

Faanyag rugalmas állandóinak dinamikus meghatározása, összehasonlítása

Horváth Miklós, Divós Ferenc[❖]

A faanyag rugalmas állandóinak ismerete hasznos információt ad az élőfák anyagi minőségének megismerésében, a fűrészáru szilárdság szerinti osztályozása során, illetve a beépített faanyagok vizsgálata kapcsán. Erre kínál lehetőséget a rugalmas állandók dinamikus meghatározása, mely kétféle módon lehetséges: élő fáknál és beépített szerkezeteknél közvetlen hangsebesség méréssel, míg a fűrészáru osztályozásnál az előbbi metódus mellett sajátrezgések mérésével (rezonancia technikával) is. Cikkünk e kétféle módszerrel mért rugalmassági moduluszt, illetve a kétféle módszerrel mért nyíró rugalmassági moduluszt hasonlítja össze. A vizsgálatok során hibamentes, gyalult felületű lucfenyő (*Picea abies*) próbatesteket használtunk. A rezgések méréséhez egy PC alapú FFT analízátor programot, míg a közvetlen sebességek meghatározáshoz FAKOPP műszert, illetve digitális oszcilloszkópot alkalmaztunk. A dinamikus rugalmassági moduluszt longitudinális rezgésekkel, majd közvetlen sebességméréssel határoztuk meg, illetve hasonlítottuk össze az így kapott eredményeket. Ezután a nyíró rugalmassági moduluszt határoztuk meg torziós rezgésekkel és közvetlen sebesség méréssel, majd e kettő eredményeit hasonlítottuk össze. A dinamikus rugalmassági modulusz összehasonlításánál a determinációs együttható $r^2 = 0,95$, míg a nyíró rugalmassági modulusz esetében $r^2 = 0,85$. Az eredményeink bizonyítják, hogy a sajátfrekvenciás mérésekkel jól korreláló direkt sebességmérések is megfelelnek a faanyag rugalmas állandóinak meghatározására.

Kulcsszavak: Dinamikus rugalmassági modulusz, Nyíró rugalmassági modulusz, Rezonancia technika, Sebesség meghatározás

Dynamic determination and comparison of wood's elastic constants

The elastic properties of wood are useful for evaluating the material in live trees, for timber strength classification, and for the in-situ evaluation of built-in wood. There are two ways for the dynamic evaluation of elastic constants. Direct sound velocity measurements are useful especially in live trees and built-in structures. Timber classification may occur by vibration (self frequency) measurements as well. This article compares the Moduli of Elasticity and Moduli of Rigidity measured by these two techniques. Defect-free planed norway spruce (*Picea abies*) specimens were used in our tests. Resonance testing and sound velocity measurements involved a PC-based FFT analyser and a microsecond timer along with a digital oscilloscope, respectively. Dynamic MOE was measured using longitudinal frequency and direct sound velocity measurements, followed by a comparison of results. Shear modulus comparison was based on torsional vibrations and direct velocity measurements. The determination coefficient (r^2) was 0.95 and 0.85 for dynamic MOE and shear modulus, respectively. The good correlations prove that direct sound velocity measurements are suitable for the determination of wood's elastic constants.

Key words: Dynamic modulus of elasticity, Modulus of rigidity, Vibration technique, Sound velocity

Bevezetés

A faanyag rugalmas állandóinak ismerete hasznos információt ad az élőfák anyagi minőségének megismeréséhez, a fűrészáru szilárdság szerinti osztályozása során, illetve a beépített faanyagok vizsgálata kapcsán. A vizsgálatok gyakorlati jelentőségre csak akkor tehetnek szert, ha azok gyorsan, pontosan, és viszonylag olcsón elvégezhetők. Erre kínál lehetőséget a rugalmas állandók dinamikus meghatározása.

A rugalmas állandók dinamikus mérése kétféle módon lehetséges: a vizsgált anyag sajátrezgéseinek mérésével, illetve közvetlen hangsebesség méréssel. A kétféle módszer közül az alkalmazási feltételek határozzák meg, hogy mely technikát lehet használni. Nevezetesen, élő fáknál és beépített szerkezeteknél csak a közvetlen hangsebesség mérést, míg a fűrészáru osztályozásnál mindkét metódust alkalmazhatjuk. Cikkünk a kétféle módszerrel mért rostirányú rugalmassági moduluszt, illetve a

[❖] Horváth Miklós doktorandusz hallgató,
Dr. Divós Ferenc CSc. egy. tanár, NYME Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratórium

kétféle módszerrel mért nyíró rugalmassági moduluszt hasonlítja össze.

