

Lombos fafajok ortotrop szilárdsága és rugalmassága. II. rész: kísérleti eredmények és következtetések

Bejő László, Láng Elemér, Szalai József, Kovács Zsolt, Divós Ferenc*

Orthotropic strength and elasticity of hardwoods. Part 2: experimental results and conclusions

The orthotropic nature of the strength and elastic characteristics of five hardwood species was investigated. The work presented here is the second part of a series that describes the results of the orthotropic shear strength, compression strength and elasticity determination of solid wood, and the dynamic MOE measurements on structural veneers. The orthotropic prediction models proposed in the first part of the article have been evaluated using standard statistical procedures. The orthotropic tensor theory based on Askenazi's postulates, as well as various forms of Hankinson's formula have been found best to describe the orthotropic nature of the above properties of the examined species. The relationship between static and dynamic moduli of elasticity was also examined using inclined-grain specimens. A second order polynomial regression model provided best fit on the experimental data. The orthotropic and regression models may be used in stochastic and deterministic simulations to estimate the mechanical properties of structural composite lumber products.

Key words: Mechanical properties, Hardwoods, Orthotropy, Orthotropic models

Bevezetés

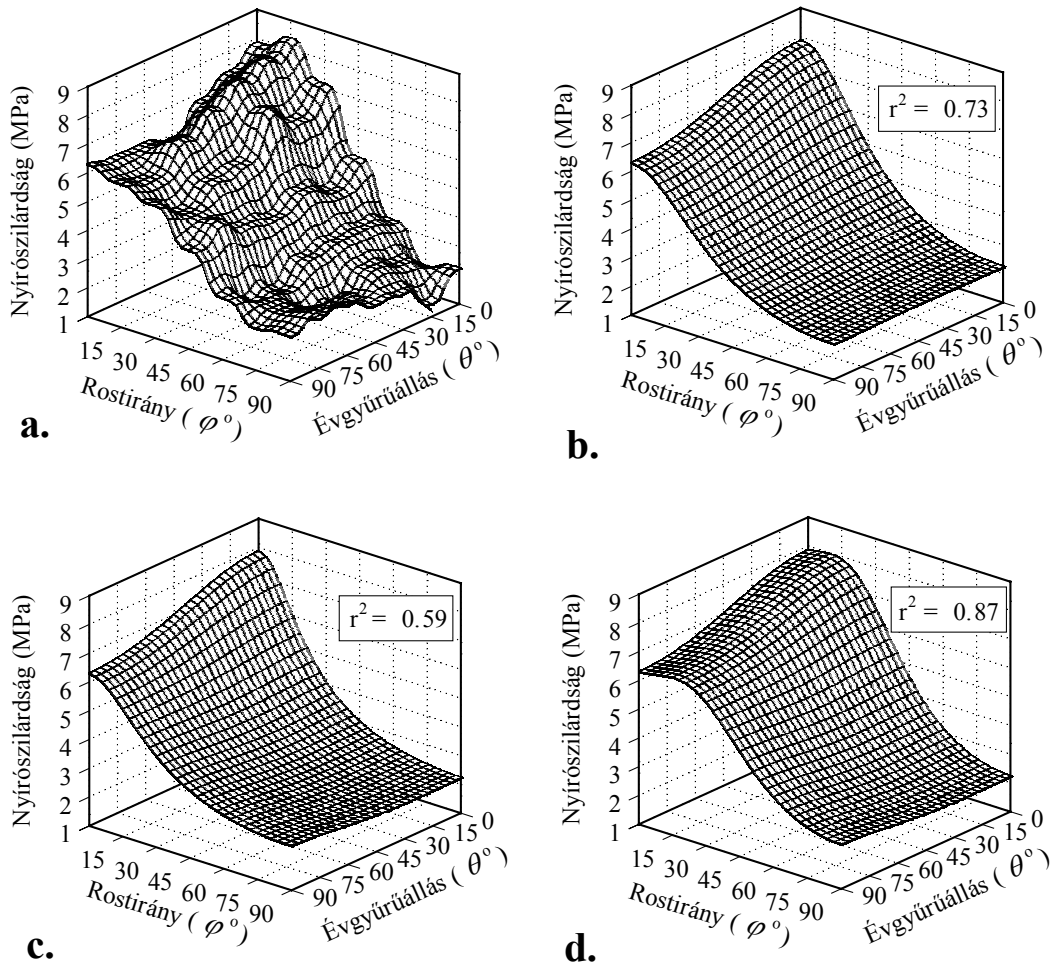
Az ismertetett munka egy nemzetközi kutatóprogram része. Ennek célkitűzése a fa-alapú szerkezeti célú kompozitok alapanyag-tulajdonságainak felmérése, és az alapanyag-bázis kiszélesítése. Ennek érdekében alacsony értékű, gyorsan nöövő, lombos fafajok bevonásának lehetőségeit vizsgáltuk a fejlesztési majd a gyártási folyamatokba. A kutatás alapfeltevése az volt, hogy ha az alapanyag ortotrop mechanikai tulajdonságai ismertek, azokból – a tulajdonságok megmunkálás közbeni változását is figyelembe véve – szimulációs modellek segítségével előre jelezhetők a kompozitok mechanikai tulajdonságai is. Előző cikkünkben (Bejő és tsai. 2003) ismertettük a szimuláció alapját képező, a mechanikai tulajdonságokat tartalmazó adatbázisok felépítését szolgáló kísérleti munka alapjait, a mechanikai tulajdonságok irányfüggését leíró modelleket, valamint a kísérletben használt anyagokat és módszereket. Ezen második rész tartalmazza a kísérletek eredményeit, azok értékelését, illetve a konklúziókat.

