10.13147/NYME.2013.038

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

FŰRÉSZÁRU SZILÁRDSÁGA ÉS FIZIKAI TULAJDONSÁGAINAK KAPCSOLATA

Doktori (PhD) értekezés

Sismándy-Kiss Ferenc
PhD jelölt

Témavezető:
Prof. Dr. Divós Ferenc
egyetemi tanár

Sopron
2012

10.13147/NYME.2013.038

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, ….......................... ………………………..
Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése …...............................

………………………..
EDT elnöke

10.13147/NYME.2013.038

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 ±0,51 GPa-os, a hajlítószilárdságot ±6,82 MPa-os hibával megbecsülni, míg vörösfenyő esetén a statikus rugalmassági moduluszt ±0,75 GPa-os, a hajlítószilárdságot ±11,62 MPa-os hibával sikerült megbecsülni.

10.13147/NYME.2013.038

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.

10.13147/NYME.2013.038

Tartalomjegyzék

10.13147/NYME.2013.038

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 modulusszal, és segítségükkel ezek a paraméterek nagy pontossággal megbecsülhetőek.

1.1 Célkitűzés

Elsődleges célom 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 úm. átlag évgyűrűszélesség, maximális évgyűrűszélesség, több göcsparaméter úm. göcsterület arány, szegély göcsterület arány, göcsátmérő arány, szegély göcsátmérő arány, különböző rezgések frekvenciáiból meghatározott dinamikus rugalmassági moduluszok, a csillapítás valamint a sűrűség.

További célom volt, hogy a mérethatás 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" megjegyzést."; „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)

10.13147/NYME.2013.038

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.)

10.13147/NYME.2013.038

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

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

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:

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

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 anizotrópia 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:

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

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

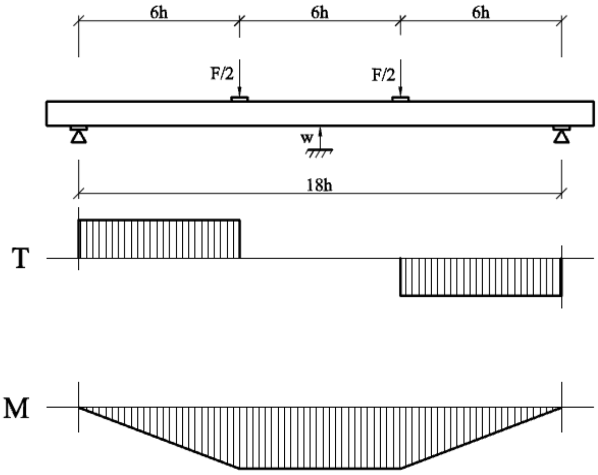
G_{ij} (i,j= R,T v. T,L v. L,R): a szögváltozással kapcsolatos nyíró rugalmassági modulusz az i,j jelű anatómiai fősíkban (az i normálisú síkon működő, j-vel párhuzamos hatásvonalú nyírófeszültség arányossági tényezője), a nyírófeszültségek dualitás tétele következményeként pedig $G_{ij}=G_{ji}$,

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 kitett fa gerendával, amit rostirányra merőlegesen fűrészeltek 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 sajátságos, 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 négypontos hajlítás vizsgálati elrendezése, valamint nyíróerő (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:

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

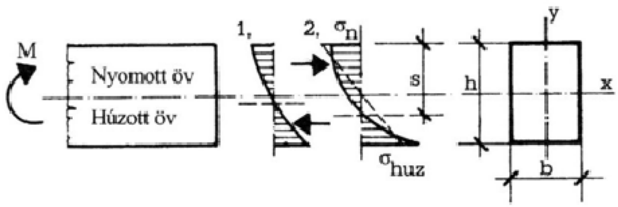
ahol: $E_{m,g}$: teljes hajlítási rugalmassági modulusz [N/mm²],
l: fesztávolság hajlítóvizsgálat esetén; $l = 18h$ [mm],
F_2-F_1: tehernövekmény a teher-alakváltozás lineáris szakaszán [N],
b: a próbatest szélessége [mm],
h: a próbatest magassága [mm],
w_2-w_1: az F2-F1-nek megfelelő alakváltozási növekmény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

10.13147/NYME.2013.038



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 súlypontján, 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 középen hat, így az erőátadás egy helyen koncentráltan történik. A másik módszer a négypontos hajlítás. A négypontos 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 négypontos hajítás esetében az MSZ EN 408 írja le az alábbi módon:

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

ahol: f_m: hajlítószilárdság [N/mm^2],

a: a terhelés helye és a legközelebbi alátámasztás közötti távolság [mm],

F_{max}: legnagyobb teher [N],

W: keresztmetszeti tényező [mm^3]:

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

ahol: b: próbatest szélesség [mm],

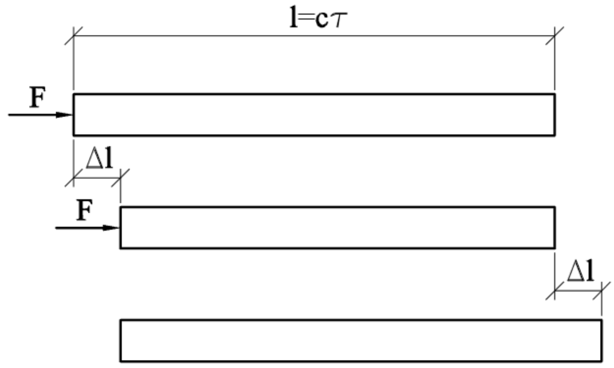
h: próbatest magasság [mm].

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 modulusszal 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 1=cτ 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:

$$\Delta l = \frac{l \cdot F}{E \cdot A}, \text{ vagy } F = \frac{E \cdot \Delta l \cdot A}{l} \qquad [2.6]\ [2.7]$$

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 $F\tau$ erőlökés 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 $m=\rho Ac\tau$ tömegű rúd elmozdult volna. Ezért, az impulzustétel szerint:

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

10.13147/NYME.2013.038

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

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

ahol: c: hangsebesség [m/s],
ρ: sűrűség [kg/m^3].

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:

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

ahol: c: hangsebesség [m/s],
f_n: a rezgés sajátfrekvenciája n-edik móduszban [Hz],
ρ: sűrűség [kg/m^3],
n: móduszszám.

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

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

ahol: E_l: rugalmassági modulusz [N/m^2],
l: a rúd hossza [m],
f_n: a rezgés sajátfrekvenciája n-edik móduszban [Hz],
n: móduszszám,
ρ: sűrűség [kg/m^3].

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:

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

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 móduszban 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:

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

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:

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

ahol: E_h: rugalmassági modulusz [N/m^2],
f_n: hajlító rezgés frekvenciája n - edik móduszban [Hz],

$\gamma_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)^2$, de γ_1=2,267; γ_2=6,249,

m: a rúd tömege [kg],

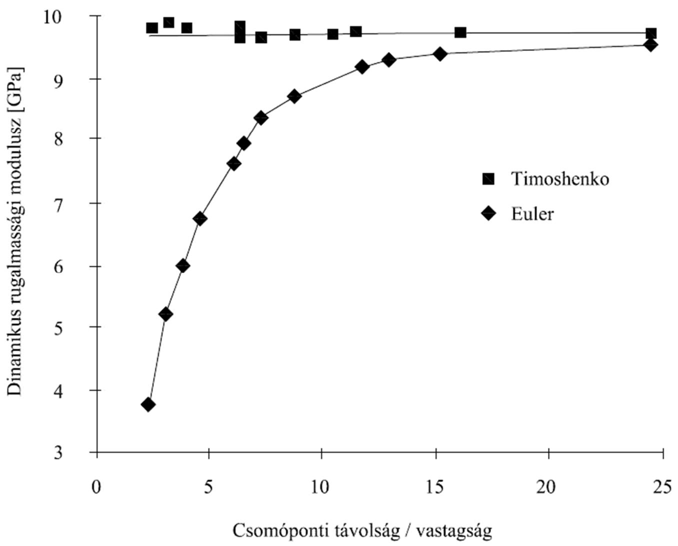
L: a rúd hossza [m],

I: keresztmetszet másodrendű nyomatéka [m^4],

n: móduszszám.

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

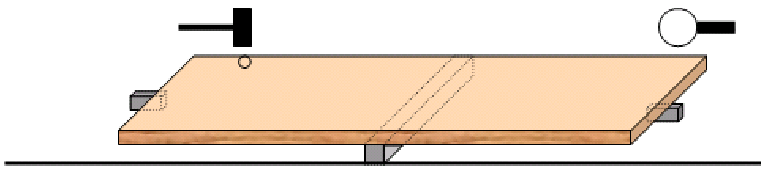
Az Euler-egyenlet hibája, hogy a hajlító rezgéseknél szerepet játszó nyíró rugalmassági modulusz hatását nem veszi figyelembe. Emiatt a pontosabb eredményt, a bonyolultabb Timoshenko-féle egyenlet megoldása nyújtja. A nyíró rugalmassági modulusz szerepe annál fontosabb, minél kisebb az alátámasztási 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 torzós rezgéseket, hanem hajlító rezgéseket is keltünk. Ezért ajánlatos előbb megbecsülni a várt torziós rezgés frekvenciáját. A nyíró rugalmassági modulusz meghatározása a következő összefüggéssel történik:

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

ahol: L: a rúd hossza [m],
f_n: hajlító rezgés frekvenciája n - edik móduszban [Hz],
n: móduszszám,
ρ: sűrűség [kg/m^3],
I_p: a rúd poláris inerciája; $I_p = \frac{ab}{12}\left(a^2 + b^2\right)$ [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):

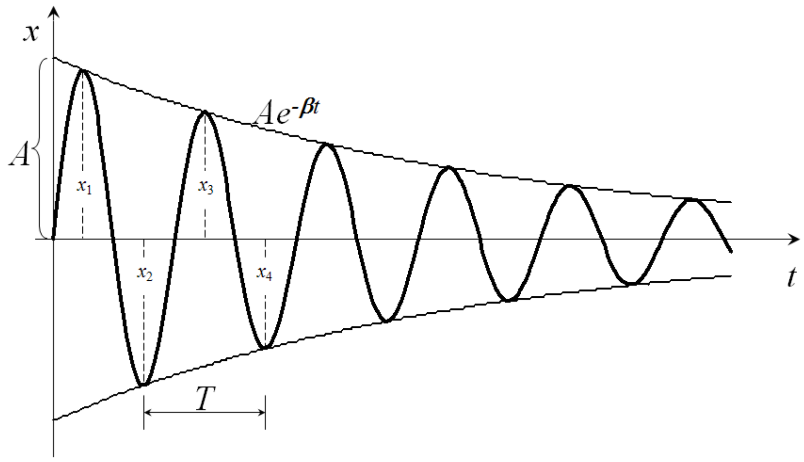
$$X(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha) \qquad [2.16]$$

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

10.13147/NYME.2013.038

ρ: sűrűség [kg/m^3],
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):

$$T = T_0\sqrt{1+\frac{\Lambda^2}{4\pi^2}}, \text{vagy } f = \frac{f_0}{\sqrt{1+\frac{\Lambda^2}{4\pi^2}}} \qquad [2.17]\ [2.18]$$

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.

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

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, úm. C csoport, amelybe a fenyők és a nyárak 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 értékekeit, 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

<u>*A mérés elméleti alapja*</u>

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

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

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:

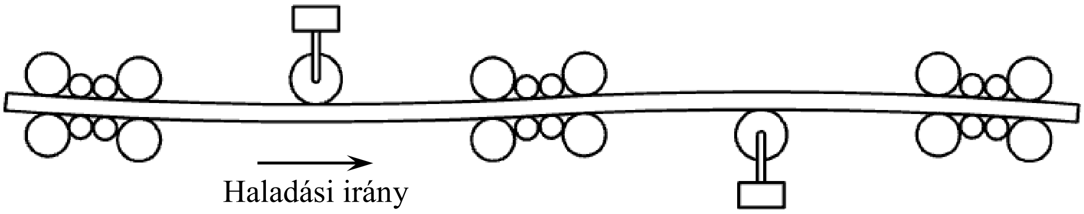
$$E = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot l^3}{a \cdot I} \qquad [3.2]$$

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 vázlata
Forrás: www.hsz.bme.hu[1] 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 minősíthetőek 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 modulusszal. Hajlító rezgésnél ez az érték: R^2=0,968, míg longitudinális rezgésnél R^2=0,927 (Divos 2011).

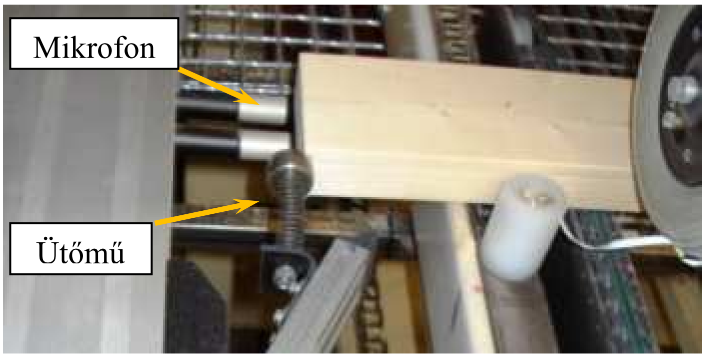
A mérés elméleti alapja

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.nl[2]

Létezik olyan megoldás is, ahol a frekvenciát nem egy mikrofon rögzíti, hanem pl. lézerrel 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 modulsz 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 megnöveli. 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 szinuszhullámok 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 *impulzushang*okkal.

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:

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

ahol: c: a hullám terjedési sebessége [m/s],
ρ: sűrűség [kg/m^3].

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

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \Rightarrow \text{visszaverődés}; \quad D = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \Rightarrow \text{átbocsátás} \qquad [3.4] \; [3.5]$$

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

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

Például egy átlagos fenyő próbatest esetében (c = 5000 m/s; ρ = 500 kg/m^3) az akusztikai keménység:

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

Ugyanez levegő esetében (c = 330 m/s; ρ = 1,3 kg/m^3):

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

A fenti képlet szerint az átbocsátás 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 átbocsátás 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.

