | 0,910043 | 0,020456 | 0,93722 | 0,021067 | 44,48769 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

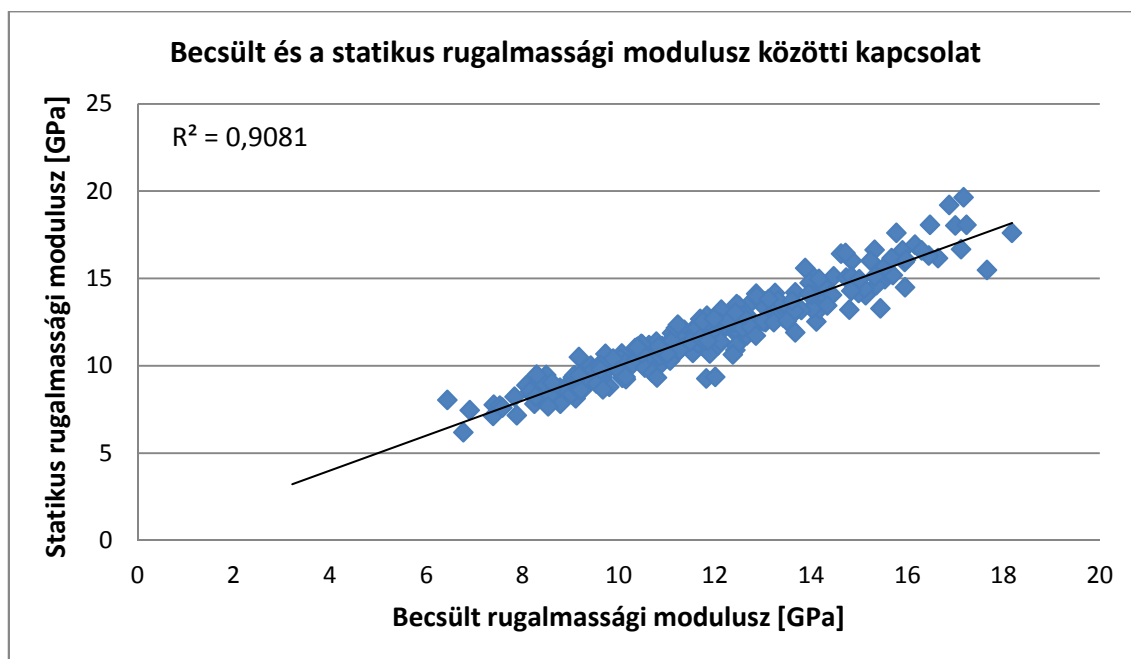
A legjobb becslés egyenlete az alábbi szerint alakul hajlító rezgés esetében:

$$E_{\text{becsült}} = 0,937 \cdot \text{hajl1MOE} - 1,683 \cdot \text{CKDR} + 0,536 \quad [5.7]$$

ahol: *hajl1MOE*: hajlító rezgésből számolt rugalmassági modulusz első módusban [GPa],

CKDR: göcsátmérő arány.

Az 5.6 ábrán látható a becslt és a statikus rugalmassági modulusz közötti összefüggés hajlító modulusz esetén.



5.6 ábra: A becslt és a statikus rugalmassági modulusz közötti kapcsolat

Forrás: saját szerkesztés

A legjobb becslés eredményét a STATISTICA szoftverrel történő vizsgálat során longitudinális rugalmassági modulusz esetén az 5.25 táblázat mutatja.

5.25 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a longitudinális modulusz, CKDR és a statikus rugalmassági modulusz között

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| R= ,93338962 R2= ,87121617 Adjusted R2= ,87049267 | | | | | | |
| F(2,356)=1204,2 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,88071 | | | | | | |
| N=359 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(356) | p-value |
| Intercept | | | 1,15796 | 0,305818 | 3,78642 | 0,000179 |
| CKDR | -0,104182 | 0,021245 | -1,98076 | 0,403922 | -4,90381 | 0,000001 |
| long 1MOE | 0,882299 | 0,021245 | 0,81865 | 0,019713 | 41,52960 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

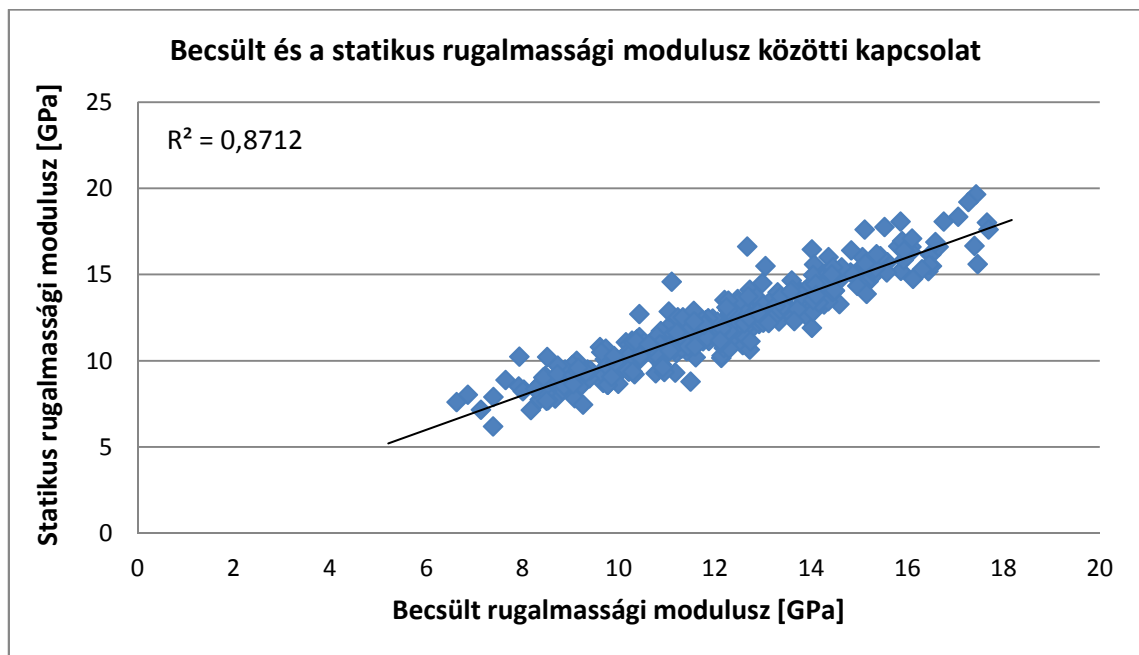
A legjobb becslés egyenlete az alábbi szerint alakul longitudinális rezgés esetében:

$$E_{\text{becsült}} = 0,819 \cdot \text{long1MOE} - 1,981 \cdot \text{CKDR} + 1,158 \quad [5.8]$$

ahol: *long1MOE*: longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulusz első módusban [GPa],

CKDR: göcsátmérő arány.

Az 5.7 ábrán látható a becsült és a statikus rugalmassági modulusz közötti összefüggés longitudinális modulusz esetén.



5.7 ábra: A becsült és a statikus rugalmassági modulusz közötti kapcsolat

Forrás: saját szerkesztés

A legjobb becsléseket vizsgálva itt is hasonló trend figyelhető meg mint az I. csoport vizsgálatánál. A hajlító rezgésből számolt rugalmassági moduluszsal becsült statikus rugalmassági modulusz jobb korrelációt mutat, mint a longitudinálissal becsült.

5.1.2.2 Hajlítószilárdság becslése

Az bemutatottak alapján megállapítottam a korrelációs értékeket és standard hibákat a hajlítószilárdság és a roncsolásmentes paraméterek között is. Az értékeket az 5.26 táblázat tartalmazza.

5.26 táblázat: Korreláció, standard hiba és az elemszám a becselőparaméterek és a hajlítószilárdság között

| Hajlítószilárdság becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemszám (N) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|
| GTA | 0,65 | 15,91 | 69 |
| SZGTA | 0,52 | 17,91 | 69 |
| SZCKDR | 0,55 | 17,37 | 87 |
| CKDR | 0,62 | 15,47 | 396 |
| long1 MOE | 0,70 | 14,06 | 398 |
| hajl1 MOE | 0,71 | 12,70 | 323 |
| Csillapítás | 0,47 | 16,04 | 323 |
| Sűrűség | 0,26 | 19,04 | 398 |
| Statikus rug. mod. | 0,73 | 12,62 | 344 |

Forrás: saját szerkesztés

A hajlító rugalmassági moduluszt használva alapparaméterként az alábbi eredményeket kaptam. Érdekes, hogy az eddigiek során a csillapítás sok esetben a legjobb eredményt adta a rugalmassági modulusz mellett mint becselő paraméter, azonban ebben az esetben ez nem volt megfigyelhető, mivel p-értéke meghaladta a 0,05-ös értéket.

5.27 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a hajlító rugalmassági modulusz és egyéb becselő paraméterekkel együtt

| Hajlítószilárdság becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemszám (N) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|
| hajl1 MOE | 0,713 | 12,696 | 323 |
| hajl1 MOE+GTA | 0,745 | 14,135 | 69 |
| hajl1 MOE+SZGTA | 0,689 | 15,354 | 69 |
| hajl1 MOE+CKDR | 0,768 | 11,617 | 322 |
| hajl1 MOE+SZCKDR | 0,699 | 14,976 | 87 |

Forrás: saját szerkesztés

A regresszió-vizsgálatból megállapítható, hogy mindegyik göcsparaméter szignifikáns eredményt ad a hajlító rugalmassági modulusz mellett, mint becselő paraméter. A STATISTICA szoftverből nyert adatokat a 8. sz. *melléklet* tartalmazza. A hajlítószilárdság becslésének hibája egy esetben csökkenthető, ha a CKDR-t vesszük be a többparaméteres vizsgálatba. Egyéb kombinációval nem érhető el ennél jelentősen jobb hajlítószilárdság becslés. Az 5.28 táblázat mutatja a hajlítószilárdság becslésének legjobb eredményét.

5.28 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító rugalmassági modulusz, CKDR és a hajlítószilárdság között

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,76773526 R2= ,58941743 Adjusted R2= ,58684325 F(2,319)=228,97 p<0,0000 Std.Error of estimate: 11,617 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=322 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(319) | p-value |
| Intercept | | | 10,1908 | 4,062690 | 2,50838 | 0,012625 |
| CKDR | -0,325918 | 0,040829 | -43,6759 | 5,471450 | -7,98250 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,556732 | 0,040829 | 3,9092 | 0,286688 | 13,63569 | 0,000000 |

Forrás: saját szerkesztés

A longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulusz és göcsparaméterek lineáris regressziójából származó eredményeket az 5.29 táblázat tartalmazza.

5.29 táblázat: Lineáris regresszió számítás adatai a longitudinális rugalmassági modulusz és egyéb becsülő paraméterekkel együtt

| Hajlítószilárdság becslése | Korrelációs koefficiens (R) | Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$) | Elemszám (N) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|
| long1 MOE | 0,701 | 14,056 | 398 |
| long1 MOE+GTA | 0,768 | 13,559 | 69 |
| long1 MOE+SZGTA | 0,735 | 14,352 | 69 |
| long1 MOE+CKDR | 0,770 | 12,564 | 396 |
| long1 MOE+SZCKDR | 0,719 | 14,572 | 87 |

Forrás: saját szerkesztés

A longitudinális rugalmassági modulusz mellett mindegyik göcsparaméter egyesével szignifikáns kapcsolatban van a hajlítószilárdsággal. P-értékük minden esetben 0,05 alatti volt. A STATISTICA szoftver eredményeit a 9. sz. melléklet tartalmazza. Az igen nagy mintaszámcsökkenés ellenére a GTA-val a szilárdságbecslés hibája csökkenthető, azonban a legjobb eredményt itt is a CKDR-rel való együttes vizsgálat hozta. Az 5.30 táblázatban a legjobb eredmény látható.

5.30 táblázat: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a longitudinális rugalmassági modulusz, CKDR és a hajlítószilárdság között

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,77010931 R2= ,59306835 Adjusted R2= ,59099745 F(2,393)=286,38 p<0,0000 Std.Error of estimate: 12,564 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=396 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(393) | p-value |
| Intercept | | | 12,1977 | 3,990217 | 3,0569 | 0,002389 |
| CKDR | -0,370140 | 0,036555 | -54,1684 | 5,349697 | -10,1255 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,522167 | 0,036555 | 3,6496 | 0,255499 | 14,2844 | 0,000000 |

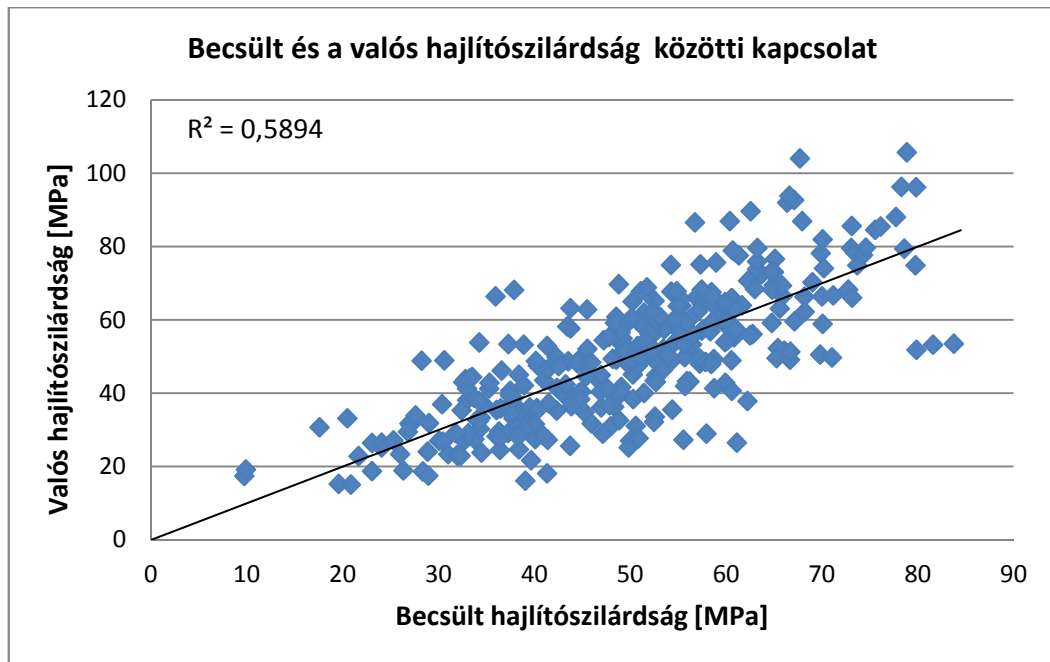
Forrás: saját szerkesztés

A hajlítoszilárdság becsléséhez használt egyenlet az alábbiak szerint alakul hajlító rezgés esetén:

$$\sigma_{\text{becsült}} = 3,909 \cdot \text{hajl}1\text{MOE} - 43,676 \cdot \text{CKDR} + 10,191 \quad [5.9]$$

ahol: *hajl1MOE*: hajlító rezgésből számolt rugalmassági modulusz első módusban [GPa],
 CKDR: göcsátmérő arány.