A faanyag ortotropikus nyírósilárdsága

A nyírósilárdságot a rostirány valamint az évgűrűállás függvényében vizsgáltuk, ahogy azt a korábbiakban már közöltük (Bejő és tsai. 2003). Ferde rostú próbatestek esetében a tönkrementeli mód eltért a tiszta nyírástól. Gyűrűslikacsú fajok esetében, $\varphi = 45^\circ$ fölött a tönkrementel inkább az évgűrűhatár mentén következett be. Ez a szörtlikacsú fafajoknál is megfigyelhető volt magasabb rostszőgek esetében. Liu és Floeter (1984) speciális, tiszta nyírást biztosító próbatest-kialakítás esetében is hasonló problémákról számoltak be. Következtetésük szerint a nyírósilárdsági mérés érvényessége csak a tönkrementel kezdőpontjától, és nem annak irányától függ. A mérések értékelésénél ehhez tartottuk magunkat, és – mivel a fenti feltételnek eleget tettünk – azokat a mérési eredményeket is megtartottuk, ahol a próbatest nem az elméleti nyírt keresztmetszetben ment tönkre.

Kétfaktoros variancia analízis (ANOVA) eljárással statisztikailag kimutatható volt, hogy mind a rostirány, mind az évgűrű-orientáció szignifikánsan befolyásolta a mérési eredményeket, valamint a két faktor kölcsönhatása is

* Dr. Bejő László PhD. főmunkatárs, NyME Fa- és Papírtechnológiai Int., Dr. habil. Láng Elemér PhD. associate prof. West Virginia University, Dr. habil. Szalai József CSc., egy. tanár intézetigazgató, NyME Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Int., Dr. habil. Kovács Zsolt CSc., egy. tanár, intézetigazgató NyME Terméktervezési és Gyártástechnológiai Int., Dr. habil. Divós Ferenc egy. docens, NyME Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratórium



1. ábra – A rezgőnyár nyírószilárdsági ortotropia diagrammjai: **a.** Kísérletileg meghatározott és interpolált értékek; **b.** az ortotrop tenzorelmélettel, **c.** a kvaratikus egyenlettel és **d.** a módosított Hankinson képlettel becsült értékek.

szignifikáns volt. Ez tehát indokolja a cikkünk előző részében leírt háromdimenziós modellek használatát, melyek mindkét tényezőt figyelembe veszik.

Általánosságban elmondható, hogy a nyírószilárdság szignifikáns csökkenést mutatott a rostszőg növekedésével. $\varphi = 0^\circ$ -nál az évgyűrű szög növekedésével a nyírószilárdság általában kissé csökkent. Ferde rostlefutású próbatestek esetében hasonló, egyértelmű trend nem volt megfigyelhető az évgyűrű orientációjában.

A 49 mérési pont mindegyikén átlagoltuk az eredményeket, és az így kapott értékeket egy 3 dimenziós koordináta-rendszerben ábrázoltuk. Ilyen diagramot mutat az **1a ábra**. Itt a mérési pontok között interpolációval további pontokat generáltunk a jobb áttekinthetőség

érdekében. Mint ezen a diagramon látható, a nyírószilárdság maximuma nem minden esetben $\varphi = 0^\circ$ -nál mutatkozott. Ez igaz volt más fafajok esetében. Ezt a jelenséget már más kutatók is megfigyelték (Askenazi 1959, Szalai 1994). Yilinen (1963) megfigyelései alapján arra következtetett, hogy a nyírófeszültségek eloszlása $\varphi = 15^\circ$ -nál egyenletesebb a keresztmetszetben, mint 0° -nál, s így a faanyag nagyobb terhelést tud felvenni.

Az eredmények értékelését a korábbi cikkünkben (Bejó és tsai 2003) ismertetett három ortotropikus modell illesztésével folytattuk. A modellekhez szükséges bemeneti paramétereket (τ_{RL} ; τ_{TL} ; τ_{RT} ; τ_{TR} ; τ_{90°) a megfelelő irányokban mért értékek átlaga szolgáltatta. A módosított Hankinson képletben szereplő n

1. táblázat – A nyírószilárdságot becsülő modellek által szolgáltatott r^2 értékek

Fafaj	Ortotrop tenzorelmélet r^2	Kvadratikus képlet r^2	Módosított Hankinson egyenlet	
			n	r^2
<i>Rezgő nyár</i>	0,73	0,59	2,72	0,87
<i>Vörös tölgy</i>	0,61	0,57	2,62	0,83
<i>Tulipánfa</i>	0,68	0,62	2,47	0,76
<i>Pannónia nyár</i>	0,63	0,55	2,70	0,86
<i>Csertölgy</i>	0,74	0,76	2,05	0,77

$n \rightarrow$ a módosított Hankinson képletben használt kitevő

kitevő értékét fafajonként, az egyes fafajok teljes adatbázisát felhasználva, görbeillesztéssel határoztuk meg (1. táblázat).