10.13147/NYME.2013.038

- 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).

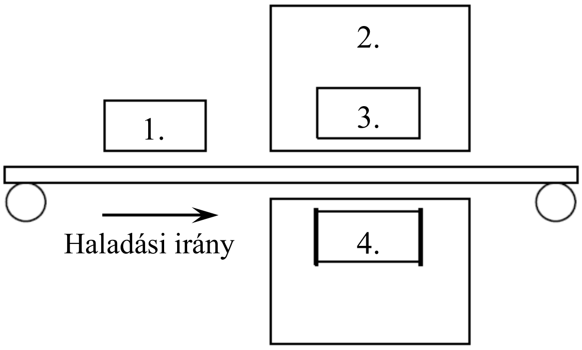
3.3 ábra: Triomatic ultrahangos osztályozó berendezése működés közben
Forrás: Sandoz, Benoit 2007

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

3.2.4 Nukleáris módszerek, izotópos eljárások

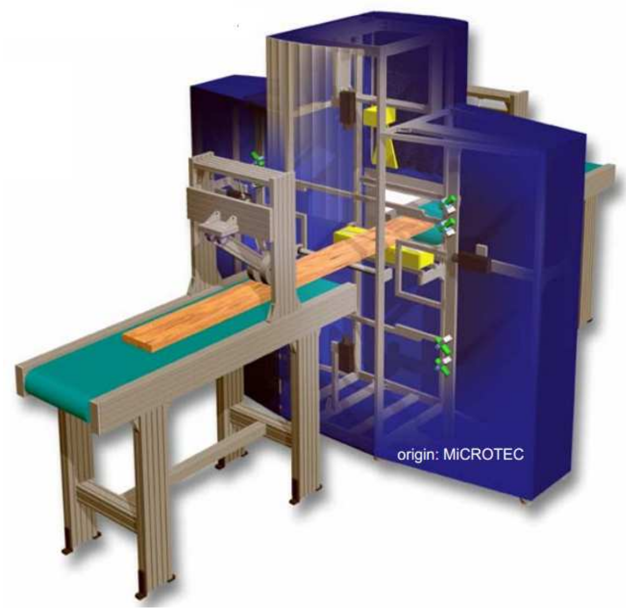
Az eljárás a sűrűség és a hajlítószilárdság kapcsolatán alapszik. A hibamentes faanyagok hajlítószilárdságával egyenes arányban változó sűrűség meglehetősen pontos becslést biztosít a hajlítószilárdságra. A sűrűség és a hajlítószilárdság között viszonylag jó a kapcsolat. A sűrűség növekedésével a hajlítószilárdság 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.net[3]

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.

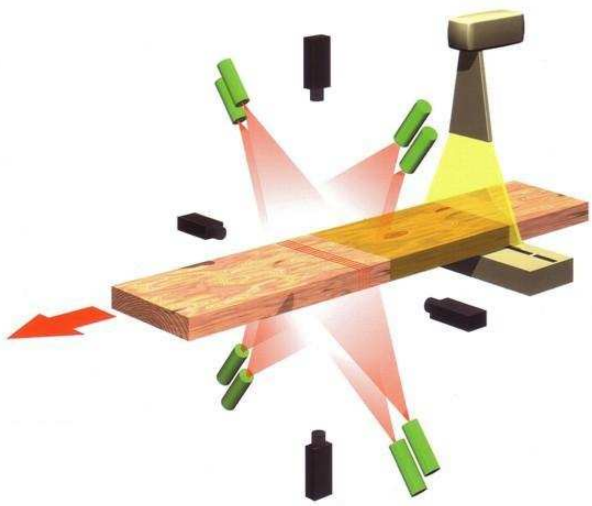
10.13147/NYME.2013.038

További géptípusok:

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

3.2.5 Optikai eljárás

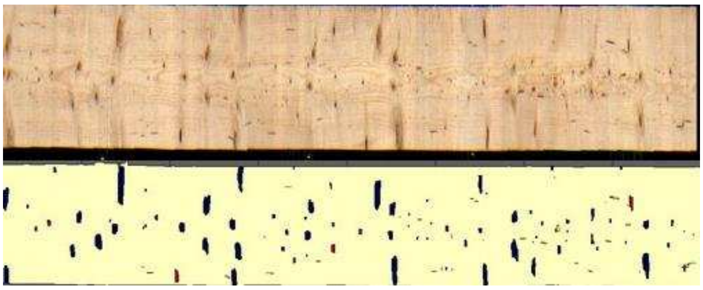
Már a kereskedelmi forgalomban is beszerezhetők a fűrészáru vizuális osztályozását üzemi sebességgel elvégző képfeldolgozó számítógépes rendszerek. A faanyagot négy oldalról négy kamera figyeli és egy nagy teljesítményű számítógép a képeket digitalizálja és értékeli. Vannak olyan kamerás rendszerek, amelyekben lézerfénnyel (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 valamit 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

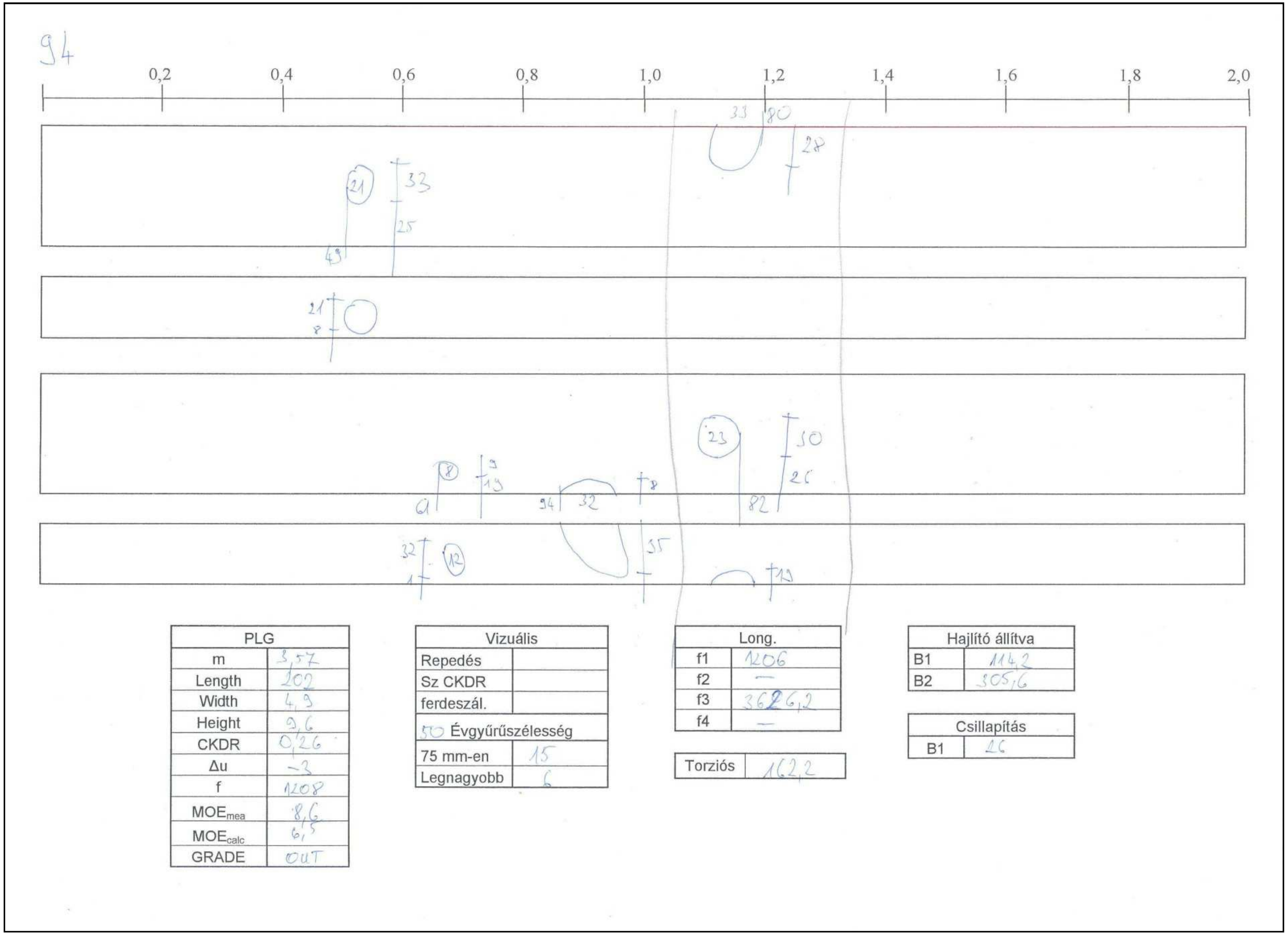
Forrás: saját szerkesztés

Az 1343 mérésből 1252 próbatesten végeztem statikus méréseket. A különbség abból adódik, hogy a táblázat 5. illetve 8. sorában szereplő fűrészáruk 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.


94

0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0

PLG	
m	3,57
Length	202
Width	4,9
Height	9,6
CKDR	0,26
Δu	-3
f	1208
MOE_{mea}	8,6
MOE_{calc}	6,5
GRADE	OUT

Vizuális	
Repedés	
Sz CKDR	
ferdeszál.	
50 Évgyűrűszélesség	
75 mm-en	15
Legnagyobb	6

Long.	
f1	1206
f2	–
f3	3626,2
f4	–

Torziós	162,2

Hajlító állítva	
B1	114,2
B2	305,6

Csillapítás	
B1	26

4.2 ábra: Egy palló felmérése osztályozólapon

Forrás: saját szerkesztés

10.13147/NYME.2013.038

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

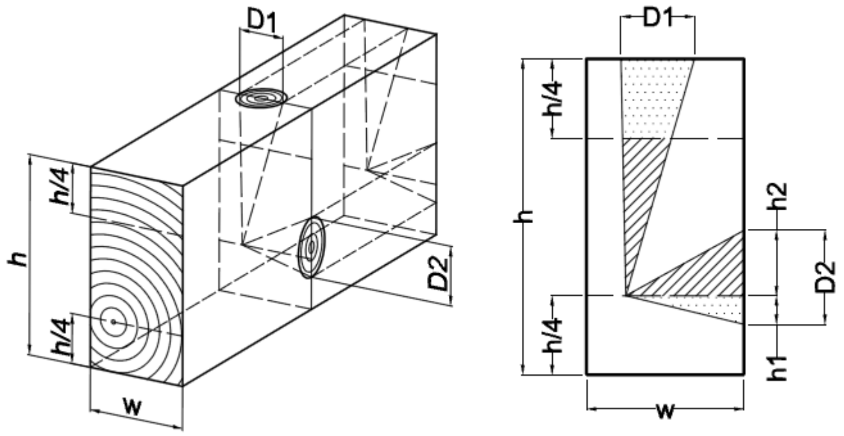
Berajzoltam a pallón elhelyezkedő összes göcsöt (*4.2 ábra*), majd meghatároztam a következő göcsparamétereket, melyeket az alábbiakban mutatok be.

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 ¼ magasságnyi sávjába eső göcsök területének és a szegély területének aránya (MSZ 10144).

Meghatározását a *4.4 ábra* szemlélteti.



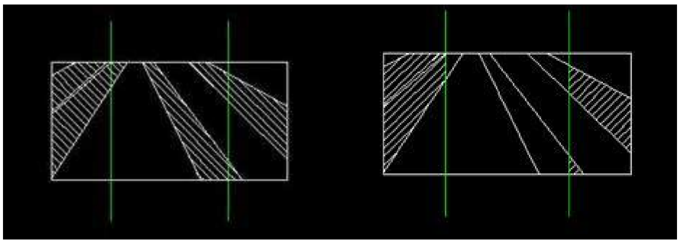
4.4 ábra: A GTA és SZGTA meghatározása
Forrás: saját szerkesztés

Számítása:

$$GTA = \frac{T_{göcs}}{T_{Km}}, \text{ és } SZGTA = \frac{T_{göcs}}{T_{Km}/2} \qquad [4.1]\ [4.2]$$

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 megrajzoltam 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)

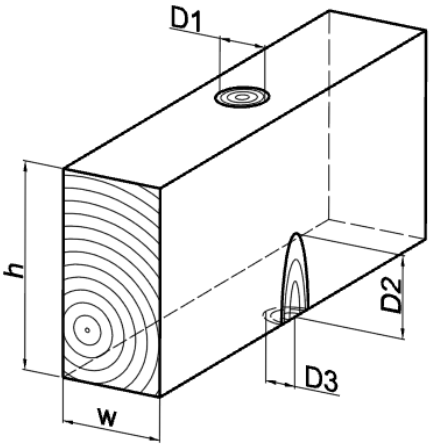
Az elnevezés a Concentrated Knot Diameter Ratio-ból adódik, ami magyarul „koncentrált göcsátmérő arányt” jelent. Ezt a paramétert a japán szabvány alkalmazza göcsparaméterként (JAS 1991).

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 megfelezendő. A göcsátmérő arány (KDR - Knot Diameter Ratio) az az érték, amelyet akkor kapunk, ha a

10.13147/NYME.2013.038

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:

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

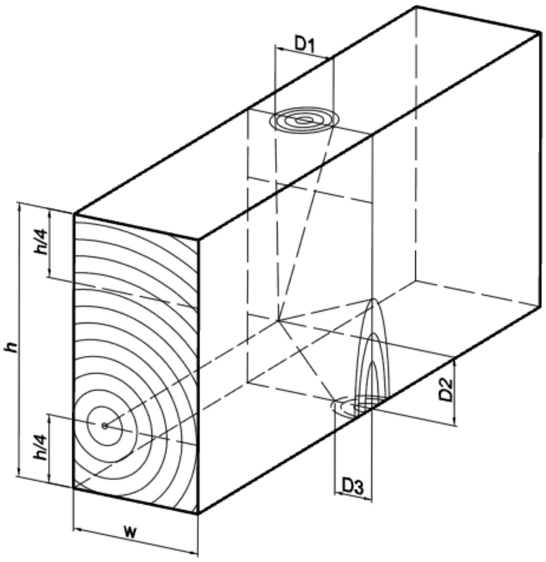
ahol: *D1, D2, D3*: a göcsátmérők [mm],
h: fűrészáru szélessége [mm],
w: fűrészáru vastagsága [mm].