A faanyag rugalmassága a következőképpen jellemezhető: az ortotróp faanyag 9 független rugalmas állandóval írható le. A deformáció és a feszültségek között a kapcsolatot az alakíthatósági mátrix teremti meg, melyet a technikai állandókkal fejezünk ki (Szalai 1994):

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

ahol:

- E – hosszváltozással kapcsolatos rugalmassági modulusz
- G – szögváltozással kapcsolatos nyírórugalmassági modulusz
- ν – interakciós hatás Poisson tényezője
- L, R, T – rost-, sugár-, illetve érintőirány.

A mátrix szimmetriájából adódóan a 12 állandó száma 9 független állandóra csökken. Gyakran csak két állandót említünk (E és G), mely homogén és izotróp anyag esetén kielégítő is. A faanyag esetében tudjuk, hogy ez nem ilyen egyszerű, mégis a gyakorlati alkalmazások miatt élhetünk bizonyos egyszerűsítésekkel. Szerencsére a gyakorlatban nem találkozunk olyan húzásnak kitett gerendával, melynek hossziránya a rostirányra merőleges. Így, ha a faanyag vonatkozásában E -ről beszélünk, az alatt E_L -t értünk. A nyírás kapcsán csupán G nyíró rugalmassági moduluszról beszélünk, azonban ez alatt a G_{TL} és G_{LR} értékét egyaránt értjük. A próbatetek anatómiai irányítottasága és az igénybevétel határozza meg, hogy éppen melyikről van szó. Az általunk használt próbatetek esetében ettől eltekinthetünk.

A faanyag rugalmas állandóinak meghatározására több lehetőségünk is van (Chui 1991). Mind a Young-féle rugalmassági modulusz (E), mind pedig a nyíró rugalmassági modulusz (G) meghatározható statikusan és dinamikusan is (Bucur 1995). A dinamikus meghatározás sajátfrekvenciás rezgések alapján, illetve direkt sebesség mérésekkel történhet. Az alábbiakban dinamikus mérések eredményeinek összehasonlításával foglalkozunk.

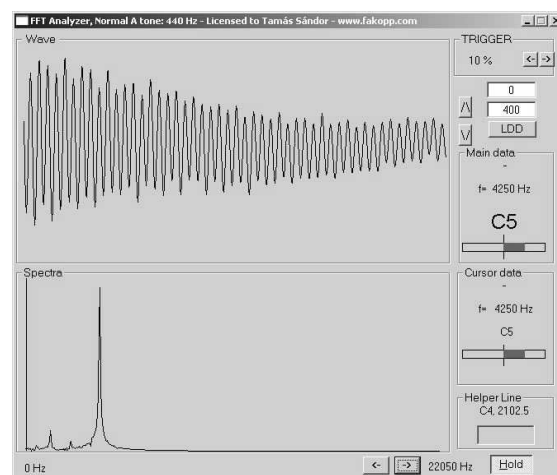
Vizsgálati módszer

A vizsgálatok során hibamentes, gyalt felületű lucfenyő (*Picea abies*) próbateteket használtunk. A próbatetek nedvességtartalma laboratóriumi légszáraz állapotnak megfelelő ($u_{\text{átl}}=10\%$) volt. Geometriai méreteik: a keresztmetszet 20x20 mm, a hosszúságuk változó. A próbatetek sűrűségére vonatkozó alapstatisztikai adatok az **1. táblázatban** olvashatók.

A hajlító, illetve torziós rezgések frekvenciáinak méréséhez egy PC alapú FFT analízátor programot használtunk, mely az **1. ábrán** látható.

1. táblázat – A próbatetek sűrűsége

| | |
|-----------|-----------------------|
| Átlag | 456 kg/m ³ |
| Szórás | 74 kg/m ³ |
| Min | 334 kg/m ³ |
| Max | 555 kg/m ³ |
| Mintaszám | 27 db |



1. ábra – FFT Analízátor program

A dinamikus rugalmassági moduluszt először longitudinális rezgésekkel határoztuk meg. E módszerrel meghatározott rugalmassági modulusz kiválóan korrelál a hajlítási-lárdsággal (Gallagin és Pellerin 1964, Divós és Tanaka 1997). A mérés elrendezése a **2. ábrán** látható.