A modelleket vizuálisan valamint statisztikai úton, regresszió-analízis segítségével értékeltük. A vizuális értékeléshez háromdimenziós diagramokat készítettünk; ezeket rezgő nyár esetében a 1. ábra b, c és d részletei szemléltetik. A különböző modellek r^2 értékeit az egyes fafajok esetében, valamint a módosított Hankinson képletben használt n kitevő értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

Mint a diagramokból és az r^2 értékekből is egyértelműen kitévő, a módosított Hankinson képletben alapuló kombinált modell írja le az adott fafajoknál legpontosabban a nyírószilárdság változását a rostirány és az évgyűrűorientáció függvényében. Ez az eredmény várható volt, hiszen itt a kitevő meghatározása az egész adatbázis felhasználásával történt. Emellett fontos megjegyezni, hogy – mint az 1. ábrán is látható – egyedül ez a képlet tudja leírni a 15° -os rostiránynál jelentkező lokális maximumot; a másik két modell szigorúan monoton csökkenő tendenciát mutat a rostirány függvényében.

Az r^2 értékek alapján elmondható, hogy a 4-dimenziós tenzor alapján előállított ortotrop modell, szintén viszonylag jól leírja a nyírószilárdság ortotropiáját. Noha ez a modell nem alkalmas a korábban említett lokális maximum leírására, erős elméleti megalapozottsága folytán alkalmazása mégis meggondolandó. A kvadratikus egyenleten alapuló modell becsléseinek pontossága azonban lényegesen elmarad a másik két függvényétől.

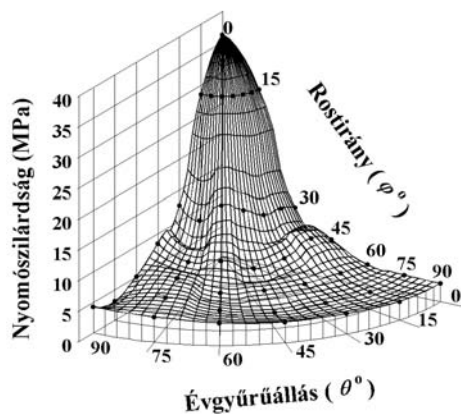
A nyomószilárdság és -rugalmasság ortotropiája

A nyomótulajdonságok tekintetében az amerikai faanyag esetében csak 37 mérési pontot ellenőriztünk, mivel az évgyűrűorientáció hatása $\varphi = 0^\circ$ -nál nem értelmezett, $\varphi = 15^\circ$ -nál pedig elhanyagoltuk azt. A magyar faanyagot csak az ortotrop tenzorelmélet szempontjából fontos hat irányban vizsgáltuk.

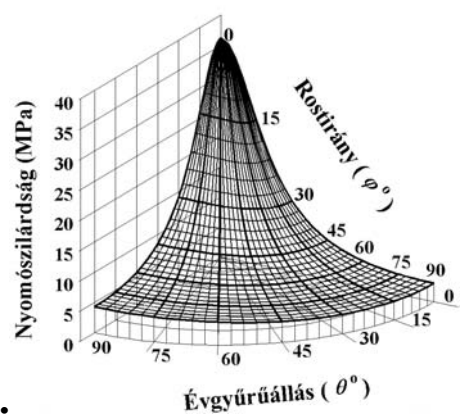
A nem rostirányú próbatestek vizsgálatát ebben az esetben két jelenség nehezítette. Egyrészt, a ferde rostú próbatestekben, a rostiránnyal párhuzamos síkokban esetenként olyan magas nyírófeszültség keletkezett, hogy a próbatestek nyomás helyett nyírás, vagy kombinált, nyomás-nyírás tönkremenetelt mutattak. Különösen jellemző volt ez a gyűrűslikacsú (tölgy) fafajok esetében, az évgyűrűhatár mentén. Ezt a jelenséget egy korábbi publikációban (Láng és tsai. 2002) részletesen tárgyaltuk; mostani cikkünkben a terjedelmi korlátok miatt ennek taglásától eltekintünk.

A másik probléma az volt, hogy 90° -os rostirányhoz közeledve nem mindig állapítható meg határozottan a törés pillanata. Ennek oka, hogy ilyen irányú terheléskor először a korai pásztában található vékony, később a késői pászta vastagabb sejtfalai fokozatosan kihajlási tönkremenetelt szenvednek, miközben a terhelés értéke stabilizálódik, és hosszú ideig ezen az állandó értéken marad. Ilyen esetekben ezt az állandósult értéket tekintettük törőerőnek.

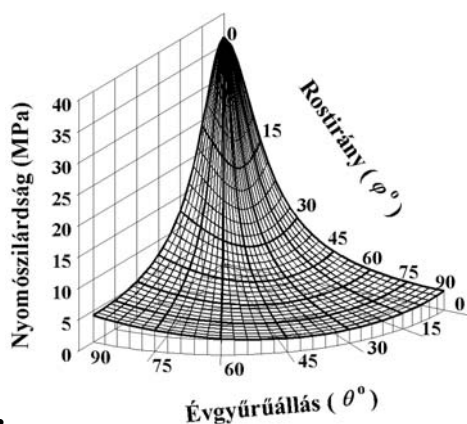
Az ANOVA vizsgálatok kimutatták, hogy mind a rostlefutás, mind az évgyűrűorientáció, valamint azok kölcsönhatása is szignifikánsan befolyásolta a nyomószilárdságot és a rugalmassági moduluszt. Általánosságban elmondható, hogy a rostlefutás (φ) növekedésének hatására a szilárdság és a rugalmassági



a.



b.



c.

2. ábra – A nyár nyomószilárdsági ortotropia diagramjai.
 a. Kísérletileg meghatározott és interpolált értékek;
 b. az ortotropikus tenzorelmélettel és c. a háromdimenziós Hankinson képlettel becsült értékek.

modulusz nagymértékben csökkent. Az évgyűrű-orientációra nézve nem lehetett egyértelmű trendeket felállítani.