Szegély koncentrált göcsátmérő arány (SZCKDR)

Ezt a paramétert a SZGTA analógiájára vezettem be. A SZCKDR esetében a keresztmetszet ¼ magasságnyi sávjába eső felületen elhelyezkedő göcsök átmérőjét osztottam a keresztmetszet ¼ magasságnyi sávjába eső kerületével [4.4].

A SZCKDR meghatározását a *4.7 ábra* mutatja.

10.13147/NYME.2013.038



4.7 ábra: A SZCKDR meghatározása
Forrás: saját szerkesztés

Számítása:

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

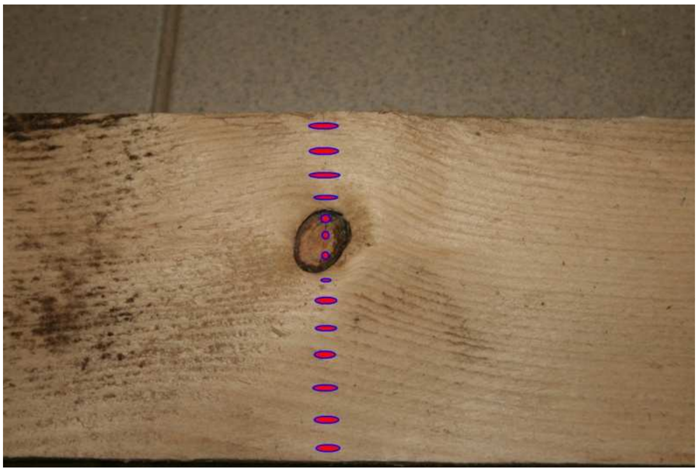
ahol: *D1, D2, D3*: a göcsátmérők [mm]
h: fűrészáru szélessége [mm]
w: fűrészáru vastagsága [mm]

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"

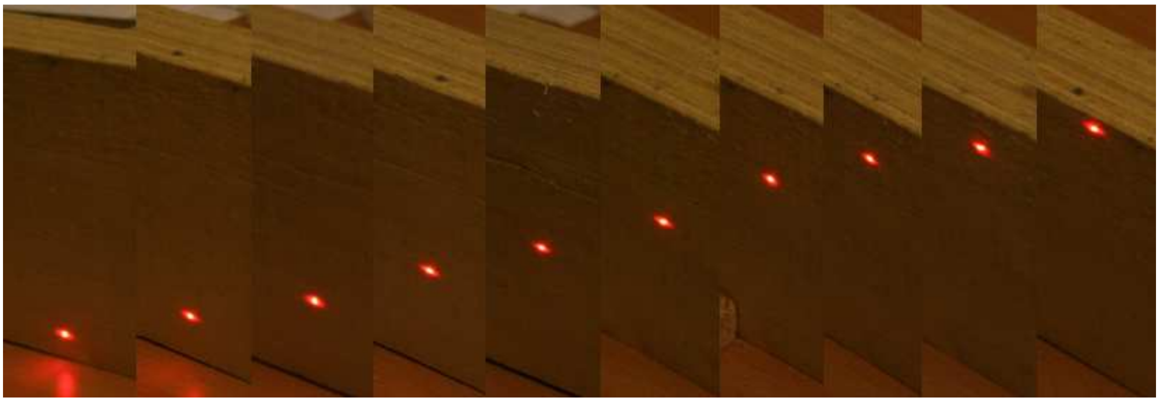
Ebben a kísérletben csupán egy pallót vizsgáltam, hogy alkalmas-e az optikai rendszer a göcsök helyzetének és méretének meghatározására. Mivel csak egy pallót vizsgáltam messzemenő következtetéseket nem lehet levonni, az eredmény csupán útmutatásként szolgál.

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 lézerfoltot 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 vonszoló 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:

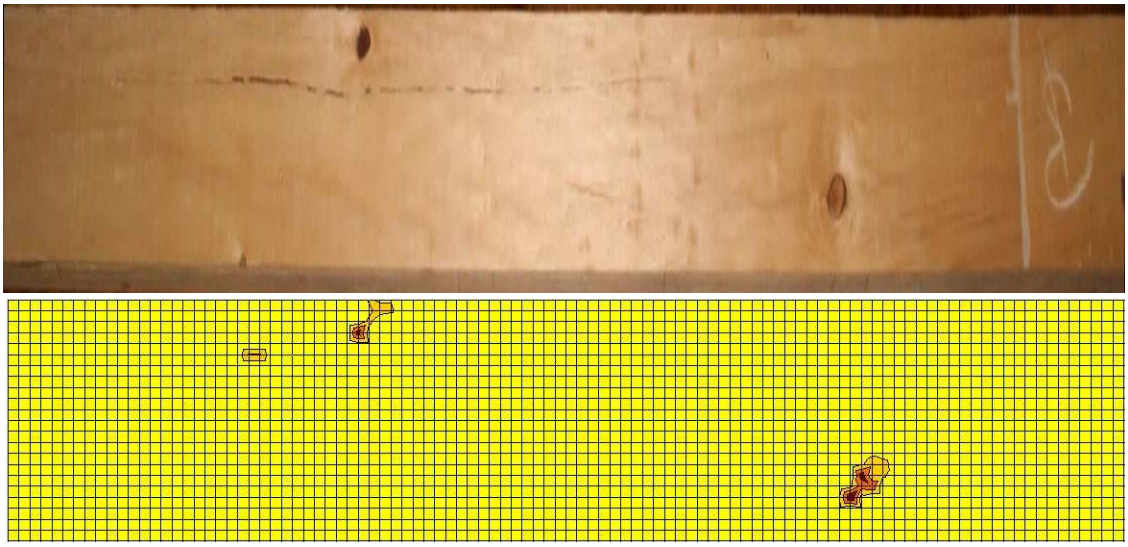
- ellipszis kisátmérője,
- ellipszis nagyátmérője,
- az ellipszis szöge a vízszinteshez viszonyítva.

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

10.13147/NYME.2013.038

<u>*1. módszer*</u>

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.



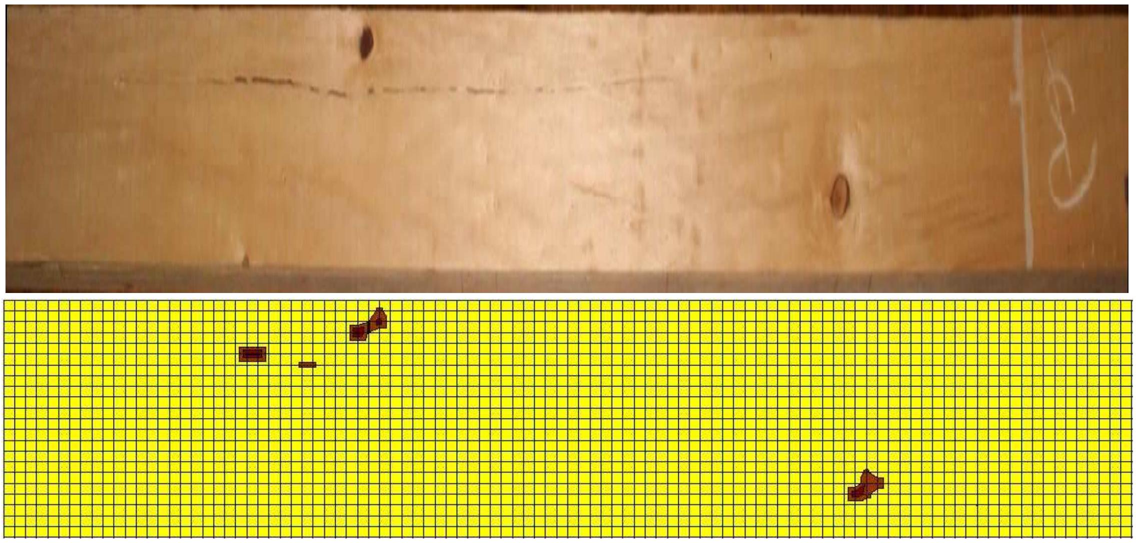
4.10 ábra: Göcsök meghatározása a szögeltérésekből
Forrás: saját szerkesztés

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 ábrázoltuk, 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.

<u>*2. módszer*</u>

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 nagyátmérő 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 körré „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 nagyátmérőjének aránya nagy, vagyis kezd körhöz hasonlítani a lézerfolt. Az értékek fafajonként 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 ≈ 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 jelölőtűs 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

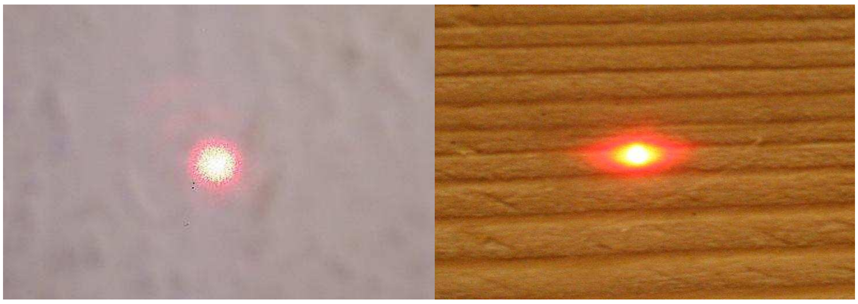
A számítást a *4.14 ábra* alapján mutatom be.

$$tg\alpha = \frac{21-14}{53} \Rightarrow \alpha = 7{,}52° \qquad [4.5]$$

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.

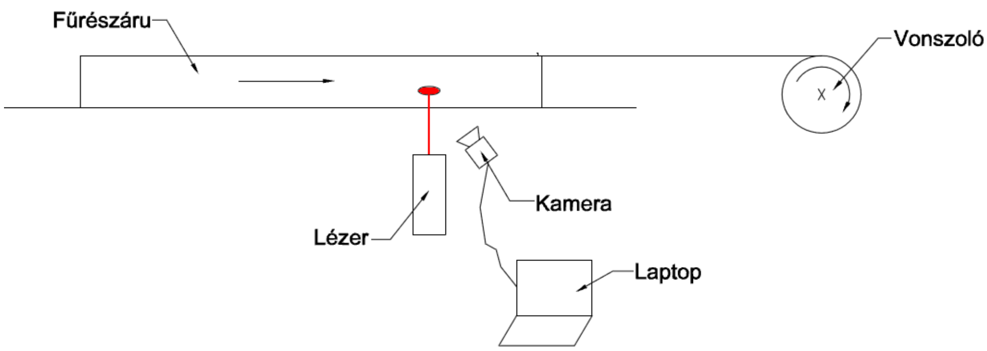
Optikai módszer

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 lézernek 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.

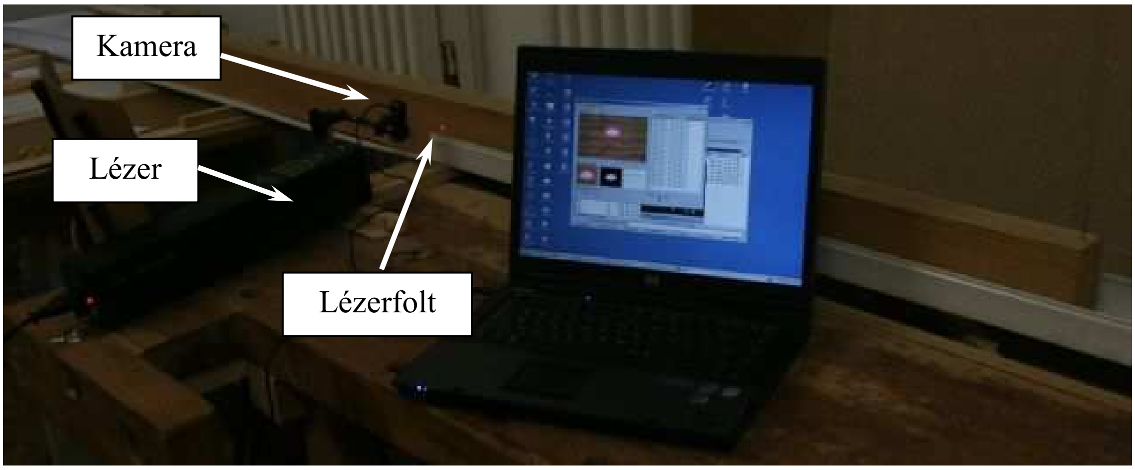


4.16 ábra: Rostlefutás mérésének elrendezése
Forrás: saját szerkesztés

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 fűrészáruról 1 cm-es felbontásban kapjak adatot.