Az 5.8 ábrán látható a becsült és a valós hajlítoszilárdság közötti összefüggés.



5.8 ábra: A becsült és a valós hajlítoszilárdság közötti kapcsolat hajlító rezgés esetén

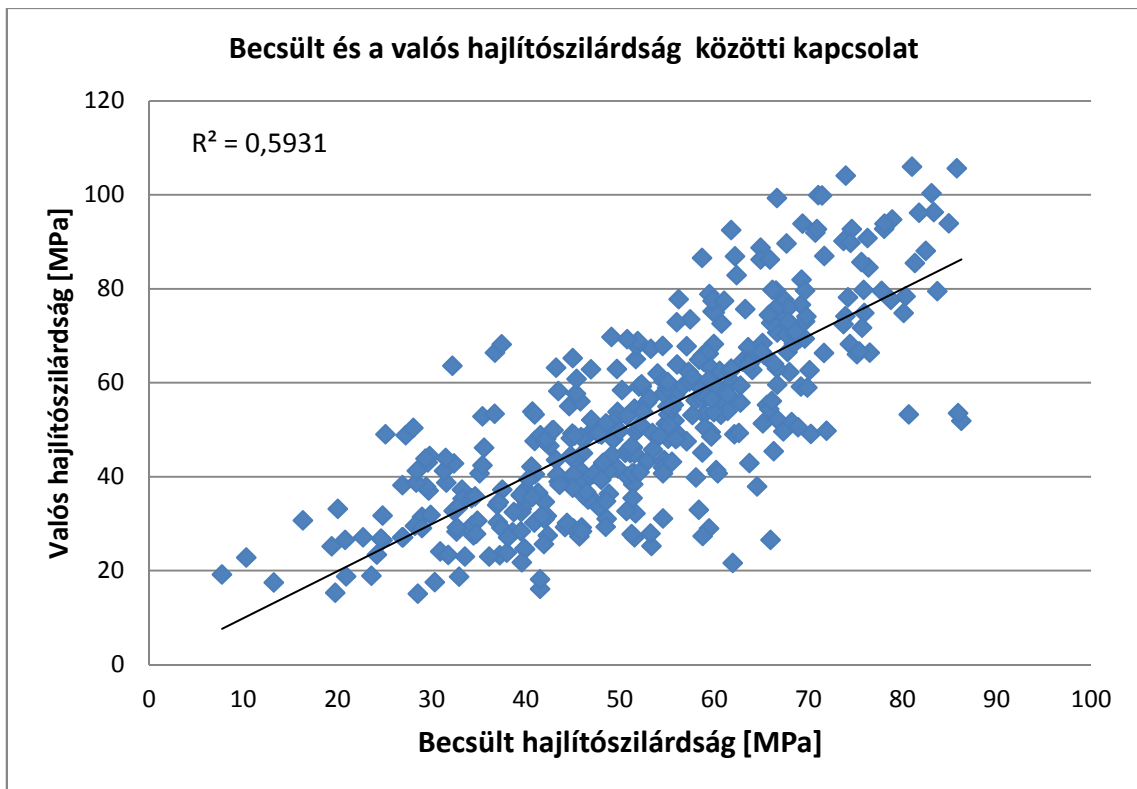
Forrás: saját szerkesztés

A longitudinális becsléséhez használt egyenlet az alábbiak szerint alakul:

$$\sigma_{\text{becsült}} = 3,650 \cdot \text{long}1\text{MOE} - 54,168 \cdot \text{CKDR} + 12,198 \quad [5.10]$$

ahol: *long1MOE*: longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulusz első módusban [GPa],
 CKDR: göcsátmérő arány.

Az 5.9 ábrán látható a becsült és a valós hajlítoszilárdság közötti összefüggés.



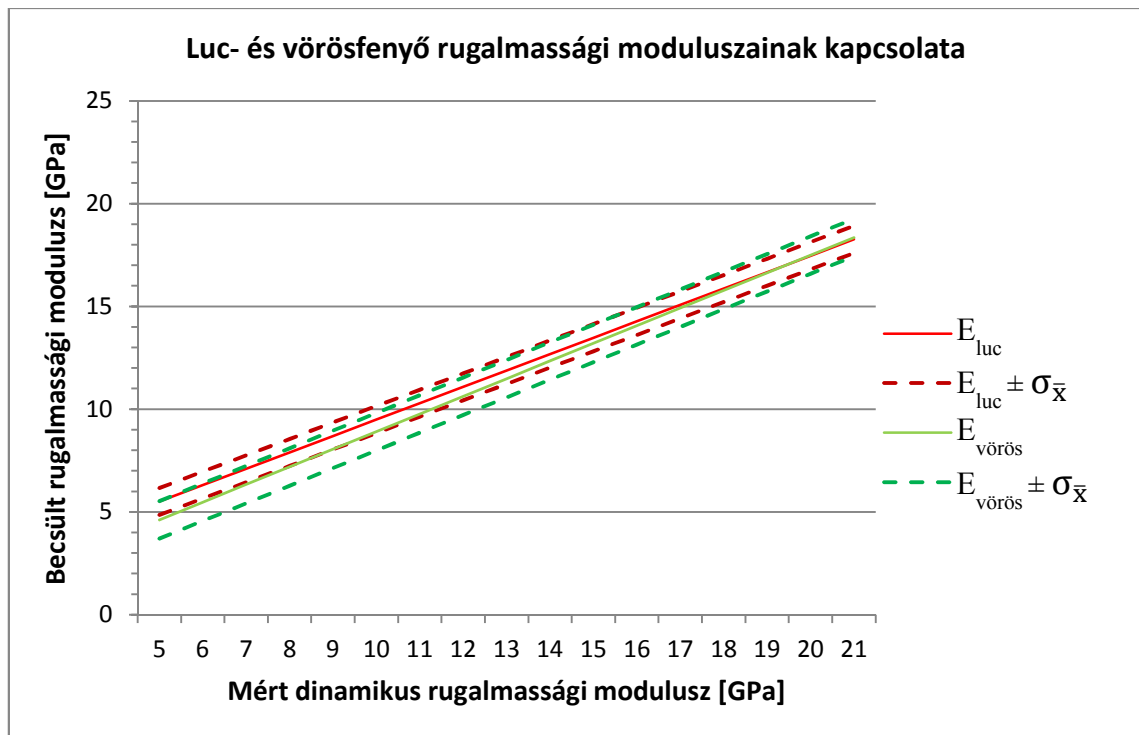
5.9 ábra: A becült és a valós hajlítószilárdság közötti kapcsolat longitudinális rezgés esetén

Forrás: saját szerkesztés

A II. csoportnál nagyobb szórások figyelhetők meg, ez valószínű annak köszönhető, hogy több rosszabb minőségű pallót vizsgáltam ebben a csoportban. Sok próbatesten igen nagy göcsök voltak, számos palló repedt volt, valamint csavarodott, illetve igen nagy rostkifutások is voltak. Néhány képet a 12. sz. mellékletben mutatok be.

5.1.3 I. és II. csoport összehasonlítása

Ha vizsgáljuk a szlovák lucfenyő (I. csoport) és az orosz vörösfenyő (II. csoport) kapcsolatát, megállapítható, hogy a vörösfenyő átlag szilárdsági és rugalmassági modulusz adatai meghaladják a Szlovákiából származó lucfenyő adatait. Azonban ha megvizsgáljuk azokat a becslő egyenleteket, amelyekkel a statikus rugalmassági modulusz illetve a hajlítószilárdság megbecsülhető, majd ezeket a teljes tartományon ábrázoljuk, az alábbi ábrákon bemutatott grafikonokat kapjuk. Az 5.10 ábrán a lucfenyő és a vörösfenyő becült rugalmassági moduluszainak kapcsolata látható.



5.10 ábra: A lucfenyő és a vörösfenyő becsült rugalmassági modulusza közötti kapcsolat

Forrás: saját szerkesztés

A 5.10 ábrán az E_{luc} , és az $E_{vörös}$, a lucfenyő és a vörösfenyő statikus rugalmassági moduluszát becsülő egyenletek, melyek az alábbiak szerint alakulnak:

$$E_{luc} = 0,797 \cdot \text{long1MOE} + 1,520 \quad [5.11]$$

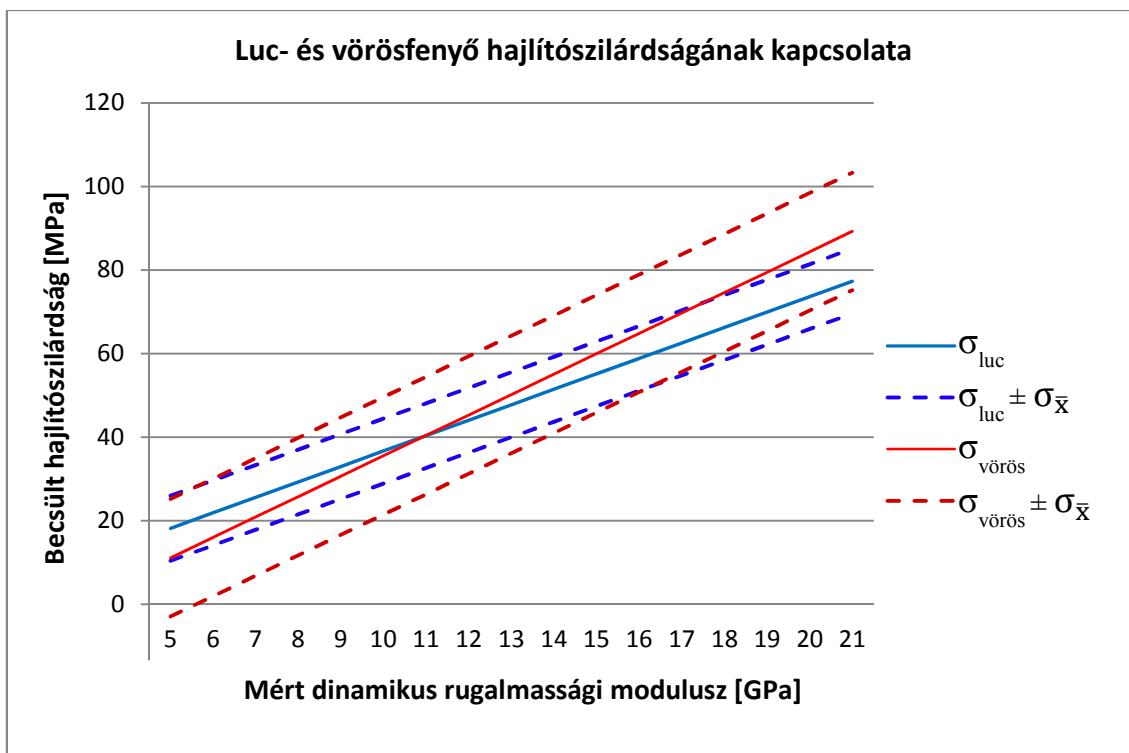
$$E_{vörös} = 0,859 \cdot \text{long1MOE} + 0,317 \quad [5.12]$$

Az $E_{luc} \pm \sigma_{\bar{x}}$ valamint az $E_{vörös} \pm \sigma_{\bar{x}}$ a becsült értékektől ± 1 standard hibányi távolság. A lucfenyő statikus rugalmassági moduluszának becslésénél ez az érték $\pm 0,657$ GPa, a vörösfenyőnél $\pm 0,911$ GPa.

Mindkét egyenletet lineáris regresszióval határoztam meg úgy, hogy csak a longitudinális rezgésből számolt rugalmassági moduluszt használtam (long1MOE), mivel a gyakorlatban is ez a legéletszerűbb, leggyorsabb meghatározás, valamint a fejlesztett osztályozó gép algoritmus is ezekkel az egyenletekkel számol.

A grafikon 5 GPa-os értéktől indul, mivel az adatokat csak azon a tartományon ábrázolom, amely tartományon belül méréseket végeztem (5-21GPa). A grafikon értelmezésének a 7 GPa-os értéktől van létjogosultsága, hiszen a szilárdság szerint történő osztályozásnál az MSZ EN 338-as szabványnak megfelelően, a 7 GPa alatti rugalmassági moduluszal rendelkező faanyagot osztályon alulinak kell tekinteni. A szórásmezők részben fedik egymást. A 7 GPa-os mért értéktől ráadásul a két becsült érték között csupán 0,77 GPa-os különbség van, ami benne van a két becslés hibája által lefedett területben. A nagyobb értékek felé haladva a két érték különbsége gyakorlatilag eltűnik. Az értékeket táblázatosan a 10. sz. mellékletben mutatom be.

Hasonlóan alakulnak a becsült hajlítószilárdsági értékek is, melyeket az alábbi grafikonon szemléltetek.



5.11 ábra: A lucfenyő és a vörösfenyő becsült hajlítószilárdsága közötti kapcsolat

Forrás: saját szerkesztés

A 5.11 ábrán a σ_{luc} , és a $\sigma_{vörös}$, a lucfenyő és a vörösfenyő hajlítószilárdságát becsülő egyenletek, melyek az alábbiak szerint alakulnak:

$$\sigma_{luc} = 3,696 \cdot \text{long}1MOE - 0,306 \quad [5.13]$$

$$\sigma_{vörös} = 4,8827 \cdot \text{long}1MOE - 13,306 \quad [5.14]$$

A $\sigma_{luc} \pm \sigma_{\bar{x}}$ valamint a $\sigma_{vörös} \pm \sigma_{\bar{x}}$ itt is a becsült értékektől ± 1 standard hibányi távolság. A lucfenyő hajlítószilárdságának becslésénél ez az érték $\pm 7,760$ MPa, a vörösfenyőnél $\pm 14,056$ MPa.

Ahogy az előzőekben bemutattam, itt is mindkét egyenletet lineáris regresszióval határoztam meg úgy, hogy csak a longitudinális rezgésből számolt rugalmassági moduluszt használtam. Itt is az 5-21 GPa-os tartományt ábrázolom. A táblázat a 11. sz. mellékletben láthatóak.

A szórásmezők itt is elég jól fedik egymást. A magasabb szilárdsági értékeknél távolodnak el egy kicsit egymástól, azonban még ez az érték is a hibahatáson belül van. A becsült értékek közötti legnagyobb eltérés nem éri el a 12 MPa-t.

Ugyan az MSZ EN 338-ban a fenyőket egy csoportban kezelik (C csoport), ugyanakkor az osztályozó gépek MSZ EN 14081-es szabvány szerinti minősítésénél minden egyes fafajra illetve termőhelyre egy – meglehetősen nagy –, több száz próbatestből álló mintát kell vizsgálni, hogy utána a gép az adott fafajra valamint az adott termőhelyre megszerezze a minősítést. Ez több ezer próbatest vizsgálatát követeli meg, amely igen nagy költségekkel jár. A bemutatottak alapján látható, hogy annak

ellenére, hogy két eltérő fafajt vizsgáltam, amelyek eltérő termőhelyről is származtak, a becslő formulák nem térnek el egymástól szignifikánsan.