Az egyes mérési pontokra számított átlagértékeket ismét ábrázoltuk, ezúttal célszerűen hengeres polárkoordináta rendszerben. Ilyen diagramot mutat a 2. ábra a részlete. A köztes pontokat itt is interpolációval

generáltuk, míg 15°-nál mind a hét esetben ugyanazt az átlagértéket ábrázoltuk.

A következő lépés a cikk előző részében bemutatott két modell értékelése volt. Az ehhez szükséges bemeneti paramétereket (szilárdság és rugalmassági modulusz) ismét a mérési adatbázis szolgáltatta. A nyírószilárdsági modellek értékeléséhez hasonlóan elkészítettük az ortotropikus diagramokat (2b. és 2c. ábra), és kiszámítottuk a 2. táblázatban feltüntetett r^2 értékeket. Ez utóbbi számításhoz, $\varphi = 15^\circ$ -nál a 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° és 90° évgyűrű-orientációnál számított értékek átlagát használtuk fel, mint becsülő paramétert.

A 2. táblázat értékei jól mutatják, hogy az ortotrop tenzorelmélet és a háromdimenziós Hankinson egyenletrendszer közel egyforma hatékonysággal írta le a rezgő nyár és a vörös tölgy nyomótulajdonságainak irányfüggését. A tulipánfa esetében azonban a Hankinson képlet lényegesen gyengébb becslést adott, mint a másik modell. Ez az eredmény nem meglepő, ha figyelembe vesszük, hogy az ortotrop tenzorelmélet több kísérletileg meghatározott eredményt használ fel a nyomótulajdonságok becsléséhez.

A magyar fafajok esetében alkalmazott kísérleti felállítás nem teszi lehetővé a fentihez hasonló statisztikai analízis elvégzését. A fafajok hasonlósága folytán feltételezhető azonban, hogy a modellek itt is hasonló eredményt nyújtanának, így – a szükséges alapadatok birtokában – ezekhez a fafajokhoz is elfogadható biztonsággal használhatók.

A hámozott furnérok ortotrop rugalmassága

A hámozott furnérok rugalmassági moduluszának meghatározása több tekintetben eltért a nyomó- és nyírótulajdonságok irányfüggésétől. Ebben az esetben az évgyűrű-orientáció hatása – értelemszerűen – nem vehető figyelembe; mivel hámozáskor tangenciálisan választják le az anyagot, a furnérok síkja jó közelítéssel az LT síkkal párhuzamos. Emellett az alkalmazott mérési eljárás lehetővé tette, hogy minden furnéron minden irányban megmérjük a rugalmassági moduluszt. Ez statisztikailag egy véletlen blokk elrendezésnek felel meg; eszerint végeztük el a variancia analízist is.

Az ANOVA eredményei alapján a rostirány változása szignifikáns hatással van a

rugalmassági modulusz értékére. Tukey többszörös terjedelem próbája azonban megmutatta, hogy ez a változás csak alacsonyabb φ értékek esetében jelentős; amerikai fafajoknál 45° -os, hazai fafajoknál pedig 60° -os rostlefutás fölött a rugalmassági modulusz nem változik jelentősen.

A véletlen blokk elrendezés folytán a hagyományos regresszió analízis nem alkalmazható a becslő modellek értékelésére. Ebben az esetben a becslő modellt minden furnérra külön kell alkalmazni, és az egyes mért értékeket ezzel a becsléssel kell összevetni. Ennek érdekében bevezettünk egy becslési hiba paramétert:

$$Hiba = \frac{\sum \frac{\hat{E}_{\varphi i} - E_{\varphi i}}{E_{\varphi i}}}{n} 100\% \quad [1]$$

ahol:

$\hat{E}_{\varphi i}$ – az ortotrop tenzorelmélettel vagy a Hankinson képlettel az adott i próbatestre, φ rostirányban számított rugalmassági modulusz érték,

$E_{\varphi i}$ – az i próbatestenen φ rostirányban mért MOE érték,

n – a próbatestek száma

A **3-7. ábrák** a részletei mutatják a mért értékek eloszlását, valamint az átlagértékek segítségével kiszámított függvénymentet az 5 fafaj esetében. A grafikonok **b** részlete a fenti módon számított hibaértékeket ábrázolja a rostirány függvényében.

Az ábrákról első látásra megállapítható, hogy az ortotrop tenzorelmélet lényegesen jobb becslést adott a Hankinson egyenletnél; az előbbi esetében a maximális hiba soha nem haladja meg a 40%-ot, míg az utóbbinál időnként még 100% fölé is megy, és mindig magasabb 40%-nál.