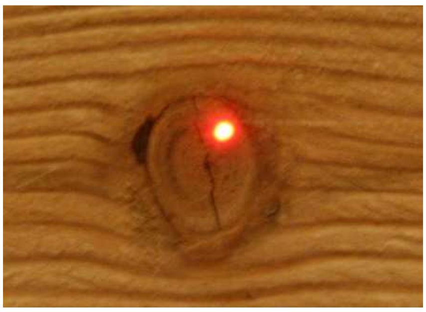
10.13147/NYME.2013.038

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 nagyátmérőjének nagyságát, mivel az értékelés során csak azokat az adatokat vettük figyelembe, amelyeknél a nagyátmérő 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” körré (*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) megszámoltam 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

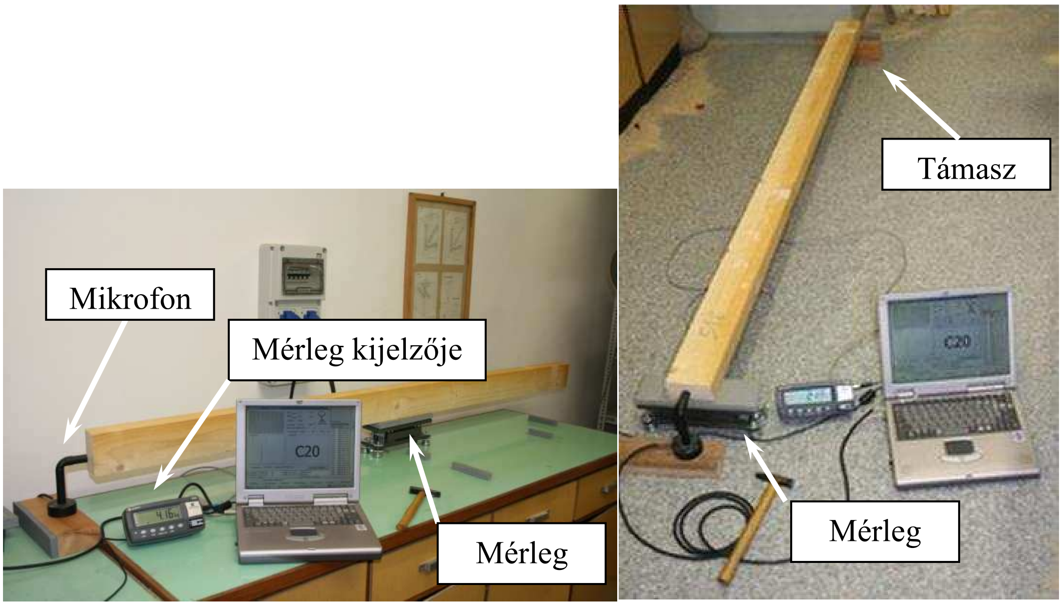
A fent bemutatott paramétereket összefoglalva, az alábbi vizuális paramétereket határoztam meg:

- 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 Faanyagvizsgálati Laboratóriuma és a FAKOPP Bt. által kifejlesztésre került szilárdsági osztályozó berendezés (*4.19 ábra*), amely meghatározza az anyag longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági moduluszát és sűrűségét, majd szilárdsági osztályba sorolja az MSZ EN 338 szerint.

10.13147/NYME.2013.038



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

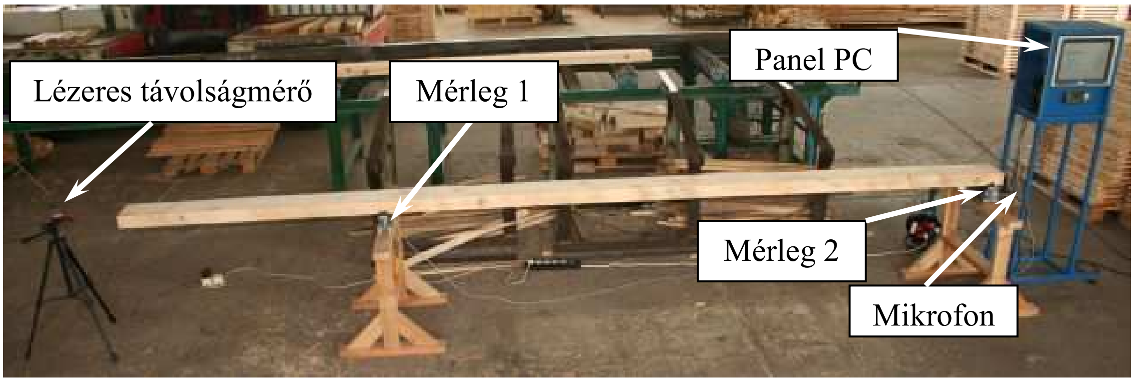
A „régi” berendezés egy mérleggel mérte a fűrészáru tömegét. Ez, abban az esetben, amikor a fűrészáru rövid, nem okoz problémát (*4.19 ábra bal oldali képe*); ha viszont hosszabb anyagot mértünk egy támaszt használtunk (*4.19 ábra jobb oldali képe*) és a fűrészáru tömegének a felét mértük. Ekkor a fűrészáru végeket pontosan kell beállítani mind a mérlegen, mind a támasz felöli 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*).

10.13147/NYME.2013.038

Hossz mérése lézeres távolság mérővel

A „régi” 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 modulusz kiszámításánál hibát vinne a rendszerbe, hiszen a longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulusz képletében a hossz a négyzeten szerepel.

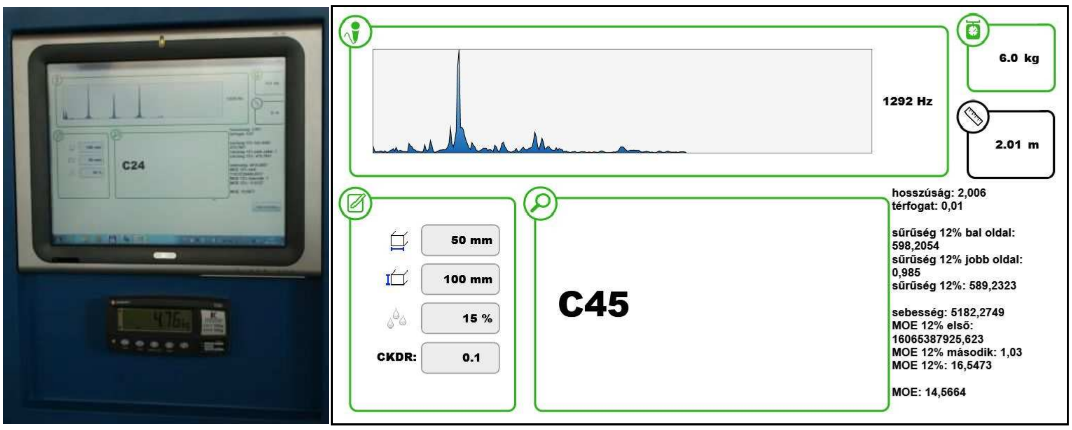
Emiatt a hosszmérést minden egyes darabon elvégezzük egy lézeres távolság mérővel, mely bluetooth-al kapcsolódik a számítógéphez, és valós időben szolgáltatja az adatokat a szoftvernek a számítások elvégzéséhez. Az új műszer kép látható a *4.20 ábrán*. A kép a soproni TAEG fűrészüzemben készült.



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

10.13147/NYME.2013.038

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

4.4 Longitudinális rezgés frekvenciájának meghatározása

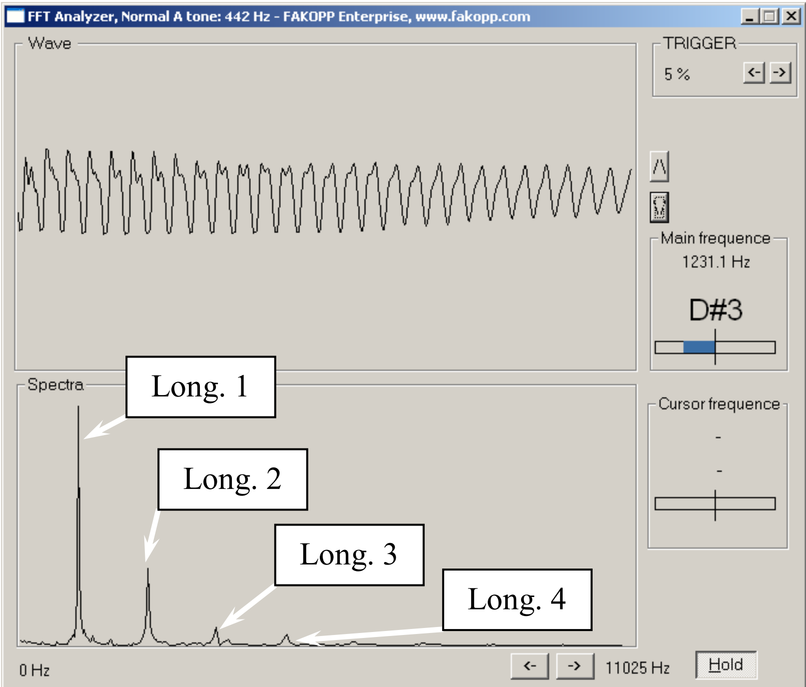
A fűrészáru osztályozó berendezés által rögzített longitudinális frekvencián kívül mértem a magasabb móduszokat is.

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

10.13147/NYME.2013.038

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



4.23 ábra: A longitudinális rezgéskép
Forrás: saját szerkesztés

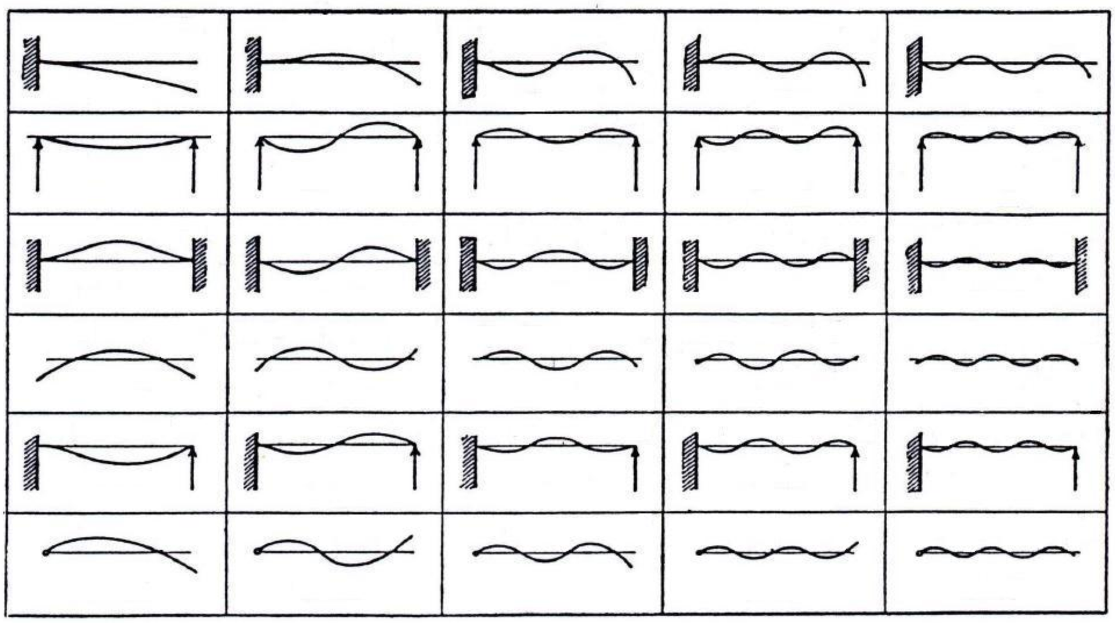
4.4.1 A longitudinális rezgés mérésekor meghatározott paraméter

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

A rezgés frekvenciájából a *2.2.1-es fejezetben* bemutatott [2.11]-es képlet segítségével kiszámolható a ***dinamikus rugalmassági modulusz (E$_l$)*** különböző móduszokban.

4.5 Hajlítórezgések frekvenciájának meghatározása

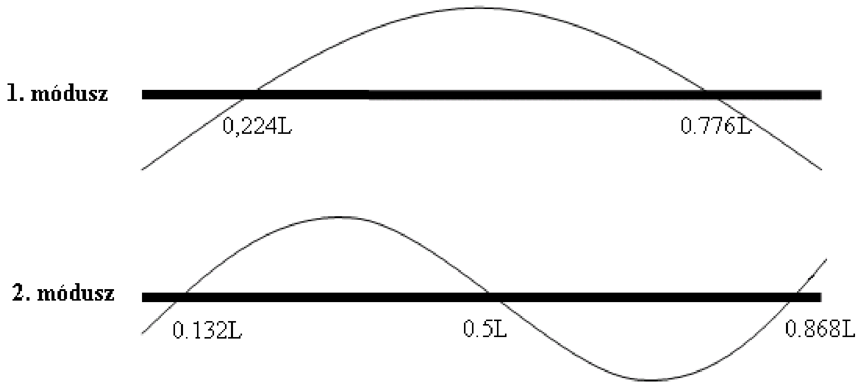
A Young-féle rugalmassági modulusz dinamikus meghatározásához egy másik lehetséges megoldás a hajlítórezgések frekvenciájának mérése. Az Euler-egyenlettel elméletileg bármely, az *4.24 ábrán* felvázolt peremfeltétel mellett mérhető a dinamikus rugalmassági modulusz értéke. A gyakorlatban a legegyszerűbb 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 móduszok rezgésképei különböző befogási és alátámasztási feltételek mellett