5.1.4 III. csoport vizsgálata

A III. csoportban különböző keresztmetszetű és hosszúságú pallót illetve gerendát vizsgáltam. A nedvességtartalom $12\pm 4\%$. Céлом az volt, hogy kimutassam, hogy a mérethatás jelensége valós méretű pallók illetve gerendák esetében fennáll-e. A vizsgált próbatestek méreteit és számait az 5.31 táblázatban foglalom össze.

5.31 táblázat: A III. csoportban vizsgált próbatestek adatai

| | Kereszt- metszet (cm) | Hossz [m] | Fafaj | Növekedési terület | Próbatest szám [db] | |
|------------------|--------------------------|--------------|------------|-----------------------|---------------------|-------------|
| | | | | | Roncsolásmentes | Roncsolásos |
| III. | 5x10 | 2 | vörösfenyő | Szlovákia | 143 | 143 |
| | 5x10 | 4 | | | 92 | 51 |
| | 7,5x15 | 6 | | | 50 | 0 |
| | 7,5x15 | 3 | | | 100 | 100 |
| | 10x10 | 4 | | | 58 | 58 |
| Összesen: | | | | | 443 | 352 |

Forrás: saját szerkesztés

A mérethatás jelenség szerint, ha minél nagyobb próbatesteket veszünk, akkor a mechanikai tulajdonságok csökkenni fognak.

A vizsgálatot azért tartottam fontosnak, hogy megtudjam, hogy a kisebb méretű próbatesteken történő méréseket (5x10 cm keresztmetszetű 2m hosszú) biztonságosan fel lehet-e használni a nagyobb keresztmetszetű és hosszúságú anyagoknál. A vizsgálatok során először – mint az előző csoportoknál – meghatároztam a roncsolásmentes paramétereket, majd elvégeztük a törővizsgálatot.

A 6 m hosszú 7,5x15 cm-es keresztmetszetű pallókat, valamint 41 db 5x10-es keresztmetszetű 4 m hosszúságú pallót először lemértem 4 ill. 6 m-es hosszban roncsolásmentesen, majd kettévágtam, újra megmértem a roncsolásmentes paramétereket, majd ezután következett a törővizsgálat. Mivel a „nagy” darabokról értelemszerűen nincsen hajlítószilárdsági adatom, a dinamikus rugalmassági moduluszokat hasonlítottam össze. A dinamikus rugalmassági moduluszok minden esetben longitudinális rezgésből számolt rugalmassági moduluszok voltak 1. módusban. Az összehasonlítást úgy végeztem, hogy a két fél darabnak (KICSI) vettem az átlagát (KICSIA) majd összehasonlítottam a teljes hosszban mért adattal (NAGY). Ha az átlagot elosztom a teljes hosszban mért adattal (KICSIA/NAGY), akkor a mérethatás szerint egy szignifikánsan 1-nél nagyobb számot kell, hogy kapjak, hiszen az elmélet szerint a nagyobb próbatestek mechanikai tulajdonságainak szignifikánsan kisebbeknek kell lenniük, mint a kisméretű próbatestekének. Ezeket a számolásokat elvégeztem minden próbatestre és az alábbi eredményeket kaptam.

5.32 táblázat Az 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m-ben és 4 m-ben mért próbatestek adatai

| | KICSIÁ/NAGY |
|--------|-------------|
| ÁTLAG | 1,025 |
| SZÓRÁS | 0,077 |

Forrás: saját szerkesztés

5.33 táblázat: A 7,5x15 cm-es keresztmetszetű 3 m-ben és 6 m-ben mért próbatestek adatai

| | KICSIÁ/NAGY |
|--------|-------------|
| ÁTLAG | 1,004 |
| SZÓRÁS | 0,041 |

Forrás: saját szerkesztés

Ugyan látszik, hogy mindkét esetben a „szám” aminek a mérethatás szerint szignifikánsan 1-nél nagyobbak kell lennie, valóban valamivel egynél nagyobb azonban azt is láthatjuk, hogy ez a hibahatáron belül van. Ezek alapján megállapíthatjuk, a mérethatás elmélete szerinti trend ugyan látszik, de nem mondható szignifikánsnak a kapcsolat.

Összefoglalva azokat a próbatesteket, amelyekről volt hajlítószilárdsági adatom az alábbi táblázatot kapom.

5.34 táblázat: A próbatestek hajlítószilárdsági adatai

| | Hajlítószilárdság adatai | | | |
|---------|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | 5x10x2m (74 db) | 5x10x4m (50 db) | 7,5x15x3m (95 db) | 10x10x4m (37 db) |
| ÁTLAG | 37,30 | 39,20 | 40,45 | 37,30 |
| SZÓRÁS | 13,10 | 13,36 | 10,87 | 8,53 |
| MINIMUM | 11,82 | 15,43 | 16,18 | 23,15 |
| MAXIMUM | 66,66 | 86,66 | 67,24 | 54,71 |

Forrás: saját szerkesztés

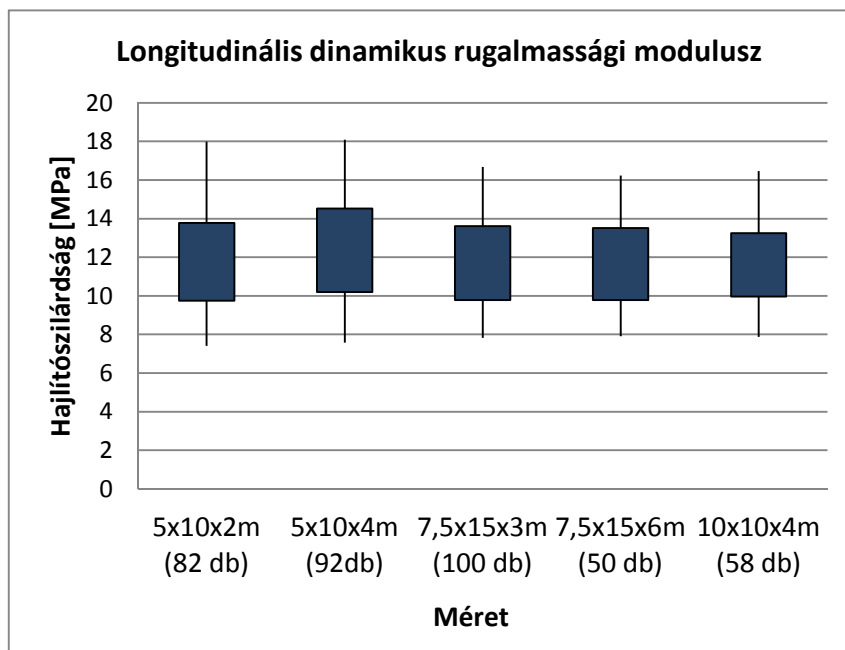
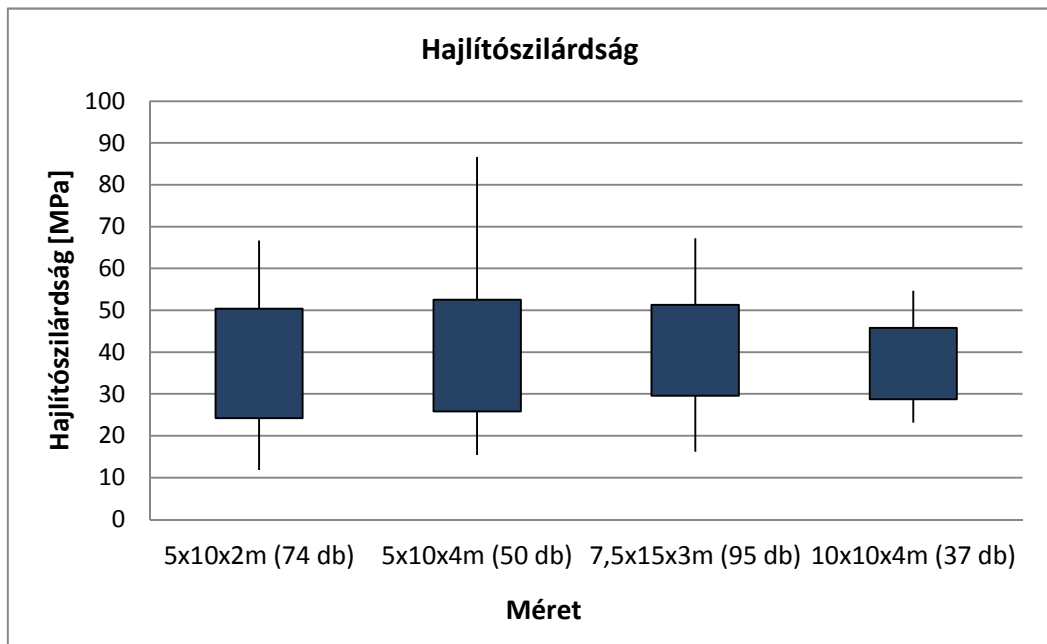
Az 5.35 táblázatban a longitudinális rezgésből meghatározott dinamikus rugalmassági modulusz adatai találhatóak. Mindkét esetben az átlagot, a szórást, a minimumot és a maximumot tüntetem fel, valamint azt, hogy mekkora darabszámon végeztem méréseket.

5.35 táblázat: A próbatestek dinamikus rugalmassági modulusz adatai

| | Longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz adatai | | | | |
|---------|---|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| | 5x10x2m (82 db) | 5x10x4m (92db) | 7,5x15x3m (100 db) | 7,5x15x6m (50 db) | 10x10x4m (58 db) |
| ÁTLAG | 11,76 | 12,36 | 11,69 | 11,65 | 11,68 |
| SZÓRÁS | 2,02 | 2,16 | 1,91 | 1,87 | 1,67 |
| MINIMUM | 7,42 | 7,58 | 7,82 | 7,91 | 7,87 |
| MAXIMUM | 17,99 | 18,08 | 16,68 | 16,23 | 16,47 |

Forrás: saját szerkesztés

Ezeket az adatokat ábrázolva az 5.12 ábrát kapjuk.



5.12 ábra: A mechanikai tulajdonságok átlagának, szórásának, minimumának és maximumának ábrázolása

Forrás: saját szerkesztés

Az 5.12 ábrán szereplő dobozok felső és alsó határa az átlag körüli szórást mutatja, a vékony vonalak pedig az értékek minimumát illetve maximumát.

A bemutatottak alapján kijelenthető, hogy az egyes méretek közötti mérethatás nem figyelhető meg, hiszen a különböző méreteknél mért szilárdsági és dinamikus rugalmassági modulusz értékek átlagai nagyon kis mértékben térnek el egymástól, a szórásmezők átfedésben vannak.

Ez az osztályozás szempontjából pozitívnak mondható, hiszen a viszonylag kis méreten mért adatok (esetemben a 2m-es próbatetek) is használhatók nagyobb keresztmetszeten illetve hosszúságon.

3. tézis

Empirikus formulát származtattam a hajlítószilárdság becslésére ($\sigma_{\text{becsült}}$).

Méréseim során megállapítottam, hogy az 1. módusban mért hajlító-rezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz (*hajl1MOE*) mellett független paraméterként az 1. módusban mért logaritmikus dekrementum (*Csillapítás*) segíti a leghatékonyabban a hajlítószilárdság ($\sigma_{\text{becsült}}$) becslését 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszú, 13±2%-os nedvességtartalmú lucfenyő palló esetén.

$$\sigma_{\text{becsült}} = \underset{(198)}{3,265} \cdot \text{hajl1MOE} - \underset{(108)}{0,826} \cdot \text{Csillapítás} + \underset{(4,390)}{28,414} \quad [6.3]$$

A fenti formula 7 MPa-os standard hibával képes a hajlítószilárdság becslésére az 15-80 MPa-os tartományban. A formula együtthatói alatt zárójelben szereplő számok az adott paraméter standard hibáit mutatják helyi érték helyesen.

4. tézis

Empirikus formulát származtattam a hajlítószilárdság becslésére ($\sigma_{\text{becsült}}$).

Méréseim során megállapítottam, hogy az 1. módusban mért longitudinális rezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz (*long1MOE*) mellett a göcsátmérő arány (*CKDR*), mint független paraméter segíti a leghatékonyabban a hajlítószilárdság becslését ($\sigma_{\text{becsült}}$) 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszú, 13±2%-os nedvességtartalmú lucfenyő palló esetén.

$$\sigma_{\text{becsült}} = \underset{(153)}{3,160} \cdot \text{long1MOE} - \underset{(2,914)}{24,122} \cdot \text{CKDR} + \underset{(2,021)}{10,938} \quad [6.4]$$

A fenti formula 7,14 MPa-os standard hibával képes a hajlítószilárdság becslésére az 15-80 MPa-os tartományban. Formula együtthatói alatt zárójelben szereplő számok az adott paraméter standard hibáit mutatják helyi érték helyesen.

5. tézis

Empirikus formulát származtattam a hajlítószilárdság becslésére ($\sigma_{becsült}$).

Méréseim során megállapítottam, hogy az 1. módusban mért hajlító-rezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz (*hajlIMOE*) mellett az 1. módusban mért logaritmikus dekrementum (*Csill*), a göcsterület arány (*GTA*) és a szegély göcsterület arány (*SZGTA*), mint egymástól független paraméterek segítségével a:

$$\sigma_{becsült} = \underset{(213)}{2,946} \cdot hajlIMOE - \underset{(4,219)}{16,103} \cdot GTA - \underset{(3,499)}{10,423} \cdot SZGTA - \underset{(137)}{0,547} \cdot Csill + \underset{(5,011)}{29,760} \quad [6.5]$$

empirikus formulával lehet a legkisebb hibával a hajlítószilárdságot ($\sigma_{becsült}$) megbecsülni 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszú, 13±2%-os nedvességtartalmú lucfenyő palló esetén.

A fenti formula 6,82 MPa-os standard hibával képes a hajlítószilárdság becslésére az 15-80 MPa-os tartományban. Formula együtthatói alatt zárójelben szereplő számok az adott paraméter standard hibáit mutatják helyi érték helyesen.