A diagramokat jobban megvizsgálva több fontos megállapítást is tehetünk. Először is, az amerikai fajok esetében az ortotrop tenzorelmélet többnyire inkább alábecsüli, míg a Hankinson képlet túlbecsüli a rugalmassági modulusz értékét. A magyar fajok esetében a tendencia fordított. Az is megfigyelhető, főleg az amerikai faanyagoknál, hogy a Hankinson formula, bár $\varphi = 45^\circ$ környékén nagyon rossz becslést ad, a kezdeti szakaszban sok esetben lényegesen jobban írja le a rugalmassági modulusz változását, mint a másik modell, amely viszont rendkívül pontos 45° -os és a feletti rostirányoknál. Célszerűnek tűnik tehát a két modell becsléseit kombinálni, olyan módon, hogy az eredmény a kettő közé essen, és a kezdeti szakaszban közel essen a Hankinson képletéhez, majd rohamosan közelítse az ortotrop modell becsléseit. A következő képlet célravezetőnek tűnik e tekintetben:

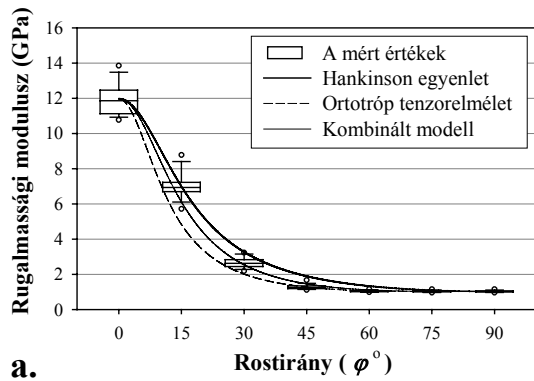
$$\hat{E}_K = \hat{E}_H \frac{\sqrt{\pi/2} - \sqrt{\varphi}}{\sqrt{\pi/2}} + \hat{E}_O \frac{\sqrt{\varphi}}{\sqrt{\pi/2}}, \quad [2]$$

ahol \hat{E}_H , \hat{E}_O és \hat{E}_K a Hankinson képlettel, az ortotrop tenzorelmélettel, illetve a kettő kombinációjával φ rostirányban becsült rugalmassági modulusz értéke.

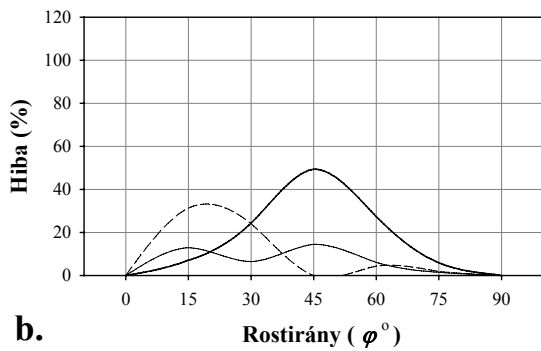
A **3-7. ábrákon** látható, hogy az előrejelzések fenti kombinációja következetesen viszonylag jó becslést szolgáltatott, és csak a vörös tölgy esetében eredményezett 40% fölötti hibát. A rezgőnyár és a tulipánfa esetében, alacsonyabb rostorientációnál a becslés lényegesen javult az ortotrop elmélethez képest, míg a magyar fajoknál a becslés minősége nem romlott lényegesen. Mindezt figyelembe véve azonban még mindig vitatható, hogy a kombinált modell valóban jobban működik-e, mint az ortotrop tenzorelmélet.

2. táblázat – A nyomószilárdságot és -rugalmassági moduluszt becslő két modell által szolgáltatott r^2 értékek

Fafaj	Ortotrop tenzorelmélet		3D Hankinson képlet	
	Nyomószilárdság	Nyomórugalmassági modulusz	Nyomószilárdság	Nyomórugalmassági modulusz
<i>Rezgőnyár</i>	0,93	0,94	0,91	0,91
<i>Vörös tölgy</i>	0,93	0,93	0,93	0,94
<i>Tulipánfa</i>	0,92	0,93	0,72	0,83

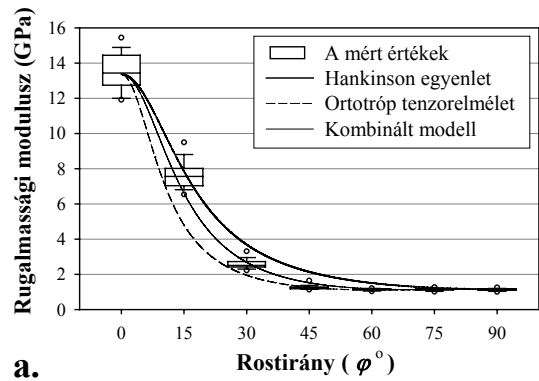


a.

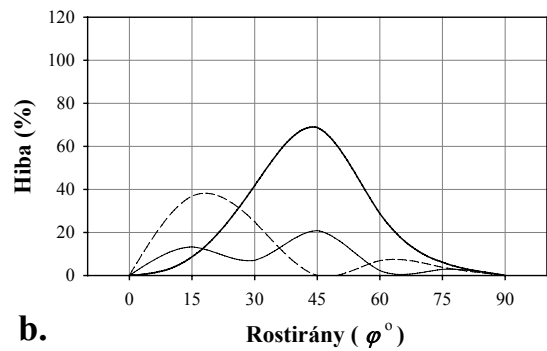


b.

3. ábra – Rezgönyár műszaki furnér dinamik rugalmassági moduluszának változása a rostírány függvényében.

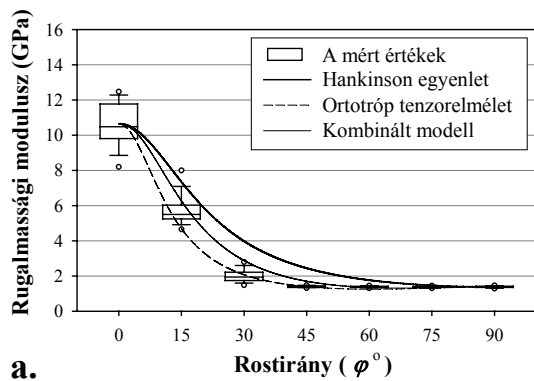


a.