Forrás: Freberg 1944 alapján saját szerkesztés

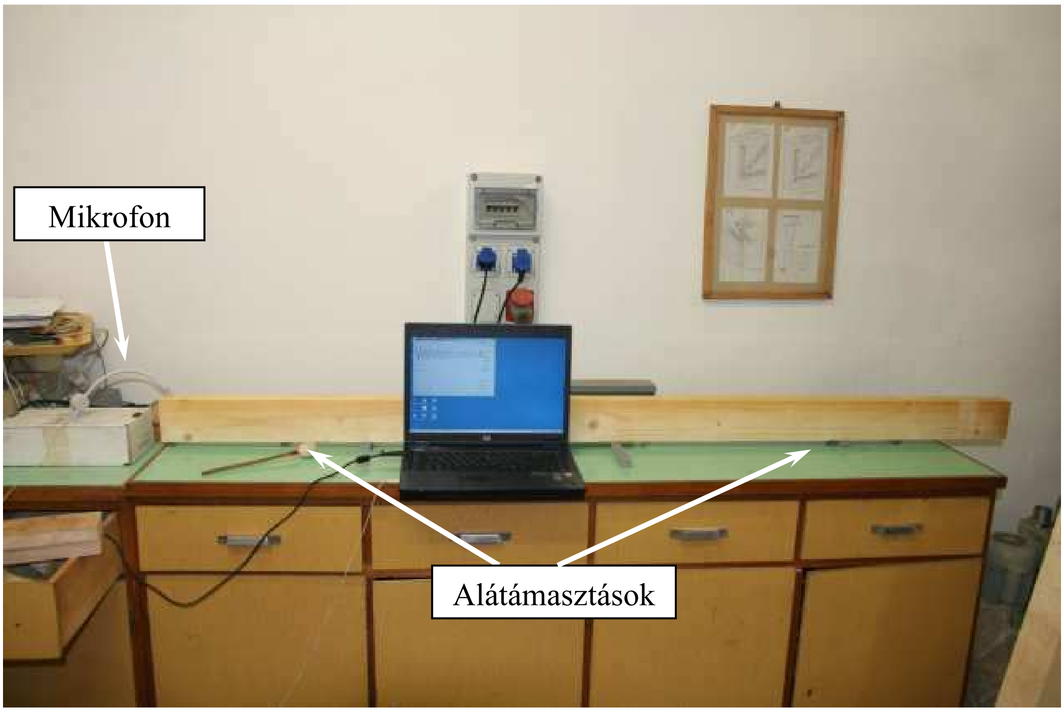
A hajlítórezgések mérésekor egyszerre több rezgési módusz frekvenciája gerjesztődik. A móduszszám azt mutatja meg, hogy a mért frekvencia melyik rezgési móduszhoz tartozik. Az elsőt alapmódusznak, a többit második-, harmadik-, stb. módusznak nevezzük. Az elsőtől eltérő móduszokat gyűjtőnéven felharmonikusaknak 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

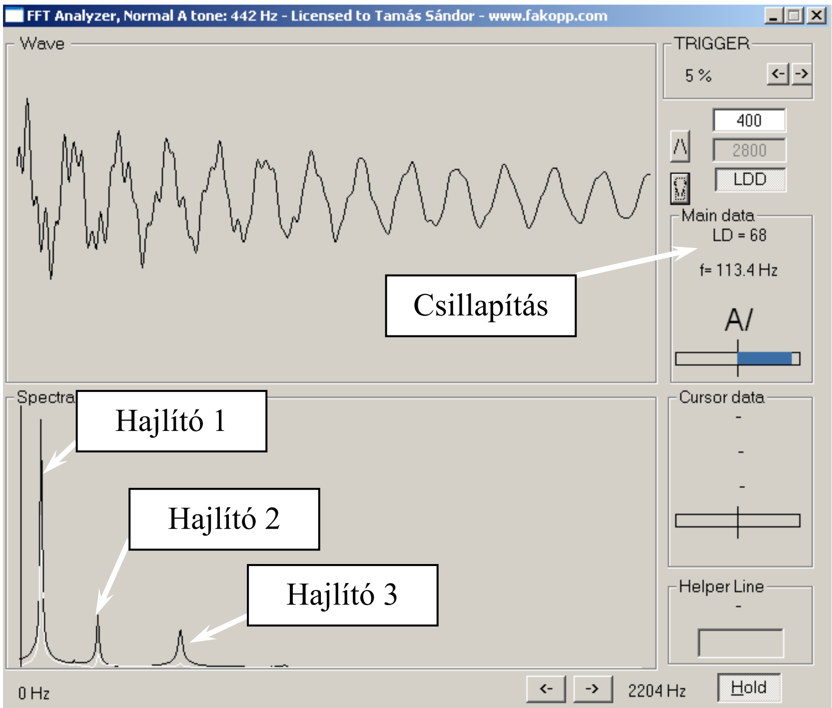
Méréseim során a hajlító rezgés alap illetve második móduszát mértem. Ennek sematikus elrendezését mutatja a *4.25 ábra*. Az *ábrán* látható az alátámasztások helyeinek pontos meghatározása is (L – a rúd hossza).



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 móduszai.

4.5.1 A hajlító rezgés mérésekor meghatározott paraméterek

- Hajlító rezgés frekvenciája 1. móduszban
- Hajlító rezgés frekvenciája 2. móduszban

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

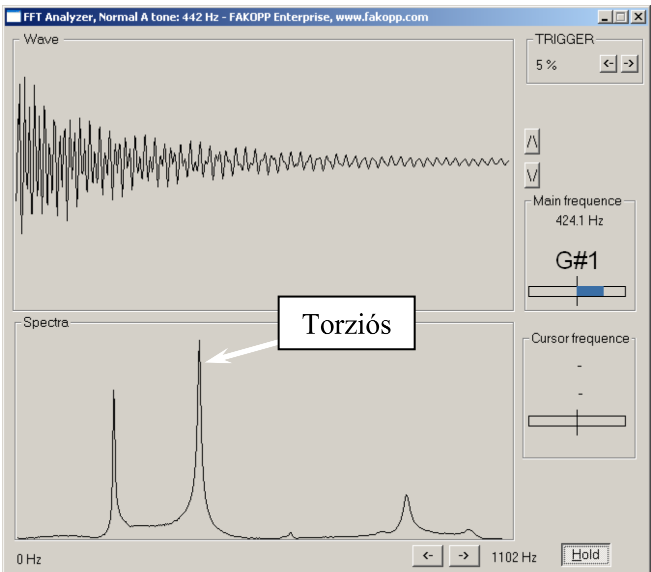
4.6 Torziós rezgés frekvenciájának meghatározása

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 azonos az említett *ábráéval*.

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 megjelennek. Ebből kifolyólag a torziós rezgés méréséhez kis gyakorlat szükséges.



4.29 ábra: Torziós rezgés mérésének FFT által megjelenített képe
Forrás: saját szerkesztés

10.13147/NYME.2013.038

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. móduszban

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 móduszt és a hozzá tartozó frekvenciát. A csúcsamplitúdók aránya valamint az időeltolás ismeretében a csillapítási tényező meghatározható az alábbi képlettel:

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

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

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

4.7.1 A csillapítás mérésekor meghatározott paraméterek

- Csillapítás – Logaritmikus 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).

10.13147/NYME.2013.038

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)

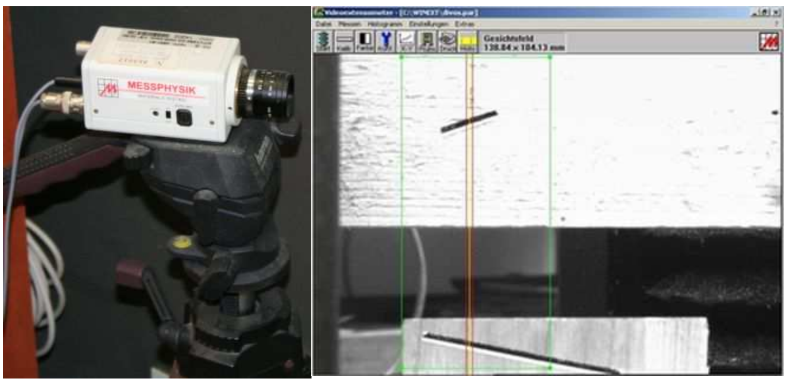
4.9 Statikus mérések

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.

10.13147/NYME.2013.038

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 ~0,5 MPixel). A kamerán különböző lencséket (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 erőadatot és a videoextensométerről érkező adatokat egy számítógép szoftvere rögzíti. A meglévő adatokból számítható a statikus rugalmassági modulusz illetve a hajlítószilárdság.

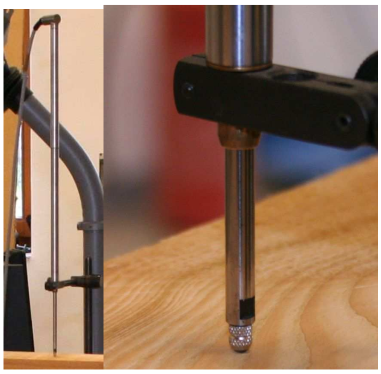
A másik berendezés a Faszerkezet Vizsgáló Laboratóriumban található MTS típusú anyagvizsgáló gép (*4.33 ábra*).

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.

10.13147/NYME.2013.038

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.

- Hajlítószilárdság (f_m)

A *2.1.2 fejezetben* leírtak alapján a [2.5] *egyenlettel* meghatározható a hajlítószilárdság 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 feltüntetem a mérési hibáikat. A *4.2 táblázatban* láthatóak azok az eszközök, melyekkel egy adott mennyiséget közvetlenül mértem. A táblázatokban feltüntetem 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 tüntetem fel.

4.2 táblázat: Eszközök nevei valamint mérési hibájuk

Eszköz neve, mennyiség megnevezése	Mérés abszolút hibája	Mérés relatív hibája (%)
1. Mérőszalag: vastagság: szélesség: hossz mérése:	50±1 mm 100±1 mm 2000±1 mm	±2% ±1% ±0,05%
2. Lézeres távolság mérő: hossz mérése	2000±1 mm	±0,05%
3. Tolómérő: vastagság: szélesség mérés:	 50±0,5 mm 100±0,5 mm	 ±1% ±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: longitudinális frekvencia mérése	120±1 Hz 1150±1 Hz	0,8% 0,1%
8. Erőmérőcella (FPZ, MTS): erő mérése	10000±100N	1%
9. Nedvességmérő: nedvesség mérése	12±0,5%	4%

Forrás: saját szerkesztés

10.13147/NYME.2013.038

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, ... közvetlenül mért mennyiségekből számítható az $y=f(x_1, x_2, x_3, \ldots)$ összefüggés alapján, akkor az egyes mennyiségek abszolút hibájából az eredményben várható hibát az alábbi módon kapjuk meg (Jánossy 1967, [3]):

$$\Delta y = |\Delta y_1| + |\Delta y_2| + |\Delta y_3| + \ldots \qquad [4.7]$$

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

Használható a közepes hibákkal megadott összefüggés:

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

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 kvadratikus abszolút hiba az alábbi módon fejezhető ki (Jánossy 1967, [3]):

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

Közvetett mérések esetén a **relatív hiba**:

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

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 próbatesten végzett vizsgálatok mérési hibái

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

Forrás: saját szerkesztés

A *4.2 és 4.3 táblázatokban* megadott adatokat a [4.9] és [4.10] *egyenletből* 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:

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

ahol: *m:* tömeg [kg]

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

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

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

Az *4.2 táblázatból* az abszolút hibák (Δm, Δsz, Δv, Δh) meghatározhatóak:

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

A derivált értékek a következőképpen alakulnak:

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

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

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

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

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

$$\Delta\rho' = \sqrt{(100 \cdot 0{,}02)^2 + (-5100 \cdot 0{,}001)^2 + (-10200 \cdot 0{,}001)^2 + (-255 \cdot 0{,}001)^2}$$

$$= \sqrt{4 + 26{,}01 + 104{,}04 + 0{,}065} = 11{,}58\,\frac{kg}{m^3}$$

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.

10.13147/NYME.2013.038

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.

<u>Néhány megállapítás az adatok elemzésével kapcsolatban</u>

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.

10.13147/NYME.2013.038

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 hajlítószilárdságáról.

A statikus rugalmassági modulusz (E_{mg}) értékét a teher-alakváltozás görbe egyenes regressziójából kell számolni. A korrelációs együttható négyzetének (R^2) 0,99-nél nagyobbnak 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 hajlítószilárdság 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 hajlítószilárdság 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 feltűntetett 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 (tételekről) 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±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 modulusszal, 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 ( )	Elemszám (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. móduszban,

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

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:

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

ahol: x: egyik minta értékei,

$\bar{x}$: egyik minta értékeinek átlaga,

y: másik minta értékei,

$\bar{y}$: másik minta értékeinek átlaga.

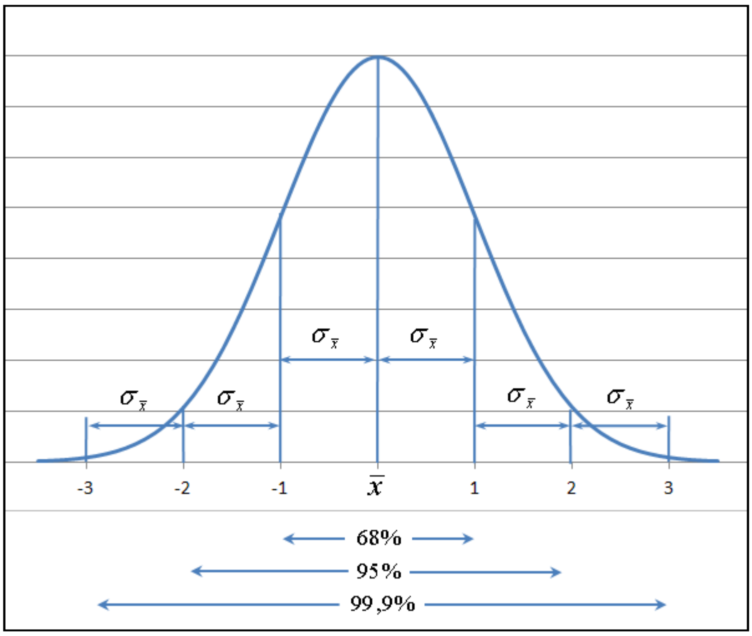
R mindig -1 és +1 közé esik. Ha a pontok nem fekszenek egy egyenes mentén, akkor azt mondjuk, hogy nincs korreláció közöttük (R=0), vagy gyenge korreláció van közöttük (R közel van 0-hoz). Ha a pontok egy egyenes mentén fekszenek, akkor R

10.13147/NYME.2013.038

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 ($\sigma_{\bar{x}}$) :

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

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 móduszokban mért dinamikus rugalmassági moduluszok. Ezt az *5.4*

10.13147/NYME.2013.038

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.