6. tézis

Empirikus formulát származtattam a statikus rugalmassági modulusz becslésére ($E_{becsült}$). Méréseim során megállapítottam, hogy az 1. módusban mért longitudinális rezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz (*longIMOE*) mellett a göcsátmérő arány (*CKDR*), mint független paraméter segíti a leghatékonyabban a statikus rugalmassági modulusz ($E_{becsült}$) becslését 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszú, 13±3%-os nedvességtartalmú vörösfenyő palló esetén.

$$E_{becsült} = \underset{(19)}{0,819} \cdot longIMOE - \underset{(404)}{1,981} \cdot CKDR + \underset{(306)}{1,158} \quad [6.6]$$

A fenti formula 0,88 GPa-os standard hibával képes a statikus rugalmassági modulusz becslésére a 6-21 GPa-os tartományban. A formula együtthatói alatt zárójelben szereplő számok az adott paraméter standard hibáit mutatják helyi érték helyesen.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom során 1307 db különböző keresztmetszetű és hosszúságú luc- és vörösfenyő pallón illetve gerendán végeztem roncsolásmentes és roncsolásos méréseket. A pallók jellemzően 5x10 cm-es keresztmetszetűek és 2 m hosszúságúak voltak.

A paraméterek között szerepeltek többek között az évgyűrűszerkezetre vonatkozó felmérések, úm. átlag évgyűrűszelesség, maximális évgyűrűszelesség, több göcsparaméter, úm. göcsterület arány, szegély göcsterület arány, göcsátmérő arány, szegély göcsátmérő arány, különböző rezgések frekvenciáiból meghatározott dinamikus rugalmassági modulusok, úm. hajlító, longitudinális rezgések, a csillapítás, nedvességtartalom valamint a sűrűség.

A meghatározott mutatók közül a legjobb becslő paraméternek a csillapítás (logaritmikus dekrementum) és az általam bevezetett szegély göcsátmérő arány bizonyult. Lucfenyő esetében a legjobb becslő formulával sikerült a statikus rugalmassági moduluszt $\pm 0,51$ GPa-os, a hajlítószilárdságot $\pm 6,82$ MPa-os hibával megbecsülni. Vörösfenyő esetén pedig a statikus rugalmassági moduluszt $\pm 0,75$ GPa-os, a hajlítószilárdságot $\pm 11,62$ MPa-os hibával.

Vizsgálataim során bemutattam, hogy a valós méretű kisebb próbatesteken (5x10 cm keresztmetszetű 2 m hosszú) végzett mérések adatai felhasználhatóak nagyobb keresztmetszetek és hosszúságok (5x10 cm keresztmetszetű 4 m hosszú; 7,5x15 cm keresztmetszetű 3 m és 6 m hosszú; 10x10 cm keresztmetszetű 4 m hosszú) esetén is, a mérethatás elenyésző hatása miatt.

Méréseim során megállapítottam, hogy a szibériai vörösfenyőre és a szlovákiai lucfenyőre meghatározott formulák szignifikánsan nem térnek el egymástól, tehát az MSZ EN 338-ban lévő fafaj összevonás (minden fenyő fafaj egy csoportba (C) tartozik) indokolt, de az MSZ EN 14081-ben szereplő követelményrendszer, amelyik a fafaj és termőhelyek szerinti megkülönböztetést írja elő, indokolatlannak látszik.

8 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsősorban köszönetemet szeretném kifejezni Dr. Divós Ferencnek, hogy doktoranduszának fogadott, megismertetett a kutatómunka szépségeivel, hogy türelmével és mindenre kiterjedő figyelmével segített a kutatásaim során.

Köszönettel tartozom Dr. Winkler András professzor úrnak, hogy a kezdetektől követte és segítette munkásságomat.

Köszönöm Csikós Szabolcs és Karácsonyi Zsolt türelmét és segítségét a rengeteg mérés elvégzésében.

Köszönöm Dr. Csanády Viktóriának a statisztikai számítások elvégzésében valamint a STATISTICA szoftver használatában és megismerésében nyújtott segítségét.

Nagy köszönettel tartozom szüleimnek támogatásukért és türelmükért.

Köszönöm Vincze Eszternek, hogy a szövegszerkesztésben és a formázásban segítségemre volt.

9 JELÖLÉSJEYZÉK

| | |
|------------------------|---|
| $[S_{ijkl}]$: | alakíthatósági mátrix |
| $[\varepsilon_{ij}]$: | az alakváltozási tenzor komponenseiből képzett egydimenziós mátrix |
| $[\sigma^{ij}]$: | a feszültségi tenzor komponenseiből képzett egydimenziós mátrix |
| a : | a terhelés helye és a legközelebbi alátámasztás közötti távolság hajlítóvizsgálat esetén [mm] |
| a : | az F erő hatására a rúd lehajlása a középpontban [mm] |
| A : | keresztmetszet [m ²] |
| a : | szélesség [m] |
| A_0 : | az amplitúdó értéke t=0-ban [m] |
| $A1$: | amplitúdó [m] |
| $A2$: | amplitúdó [m] |
| b : | a próbatest szélessége hajlítóvizsgálat esetén [mm] |
| b : | vastagság [m] |
| c : | az 2.1 táblázatban megadott konstans |
| c : | hangsebesség [m/s] |
| D : | átbocsátás |
| $D1, D2, D3$: | a göcsátmérők [mm] |
| E : | rugalmassági modulusz [N/m ²] |
| E_h : | hajlító rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz [N/m ²] |
| E_l : | longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz [N/m ²] |
| $E_{m,g}$: | teljes hajlítási rugalmassági modulusz [N/mm ²] |
| f : | csillapítatlan rezgés frekvenciája [Hz] |
| F : | erő [N] |
| f_0 : | az észlelt frekvencia [Hz] |
| F_2-F_1 : | tehernövekmény a teher-alakváltozás lineáris szakaszán [N] |
| f_m : | hajlítószilárdság [N/mm ²] |
| F_{max} : | legnagyobb teher [N] |
| f_n : | a rezgés sajátfrekvenciája n-edik módusban [Hz] |
| G : | nyíró rugalmassági modulusz [GPa] |
| h : | a próbatest magassága hajlítóvizsgálat esetén [mm] |
| h : | fűrészáru szélessége [mm] |
| h : | hossz [m] |
| I : | a keresztmetszet másodrendű tehetetlenségi nyomatéka [mm ⁴] |
| I_p : | a rúd poláris inerciája; [m ⁴] |
| K_t : | a rúd keresztmetszeti tényezője; [m ⁴] |
| l : | a rúd hossza [m] |
| L : | a rúd hossza [m] |
| l : | fesztávolság hajlítóvizsgálat esetén [mm]; $l = 18h$ |

| | |
|----------------------|---|
| m : | a rúd tömege [kg] |
| n : | módusszám |
| r : | kitérés |
| R : | visszaverődés |
| sz : | szélesség [m] |
| T : | csillapítatlan rezgés periódusideje [s] |
| t : | idő [s] |
| T_0 : | az észlelt periódusidő [s] |
| $T_{göcs}$: | teljes keresztmetszetre vonatkoztatott göcsterület [mm ²] |
| T_{Km} : | teljes keresztmetszet területe [mm ²] |
| v : | vastagság [m] |
| w : | fűrészáru vastagsága [mm] |
| W : | keresztmetszeti tényező [mm ³] |
| w_2-w_1 : | az F2-F1-nek megfelelő alakváltozási növekmény [mm] |
| x : | a futópont koordinátája a rúd hosszirányában |
| X : | a kitérés [m] |
| Z : | akusztikai keménység [kg/sm ²] |
| α : | a kezdőfázis |
| β : | csillapítási tényező [1/s] |
| β : | nyíró faktor (1/1,2 prizmatikus rudak esetén) |
| Δl : | a rúd hosszváltozása [m] |
| ε : | az F erő hatására bekövetkező relatív hosszváltozás. |
| ε_{kl} : | az alakváltozási állapot tenzora |
| Λ : | logaritmikus dekrementum |
| ρ : | sűrűség [kg/m ³] |
| σ^{ij} : | a feszültségi állapot tenzora, |
| ω : | a rezgés körfrekvenciája [1/s] |

A mérések során alkalmazott fontosabb jelölések:

| | |
|-----------------|---|
| $CKDR$: | koncentrált göcsátmérő arány |
| $Csill.$: | logaritmikus dekrementum (Λ) x 1000 |
| $Csillapítás$: | logaritmikus dekrementum (Λ) x 1000 |
| $E_{becsült}$: | statikus rugalmassági moduluszt becsülő formula |
| E_{luc} : | lucfenyő statikus rugalmassági moduluszát becsülő formula |
| $E_{vörös}$: | vörösfenyő statikus rugalmassági moduluszát becsülő formula |
| G : | nyíró rugalmassági modulusz [GPa] |
| GTA : | göcsterület arány |
| $hajl1MOE$: | hajlító rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 1. módusban |
| $hajl2MOE$: | hajlító rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 2. módusban |
| $HSZIL$: | hajlítószilárdság [MPa] |

| | |
|-----------------------------|---|
| <i>long1MOE:</i> | longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 1. módusban [GPa] |
| <i>long2MOE:</i> | longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 2. módusban [GPa] |
| <i>long3MOE:</i> | longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 3. módusban [GPa] |
| <i>long4MOE:</i> | longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 4. módusban [GPa] |
| <i>R:</i> | korrelációs koefficiens |
| <i>Statikus MOE:</i> | statikus rugalmassági modulusz [GPa] |
| <i>STATMOE:</i> | statikus rugalmassági modulusz [GPa] |
| <i>SŰR:</i> | sűrűség [kg/m ³] |
| <i>SZCKDR:</i> | szegély koncentrált göcsátmérő arány |
| <i>SZGTA:</i> | szegély göcsterület arány |
| <i>u:</i> | nedvességtartalom [%] |
| $\sigma_{\text{becsült}}$: | hajlítószilárdságot becslő formula |
| σ_{luc} : | lucfenyő hajlítószilárdságát becslő formula |
| $\sigma_{\text{vörös}}$: | vörösfenyő hajlítószilárdságát becslő formula |
| $\sigma_{\bar{x}}$: | standard hiba |

10 IRODALOMJEGYZÉK

- Budó Ágoston (1972): Kísérleti fizika I., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- Divos F, Daniel I, Hodasz E, Jarasi J (1994): Experimental Investigation of Thirteen Strength Predictor Parameters of Coniferous Wood - Proceedings, First European Symposium on Nondestructive Testing of Wood
- Dr. Molnár Sándor (szerk) (2000): Faipari Kézikönyv I., Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, pp. 78-79.
- Dr. Wittmann Gyula (szerk) (2000): Mérnöki faszerkezetek I., Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- Dr. Wittmann Gyula (szerk) (2001): Mérnöki faszerkezetek II., Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- Ferenc Sismándy-Kiss, Ferenc Divos, (2011): Strength Grading of Structural Lumber – Effect of Damping and Knots; 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, September 14-16, 2011., Sopron, ISBN 978-963-9883-81-9; pp. 255-262.
- Freberg C. R., Kemmler E. M. (1944): Aircraft Vibration and Flutter, Wiley & Sons
- Hearmon R. F. S. (1966) Vibration Testing of Wood, Forest Products Journal, vol.16, No. 8, pp. 29-40
- Horváth Miklós (2010): Akác faanyag akusztikai térképe – Doktori (PhD) értekezés; Nyugat-magyarországi Egyetem Faipari Mérnöki Kar, Sopron
- IPOSZ Tananyagsorozat 20. szám - A bővülő faipar és mi, pp. 16-17.
- J, és H. Krautkramer (1990): Ultrasonic Testing of Materials – Springer Verlag
- Jánossy Lajos (1967): A valószínűségelmélet alapjai és néhány alkalmazása, Tankönyvkiadó, Budapest
- Karácsonyi Zsolt (2011): A természetes faanyag nyíró-rugalmassági moduluszának meghatározása – Doktori (PhD) értekezés; Nyugat-magyarországi Egyetem Faipari Mérnöki Kar, Sopron
- Perstorper M (1994) Quality of structural lumber, Chalmers University, Department of Structural Engineering, Thesis, Gotegorg, Sweden
- Prof. Dr. Divós Ferenc (szerk.) és mts. (1999): Roncsolásmentes faanyagvizsgálat, Mérési útmutató. Belső használatra készült a Soproni Egyetemen, 1999-ben a PFP támogatásával, pp. 5-6; 13-15;

Szalai J (1994): A faanyag és faalapú anyagok anizotrop rugalmasság- és szilárdságtana, I. rész: A mechanikai tulajdonságok anizotrópiája, Sopron

Tartószerkezeti Tagozat ügyvezető elnökségi ülés, 2009. november 5., pp. 1-2.

W. L. Gallagin, R. F. Pellerin (1964): Nondestructive Testing of Structural Lumber – Material Evaluation, Vol XXII, No. 4.

W. L. Gallagin, R. F. Pellerin, G. G. Marra (1966): Nondestructive Evaluation of Wood Strength and Elasticity by Vibration - Holz als Roh- und Werkstoff (24) pp. 460-466

Weaver W Jr, Timoshenko SP, Young DH (1990): Vibration Problems in Engineering, Fifth edition - John Wiley & Sons

Y. H. Chui, I. Smith (1989): Influence of Rotary Inertia Shear Deformation and Support Condition on Natural Frequencies of Wooden Beams - Wood Science and Technology, (24) pp. 233-245

Sandoz Jean-Luc, Benoit Yann (2007): Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement: COST E53 Conference - Quality Control for Wood and Wood Products, 15th – 17th October 2007, Warsaw, Poland

Szabványok:

JAS (1991) Japanese agricultural standard for structural softwood lumber. SIS-19. Japan External Trade Organisation.