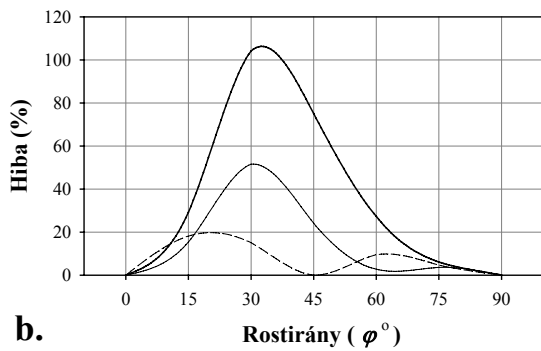


b.

4. ábra – Tulipánfa műszaki furnér dinamik rugalmassági moduluszának változása a rostírány függvényében.

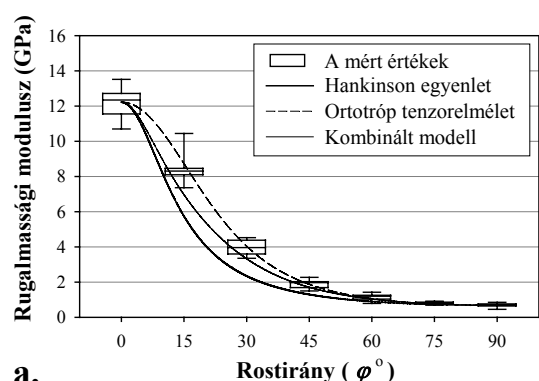


a.

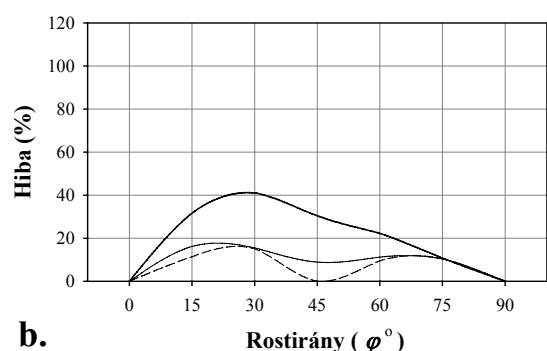


b.

5. ábra – Vörös tölgy műszaki furnér dinamik rugalmassági moduluszának változása a rostírány függvényében.

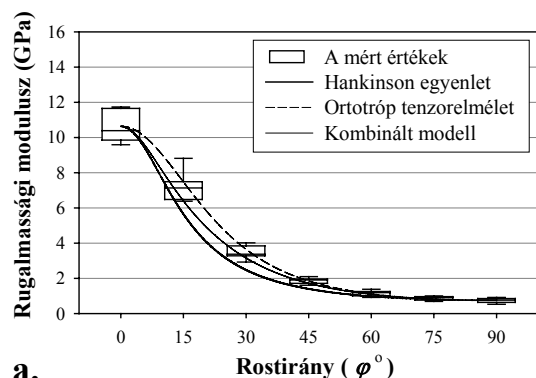


a.

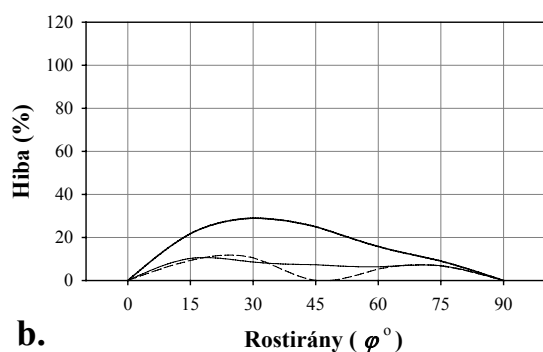


b.

6. ábra – Csertölgy műszaki furnér dinamik rugalmassági moduluszának változása a rostírány függvényében.



a.



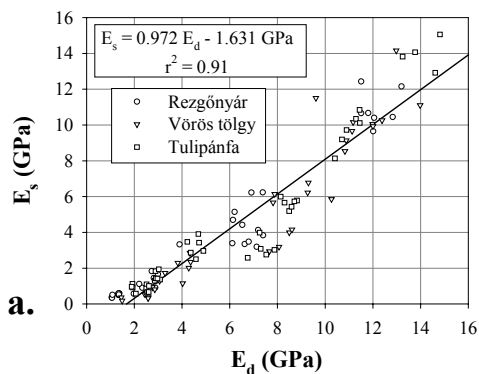
b.

7. ábra – Pannónia nyár műszaki furnér dinamikus rugalmassági moduluszának változása a rostirány függvényében.

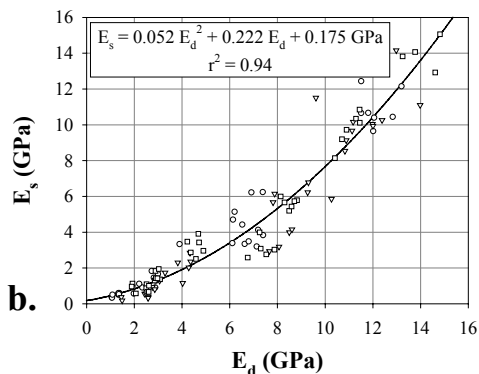
A dinamikus és statikus rugalmassági modulusz összefüggése

A statikus húzó- és dinamikus rugalmassági modulusz összefüggését 0-45° között változó rostirányú, furnér és tömörfa próbatesteken mértük. Ilyen ferde rostú próbatesteken tudomásunk szerint még nem végeztek hasonló vizsgálatokat.