10.13147/NYME.2013.038

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 legjobbakat 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 ≤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 móduszban mért hajlító rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz és első móduszban 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 modulusszal, 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 móduszban mért hajlítórezgésből számított dinamikus rugalmassági modulusz illetve az első móduszban 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

N=281	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					
N=283	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 modulusszal 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					
N=229	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 becslő paraméterekkel együtt

Statikus rugalmassági modulusz becslése	Korrelációs koefficiens (R)	Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$)	Elemszám (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 elvetettem.

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

Statikus rugalmassági modulusz becslése	Korrelációs koefficiens (R)	Standard hiba ($\sigma_{\bar{x}}$)	Elemszám (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 modulusszal 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 becslő 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.

10.13147/NYME.2013.038

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

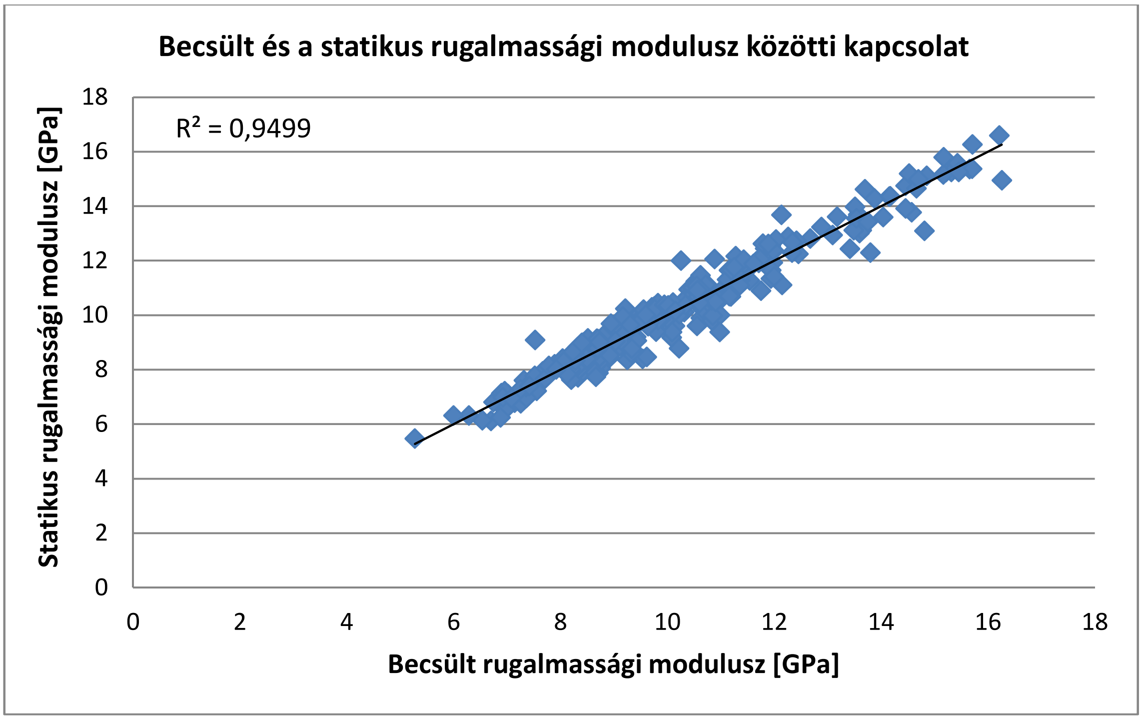
A statisztikai elemzés során lefuttatott rengeteg többparaméteres lineáris regresszió esetében ezekkel a paraméterekkel lehet a legpontosabban megbecsülni a statikus rugalmassági moduluszt. A szoftverből kiolvashatóak az egyes paraméterek együtthatói is (b), mellyel meghatározhatóak a becslések egyenletei.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

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

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

Csillapítás: logaritmikus dekrementum ezerszerese.

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



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

Forrás: saját szerkesztés

10.13147/NYME.2013.038

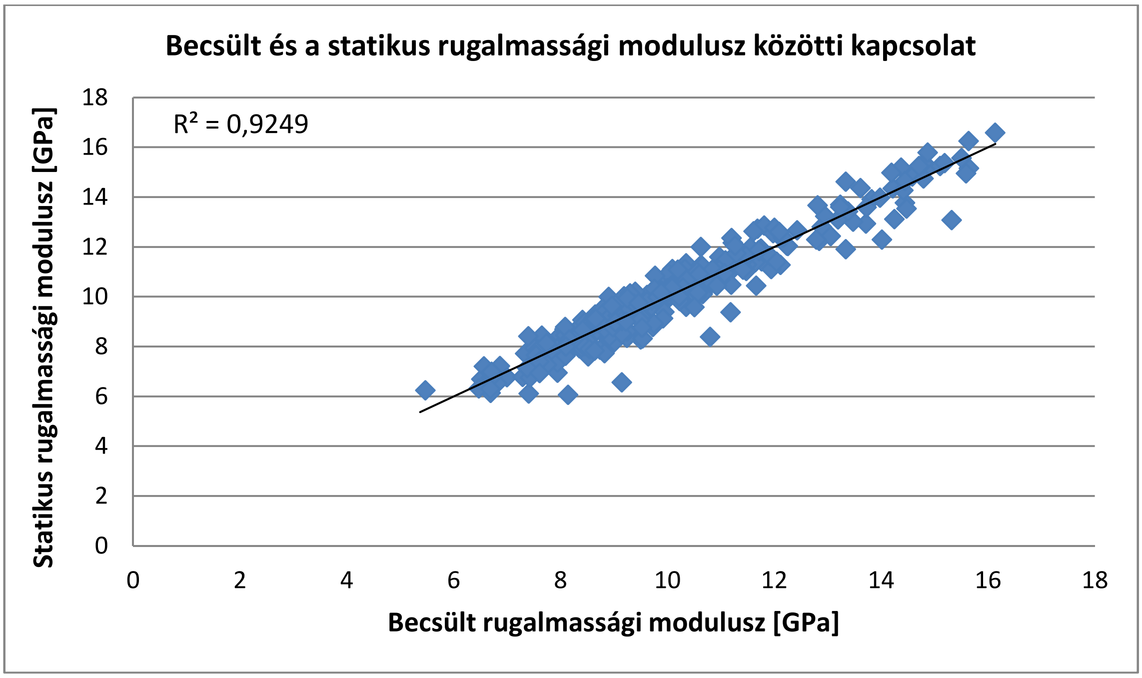
Ha a dinamikus longitudinális rugalmassági moduluszt és a SZCKDR-t használjuk a becsléshez, az egyenlet az alábbi szerint alakul:

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

ahol: *long1MOE*: longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulusz első móduszban [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 modulusszal 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 méréstechnikailag 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 Hajlítószilárdság becslése

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

5.14 táblázat: Korreláció, standard hiba és az elemszám a becslőparaméterek és a hajlítószilárdság között

Hajlítószilárdság becslése	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. móduszban mért hajlítórezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági moduluszt és az 1. móduszban mért longitudinális rezgés 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 ($\sigma_{\bar{x}}$)	Elemszám (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. móduszban 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 számítást, de most alapparaméternek az 1. móduszban 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 ($\sigma_{\bar{x}}$)	Elemszám (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

N=261	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					
	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:

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

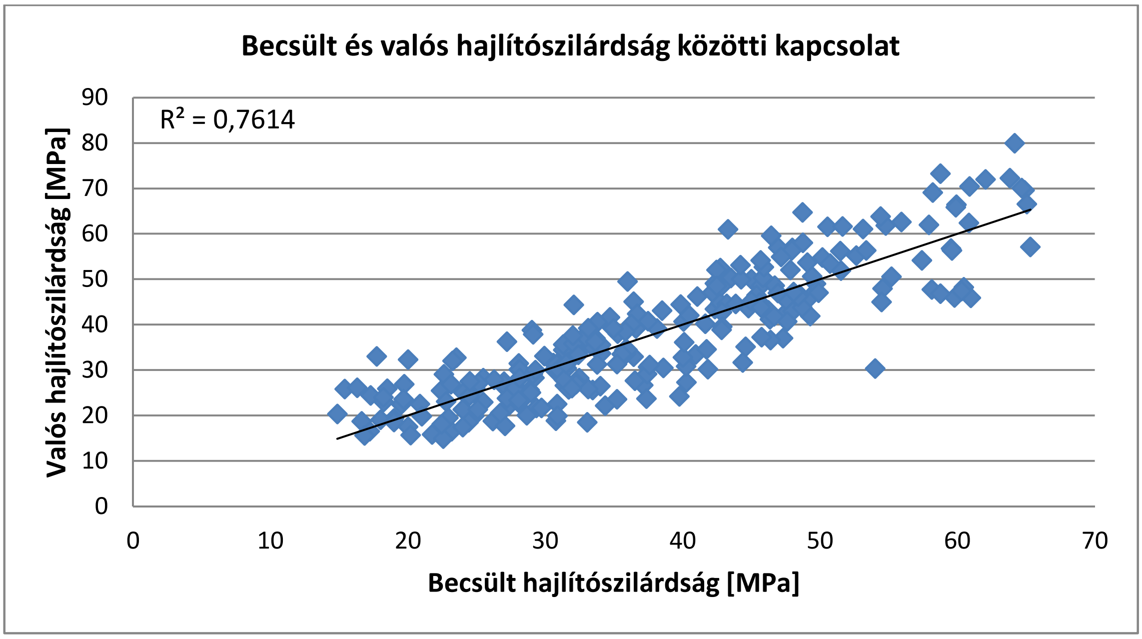
ahol: *hajl1MOE*: hajlító rezgésből számolt rugalmassági modulusz első móduszban [GPa],

GTA: göcsterület arány,

SZGTA: szegély göcsterület arány,

Csill: logaritmikus dekrementum ezerszerese.

Az *5.4 ábrán* látható a becsült és a valós hajlítószilárdság közötti összefüggés.



5.4 ábra: A becsült 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

N=376	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					
	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

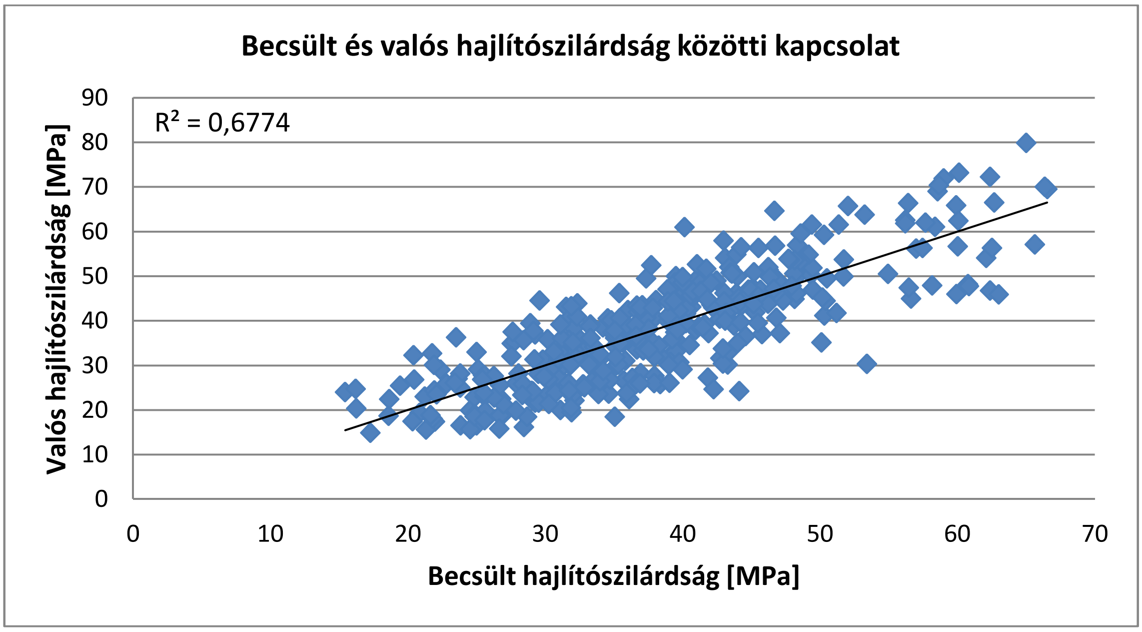
A longitudinális becsléséhez használt egyenlet az alábbiak szerint alakul:

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

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

CKDR: göcsátmérő arány.

Az *5.5 ábrán* látható a becsült és a valós hajlítószilárdság közötti összefüggés.



5.5 ábra: A becsült 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 becsült 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 becsült 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±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.	long1 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 évgyűrűszerkezetre 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 modulusszal, valamint a hajlítószilárdsággal. Először bemutatom a statikus rugalmassági moduluszra, majd a hajlítószilárdságra vonatkoztatott eredményeket.