MSZ 10144-1986: Teherhordó faszerkezetek anyagai

MSZ 15025: Építmények teherhordó faszerkezeteinek erőtani tervezése

MSZ EN 1310: Hengeres faanyagok és fűrészáru. A fahibák mérése

MSZ EN 14081-1: Faszerkezetek. Szilárdság szerint osztályozott, négyszög keresztmetszetű szerkezeti fa. 1. rész: Általános követelmények

MSZ EN 14081-2: Faszerkezetek. Szilárdság szerint osztályozott, négyszög keresztmetszetű szerkezeti fa. 2. rész: Gépi osztályozás; kiegészítő követelmények az első típusvizsgálathoz

MSZ EN 14081-3: Faszerkezetek. Szilárdság szerint osztályozott, négyszög keresztmetszetű szerkezeti fa. 3. rész: Gépi osztályozás; kiegészítő követelmények az üzemi gyártásellenőrzéshez

MSZ EN 14081-4: Faszerkezetek. Szilárdság szerint osztályozott, négyszög keresztmetszetű szerkezeti fa. 4. rész: Gépi osztályozás; az osztályozógépek beállítása gépi ellenőrző rendszerekhez

MSZ EN 1912: Szerkezeti fa. Szilárdsági osztályok. A vizuális szilárdsági osztályok és a fajok szilárdsági besorolása

MSZ EN 1995-1-1: Eurocode 5. Faszerkezetek tervezése

MSZ EN 338: Szerkezeti fa. Szilárdsági osztályok

MSZ EN 384: Szerkezeti fa. A mechanikai tulajdonságok és a sűrűség karakterisztikus értékeinek meghatározása

MSZ EN 408: Faszerkezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása

Internetes irodalom:

[1] <http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/faepites-faepites/ch29.html>

[2] <http://www.tankonyvtar.hu/konyvek/faepites/faepites-2-2-2>

[3] [http://foundation01.chem.elte.hu/Specik/\(1\)/Mereselmelet_merestechnika_2_resz_Hi_baszamitas.pdf](http://foundation01.chem.elte.hu/Specik/(1)/Mereselmelet_merestechnika_2_resz_Hi_baszamitas.pdf)

[4] <http://www.biostat.hu/biostat/indit1.asp?p=szotar2&k=88>

[5] <http://rs1.szif.hu/~szorenyi/elm/bioselm7.htm>

[6] Székelyi Mária, Barna Ildikó, Himesi Zsuzsa: Segédanyag az Adatfeldolgozás című tárgyhoz

<http://barna.tatk.elte.hu/Phd%20szocpol/orai%20anyagok/orai%20anyagok.html>

Internetes források:

3.1 ábra: http://www.hsz.bme.hu/hsz/oktatas/feltoltesek/BMEEOHS-V44/roncsolasmentes_favizsgalat.pdf

3.2 ábra: <http://www.woodguide.nl/index.php?id=50>

3.5 ábra: <http://www.coste53.net/downloads/WG3/WG3-Hamburg/Lectures/COST-E53-WG3-Meeting-Hamburg-Denzler.pdf>

3.6 ábra: <http://www.microtec.eu/ProductView.aspx?Lang=en-US&Nid=10263,10290,10530>

3.7 ábra: <http://www.microtec.eu/ProductView.aspx?Lang=en-US&Nid=10262,10342,10664>

11 MELLÉKLETEK

1. sz. melléklet: A szögértékek mátrixa a vizsgált próbatesten

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 0 | 1 | 5 | 3 | 0 | 1 | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 0 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 8 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 0 | 4 | 2 | 1 |
| 7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 4 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 3 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 11 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 12 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| 13 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 4 |
| 14 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 4 | 4 | 3 | 0 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 | 4 | 3 | 1 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 |
| 16 | 2 | 0 | 2 | 0 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 5 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 |
| 17 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 4 | 1 | 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| 18 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 2 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 4 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 | 0 |
| 19 | 3 | 0 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 3 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 20 | 3 | 1 | 1 | 0 | 3 | 1 | 6 | 2 | 4 | 3 | 0 | 2 | 3 | 4 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 |
| 21 | 4 | 3 | 3 | 0 | 3 | 1 | 6 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 |
| 22 | 4 | 0 | 1 | 1 | 4 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 6 | 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 | 4 |
| 23 | 7 | 3 | 3 | 0 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 1 | 0 | 21 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 |
| 24 | 4 | 3 | 4 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 6 | 4 | 1 | 0 | 21 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| 25 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 |
| 26 | 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 5 | 5 | 1 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 |
| 27 | 5 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 6 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 1 | 0 | 4 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 28 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 0 | 6 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 1 | 10 | 0 | 0 | 3 | 1 | 2 | 4 |
| 29 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 0 | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 |
| 30 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 4 | 5 | 4 | 2 | 4 | 4 | 3 | 5 | 6 | 4 | 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 |
| 31 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 | 2 | 5 | 2 | 4 | 3 | 4 | 5 | 3 | 1 | 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| 32 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 6 | 3 | 4 | 2 | 2 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 6 | 4 | 4 | 2 | 8 | 35 | 4 | 0 | 4 |
| 34 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 | 8 | 5 | 12 | 8 | 11 |
| 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 6 | 1 | 2 | 1 | 0 | 6 | 1 | 5 | 13 | 9 |
| 36 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 6 | 6 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 12 | 9 |
| 37 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 6 | 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 38 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 5 | 5 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| 39 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 40 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 6 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 41 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 4 | 5 | 1 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 42 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 4 |
| 43 | 1 | 2 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 | 1 |
| 44 | 1 | 1 | 3 | 0 | 2 | 0 | 5 | 5 | 5 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 45 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 |
| 46 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| 47 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 5 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 48 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 6 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 49 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 5 | 6 | 1 | 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| 50 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 4 | 5 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 5 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 51 | 2 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 5 | 6 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| 52 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 5 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 |
| 53 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | 4 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 6 |
| 54 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 6 |
| 55 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 56 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 0 | 1 | 1 | 5 | 2 | 0 | 2 | 4 |
| 57 | 3 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 2 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 58 | 3 | 0 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| 59 | 2 | 2 | 2 | 2 | 6 | 2 | 3 | 5 | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 60 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 0 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| 61 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0 | 3 | 3 | 4 | 2 | 2 | 0 | 2 | 4 | 3 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| 62 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 3 |
| 63 | 3 | 2 | 2 | 0 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 4 |
| 64 | 2 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 4 | 3 | 0 | 4 | 2 | 3 | 2 | 0 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 65 | 4 | 3 | 2 | 1 | 4 | 0 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 6 |
| 66 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 6 |
| 67 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 4 | 0 | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 5 |
| 68 | 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 3 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 0 | 4 |
| 69 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 3 | 4 | 0 | 2 |
| 70 | 2 | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 |
| 71 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 4 | 0 | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 5 | 2 | 1 |
| 72 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 2 | 2 | 0 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| 73 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 3 | 2 | 2 | 0 | 4 |
| 74 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| 75 | 6 | 4 | 1 | 1 | 2 | 6 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 5 |
| 76 | 3 | 3 | 3 | 2 | 5 | 1 | 0 | 2 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 77 | 3 | 2 | 3 | 5 | 9 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 78 | 0 | 4 | 5 | 3 | 56 | 5 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| 79 | 0 | 2 | 1 | 8 | 6 | 24 | 34 | 8 | 2 | 7 | 0 | 5 | 1 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 |
| 80 | 0 | 2 | 1 | 8 | 1 | 28 | 12 | 17 | 8 | 3 | 5 | 5 | 0 | 4 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 81 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 12 | 17 | 2 | 0 | 4 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 82 | 1 | 5 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 0 | 1 | 4 | 3 | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 |
| 83 | 1 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 |
| 84 | 0 | 1 | 1 | 4 | 0 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 85 | 0 | 1 | 6 | 4 | 1 | 4 | 3 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| 86 | 0 | 2 | 6 | 4 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 |
| 87 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 |
| 88 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 |
| 89 | 2 | 1 | 4 | 7 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 90 | 0 | 1 | 3 | 6 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 4 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 91 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 0 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 92 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 93 | 1 | 3 | 1 | 5 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 4 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| 94 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 0 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 95 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 6 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| 96 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 6 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 3 | 1 | 3 |
| 97 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 3 |
| 98 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 99 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| 100 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 4 | 3 | 1 | 3 |
| 101 | 2 | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 0 | 4 | 5 | 3 | 3 | 6 | 5 | 3 | 5 |
| 102 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 0 | 2 | 1 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| 103 | 1 | 0 | 4 | 1 | 0 | 5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 2 | 0 | 1 | 2 | 6 | 4 | 4 | 5 | 2 | 2 | 4 |