A 8. ábra szemlélteti a kétféleképpen mért rugalmassági modulusz összefüggését. Elméleti megfontolások (Divós és Tanaka 2000) alapján feltételeztük, hogy az összefüggés fafajfüggetlen, azonos meredekségű egyenes vonallal jellemezhető, és a regressziós egyenes áthalad az origón. A 8a. ábra egyértelműen mutatja, hogy ez a feltételezés téves volt. A regressziós egyenes nem halad át az origón, és az összefüggés linearitása is megkérdőjelezhető. Ennek az eltérésnek az okát több dolog is magyarázhatja. Feltételezhető, hogy a mérést befolyásolta a faanyag erős csillapító hatása a longitudinális irányokban. Problémát okozhatott az is, hogy a faanyag húzó- és nyomórugalmassági



a.



b.

8. ábra – A dinamikus és statikus rugalmassági modulusz összefüggése ferde rostlefutású tömörfa és furnér próbatestek esetében.

sági modulusza eltér. Mint köztudott, a faanyagban elindított lökeshullámok húzó- és nyomódeformációk kombinációjából állnak elő. Az ilyen módon mért rugalmassági modulusz összevetése a tisztán húzódeformációból származtatott értékkel szintén okozhatta a fenti eltéréseket.

A 8a. ábrán látható lineáris regressziós modellel kapcsolatos legfőbb probléma azonban az, hogy e szerint az egyenlet szerint a magasabb φ értékeknél mért alacsonyabb dinamikus rugalmassági modulusz értékek egyes esetekben negatív statikus rugalmassági modulusznak felelnek meg. Ez megengedhetetlen, különösen akkor, ha – mint esetünkben – a modellt egy szimulációs tanulmány keretében statikus rugalmassági modulusz generálására kívánjuk felhasználni.

A 8b. ábra ugyanazokat az adatpontokat mutatja, azonban ebben az esetben egy másodrendű polinomiális regressziót alkalmaztunk. Amint az r^2 érték javulásából is látható, ez a modell lényegesen jobban illeszkedik az adathalmazra, mint a lineáris függvény. Ez a négyzetes modell az alacsonyabb dinamikus

rugalmassági modulusz értékek esetén is pozitív statikus rugalmassági modulusz értékeket szolgáltat. Bár a másodrendű polinomiális függvény alkalmazásának nincs elméleti alapja, ez a modell nyilvánvalóan jobban használható, ha a célunk a statikus rugalmassági modulusz becslése a dinamikus értékek alapján.

Összefoglalás

Cikkünk második részében ismertettük a három észak-amerikai és két magyarországi faanyag ortotrop nyírószilárdság, nyomószilárdság és rugalmassági modulusz, valamint a furnérok dinamikus rugalmassági modulusz kísérleti meghatározásának eredményeit. Megvizsgáltuk az első részben bemutatott ortotrop modellek alkalmasságát az egyes esetekben, valamint röviden kitértünk a statikus és dinamikus rugalmassági modulusz összefüggésére ferde rostú faanyag esetében. Mindezen vizsgálatok eredményeiből az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A nyírószilárdság ortotropiájának leírására legalkalmasabb a módosított Hankinson egyenlet és az ortotrop tenzorelmélet kétdimenziós egyenleteiből származtatott kombinált modell. Minden esetben ez a modell írta le legpontosabban a kísérleti adathalmazt, és ez volt az egyetlen modell, mely a 15° -nál jelentkező lokális maximumot kezelni tudta. Az ortotrop tenzorelméletből származtatott háromdimenziós egyenlet szintén viszonylag jó eredményt adott, míg a harmadik vizsgált modell pontossága lényegesen elmaradt az előbbiektől.
- A nyomószilárdság és -rugalmassági modulusz ortotropiáját leíró modelleket csak az amerikai fafajok esetében volt módunk vizsgálni. Itt a háromdimenziós Hankinson képlet és az ortotrop tenzorelmélet közel egyformán jó becslést szolgáltatott, kivéve a tulipánfát, ahol az ortotrop tenzorelmélet (mely a becsléshez több kísérletileg meghatározott adatpontot igényel) jelentősen jobb becslést adott.
- A hámozott furnérok dinamikus rugalmassági moduluszának változását az LT síkban, a rostirány függvényében szintén az ortotrop tenzorelmélet közelítette jobban. A

Hankinson egyenlet azonban alacsonyabb rostlefutásnál sok esetben pontosabbnak bizonyult. A két elmélet kombinációjából létrejött modell, bár egyes esetekben lényegesen javította a becslés pontosságát, nem bizonyult egyértelműen jobbnak az ortotrop tenzorelméletnél.

- Általánosságban elmondható, hogy a Hankinson képlet (vagy annak módosított formája) és az Askenazi által kidolgozott, négy-dimenziós tenzorelméleten alapuló modellek közel egyforma pontossággal írják le a különböző mechanikai tulajdonságok irányfüggését a használt fafajok esetében. Bár nem minden esetben bizonyult a legjobbnak, összességében a két modell közül az ortotrop tenzorelmélet következetesen viszonylag jó eredményeket szolgáltatott; általános érvényessége, robusztussága és szilárd elméleti megalapozottsága miatt tehát valószínűleg előnyben részesítendő.

A dinamikus és statikus rugalmassági modulusz összefüggését az elméleti megfontolásoknak ellentmondóan egy másodrendű polinomiális regressziós modell írta le legjobban. Az elméleti indokoltság hiánya ellenére gyakorlati szempontból e modell alkalmazása célravezetőbb.