10.13147/NYME.2013.038

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
long1 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 móduszban mért hajlító rezgésből számolt rugalmassági moduluszt, valamint az első móduszban 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

10.13147/NYME.2013.038

kapcsolatban van a statikus rugalmassági modulusszal. 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 estben 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 ($\sigma_{\bar{x}}$)	Elemszám (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

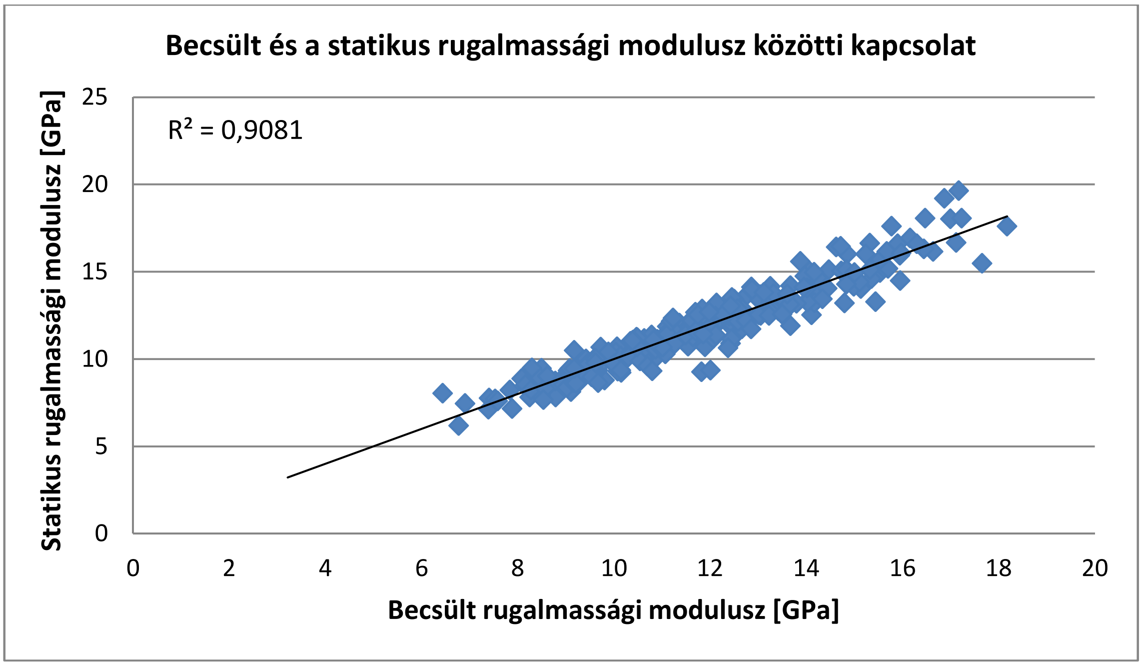
A legjobb becslés egyenlete az alábbi szerint alakul hajlító rezgés esetében:

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

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

CKDR: göcsátmérő arány.

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



5.6 ábra: A becsült 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

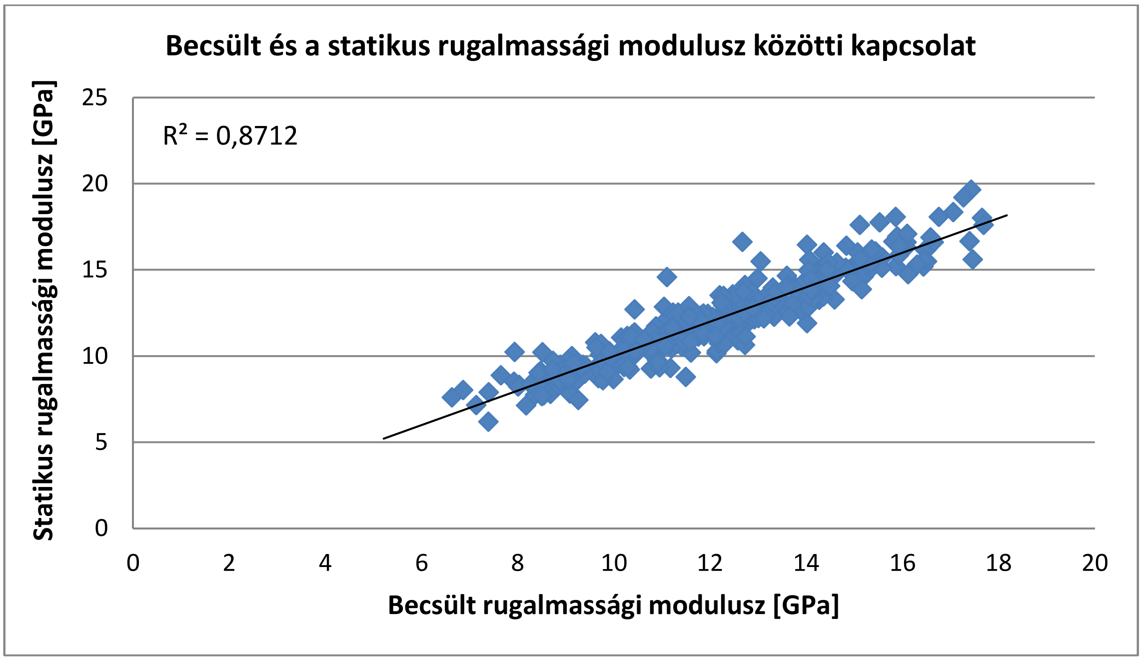
Forrás: saját szerkesztés

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

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

ahol: *long1MOE*: longitudinális rezgésből számolt rugalmassági modulusz első móduszban [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 modulusszal 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 becslőparaméterek 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 becslő 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 becslő 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 becslő 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

N=322	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					
	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 becslő 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

N=396	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					
	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

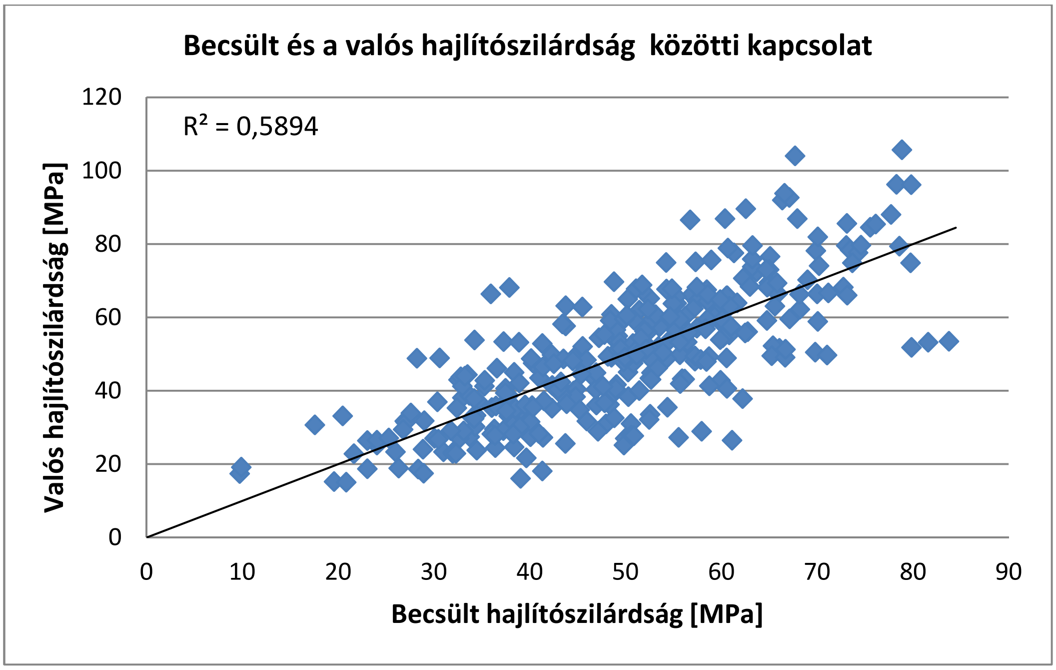
Forrás: saját szerkesztés

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

$$\sigma_{becsült} = 3{,}909 \cdot hajl1MOE - 43{,}676 \cdot CKDR + 10{,}191 \qquad [5.9]$$

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

Az *5.8 ábrán* látható a becsült és a valós hajlítószilárdság közötti összefüggés.



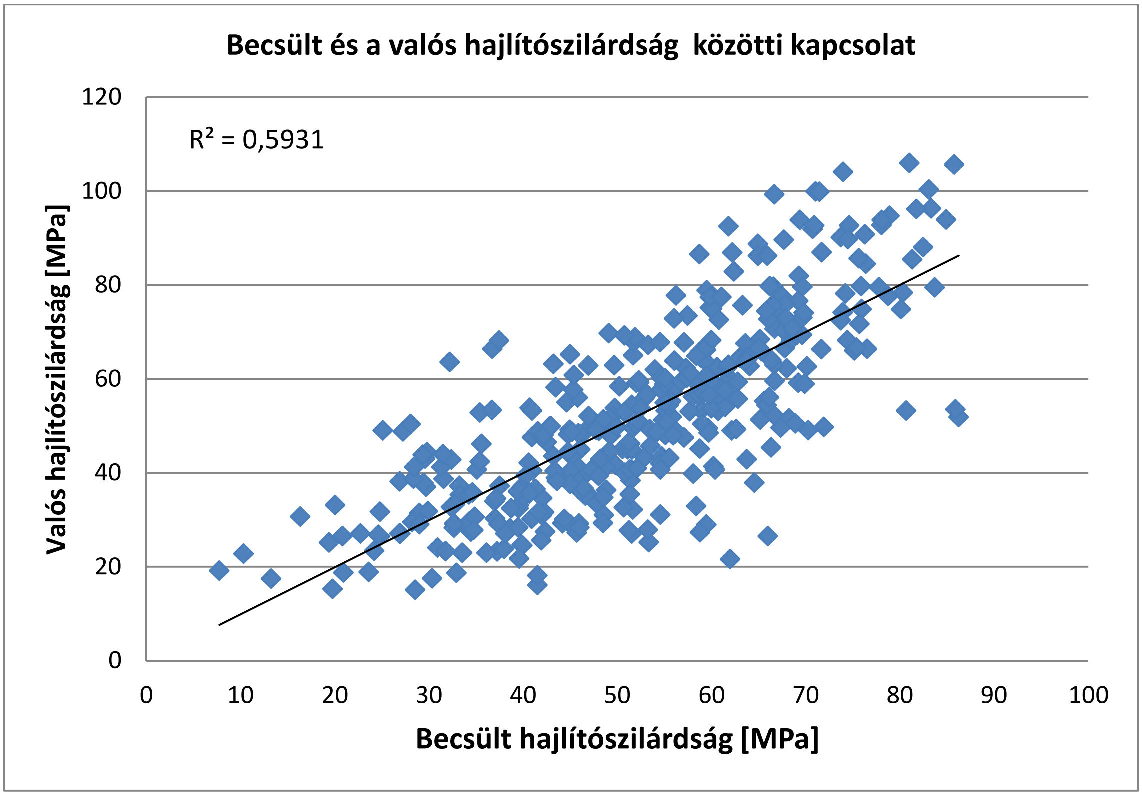
5.8 ábra: A becsült és a valós hajlítószilárdság közötti kapcsolat hajlító rezgés esetén
Forrás: saját szerkesztés

A longitudinális becsléséhez használt egyenlet az alábbiak szerint alakul:

$$\sigma_{becsült} = 3{,}650 \cdot long1MOE - 54{,}168 \cdot CKDR + 12{,}198 \qquad [5.10]$$

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

Az *5.9 ábrán* látható a becsült és a valós hajlítószilárdság közötti összefüggés.



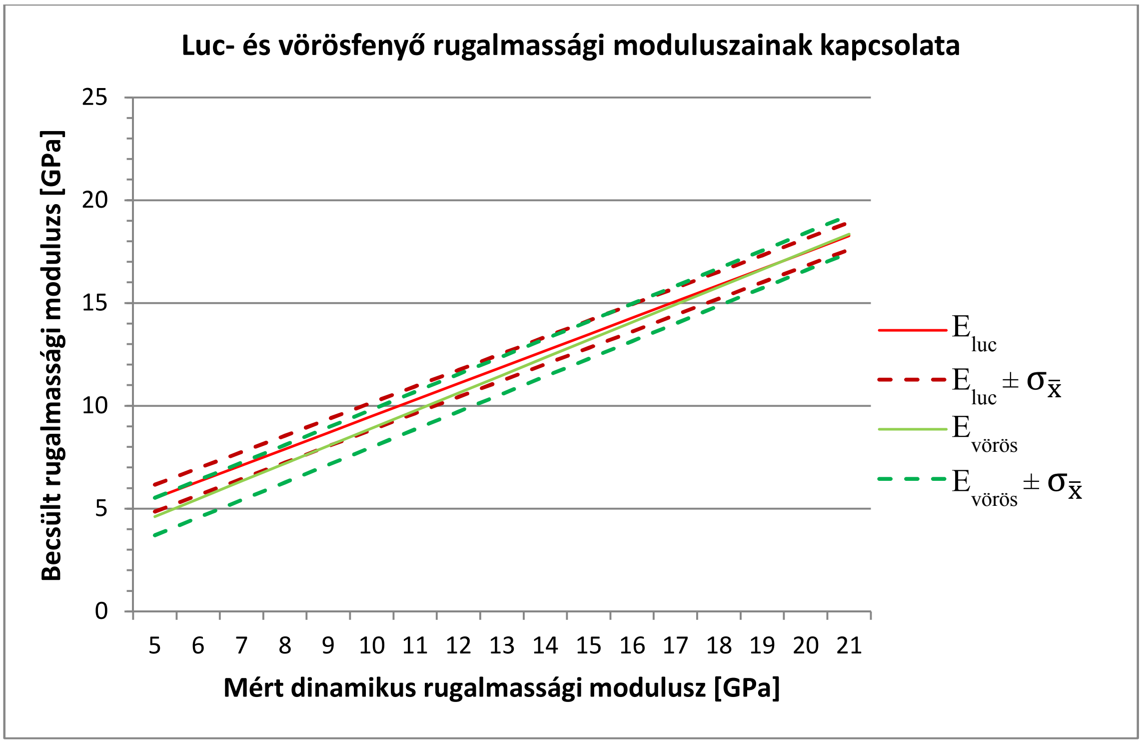
5.9 ábra: A becsült és a valós hajlítószilárdság közötti kapcsolat longitudinális rezgés esetén
Forrás: saját szerkesztés

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 becsült rugalmassági moduluszainak kapcsolata látható.