2. sz. melléklet: Az ellipszis arányainak mátrixa a vizsgált próbatesten.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,500 | 0,556 | 0,523 | 0,522 | 0,553 | 0,565 | 0,553 | 0,581 | 0,568 | 0,590 | 0,535 | 0,545 | 0,543 | 0,585 | 0,619 | 0,542 | 0,553 | 0,683 | 0,718 | 0,750 | 0,711 | 0,756 | 0,646 |
| 2 | 0,477 | 0,565 | 0,523 | 0,500 | 0,553 | 0,574 | 0,553 | 0,556 | 0,532 | 0,605 | 0,537 | 0,610 | 0,578 | 0,575 | 0,619 | 0,614 | 0,578 | 0,605 | 0,700 | 0,690 | 0,674 | 0,756 | 0,674 |
| 3 | 0,488 | 0,609 | 0,558 | 0,521 | 0,553 | 0,574 | 0,553 | 0,543 | 0,532 | 0,590 | 0,548 | 0,585 | 0,614 | 0,615 | 0,605 | 0,614 | 0,651 | 0,600 | 0,659 | 0,643 | 0,651 | 0,659 | 0,659 |
| 4 | 0,512 | 0,574 | 0,535 | 0,543 | 0,553 | 0,574 | 0,542 | 0,556 | 0,542 | 0,600 | 0,548 | 0,571 | 0,614 | 0,585 | 0,628 | 0,581 | 0,591 | 0,614 | 0,300 | 0,683 | 0,644 | 0,636 | 0,587 |
| 5 | 0,512 | 0,617 | 0,581 | 0,194 | 0,520 | 0,542 | 0,553 | 0,556 | 0,553 | 0,548 | 0,537 | 0,571 | 0,600 | 0,625 | 0,692 | 0,591 | 0,591 | 0,596 | 0,284 | 0,707 | 0,711 | 0,619 | 0,574 |
| 6 | 0,488 | 0,617 | 0,558 | 0,200 | 0,540 | 0,520 | 0,553 | 0,556 | 0,542 | 0,511 | 0,595 | 0,600 | 0,600 | 0,667 | 0,650 | 0,619 | 0,628 | 0,596 | 0,284 | 0,659 | 0,723 | 0,634 | 0,600 |
| 7 | 0,535 | 0,583 | 0,571 | 0,565 | 0,540 | 0,519 | 0,553 | 0,556 | 0,565 | 0,533 | 0,595 | 0,600 | 0,628 | 0,610 | 0,650 | 0,636 | 0,674 | 0,596 | 0,263 | 0,700 | 0,652 | 0,610 | 0,690 |
| 8 | 0,512 | 0,583 | 0,571 | 0,565 | 0,510 | 0,529 | 0,553 | 0,558 | 0,553 | 0,511 | 0,575 | 0,632 | 0,591 | 0,610 | 0,650 | 0,600 | 0,574 | 0,578 | 0,241 | 0,683 | 0,617 | 0,610 | 0,651 |
| 9 | 0,524 | 0,592 | 0,558 | 0,553 | 0,510 | 0,540 | 0,553 | 0,545 | 0,574 | 0,511 | 0,548 | 0,632 | 0,591 | 0,610 | 0,650 | 0,600 | 0,652 | 0,644 | 0,256 | 0,683 | 0,630 | 0,659 | 0,614 |
| 10 | 0,537 | 0,592 | 0,558 | 0,553 | 0,529 | 0,540 | 0,542 | 0,558 | 0,574 | 0,600 | 0,561 | 0,632 | 0,591 | 0,650 | 0,634 | 0,667 | 0,604 | 0,614 | 0,244 | 0,683 | 0,609 | 0,628 | 0,667 |
| 11 | 0,537 | 0,604 | 0,581 | 0,565 | 0,609 | 0,540 | 0,531 | 0,595 | 0,542 | 0,605 | 0,667 | 0,657 | 0,600 | 0,625 | 0,595 | 0,622 | 0,604 | 0,614 | 0,225 | 0,674 | 0,609 | 0,707 | 0,683 |
| 12 | 0,537 | 0,596 | 0,581 | 0,578 | 0,587 | 0,600 | 0,563 | 0,558 | 0,565 | 0,615 | 0,590 | 0,632 | 0,587 | 0,625 | 0,619 | 0,783 | 0,739 | 0,600 | 0,228 | 0,659 | 0,667 | 0,659 | 0,675 |
| 13 | 0,525 | 0,596 | 0,545 | 0,578 | 0,574 | 0,563 | 0,551 | 0,543 | 0,578 | 0,632 | 0,590 | 0,585 | 0,587 | 0,581 | 0,628 | 0,652 | 0,723 | 0,600 | 0,266 | 0,636 | 0,674 | 0,651 | 0,628 |
| 14 | 0,537 | 0,596 | 0,545 | 0,532 | 0,574 | 0,596 | 0,574 | 0,522 | 0,565 | 0,667 | 0,605 | 0,585 | 0,556 | 0,571 | 0,628 | 0,596 | 0,571 | 0,762 | 0,284 | 0,636 | 0,682 | 0,651 | 0,643 |
| 15 | 0,537 | 0,574 | 0,535 | 0,543 | 0,574 | 0,609 | 0,574 | 0,545 | 0,542 | 0,590 | 0,575 | 0,535 | 0,565 | 0,561 | 0,614 | 0,596 | 0,667 | 0,682 | 0,304 | 0,614 | 0,682 | 0,651 | 0,690 |
| 16 | 0,550 | 0,583 | 0,545 | 0,532 | 0,587 | 0,609 | 0,574 | 0,533 | 0,542 | 0,548 | 0,535 | 0,523 | 0,565 | 0,571 | 0,578 | 0,681 | 0,830 | 0,651 | 0,282 | 0,609 | 0,651 | 0,690 | 0,659 |
| 17 | 0,477 | 0,583 | 0,545 | 0,543 | 0,587 | 0,563 | 0,574 | 0,556 | 0,553 | 0,571 | 0,535 | 0,545 | 0,531 | 0,595 | 0,578 | 0,766 | 0,830 | 0,636 | 0,268 | 0,622 | 0,727 | 0,667 | 0,667 |
| 18 | 0,500 | 0,574 | 0,558 | 0,532 | 0,532 | 0,563 | 0,591 | 0,595 | 0,591 | 0,571 | 0,558 | 0,545 | 0,551 | 0,605 | 0,614 | 0,609 | 0,604 | 0,667 | 0,300 | 0,667 | 0,681 | 0,636 | 0,674 |
| 19 | 0,500 | 0,574 | 0,558 | 0,532 | 0,553 | 0,563 | 0,634 | 0,667 | 0,574 | 0,571 | 0,558 | 0,545 | 0,574 | 0,591 | 0,614 | 0,553 | 0,583 | 0,667 | 0,300 | 0,630 | 0,609 | 0,674 | 0,644 |
| 20 | 0,512 | 0,574 | 0,558 | 0,565 | 0,553 | 0,563 | 0,725 | 0,684 | 0,565 | 0,561 | 0,571 | 0,568 | 0,542 | 0,568 | 0,614 | 0,542 | 0,563 | 0,587 | 0,333 | 0,652 | 0,689 | 0,700 | 0,587 |
| 21 | 0,488 | 0,565 | 0,548 | 0,556 | 0,565 | 0,574 | 0,725 | 0,610 | 0,542 | 0,548 | 0,585 | 0,605 | 0,551 | 0,568 | 0,614 | 0,542 | 0,587 | 0,542 | 0,275 | 0,652 | 0,652 | 0,700 | 0,600 |
| 22 | 0,538 | 0,542 | 0,548 | 0,605 | 0,591 | 0,600 | 0,659 | 0,585 | 0,542 | 0,610 | 0,571 | 0,568 | 0,551 | 0,591 | 0,591 | 0,600 | 0,587 | 0,714 | 0,310 | 0,609 | 0,612 | 0,725 | 0,651 |
| 23 | 0,564 | 0,551 | 0,558 | 0,568 | 0,605 | 0,667 | 0,619 | 0,585 | 0,531 | 0,625 | 0,585 | 0,556 | 0,540 | 0,587 | 0,578 | 0,587 | 0,600 | 0,957 | 0,289 | 0,617 | 0,569 | 0,651 | 0,667 |
| 24 | 0,500 | 0,560 | 0,545 | 0,543 | 0,619 | 0,643 | 0,578 | 0,558 | 0,565 | 0,595 | 0,571 | 0,556 | 0,540 | 0,578 | 0,591 | 0,591 | 0,600 | 0,957 | 0,280 | 0,638 | 0,640 | 0,651 | 0,667 |
| 25 | 0,512 | 0,560 | 0,535 | 0,543 | 0,619 | 0,667 | 0,578 | 0,556 | 0,522 | 0,610 | 0,571 | 0,556 | 0,551 | 0,581 | 0,591 | 0,605 | 0,591 | 0,714 | 0,280 | 0,630 | 0,588 | 0,636 | 0,683 |
| 26 | 0,476 | 0,540 | 0,535 | 0,545 | 0,619 | 0,659 | 0,591 | 0,556 | 0,600 | 0,585 | 0,571 | 0,556 | 0,551 | 0,581 | 0,591 | 0,605 | 0,628 | 0,744 | 0,315 | 0,644 | 0,612 | 0,651 | 0,683 |
| 27 | 0,500 | 0,553 | 0,561 | 0,610 | 0,650 | 0,692 | 0,641 | 0,571 | 0,591 | 0,610 | 0,511 | 0,533 | 0,551 | 0,605 | 0,614 | 0,605 | 0,605 | 0,705 | 0,304 | 0,630 | 0,620 | 0,651 | 0,659 |
| 28 | 0,525 | 0,553 | 0,605 | 0,600 | 0,667 | 0,692 | 0,641 | 0,558 | 0,591 | 0,595 | 0,585 | 0,568 | 0,551 | 0,568 | 0,578 | 0,605 | 0,867 | 0,600 | 0,315 | 0,644 | 0,653 | 0,651 | 0,675 |
| 29 | 0,553 | 0,565 | 0,605 | 0,615 | 0,625 | 0,692 | 0,625 | 0,571 | 0,578 | 0,585 | 0,571 | 0,556 | 0,574 | 0,585 | 0,614 | 0,760 | 0,867 | 0,667 | 0,275 | 0,600 | 0,625 | 0,674 | 0,763 |
| 30 | 0,553 | 0,614 | 0,605 | 0,632 | 0,650 | 0,625 | 0,568 | 0,558 | 0,578 | 0,595 | 0,571 | 0,545 | 0,600 | 0,585 | 0,675 | 0,485 | 0,485 | 0,619 | 0,291 | 0,628 | 0,617 | 0,651 | 0,763 |
| 31 | 0,568 | 0,614 | 0,605 | 0,600 | 0,650 | 0,634 | 0,532 | 0,568 | 0,578 | 0,610 | 0,571 | 0,545 | 0,600 | 0,571 | 0,634 | 0,686 | 0,717 | 0,619 | 0,275 | 0,718 | 0,622 | 0,650 | 0,711 |
| 32 | 0,541 | 0,591 | 0,605 | 0,600 | 0,650 | 0,659 | 0,556 | 0,543 | 0,565 | 0,595 | 0,558 | 0,545 | 0,587 | 0,581 | 0,634 | 0,681 | 0,577 | 0,634 | 0,295 | 0,676 | 0,667 | 0,667 | 0,650 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 33 | 0,514 | 0,614 | 0,579 | 0,615 | 0,667 | 0,619 | 0,556 | 0,565 | 0,587 | 0,568 | 0,533 | 0,533 | 0,542 | 0,571 | 0,619 | 0,681 | 0,721 | 0,610 | 0,706 | 0,968 | 0,722 | 0,667 | 0,658 |
| 34 | 0,541 | 0,600 | 0,579 | 0,649 | 0,595 | 0,578 | 0,578 | 0,578 | 0,587 | 0,558 | 0,556 | 0,543 | 0,520 | 0,568 | 0,605 | 0,804 | 0,542 | 0,571 | 0,735 | 0,844 | 0,842 | 0,727 | 0,714 |
| 35 | 0,500 | 0,591 | 0,579 | 0,605 | 0,595 | 0,578 | 0,600 | 0,578 | 0,587 | 0,558 | 0,556 | 0,565 | 0,574 | 0,556 | 0,568 | 0,435 | 0,542 | 0,605 | 0,758 | 0,692 | 0,923 | 0,867 | 0,758 |
| 36 | 0,500 | 0,605 | 0,605 | 0,676 | 0,581 | 0,578 | 0,667 | 0,605 | 0,587 | 0,523 | 0,568 | 0,556 | 0,565 | 0,568 | 0,556 | 0,500 | 0,484 | 0,605 | 0,658 | 0,610 | 0,737 | 0,778 | 0,758 |
| 37 | 0,487 | 0,605 | 0,605 | 0,694 | 0,595 | 0,565 | 0,628 | 0,591 | 0,600 | 0,523 | 0,568 | 0,568 | 0,578 | 0,581 | 0,578 | 0,534 | 0,525 | 0,614 | 0,658 | 0,690 | 0,690 | 0,628 | 0,667 |
| 38 | 0,500 | 0,578 | 0,605 | 0,694 | 0,595 | 0,578 | 0,591 | 0,591 | 0,574 | 0,545 | 0,543 | 0,568 | 0,614 | 0,595 | 0,578 | 0,525 | 0,525 | 0,574 | 0,711 | 0,622 | 0,644 | 0,690 | 0,683 |
| 39 | 0,513 | 0,587 | 0,564 | 0,615 | 0,581 | 0,605 | 0,591 | 0,578 | 0,574 | 0,545 | 0,545 | 0,543 | 0,609 | 0,643 | 0,578 | 0,525 | 0,667 | 0,596 | 0,610 | 0,604 | 0,667 | 0,690 | 0,636 |
| 40 | 0,513 | 0,565 | 0,590 | 0,632 | 0,581 | 0,578 | 0,591 | 0,543 | 0,574 | 0,581 | 0,556 | 0,578 | 0,587 | 0,619 | 0,578 | 0,702 | 0,674 | 0,609 | 0,636 | 0,620 | 0,739 | 0,698 | 0,721 |
| 41 | 0,500 | 0,628 | 0,639 | 0,615 | 0,605 | 0,578 | 0,614 | 0,565 | 0,574 | 0,558 | 0,556 | 0,543 | 0,574 | 0,628 | 0,614 | 0,739 | 0,723 | 0,596 | 0,578 | 0,667 | 0,702 | 0,659 | 0,705 |
| 42 | 0,541 | 0,659 | 0,639 | 0,575 | 0,610 | 0,605 | 0,578 | 0,565 | 0,574 | 0,545 | 0,533 | 0,533 | 0,600 | 0,605 | 0,600 | 0,810 | 0,702 | 0,596 | 0,578 | 0,638 | 0,745 | 0,630 | 0,705 |
| 43 | 0,488 | 0,659 | 0,667 | 0,615 | 0,634 | 0,643 | 0,628 | 0,578 | 0,587 | 0,558 | 0,533 | 0,522 | 0,587 | 0,605 | 0,600 | 0,600 | 0,609 | 0,596 | 0,578 | 0,646 | 0,717 | 0,721 | 0,674 |
| 44 | 0,513 | 0,643 | 0,667 | 0,615 | 0,634 | 0,614 | 0,591 | 0,565 | 0,563 | 0,558 | 0,556 | 0,522 | 0,600 | 0,605 | 0,600 | 0,628 | 0,587 | 0,583 | 0,600 | 0,646 | 0,681 | 0,744 | 0,775 |
| 45 | 0,525 | 0,591 | 0,639 | 0,585 | 0,634 | 0,651 | 0,591 | 0,587 | 0,551 | 0,545 | 0,543 | 0,543 | 0,587 | 0,595 | 0,600 | 0,628 | 0,705 | 0,596 | 0,578 | 0,630 | 0,660 | 0,744 | 0,732 |
| 46 | 0,553 | 0,587 | 0,600 | 0,585 | 0,581 | 0,628 | 0,600 | 0,600 | 0,551 | 0,533 | 0,556 | 0,522 | 0,600 | 0,595 | 0,614 | 0,612 | 0,633 | 0,636 | 0,614 | 0,604 | 0,609 | 0,756 | 0,674 |
| 47 | 0,553 | 0,609 | 0,585 | 0,615 | 0,610 | 0,628 | 0,622 | 0,600 | 0,574 | 0,545 | 0,543 | 0,522 | 0,600 | 0,595 | 0,574 | 0,604 | 0,623 | 0,574 | 0,659 | 0,633 | 0,707 | 0,674 | 0,659 |
| 48 | 0,500 | 0,622 | 0,615 | 0,625 | 0,610 | 0,614 | 0,651 | 0,600 | 0,574 | 0,558 | 0,543 | 0,543 | 0,628 | 0,643 | 0,600 | 0,714 | 0,647 | 0,574 | 0,636 | 0,633 | 0,690 | 0,659 | 0,659 |
| 49 | 0,512 | 0,622 | 0,615 | 0,625 | 0,610 | 0,578 | 0,600 | 0,574 | 0,574 | 0,558 | 0,543 | 0,556 | 0,614 | 0,619 | 0,578 | 0,587 | 0,773 | 0,614 | 0,636 | 0,592 | 0,690 | 0,636 | 0,675 |
| 50 | 0,512 | 0,600 | 0,615 | 0,625 | 0,610 | 0,578 | 0,622 | 0,563 | 0,551 | 0,595 | 0,543 | 0,556 | 0,578 | 0,605 | 0,578 | 0,605 | 0,628 | 0,542 | 0,578 | 0,609 | 0,674 | 0,690 | 0,659 |
| 51 | 0,538 | 0,587 | 0,632 | 0,625 | 0,610 | 0,591 | 0,622 | 0,563 | 0,551 | 0,595 | 0,556 | 0,568 | 0,605 | 0,628 | 0,605 | 0,605 | 0,605 | 0,565 | 0,568 | 0,622 | 0,644 | 0,690 | 0,659 |