Köszönetnyilvánítások

A leírt kutatást részben a McIntire-Stennis Forestry Research Act 978. sz. projektje, részben az OTKA T 025985. sz. kutatási programja finanszírozta. A nemzetközi együttműködést a NATO CRG.LG 973967. sz. kooperációs kutatási ösztöndíja tette lehetővé. A szerzők hálásak mindezért a pénzügyi támogatásért, és külön köszönetet mondanak a TrusJoist McMillan, a Weyerhaeuser Business Buckhannoni (WV) LVL és PSL gyárának az alapanyagok valamint gyártási kérdések terén nyújtott segítségéért. Az ortotrop nyíró-, nyomó-, illetve dinamikus rugalmassági modulusz vizsgálatok eredményei három különálló angol nyelvű publikációból (Láng és tsai 2000, 2002 és 2003) az itt leírtnál részletesebben is megismerhetők.

Irodalomjegyzék

1. Askenazi, E. K. 1959. *On the Problem of Anisotropy of Construction Materials*. Sov. Phys. Tech. Phys. Vol 4. 1959 pp. 333-338.
2. Bejó L., Láng E., Szalai J., Kovács Zs., Divós F. 2003. *Lombos fajok ortotrop szilárdsága és rugalmassága. I. rész: elméleti alapok, kísérleti módszerek*. Faipar 51(2):19-25
3. Divós, F., T. Tanaka. 2000. *Effect of creep on Modulus of Elasticity determination of wood*. ASME J. of Vibration and Acoustics 122(1):90-92.
4. Lang, E. M., Bejó, L., Szalai, J., Kovacs, Zs., 2000. *Orthotropic Strength and Elasticity of Hardwoods in Relation to Composite Manufacture. Part I. Orthotropy of Shear Strength*. Wood Fiber Sci. 32(4):502-519.
5. Lang, E. M., Bejó, L., Szalai, J., Kovacs, Zs., Anderson, R. B. 2002. *Orthotropic Strength and Elasticity of Hardwoods in Relation to Composite Manufacture. Part II.: Orthotropy of Compression Strength and MOE*. Wood Fiber Sci. 34(2):350-365
6. Lang, E. M., Bejó, L., Kovacs, Zs., Divós F., Anderson, R. B. 2003. *Orthotropic Strength and Elasticity of Hardwoods in Relation to Composite Manufacture. Part III: Orthotropic Elasticity of Structural Veneers*. Wood Fiber Sci. 35(2):308-320
7. Szalai J. 1994. *A faanyag és faalapú anyagok anizotrop rugalmasság- és szilárdságtana. I. rész: a mechanikai tulajdonságok anizotrópiája*. EFE, Sopron.
8. Ylinen, A. 1963. *A Comparative Study of Different Types of Shear Tests of Wood*. Paper presented on the Fifth Conference of Wood Technology. U.S. Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, September 16-27, 67 pp.

A természetes fa vágása lézerrel – 2. rész

Gerencsér Kinga*

Cutting solid wood with lasers. Part 2

The first part of this article presented the main areas of laser utilisation, the theoretical background, the properties of laser light and an analysis of the operation principles and characteristics of the cutting mechanism. In the second part, the author discusses the challenges of using lasers for cutting wood, and describes the experimental work done on solid wood. Laser cutting compared favourably to traditional and high-pressure pneumatic cutting in terms of surface roughness and kerf width. Carbonisation of the surfaces and the high costs of the method are the most important drawbacks of the method.

Key words: Laser, Laser cutting, Surface quality

A cikk első része a lézerekkel kapcsolatos legfontosabb alapfogalmakat, illetve a lézervágás alapelveit és mechanizmusát ismertette. A második rész a faanyag lézeres vágásának kérdéseivel, kihívásaival foglalkozik, illetve ismerteti az ezen a területen elvégzett munkát, és annak eredményeit.

A vágáshoz használt lézersugár tulajdonságai

A vágáshoz vagy folytonos üzemi, vagy olyan ismétlési frekvenciájú impulzuslézere van szükség, ahol az egymást átlapoló lyukak sorozatával végzik a vágást. A vágásrendszernek lehetőleg legkisebbnek kell lennie, anélkül, hogy az anyag újra-összehegedése bekövetkezne. Ez főként műanyagokra vonatkozik, ahol a vágásrés 0,025 mm-nél kisebb is lehet (Myring és Kimmitt 1988).

A vágás mélysége nő a nyomás növekedésével, amíg a nyomás el nem éri azt az értéket (kb. 2-3 bar), amikor a további nyomásnövekedésnek már nincs többé hatása. A vágási sebesség nagymértékben független az alkalmazott gáztól és a gáznyomástól olyan esetekben, amikor az anyagnak nincs exotermikus reakciója a vágógázzal. Olyan anyagokat is, amelyek levegőn elégnek, mint pl. a papír, el lehet vágni, mivel a fókuszon kívül a hűtés hatása többnyire elég nagy ahhoz, hogy megakadályozza az égést. Az anyag tulajdonságaitól függően, nagy relatív mélységű, párhuzamos oldalú vágásrészt lehet kapni a fókuszmélységen túl is.

A vágás során kiáramló segédgáz keresztuláramlik a vágásrészen, és kisöpri onnan a keletkező melléktermékeket. Amennyiben a gáz a szűk vágásrésben lelassul, a felszabaduló

* Dr. habil Gerencsér Kinga CSc., tszv. egy. docens, NYME Fűrészipari Tanszék