A fában gerjesztett longitudinális hullám terjedési sebessége az alábbi képlettel számítható:

$$c = 2 \cdot f_{long} \cdot L, \quad [2]$$

ahol:

c – a longitudinális hullám terjedési sebessége

f_{long} – a longitudinális rezgés frekvenciája

L – a próbatest hossza

Az ismert terjedési sebesség felhasználásával meghatározható a dinamikus rugalmassági modulusz (Budó 1972):

$$E_{din,long} = \rho \cdot c^2, \quad [3]$$

ahol:

$E_{din,long}$ – a longitudinális rezgésekkel meghatározott dinamikus rugalmassági modulusz

ρ – a próbatest sűrűsége

A dinamikus rugalmassági modulusz meghatározható többek között közvetlen sebességméréssel is. E módszerek közül jelen esetben a sebesség meghatározását 45 kHz-es ultrahangos készülékkel végeztük. A méréshez használt FAKOPP műszerhez csatlakozó érzékelőket a próbatesthez kell illeszteni a **3. ábrán** látható módon, majd a terjedési idő közvetlenül leolvasható a műszerről.



2. ábra – A próbatest longitudinális frekvenciájának meghatározása

Az érzékelők távolsága, és az idő ismeretében a sebesség meghatározható:

$$c = \frac{s}{t_{45kHz}}, \quad [4]$$

ahol:

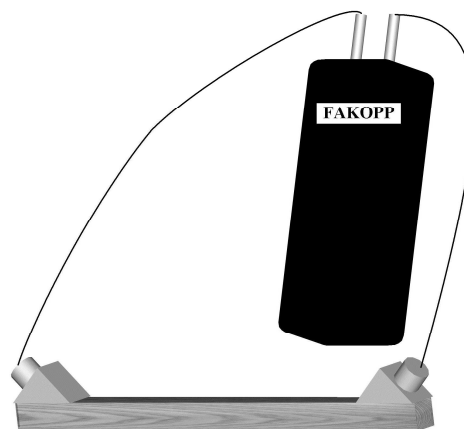
s – az érzékelők távolsága

t_{45kHz} – a készülék által kijelzett terjedési idő

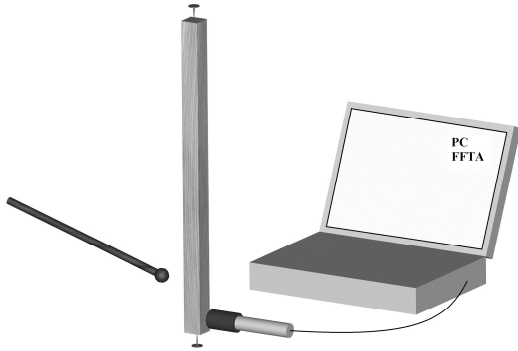
A rugalmassági modulusz ($E_{din,seb}$) meghatározása a 45 kHz-es ultrahangos készülékkel végzett mérések során a [3]-as egyenlettel analóg módon történik.

Továbbiakban a nyíró rugalmassági moduluszt határoztuk meg torziós rezgésekkel (Divós és tsai. 1999), illetve közvetlen sebesség méréssel, majd e kettő eredményeit hasonlítottuk össze.

A rudak torziós rezgései lehetővé teszik a nyíró rugalmassági modulusz meghatározását. A mérés többféleképpen kivitelezhető. Az egyik lehetséges, és esetünkben eredményhez is vezető megoldás volt, amikor a próbatesteket álló helyzetben vizsgáltuk. A rudak végeit rajszögökkel rögzítettük oly módon, hogy a rögzítési pontok a próbatest középvonalát jelölték ki. A mintákat torziós rezgésbe hozva mértük a gerjesztett frekvenciákat a **4. ábrán** látható elrendezésben. A koppintás helyének kiválasztásakor a lehető legnagyobb nyomatókátvitelre kell törekedni, illetve a gerjesztési kívánt módusz amplitúdójának maximumhelyénél kell az ütest végrehajtani.