| 52 | 0,568 | 0,587 | 0,615 | 0,632 | 0,610 | 0,619 | 0,600 | 0,563 | 0,551 | 0,632 | 0,568 | 0,558 | 0,581 | 0,614 | 0,605 | 0,605 | 0,628 | 0,553 | 0,571 | 0,659 | 0,690 | 0,683 | 0,667 |
| 53 | 0,525 | 0,591 | 0,605 | 0,632 | 0,610 | 0,619 | 0,587 | 0,587 | 0,551 | 0,649 | 0,556 | 0,558 | 0,581 | 0,619 | 0,605 | 0,591 | 0,643 | 0,568 | 0,595 | 0,659 | 0,667 | 0,690 | 0,725 |
| 54 | 0,538 | 0,643 | 0,615 | 0,632 | 0,625 | 0,619 | 0,643 | 0,614 | 0,563 | 0,622 | 0,568 | 0,595 | 0,581 | 0,595 | 0,625 | 0,581 | 0,619 | 0,568 | 0,625 | 0,622 | 0,609 | 0,651 | 0,725 |
| 55 | 0,512 | 0,643 | 0,605 | 0,641 | 0,641 | 0,619 | 0,667 | 0,634 | 0,574 | 0,639 | 0,568 | 0,581 | 0,568 | 0,595 | 0,610 | 0,558 | 0,581 | 0,614 | 0,625 | 0,675 | 0,636 | 0,659 | 0,674 |
| 56 | 0,512 | 0,659 | 0,605 | 0,641 | 0,641 | 0,650 | 0,667 | 0,605 | 0,600 | 0,639 | 0,545 | 0,581 | 0,543 | 0,610 | 0,610 | 0,641 | 0,610 | 0,431 | 0,641 | 0,730 | 0,667 | 0,636 | 0,651 |
| 57 | 0,512 | 0,619 | 0,605 | 0,641 | 0,735 | 0,714 | 0,667 | 0,605 | 0,628 | 0,639 | 0,571 | 0,568 | 0,553 | 0,641 | 0,595 | 0,641 | 0,684 | 0,443 | 0,658 | 0,675 | 0,651 | 0,636 | 0,651 |
| 58 | 0,568 | 0,619 | 0,605 | 0,632 | 0,714 | 0,667 | 0,658 | 0,634 | 0,628 | 0,605 | 0,649 | 0,568 | 0,591 | 0,625 | 0,610 | 0,600 | 0,625 | 0,667 | 0,658 | 0,667 | 0,659 | 0,659 | 0,651 |
| 59 | 0,583 | 0,634 | 0,595 | 0,727 | 0,686 | 0,667 | 0,703 | 0,667 | 0,605 | 0,600 | 0,632 | 0,558 | 0,591 | 0,727 | 0,684 | 0,585 | 0,625 | 0,600 | 0,595 | 0,659 | 0,659 | 0,644 | 0,636 |
| 60 | 0,541 | 0,605 | 0,538 | 0,697 | 0,632 | 0,650 | 0,667 | 0,684 | 0,634 | 0,590 | 0,639 | 0,600 | 0,581 | 0,727 | 0,641 | 0,641 | 0,625 | 0,610 | 0,667 | 0,675 | 0,634 | 0,644 | 0,636 |
| 61 | 0,556 | 0,605 | 0,538 | 0,639 | 0,632 | 0,676 | 0,667 | 0,625 | 0,659 | 0,548 | 0,639 | 0,615 | 0,667 | 0,706 | 0,694 | 0,571 | 0,595 | 0,610 | 0,641 | 0,659 | 0,675 | 0,674 | 0,667 |
| 62 | 0,514 | 0,605 | 0,538 | 0,639 | 0,632 | 0,703 | 0,625 | 0,619 | 0,650 | 0,561 | 0,590 | 0,615 | 0,632 | 0,649 | 0,694 | 0,585 | 0,610 | 0,634 | 0,610 | 0,600 | 0,643 | 0,622 | 0,674 |
| 63 | 0,543 | 0,619 | 0,611 | 0,639 | 0,632 | 0,676 | 0,667 | 0,667 | 0,667 | 0,561 | 0,605 | 0,605 | 0,610 | 0,615 | 0,658 | 0,615 | 0,667 | 0,622 | 0,581 | 0,565 | 0,614 | 0,622 | 0,744 |
| 64 | 0,514 | 0,667 | 0,677 | 0,639 | 0,632 | 0,714 | 0,667 | 0,625 | 0,667 | 0,579 | 0,697 | 0,686 | 0,571 | 0,615 | 0,649 | 0,632 | 0,615 | 0,682 | 0,595 | 0,634 | 0,574 | 0,622 | 0,675 |
| 65 | 0,528 | 0,615 | 0,588 | 0,639 | 0,667 | 0,714 | 0,714 | 0,649 | 0,610 | 0,583 | 0,719 | 0,657 | 0,650 | 0,657 | 0,667 | 0,600 | 0,641 | 0,605 | 0,641 | 0,591 | 0,609 | 0,667 | 0,707 |
| 66 | 0,571 | 0,634 | 0,657 | 0,667 | 0,694 | 0,706 | 0,688 | 0,639 | 0,639 | 0,629 | 0,719 | 0,735 | 0,625 | 0,658 | 0,686 | 0,600 | 0,641 | 0,605 | 0,595 | 0,591 | 0,596 | 0,683 | 0,707 |
| 67 | 0,528 | 0,634 | 0,639 | 0,615 | 0,667 | 0,714 | 0,658 | 0,730 | 0,658 | 0,667 | 0,719 | 0,735 | 0,610 | 0,632 | 0,686 | 0,632 | 0,632 | 0,605 | 0,595 | 0,591 | 0,609 | 0,592 | 0,690 |
| 68 | 0,541 | 0,650 | 0,639 | 0,615 | 0,667 | 0,667 | 0,625 | 0,667 | 0,610 | 0,667 | 0,719 | 0,750 | 0,684 | 0,575 | 0,686 | 0,632 | 0,615 | 0,628 | 0,581 | 0,600 | 0,587 | 0,659 | 0,674 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 69 | 0,526 | 0,683 | 0,639 | 0,641 | 0,686 | 0,694 | 0,625 | 0,667 | 0,595 | 0,647 | 0,719 | 0,719 | 0,641 | 0,615 | 0,727 | 0,657 | 0,622 | 0,591 | 0,605 | 0,587 | 0,596 | 0,659 | 0,667 |
| 70 | 0,541 | 0,578 | 0,579 | 0,600 | 0,727 | 0,694 | 0,634 | 0,605 | 0,595 | 0,667 | 0,667 | 0,767 | 0,676 | 0,641 | 0,706 | 0,667 | 0,667 | 0,591 | 0,578 | 0,596 | 0,617 | 0,644 | 0,690 |
| 71 | 0,528 | 0,543 | 0,564 | 0,667 | 0,742 | 0,694 | 0,595 | 0,605 | 0,591 | 0,676 | 0,697 | 0,742 | 0,727 | 0,625 | 0,667 | 0,667 | 0,632 | 0,703 | 0,574 | 0,587 | 0,596 | 0,630 | 0,757 |
| 72 | 0,543 | 0,568 | 0,550 | 0,579 | 0,719 | 0,676 | 0,634 | 0,619 | 0,565 | 0,639 | 0,611 | 0,639 | 0,743 | 0,676 | 0,615 | 0,676 | 0,676 | 0,694 | 0,600 | 0,553 | 0,614 | 0,667 | 0,757 |
| 73 | 0,556 | 0,568 | 0,564 | 0,605 | 0,710 | 0,600 | 0,641 | 0,634 | 0,565 | 0,605 | 0,611 | 0,639 | 0,722 | 0,667 | 0,658 | 0,667 | 0,658 | 0,694 | 0,553 | 0,583 | 0,600 | 0,700 | 0,771 |
| 74 | 0,588 | 0,591 | 0,564 | 0,605 | 0,710 | 0,625 | 0,658 | 0,684 | 0,585 | 0,590 | 0,611 | 0,639 | 0,667 | 0,686 | 0,658 | 0,684 | 0,676 | 0,684 | 0,553 | 0,617 | 0,583 | 0,614 | 0,818 |
| 75 | 0,588 | 0,561 | 0,605 | 0,639 | 0,733 | 0,657 | 0,658 | 0,684 | 0,615 | 0,605 | 0,622 | 0,605 | 0,595 | 0,686 | 0,641 | 0,667 | 0,650 | 0,684 | 0,591 | 0,609 | 0,596 | 0,614 | 0,794 |
| 76 | 0,563 | 0,676 | 0,656 | 0,611 | 0,700 | 0,676 | 0,649 | 0,629 | 0,622 | 0,606 | 0,622 | 0,605 | 0,641 | 0,686 | 0,634 | 0,610 | 0,634 | 0,757 | 0,591 | 0,609 | 0,622 | 0,614 | 0,692 |
| 77 | 0,600 | 0,615 | 0,606 | 0,697 | 0,810 | 0,676 | 0,629 | 0,629 | 0,622 | 0,622 | 0,583 | 0,605 | 0,600 | 0,727 | 0,625 | 0,610 | 0,634 | 0,684 | 0,591 | 0,609 | 0,622 | 0,609 | 0,652 |
| 78 | 0,629 | 0,625 | 0,667 | 0,667 | 0,941 | 0,786 | 0,667 | 0,676 | 0,622 | 0,605 | 0,583 | 0,622 | 0,605 | 0,667 | 0,658 | 0,634 | 0,634 | 0,684 | 0,565 | 0,574 | 0,609 | 0,609 | 0,652 |
| 79 | 0,629 | 0,610 | 0,639 | 0,688 | 0,880 | 0,895 | 0,864 | 0,815 | 0,694 | 0,611 | 0,622 | 0,561 | 0,605 | 0,706 | 0,615 | 0,600 | 0,625 | 0,684 | 0,532 | 0,583 | 0,596 | 0,574 | 0,644 |
| 80 | 0,667 | 0,610 | 0,639 | 0,688 | 0,641 | 0,900 | 0,676 | 0,686 | 0,641 | 0,632 | 0,622 | 0,561 | 0,641 | 0,676 | 0,615 | 0,585 | 0,610 | 0,684 | 0,521 | 0,583 | 0,571 | 0,609 | 0,604 |
| 81 | 0,583 | 0,641 | 0,647 | 0,765 | 0,641 | 0,684 | 0,676 | 0,686 | 0,625 | 0,571 | 0,600 | 0,558 | 0,619 | 0,615 | 0,641 | 0,585 | 0,610 | 0,610 | 0,553 | 0,630 | 0,571 | 0,609 | 0,604 |
| 82 | 0,553 | 0,667 | 0,657 | 0,639 | 0,634 | 0,667 | 0,619 | 0,667 | 0,556 | 0,571 | 0,585 | 0,634 | 0,619 | 0,548 | 0,641 | 0,585 | 0,619 | 0,634 | 0,591 | 0,609 | 0,604 | 0,604 | 0,625 |
| 83 | 0,600 | 0,684 | 0,697 | 0,605 | 0,667 | 0,667 | 0,641 | 0,628 | 0,556 | 0,615 | 0,585 | 0,595 | 0,634 | 0,615 | 0,641 | 0,595 | 0,595 | 0,619 | 0,605 | 0,609 | 0,617 | 0,617 | 0,652 |
| 84 | 0,606 | 0,722 | 0,676 | 0,667 | 0,641 | 0,625 | 0,684 | 0,619 | 0,565 | 0,585 | 0,585 | 0,571 | 0,619 | 0,667 | 0,658 | 0,568 | 0,605 | 0,619 | 0,650 | 0,587 | 0,604 | 0,600 | 0,652 |
| 85 | 0,606 | 0,844 | 0,719 | 0,706 | 0,641 | 0,667 | 0,694 | 0,634 | 0,578 | 0,571 | 0,585 | 0,585 | 0,619 | 0,658 | 0,595 | 0,581 | 0,605 | 0,605 | 0,650 | 0,636 | 0,592 | 0,560 | 0,640 |
| 86 | 0,606 | 0,758 | 0,719 | 0,706 | 0,600 | 0,650 | 0,667 | 0,684 | 0,619 | 0,585 | 0,585 | 0,585 | 0,634 | 0,600 | 0,595 | 0,595 | 0,605 | 0,614 | 0,675 | 0,707 | 0,592 | 0,580 | 0,640 |
| 87 | 0,588 | 0,676 | 0,815 | 0,649 | 0,600 | 0,667 | 0,667 | 0,684 | 0,634 | 0,585 | 0,585 | 0,600 | 0,619 | 0,581 | 0,595 | 0,634 | 0,619 | 0,630 | 0,675 | 0,659 | 0,604 | 0,549 | 0,640 |
| 88 | 0,606 | 0,634 | 0,647 | 0,622 | 0,595 | 0,667 | 0,650 | 0,605 | 0,619 | 0,558 | 0,585 | 0,571 | 0,659 | 0,581 | 0,610 | 0,634 | 0,619 | 0,644 | 0,650 | 0,667 | 0,644 | 0,549 | 0,627 |
| 89 | 0,594 | 0,634 | 0,697 | 0,852 | 0,686 | 0,667 | 0,634 | 0,634 | 0,619 | 0,641 | 0,585 | 0,585 | 0,625 | 0,595 | 0,634 | 0,634 | 0,619 | 0,667 | 0,667 | 0,707 | 0,644 | 0,571 | 0,640 |
| 90 | 0,704 | 0,619 | 0,697 | 0,815 | 0,632 | 0,667 | 0,610 | 0,625 | 0,605 | 0,667 | 0,610 | 0,585 | 0,568 | 0,595 | 0,730 | 0,634 | 0,643 | 0,674 | 0,667 | 0,683 | 0,630 | 0,560 | 0,640 |
| 91 | 0,704 | 0,619 | 0,647 | 0,667 | 0,615 | 0,625 | 0,703 | 0,650 | 0,595 | 0,575 | 0,610 | 0,600 | 0,605 | 0,595 | 0,634 | 0,675 | 0,667 | 0,674 | 0,643 | 0,636 | 0,596 | 0,646 | 0,640 |
| 92 | 0,679 | 0,619 | 0,647 | 0,667 | 0,615 | 0,634 | 0,676 | 0,641 | 0,610 | 0,590 | 0,585 | 0,600 | 0,634 | 0,595 | 0,634 | 0,711 | 0,692 | 0,667 | 0,667 | 0,636 | 0,609 | 0,630 | 0,653 |
| 93 | 0,621 | 0,641 | 0,595 | 0,676 | 0,615 | 0,658 | 0,676 | 0,658 | 0,610 | 0,622 | 0,649 | 0,585 | 0,659 | 0,610 | 0,605 | 0,625 | 0,667 | 0,643 | 0,643 | 0,659 | 0,659 | 0,651 | 0,633 |
| 94 | 0,679 | 0,641 | 0,611 | 0,688 | 0,632 | 0,658 | 0,658 | 0,649 | 0,610 | 0,622 | 0,590 | 0,571 | 0,634 | 0,600 | 0,595 | 0,659 | 0,643 | 0,614 | 0,614 | 0,644 | 0,707 | 0,651 | 0,612 |
| 95 | 0,793 | 0,703 | 0,629 | 0,688 | 0,686 | 0,658 | 0,667 | 0,625 | 0,610 | 0,676 | 0,632 | 0,600 | 0,658 | 0,632 | 0,756 | 0,625 | 0,683 | 0,707 | 0,636 | 0,762 | 0,692 | 0,636 | 0,696 |
| 96 | 0,606 | 0,625 | 0,657 | 0,667 | 0,684 | 0,632 | 0,714 | 0,722 | 0,619 | 0,590 | 0,632 | 0,686 | 0,667 | 0,650 | 0,636 | 0,659 | 0,683 | 0,614 | 0,683 | 0,600 | 0,683 | 0,750 | 0,682 |
| 97 | 0,606 | 0,619 | 0,595 | 0,615 | 0,610 | 0,667 | 0,581 | 0,643 | 0,700 | 0,590 | 0,667 | 0,686 | 0,676 | 0,641 | 0,558 | 0,591 | 0,556 | 0,614 | 0,600 | 0,609 | 0,675 | 0,644 | 0,682 |
| 98 | 0,594 | 0,595 | 0,595 | 0,615 | 0,571 | 0,591 | 0,591 | 0,578 | 0,605 | 0,590 | 0,590 | 0,590 | 0,600 | 0,615 | 0,558 | 0,556 | 0,591 | 0,565 | 0,578 | 0,622 | 0,675 | 0,622 | 0,609 |
| 99 | 0,633 | 0,625 | 0,639 | 0,575 | 0,571 | 0,634 | 0,591 | 0,578 | 0,581 | 0,579 | 0,605 | 0,632 | 0,641 | 0,649 | 0,571 | 0,556 | 0,556 | 0,578 | 0,556 | 0,609 | 0,571 | 0,634 | 0,705 |
| 100 | 0,559 | 0,658 | 0,647 | 0,590 | 0,600 | 0,595 | 0,581 | 0,556 | 0,581 | 0,579 | 0,605 | 0,605 | 0,632 | 0,649 | 0,600 | 0,556 | 0,578 | 0,591 | 0,553 | 0,551 | 0,565 | 0,634 | 0,617 |
| 101 | 0,576 | 0,676 | 0,629 | 0,657 | 0,690 | 0,625 | 0,610 | 0,568 | 0,581 | 0,561 | 0,600 | 0,595 | 0,632 | 0,595 | 0,600 | 0,591 | 0,578 | 0,556 | 0,565 | 0,644 | 0,563 | 0,600 | 0,609 |
| 102 | 0,531 | 0,657 | 0,618 | 0,611 | 0,605 | 0,625 | 0,641 | 0,610 | 0,578 | 0,575 | 0,585 | 0,632 | 0,650 | 0,658 | 0,694 | 0,545 | 0,578 | 0,578 | 0,619 | 0,628 | 0,578 | 0,609 | 0,622 |
| 103 | 0,531 | 0,595 | 0,688 | 0,649 | 0,632 | 0,658 | 0,625 | 0,625 | 0,595 | 0,575 | 0,585 | 0,575 | 0,632 | 0,632 | 0,605 | 0,590 | 0,585 | 0,578 | 0,605 | 0,651 | 0,651 | 0,574 | 0,622 |

