

Doktori (PhD) értekezés tézisei

A természetes faanyag nyíró-rugalmassági moduluszának meghatározása

Karácsonyi Zsolt

Nyugat-magyarországi Egyetem

Sopron

2011

Doktori (PhD) értekezés
Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
Cziráki József Faanyagtudomány- és Technológiák Doktori Iskola
Vezető: Dr. Dr. h.c. Winkler András egyetemi tanár

Doktori program: Faszervezetek
Programvezető: Dr. Divós Ferenc CSc.

Tudományág:
Anyagtudományok és technológiák

Témavezető: Dr. Szalai József CSc.

1. Bevezetés

A nyíró-rugalmassági modulusz az egyik fontos rugalmas anyagjellemző. Az Young-modulusz és a Poisson tényező mellett a G modulusz a harmadik rugalmas technikai állandó, amely meghatározza a merevségi és alakíthatósági tenzort. A rugalmas állandók ismeretében meghatározott, fenti tenzorok segítségével számíthatjuk a feszültségi állapot alapján az alakváltozási állapotot vagy fordítva. A gyakorlati életben a faanyag nyíró-rugalmassági moduluszának az ismerete azért is fontos, mert a hajlított fa tartók alakváltozásának mintegy 15%-a a nyírásból származik, szemben az acél tartókkal, ahol csupán 2% a nyírásból származó lehajlás. A pontos lehajlás meghatározásához ismerni kell a faanyag G moduluszát. A nyíró-rugalmassági modulusz pontos értékét azonban nem könnyű meghatározni, mérni. Ennek oka, hogy egy előre kiválasztott keresztmetszetben tiszta nyírást kísérleti körülmények között nehéz létrehozni. Ezen kívül a szögváltozás nagyságának meghatározása is a bonyolultabb alakváltozás-mérési feladatok közé tartozik. Ezek a nehézségek azzal a következőkkel jártak, hogy napjainkra több technológiát is dolgoztak ki a nyíró-rugalmassági modulusz mérésére. Ezek többsége továbbra is tartalmaz valamilyen elméleti és/vagy méréstechnikai problémát és pontatlanságot. Az izotrop anyagokat egy rugalmassági modulusz jellemzi. Az anizotrop anyagoknál azonban más a helyzet. Elvileg minden síkhoz más nyíró-rugalmassági modulusz tartozik. Az ortogonálisan anizotrop faanyag esetén bizonyítható, hogy amennyiben ismerjük a három anatómiai fősíkhoz tartozó G-moduluszt, akkor bármely tetszőleges síkhoz elméletileg kiszámíthatjuk.

2. A kutatómunka célja

Anizotrop anyagoknál – mint amilyen a faanyag is – lehetőség nyílik a nyíró-rugalmassági modulusz közvetett mérésére. E módszerrel a megfelelően orientált rúd alakú próbatestet tiszta húzásnak vagy nyomásnak vetjük alá és mérjük a hossz- keresztirányú és szögfelezőhöz tartozó fajlagos hosszváltozásokat. 45-fokban orientált próbatest esetén csak a hossz- és keresztirányú alakváltozást kell mérni. Ez a közvetett technológia egyszerű és pontos. A módszerről kevés publikációt találni a szakirodalomban. Az eddig elvégzett kísérletek kisszámú mintára vonatkoznak. Ennek oka, hogy a szükséges, egyszerre két- vagy háromirányú alakváltozás mérése nagyon költséges és időigényes feladat.

Doktori munkám megkezdése előtt két célt fogalmaztunk meg. Az egyik a nyíró-rugalmassági modulusz meghatározása húzó vagy nyomó igénybevétel alkalmazá-

sával, és az eredmények alapján a módszer elméleti háttérének az igazolása nagyszámú minta és több fafaj alkalmazásával. A másik cél, a Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézet új, optikai alakváltozás-mérő rendszerének alapos megismerése és mindennapi használatának a begyakorlása.

3. A kutatómunka tárgya – anyagok és módszerek

A nyíró-rugalmassági modulusz a közvetett módszer levezetése után egy viszonylag egyszerű és rövid összefüggéssel határozható meg:

$$G_{ij} = \frac{\sigma^{i'i'} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha}{2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot (\varepsilon_{i'i'} - \varepsilon_{j'j'}) + 2 \cdot \left[\varepsilon_{ij}^{45} - \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{i'i'} + \varepsilon_{j'j'}) \right] \cdot \cos 2\alpha}$$

ahol, $i', j' = 1', 2', 3'$, $i, j = 1, 2, 3$ és $1 = L$; $2 = R$; $T = 3$,

$\varepsilon_{1'1'}$ - a terhelés irányával párhuzamos fajlagos alakváltozás,

$\varepsilon_{2'2'}$ - a terheléssel irányára merőleges fajlagos alakváltozás,

ε_{ij}^{45} - a terhelés iránya és az arra merőleges irány szögfelezőjében a fajlagos alakváltozás,

α - az i és i' irányok által bezárt szög,

$\sigma^{i'i'}$ a terhelés hatására fellépő normálfeszültség.