3. ábra – A longitudinális hullám terjedési idejének meghatározása Fakopp műszerrel (45 kHz-es ultrahangos készülék)



4. ábra – A próbatest torziós frekvenciájának meghatározása

A rezgések frekvenciája az FFT analízátor programról leolvasható, a számítást pedig az alábbi képlet alapján végeztük:

$$G_{din,tor} = \left(\frac{2L \cdot f_t}{n} \right)^2 \frac{\rho \cdot I_p}{K_t}, \quad [5]$$

ahol:

f_t – torziós frekvencia

L – próbatest hossza

ρ – a próbatest sűrűsége

n – módusszám

I_p – poláris inercia, $I_p = \frac{a \cdot b}{12} \cdot (a^2 + b^2)$

K_t – keresztmetszeti tényező, $K_t = c \cdot a \cdot b^3$

a, b – a keresztmetszet oldalhossz méretei

c – táblázati érték, esetünkben $c = 0,141$

A közvetlen nyírósebesség méréséhez speciális nyíróérzékelőket használtunk, melyeket a próbatestekbe nyomtunk az 5. ábrának megfelelően. A terjedési időt oszcilloszkóp segítségével határoztuk meg. A leolvasott időkből, és az érzékelők távolságából sebességet számítottunk:

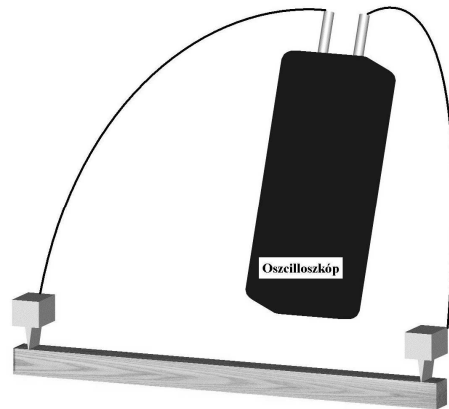
$$c_G = \frac{s_{ny}}{t_{ny}}, \quad [6]$$

ahol:

c_G – a nyírósebesség

s_{ny} – a nyíró érzékelők távolsága

t_{ny} – az oszcilloszkópról leolvasott terjedési idő



5. ábra – A transzverzális hullám terjedési idejének meghatározása oszcilloszkóp segítségével

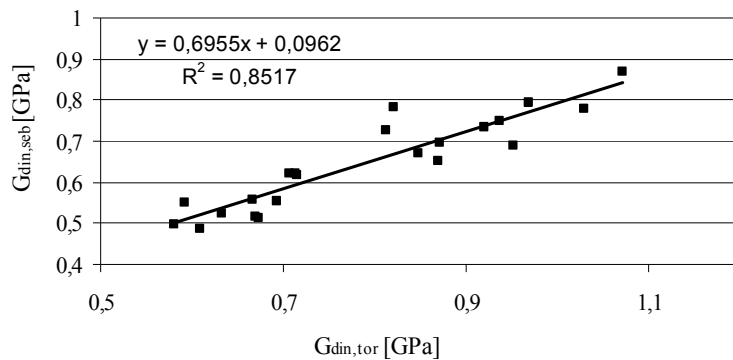
Az ilyen módon számított sebesség segítségével a nyíró rugalmassági modulusz a következőképpen számítható:

$$G_{din,seb} = \rho \cdot c_G^2, \quad [7]$$

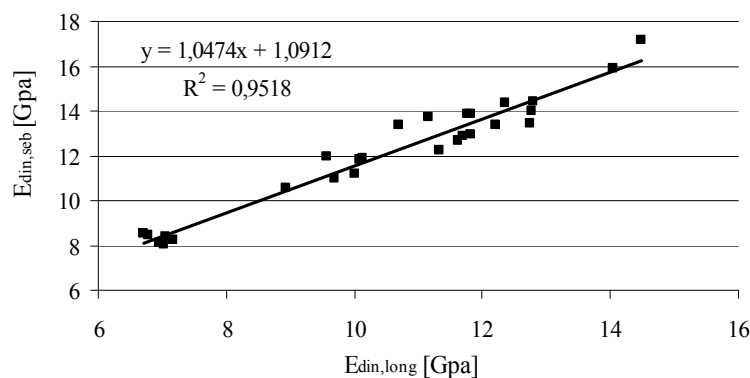
Eredmények

A sajátrezgések, illetve a direkt úton mért hang terjedési sebességéből meghatározott dinamikus rugalmassági moduluszt hasonlítottuk össze az 6. ábrában. A determinációs koefficiens a vártnak megfelelően magas, $r^2 = 0,95$. A mérési eredmények eltéréseinek okai a következők: a direkt sebességmérésnél keletkező hullámfront palástja gömb alakú, melytől csak bizonyos próbatesthossz után tekinthetünk el. Továbbá, a két módszerrel mért rugalmassági modulusz jó korrelációja mellett megfigyelhetjük, hogy a 45 kHz-es ultrahangos készülékkel történő mérés rendre magasabb E értéket ad, mivel a vizsgálati idő befolyásolja a rugalmassági modulusz nagyságát, a viszkóz deformáció csekélyebb szerepe miatt (Divós és tsai. 1999).

A két módon meghatározott nyíró rugalmassági moduluszt hasonlítottuk össze a 7. ábrában. Ez esetben a determinációs koefficiens $r^2 = 0,85$. Az eltérések okai a következők: a két mérés során adott keresztmetszeten belül a feszültségállapot eltérő, a közvetlen sebességmérésnél nyíróhullám továbbítás, míg a sajátrezgések vizsgálatakor



6. ábra – A dinamikusan mért hajlító rugalmassági moduluszok összehasonlítása



7. ábra – A dinamikusan mért nyíró rugalmassági moduluszok összehasonlítása

torziós rezgések keltése történt. Fontos figyelembe venni azt is, hogy a sajátrezgések mérése nagy gyakorlati tapasztalattal is néhány esetben nehezen, vagy nem kivitelezhető. A torziós rezgések mérésekor többek között hajlítórengések is gerjesztődhetnek, illetve a torziós frekvenciák beazonosításának alapelveit – miszerint a torziós rezgési módusok frekvenciái a többszöröseik egymásnak – nehezíti még a fa inhomogenitása is.

A korrelációk jól bizonyítják, hogy a bemutatott módszerek alkalmasak a faanyag rugalmas állandóinak meghatározására. Fő alkalmazási területeik az élőfa-vizsgálatok, fűrészáru osztályozás, illetve a beépített faanyagok vizsgálata. Amennyiben lehetőség van, a mérések közül a sajátfrekvenciás rezgéseket kell alkalmazni, hiszen ezek eredményei a legmegbízhatóbbak (Schnell 1985), de erre élőfáknál és beépített faanyagoknál nincs mód. Az eredmények bizonyítják, hogy a sajátfrekvenciás mérésekkel jól korreláló

direkt sebességmérések megfelelnek a faanyag rugalmas állandóinak meghatározására.

Összefoglalás

Hibamentes fenyő rudakon végeztünk rugalmassági modulusz és nyíró modulusz méréseket kétféle dinamikus technikával: sajátrezgés illetve közvetlen sebesség mérés segítségével. A kétféle módon meghatározott modulusz értékek a vártnak megfelelően magas determinációs koefficiens együtthatót mutatnak, ami bizonyítja mindkét módszer alkalmazhatóságát.

Irodalomjegyzék

1. Bucur, V. 1995. *Acoustics of Wood*. CRC Press Inc, New York
2. Budó Á. 1972. *Kísérleti fizika I*. Tankönyvkiadó, Budapest.
3. Chui, Y. H. 1991. *Simultaneous evaluation of bending and shear moduli of wood and the influence of knots on these parameters*. Wood Science and Technology 25: 125-134
4. Divós F., T. Tanaka 1997. *Lumber Strength estimation by multiple regression*. Holzforschung, 51: 467-471
5. Divós F., Bejő L., Gergely L., Magoss E., Salamon Z. 1999. *Roncsolásmentes Faanyagvizsgálat*. Egyetemi Jegyzet, Sopron.
6. Gallagin, W. L., R.F. Pellerin 1964. *Non-destructive Testing of Structural Lumber*. Materials Evaluation, 22 (4): 163-174. old.
7. Schnell L. 1985. *Jelek és rendszerek mérés technikája*. Műszaki könyvkiadó, Budapest
8. Szalai J. 1994. *A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana: I. rész A mechanikai tulajdonságok anizotrópiája*. EFE, Sopron.