3. sz. melléklet: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, a göcsparaméterek, a csillapítás valamint a hajlítószilárdság között az I. csoportban

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,80114854 R2= ,64183899 Adjusted R2= ,64087360 F(1,371)=664,85 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,5236 | | | | | | |
|--|----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=373 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(371) | p-value |
| Intercept | | | -3,11567 | 1,659521 | -1,87745 | 0,061241 |
| hajl 1MOE | 0,801149 | 0,031071 | 4,23111 | 0,164094 | 25,78463 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,85328531 R2= ,72809582 Adjusted R2= ,72600425 F(2,260)=348,11 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,2687 | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=263 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(260) | p-value |
| Intercept | | | 9,1105 | 2,313161 | 3,93853 | 0,000105 |
| GTA | -0,286852 | 0,035429 | -27,5295 | 3,400161 | -8,09654 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,694951 | 0,035429 | 3,5942 | 0,183234 | 19,61533 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,85484454 R2= ,73075919 Adjusted R2= ,72868811 F(2,260)=352,84 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,2331 | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=263 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(260) | p-value |
| Intercept | | | 8,4521 | 2,229326 | 3,79134 | 0,000186 |
| szeg.GTA | -0,294413 | 0,035501 | -22,6944 | 2,736557 | -8,29303 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,687782 | 0,035501 | 3,5571 | 0,183608 | 19,37347 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,83068650 R2= ,69004007 Adjusted R2= ,68836461 F(2,370)=411,85 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,0085 | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=373 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(370) | p-value |
| Intercept | | | 7,6961 | 2,102720 | 3,66007 | 0,000289 |
| CKDR | -0,245392 | 0,032351 | -21,9740 | 2,896890 | -7,58536 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,691531 | 0,032351 | 3,6522 | 0,170854 | 21,37609 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,82471578 R2= ,68015612 Adjusted R2= ,67842255 F(2,369)=392,34 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,1208 | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=372 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(369) | p-value |
| Intercept | | | 4,8206 | 2,015216 | 2,39211 | 0,017252 |
| SZCKDR | -0,212831 | 0,032385 | -14,9954 | 2,281727 | -6,57193 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,713040 | 0,032385 | 3,7849 | 0,171902 | 22,01775 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,82997118 R2= ,68885216 Adjusted R2= ,68716114 F(2,368)=407,36 p<0,0000 Std.Error of estimate: 6,9997 | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=371 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(368) | p-value |
| Intercept | | | 28,41423 | 4,390199 | 6,47220 | 0,000000 |
| hajl 1MOE | 0,618379 | 0,037504 | 3,26448 | 0,197988 | 16,48824 | 0,000000 |
| csill B1 | -0,286937 | 0,037504 | -0,82638 | 0,108012 | -7,65081 | 0,000000 |

4. sz. melléklet. Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a longitudinális modulusz, a göcsparaméterek, valamint a hajlítószilárdság között az I. csoportban

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,78619306 R2= ,61809953 Adjusted R2= ,61707841 F(1,374)=605,31 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,7596 | | | | | | |
|--|----------|-------------------|-----------|------------------|----------|----------|
| N=376 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(374) | p-value |
| Intercept | | | -0,305658 | 1,626088 | -0,18797 | 0,851001 |
| long 1MOE | 0,786193 | 0,031955 | 3,696260 | 0,150235 | 24,60310 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,83943993 R2= ,70465939 Adjusted R2= ,70241345 F(2,263)=313,75 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,5567 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=266 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(263) | p-value |
| Intercept | | | 12,3200 | 2,307870 | 5,33827 | 0,000000 |
| GTA | -0,297855 | 0,036753 | -28,5141 | 3,518427 | -8,10421 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,671971 | 0,036753 | 3,0955 | 0,169307 | 18,28335 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,85051568 R2= ,72337692 Adjusted R2= ,72127332 F(2,263)=343,88 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,3133 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=266 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(263) | p-value |
| Intercept | | | 11,9737 | 2,099857 | 5,70215 | 0,000000 |
| szeg.GTA | -0,329528 | 0,035144 | -25,3667 | 2,705355 | -9,37646 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,667343 | 0,035144 | 3,0742 | 0,161896 | 18,98870 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,82004220 R2= ,67246921 Adjusted R2= ,67070830 F(2,372)=381,89 p<0,0000 Std.Error of estimate: 7,1971 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=375 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(372) | p-value |
| Intercept | | | 8,3457 | 1,890109 | 4,41546 | 0,000013 |
| SZCKDR | -0,250749 | 0,031964 | -17,6808 | 2,253870 | -7,84465 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,693077 | 0,031964 | 3,2718 | 0,150896 | 21,68282 | 0,000000 |

5. sz. melléklet: A 164-es palló törésképe (mindkét oldal)



6. sz. melléklet: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, a göcsparaméterek, csillapítás valamint a statikus rugalmassági modulusz között a II. csoportban

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,94976588 R2= ,90205523 Adjusted R2= ,90170035 F(1,276)=2541,9 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,77095 | | | | | | |
|---|----------|----------------|-----------|---------------|----------|----------|
| N=278 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(276) | p-value |
| Intercept | | | -0,239055 | 0,242463 | -0,98594 | 0,325024 |
| hajl 1MOE | 0,949766 | 0,018838 | 0,978208 | 0,019402 | 50,41740 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,92527782 R2= ,85613905 Adjusted R2= ,85001731 F(2,47)=139,85 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,90240 | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=50 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(47) | p-value |
| Intercept | | | 0,77492 | 0,948235 | 0,81723 | 0,417921 |
| GTA | -0,206129 | 0,057170 | -4,34943 | 1,206314 | -3,60556 | 0,000751 |
| hajl 1MOE | 0,851579 | 0,057170 | 0,96400 | 0,064717 | 14,89560 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,92886473 R2= ,86278968 Adjusted R2= ,85695094 F(2,47)=147,77 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,88130 | | | | | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=50 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(47) | p-value |
| Intercept | | | 0,45243 | 0,892735 | 0,50679 | 0,614674 |
| szeg.GTA | -0,217998 | 0,054656 | -4,16023 | 1,043051 | -3,98852 | 0,000231 |
| hajl 1MOE | 0,870643 | 0,054656 | 0,98559 | 0,061872 | 15,92941 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,94990851 R2= ,90232617 Adjusted R2= ,90161322 F(2,274)=1265,6 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,76777 | | | | | | |
|---|-----------|----------------|-----------|---------------|----------|----------|
| N=277 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(274) | p-value |
| Intercept | | | 0,522289 | 0,457735 | 1,14103 | 0,254853 |
| hajl 1MOE | 0,918066 | 0,024975 | 0,944538 | 0,025695 | 36,75916 | 0,000000 |
| csill B1 | -0,047602 | 0,024975 | -0,009108 | 0,004779 | -1,90598 | 0,057700 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,93399003 R2= ,87233738 Adjusted R2= ,86821923 F(2,62)=211,83 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,86858 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=65 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(62) | p-value |
| Intercept | | | 0,56399 | 0,785001 | 0,71846 | 0,475173 |
| SZCKDR | -0,165566 | 0,047661 | -2,76833 | 0,796907 | -3,47384 | 0,000942 |
| hajl 1MOE | 0,869954 | 0,047661 | 0,97217 | 0,053261 | 18,25299 | 0,000000 |

7. sz. melléklet: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a longitudinális modulusz, a göcsparaméterek, valamint a statikus rugalmassági modulusz között a II. csoportban

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,92837979 R2= ,86188904 Adjusted R2= ,86150326 F(1,358)=2234,1 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,91103 | | | | | | |
|---|----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=360 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(358) | p-value |
| Intercept | | | 0,317594 | 0,253801 | 1,25135 | 0,211624 |
| long 1MOE | 0,928380 | 0,019641 | 0,858711 | 0,018167 | 47,26647 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,91701689 R2= ,84091997 Adjusted R2= ,83442691 F(2,49)=129,51 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,96045 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=52 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(49) | p-value |
| Intercept | | | 0,83777 | 0,999093 | 0,83853 | 0,405807 |
| GTA | -0,221337 | 0,058857 | -4,80090 | 1,276633 | -3,76059 | 0,000453 |
| long 1MOE | 0,836158 | 0,058857 | 0,89094 | 0,062713 | 14,20662 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,92963131 R2= ,86421437 Adjusted R2= ,85867210 F(2,49)=155,93 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,88735 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=52 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(49) | p-value |
| Intercept | | | 0,43461 | 0,881356 | 0,49311 | 0,624137 |
| szeg.GTA | -0,264603 | 0,052948 | -5,19699 | 1,039933 | -4,99742 | 0,000008 |
| long 1MOE | 0,863207 | 0,052948 | 0,91977 | 0,056417 | 16,30293 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: STAT. MOE R= ,91578649 R2= ,83866489 Adjusted R2= ,83370073 F(2,65)=168,94 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,98863 | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=68 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(65) | p-value |
| Intercept | | | 1,01550 | 0,856206 | 1,18605 | 0,239920 |
| SZCKDR | -0,184484 | 0,051837 | -3,15305 | 0,885960 | -3,55891 | 0,000702 |
| long 1MOE | 0,847499 | 0,051837 | 0,87556 | 0,053553 | 16,34921 | 0,000000 |

8. sz. melléklet: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a hajlító modulusz, a göcsparaméterek, valamint a hajlítószilárdság között a II. csoportban

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,71299993 R2= ,50836891 Adjusted R2= ,50683734 F(1,321)=331,93 p<,0000 Std.Error of estimate: 12,696 | | | | | | |
|---|----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=323 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(321) | p-value |
| Intercept | | | -10,8007 | 3,395099 | -3,18127 | 0,001610 |
| hajl 1MOE | 0,713000 | 0,039135 | 5,0107 | 0,275027 | 18,21891 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,74461262 R2= ,55444796 Adjusted R2= ,54094638 F(2,66)=41,065 p<,00000 Std.Error of estimate: 14,135 | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=69 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(66) | p-value |
| Intercept | | | 19,7431 | 12,42926 | 1,58844 | 0,116967 |
| GTA | -0,495421 | 0,089845 | -88,4738 | 16,04483 | -5,51416 | 0,000001 |
| hajl 1MOE | 0,390475 | 0,089845 | 3,6192 | 0,83275 | 4,34609 | 0,000049 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,68865132 R2= ,47424064 Adjusted R2= ,45830854 F(2,66)=29,766 p<,00000 Std.Error of estimate: 15,354 | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=69 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(66) | p-value |
| Intercept | | | 6,3697 | 12,83039 | 0,49645 | 0,621225 |
| szeg.GTA | -0,373141 | 0,094176 | -61,5361 | 15,53092 | -3,96217 | 0,000185 |
| hajl 1MOE | 0,471849 | 0,094176 | 4,3735 | 0,87290 | 5,01028 | 0,000004 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,69936017 R2= ,48910465 Adjusted R2= ,47694048 F(2,84)=40,209 p<,00000 Std.Error of estimate: 14,976 | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=87 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(84) | p-value |
| Intercept | | | 8,7245 | 11,48248 | 0,75981 | 0,449498 |
| SZCKDR | -0,329796 | 0,087781 | -45,4093 | 12,08656 | -3,75701 | 0,000316 |
| hajl 1MOE | 0,483645 | 0,087781 | 4,1943 | 0,76127 | 5,50965 | 0,000000 |

9. sz. melléklet: Lineáris regresszió vizsgálat STATISTICA szoftverrel a longitudinális modulusz, a göcsparaméterek, valamint a hajlítószilárdság között a II. csoportban

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,70115990 R2= ,49162521 Adjusted R2= ,49034143 F(1,396)=382,95 p<0,0000 Std.Error of estimate: 14,056 | | | | | | |
|--|----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=398 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(396) | p-value |
| Intercept | | | -13,3056 | 3,435192 | -3,87332 | 0,000126 |
| long 1MOE | 0,701160 | 0,035830 | 4,8827 | 0,249508 | 19,56918 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,76813220 R2= ,59002708 Adjusted R2= ,57760366 F(2,66)=47,493 p<,00000 Std.Error of estimate: 13,559 | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=69 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(66) | p-value |
| Intercept | | | 12,7483 | 11,93423 | 1,06821 | 0,289316 |
| GTA | -0,484092 | 0,085461 | -86,4507 | 15,26185 | -5,66450 | 0,000000 |
| long 1MOE | 0,437901 | 0,085461 | 3,7567 | 0,73317 | 5,12401 | 0,000003 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,73529996 R2= ,54066604 Adjusted R2= ,52674683 F(2,66)=38,843 p<,00000 Std.Error of estimate: 14,352 | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=69 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(66) | p-value |
| Intercept | | | -1,5255 | 11,70564 | -0,13032 | 0,896707 |
| szeg.GTA | -0,398471 | 0,085845 | -65,7134 | 14,15700 | -4,64176 | 0,000017 |
| long 1MOE | 0,531113 | 0,085845 | 4,5564 | 0,73646 | 6,18688 | 0,000000 |

| Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,71850942 R2= ,51625579 Adjusted R2= ,50473807 F(2,84)=44,823 p<,00000 Std.Error of estimate: 14,572 | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=87 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(84) | p-value |
| Intercept | | | 6,7919 | 10,77550 | 0,63031 | 0,530204 |
| SZCKDR | -0,352956 | 0,082668 | -48,5983 | 11,38246 | -4,26958 | 0,000051 |
| long 1MOE | 0,501315 | 0,082668 | 3,9927 | 0,65840 | 6,06421 | 0,000000 |

10. sz. melléklet: A luc- és a vörösfenyő becsült rugalmassági moduluszainak értékei és eltérései

| MOE LONG [GPa] | E_{luc} [GPa] | $E_{\text{vörös}}$ [GPa] | Eltérés [GPa] |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|
| 5,00 | 5,51 | 4,61 | 0,89 |
| 6,00 | 6,30 | 5,47 | 0,83 |
| 7,00 | 7,10 | 6,33 | 0,77 |
| 8,00 | 7,90 | 7,19 | 0,71 |
| 9,00 | 8,69 | 8,05 | 0,65 |
| 10,00 | 9,49 | 8,90 | 0,59 |
| 11,00 | 10,29 | 9,76 | 0,52 |
| 12,00 | 11,08 | 10,62 | 0,46 |
| 13,00 | 11,88 | 11,48 | 0,40 |
| 14,00 | 12,68 | 12,34 | 0,34 |
| 15,00 | 13,48 | 13,20 | 0,28 |
| 16,00 | 14,27 | 14,06 | 0,22 |
| 17,00 | 15,07 | 14,92 | 0,15 |
| 18,00 | 15,87 | 15,77 | 0,09 |
| 19,00 | 16,66 | 16,63 | 0,03 |
| 20,00 | 17,46 | 17,49 | -0,03 |
| 21,00 | 18,26 | 18,35 | -0,09 |

11. sz. melléklet: A luc- és a vörösfenyő becsült hajlítószilárdság értékei és eltérései

| MOE LONG [GPa] | σ_{luc} [MPa] | $\sigma_{\text{vörös}}$ [MPa] | Eltérés [MPa] |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------|
| 5,00 | 18,17 | 11,11 | 7,06 |
| 6,00 | 21,87 | 16,00 | 5,87 |
| 7,00 | 25,57 | 20,88 | 4,69 |
| 8,00 | 29,26 | 25,76 | 3,50 |
| 9,00 | 32,96 | 30,64 | 2,31 |
| 10,00 | 36,65 | 35,53 | 1,13 |
| 11,00 | 40,35 | 40,41 | -0,06 |
| 12,00 | 44,05 | 45,29 | -1,25 |
| 13,00 | 47,74 | 50,18 | -2,43 |
| 14,00 | 51,44 | 55,06 | -3,62 |
| 15,00 | 55,13 | 59,94 | -4,81 |
| 16,00 | 58,83 | 64,82 | -5,99 |
| 17,00 | 62,53 | 69,71 | -7,18 |
| 18,00 | 66,22 | 74,59 | -8,37 |
| 19,00 | 69,92 | 79,47 | -9,55 |
| 20,00 | 73,61 | 84,35 | -10,74 |
| 21,00 | 77,31 | 89,24 | -11,93 |

12. sz. melléklet: Néhány „problémás” palló törésképe a II. csoportból