10.13147/NYME.2013.038



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 becslő egyenletek, melyek az alábbiak szerint alakulnak:

$$E_{luc} = 0{,}797 \cdot 1ong1MOE + 1{,}520 \qquad [5.11]$$

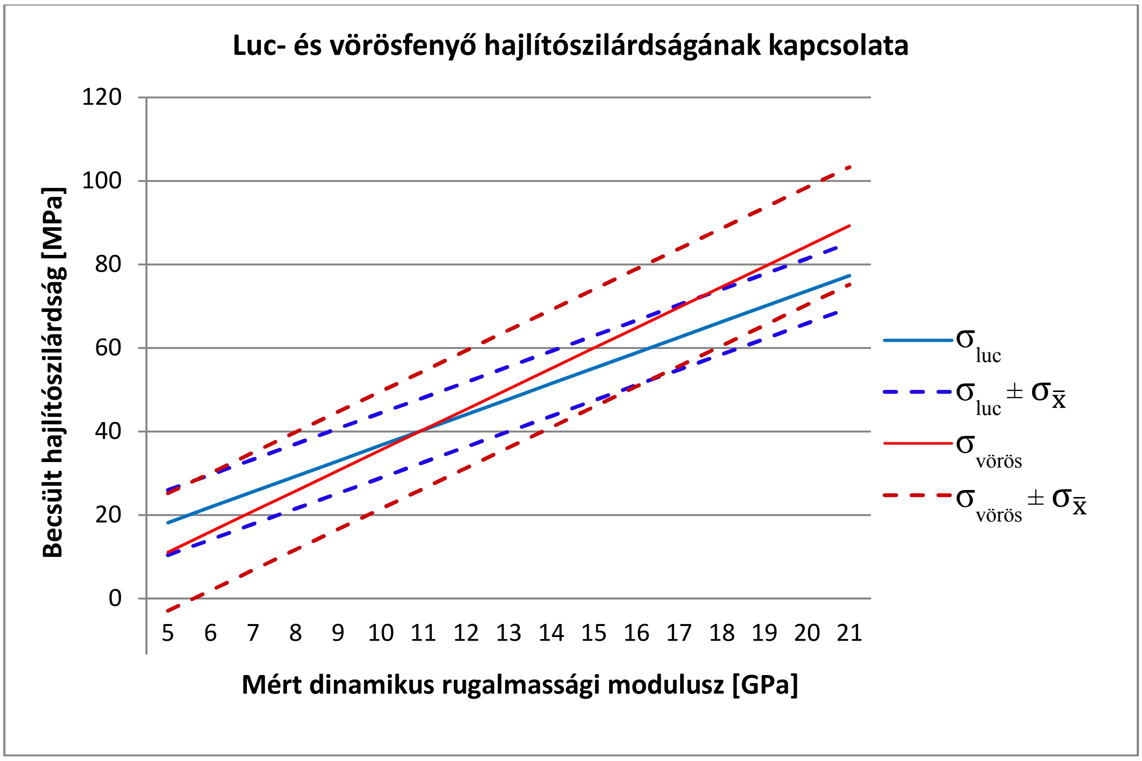
$$E_{vörös} = 0{,}859 \cdot 1ong1MOE + 0{,}317 \qquad [5.12]$$

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 ±0,657 GPa, a vörösfenyőnél ±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 algoritmusa 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 modulusszal 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 becslő egyenletek, melyek az alábbiak szerint alakulnak:

$$\sigma_{luc} = 3{,}696 \cdot 1ong1MOE - 0{,}306 \qquad [5.13]$$

$$\sigma_{vörös} = 4{,}8827 \cdot 1ong1MOE - 13{,}306 \qquad [5.14]$$

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 ±7,760 MPa, a vörösfenyőnél ±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±4%. Célom 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. móduszban. Az összehasonlítást úgy végeztem, hogy a két fél darabnak (KICSI) vettem az átlagát (KICSIÁ) majd összehasonlítottam a teljes hosszban mért adattal (NAGY). Ha az átlagot elosztom a teljes hosszban mért adattal (KICSIÁ/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 nagyobbnak kell lennie, valóban valamivel egynél nagyobb azonban azt is láthatjuk, hogy ez a hibahatáron belül van. Ezek alapján megállapíthatjuk, a méterhatás 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 találhatók. Mindkét esetben az átlagot, a szórást, a minimumot és a maximumot tüntetem fel, valamint azt, hogy mekkora darabszámon végeztem méréseket.

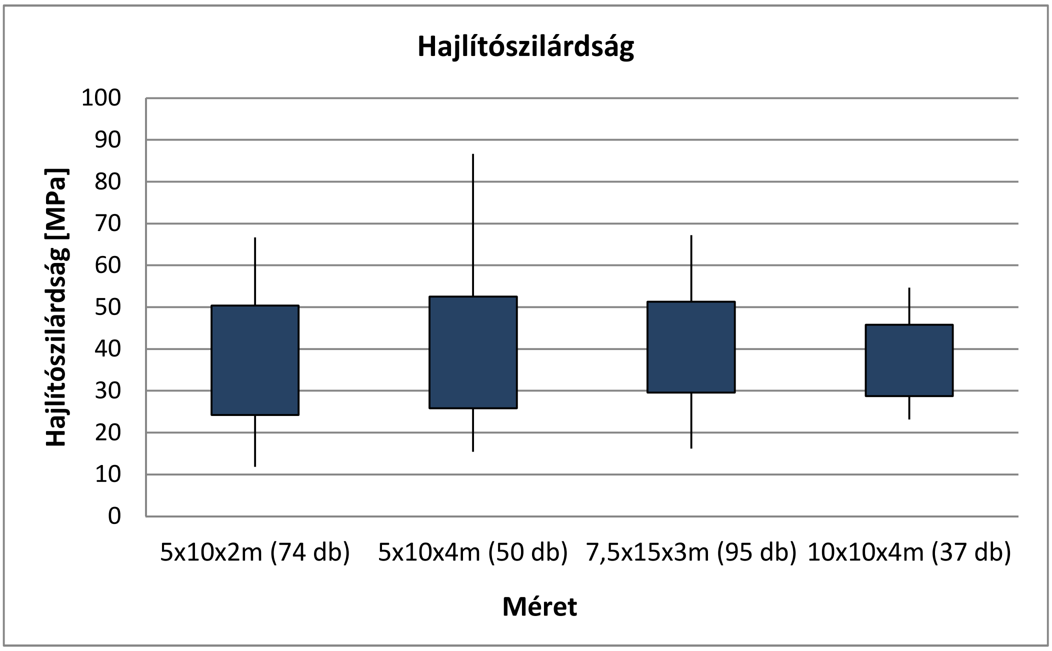
5.35 táblázat: A próbatestek dinamikus rugalmassági modulusz adatai

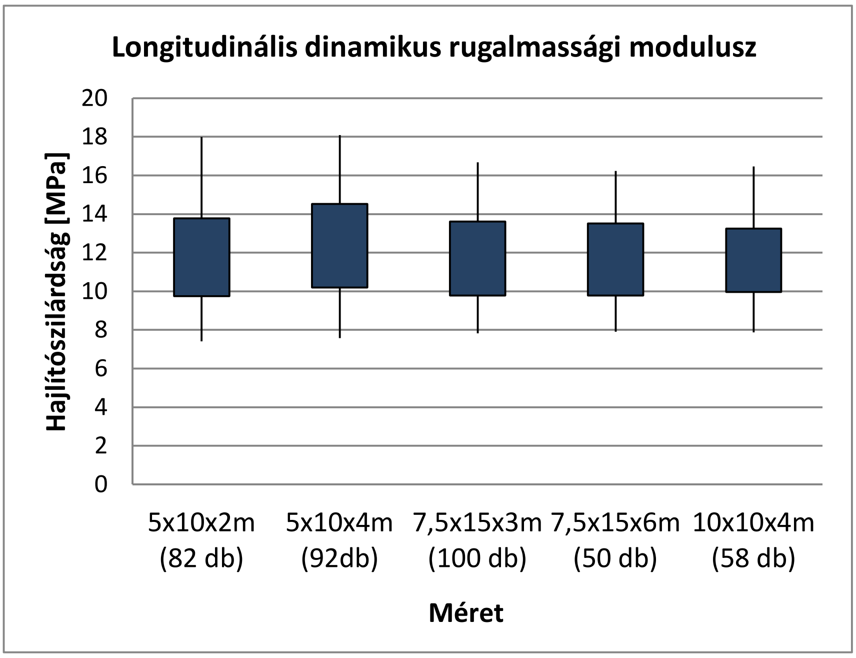
	Longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz adatai				
	5x10x2m (82 db)	5x10x4m (92db)	7,5x15x3m (100 db)	7,5x15x6m (50 db)	10x10x4m (58 db)
ÁTLAG	11,76	12,36	11,69	11,65	11,68
SZÓRÁS	2,02	2,16	1,91	1,87	1,67
MINIMUM	7,42	7,58	7,82	7,91	7,87
MAXIMUM	17,99	18,08	16,68	16,23	16,47

Forrás: saját szerkesztés

10.13147/NYME.2013.038

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.

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

6 TÉZISEK

1. tézis

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

$$E_{becsült} = \underset{(16)}{0{,}863} \cdot hajl1MOE - \underset{(9)}{0{,}043} \cdot Csillapítás + \underset{(374)}{2{,}512} \qquad [6.1]$$

A fenti formula 0,51 GPa-os standard hibával képes a statikus rugalmassági modulusz becslésére az 5-18 GPa-os tartományban. A formula együtthatói alatt zárójelben szereplő számok az adott paraméter standard hibáit mutatják helyi érték helyesen.

2. tézis

Empirikus formulát származtattam a statikus rugalmassági modulusz becslésére *($E_{becsült}$)*. Méréseim során megállapítottam, hogy az 1. móduszban mért longitudinális rezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz (*long1MOE*) mellett az általam meghatározott szegély göcsátmérő arány (*SZCKDR*), mint független paraméter segíti a leghatékonyabban a statikus rugalmassági modulusz becslését *($E_{becsült}$)* 5x10 cm-es keresztmetszetű 2 m hosszú, 13±2%-os nedvességtartalmú lucfenyő palló esetén.

$$E_{becsült} = \underset{(14)}{0{,}763} \cdot long1MOE - \underset{(229)}{1{,}382} \cdot SZCKDR + \underset{(191)}{2{,}214} \qquad [6.2]$$

A fenti formula 0,62 GPa-os standard hibával képes a statikus rugalmassági modulusz becslésére az 5-18 GPa-os tartományban. A formula együtthatói alatt zárójelben szereplő számok az adott paraméter standard hibáit mutatják helyi érték helyesen.

3. tézis

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

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

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

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 ($\sigma_{becsült}$).

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

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

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.

10.13147/NYME.2013.038

5. tézis

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

Méréseim során megállapítottam, hogy az 1. móduszban mért hajlító-rezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz *(hajl1MOE)* mellett az 1. móduszban mért logaritmikus dekrementum *(Csill)*, a göcsterület arány *(GTA)* és a szegély göcsterület arány *(SZGTA)*, mint egymástól független paraméterek segítségével a:

$$\sigma_{becsült} = \underset{(213)}{2{,}946} \cdot hajl1MOE - \underset{(4{,}219)}{16{,}103} \cdot GTA - \underset{(3{,}499)}{10{,}423} \cdot SZGTA - \underset{(137)}{0{,}547} \cdot Csill + \underset{(5{,}011)}{29{,}760} \quad [6.5]$$

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. móduszban mért longitudinális rezgés frekvenciájából számolt dinamikus rugalmassági modulusz *(long1MOE)* 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.

$$E_{becsült} = \underset{(19)}{0{,}819} \cdot long1MOE - \underset{(404)}{1{,}981} \cdot CKDR + \underset{(306)}{1{,}158} \quad [6.6]$$

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.

10.13147/NYME.2013.038

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 évgyűrűszélesség, maximális évgyűrűszélesség, több göcsparaméter, úm. göcsterület arány, szegély göcsterület arány, göcsátmérő arány, szegély göcsátmérő arány, különböző rezgések frekvenciáiból meghatározott dinamikus rugalmassági moduluszok, 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 ±0,51 GPa-os, a hajlítószilárdságot ±6,82 MPa-os hibával megbecsülni. Vörösfenyő esetén pedig a statikus rugalmassági moduluszt ±0,75 GPa-os, a hajlítószilárdságot ±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.

10.13147/NYME.2013.038

9 JELÖLÉSJEGYZÉK

$[S_{ijkl}]$:	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/mm2]*
F_{max}:	legnagyobb teher [N]
f_n:	a rezgés sajátfrekvenciája n-edik móduszban [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:	móduszszám
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]

<u>*A mérések során alkalmazott fontosabb jelölések:*</u>

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

long1MOE:	longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 1. móduszban [GPa]
long2MOE:	longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 2. móduszban [GPa]
long3MOE:	longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 3. móduszban [GPa]
long4MOE:	longitudinális rezgésből számolt dinamikus rugalmassági modulusz 4. móduszban [GPa]
R:	korrelációs koefficiens
Statikus MOE:	statikus rugalmassági modulusz [GPa]
STATMOE:	statikus rugalmassági modulusz [GPa]
SŰR:	sűrűség [kg/m^3]
SZCKDR:	szegély koncentrált göcsátmérő arány
SZGTA:	szegély göcsterület arány
u:	nedvességtartalom [%]
$\sigma_{becsült}$:	hajlítószilárdságot becslő formula
σ_{luc}:	lucfenyő hajlítószilárdságát becslő formula
$\sigma_{vörös}$:	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 fafajok 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-ragasztolt 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_Hibaszamitas.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

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

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

N=373	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					
	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

N=263	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					
	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

N=263	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					
	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

N=373	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					
	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

N=372	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					
	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

N=371	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					
	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

10.13147/NYME.2013.038

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

10.13147/NYME.2013.038

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

N=278	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					
	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

N=50	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					
	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

N=50	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					
	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

N=277	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					
	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

N=65	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					
	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

N=360	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					
	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

N=52	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					
	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

N=52	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					
	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

N=68	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					
	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

N=323	Regression Summary for Dependent Variable: H. szil. R= ,71299993 R2= ,50836891 Adjusted R2= ,50683734 F(1,321)=331,93 p<0,0000 Std.Error of estimate: 12,696					
	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

N=69	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					
	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

N=69	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					
	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

N=87	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					
	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]	$E_{vörös}$ [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]	$\sigma_{vörös}$ [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

10.13147/NYME.2013.038

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