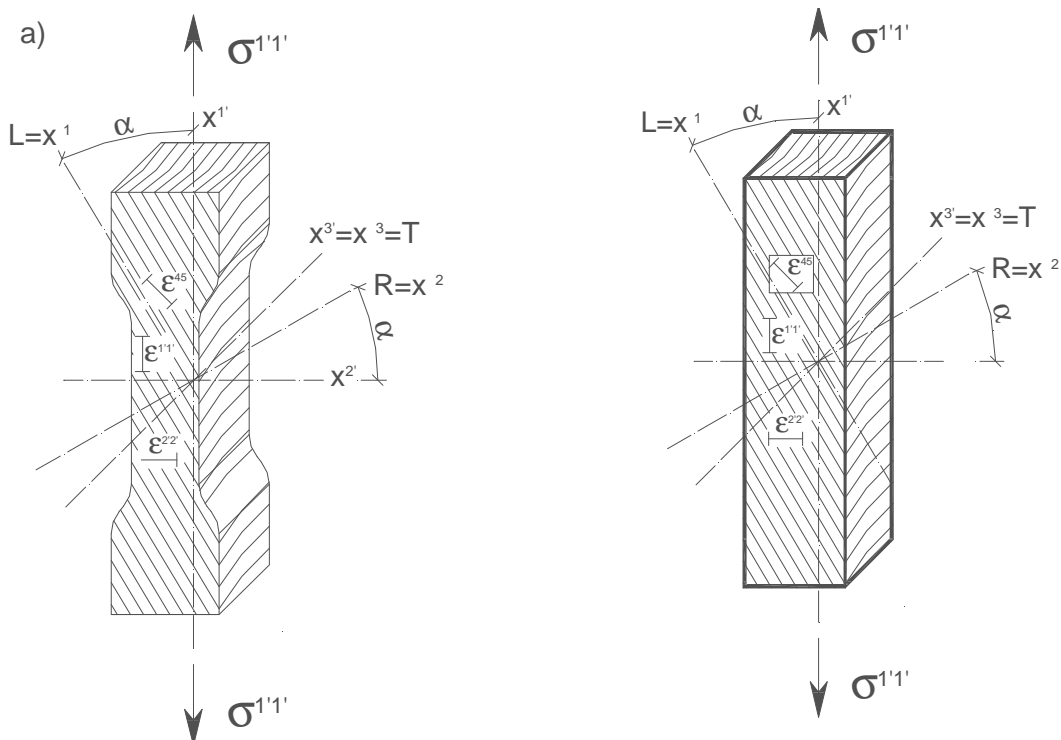
Abban a speciális esetben, ha a próbatestet $\alpha = 45^\circ$ -os orientációval alakítjuk ki, akkor az előbbi egyenletbe az α - t behelyettesítve kapjuk meg a következő összefüggést:

$$G_{ij} = \frac{\sigma^{i'i'}}{2 \cdot (\varepsilon_{i'i'} - \varepsilon_{j'j'})}$$

Ilyen speciális orientáció esetén tehát elegendő két irányban mérni a ható erőhöz tartozó alakváltozást az anatómiai fősíkhhoz tartozó G meghatározásához.

A kutatás első szakaszában több száz bevezető mérést csináltunk. Ezeket a méréseket lucfenyőből (*Picea Abies*) kialakított húzó próbatesteken végeztük, mindhárom anatómia fősíkban. A terhelést egy univerzális anyagvizsgáló berendezés (FPZ-100) biztosította, míg az alakváltozás méréséhez a videoóextenzométert és nyúlásmérő-bélyegeket használtunk.

Az optikai alakváltozás-mérő berendezés beállításainak alapos megismerése, összehangolása a terhelő berendezéssel sok problémával és idővel járt a felmerülő nehézségek miatt – az alakváltozás-feszültség görbék jellege nem voltak megfelelőek. A hibák megállapításra 0° és 45° -os orientációjú fenyő próbatestekkel, illetve bicikli



Húzó és nyomó próbatetek kialakítása faanyag nyíró-rugalmassági modulusának normál-igénybevétellel történő meghatározására

gumi belsővel is hajtottunk végre húzó vizsgálatokat, miközben mértük az egymásra merőleges, kétirányú alakváltozást.

A kutatás második szakaszában a lucfenyő (*Picea Abies*) húzó próbatetekből 97 darabos mintát gyártottunk le az LR anatómia fősíkhöz tartozó nyíró-rugalmassági modulus meghatározásához. A mérések kivitelezésre két helyszínen is sor került. Először Svájcban, az ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) Zürich laboratóriumában. Ezúttal is köszönetemet fejezem ki Prof. Peter Niemznek és a Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézet doktoranduszának, Garab Józsefnek. Prof. Niemz engedélyt adott arra, hogy az itthon elkészített és kiküldött próbatesteinket a zürichi intézetben rendelkezésre álló technikával is megvizsgálhassuk. A terhelő erőt egy ZWICK univerzális terhelő-berendezés biztosította, míg a kétirányú alakváltozás méréséhez a DIC-2D optikai rendszert alkalmaztuk. A méréseket roncsolásmentes módon, a tönkremeneteli határ alatt végeztük el, lehetőséget biztosítva ezzel a soproni mérésekre. Ugyanezen próbatesteket idehaza is alávetettük a húzó vizsgálatoknak. A terhelő erőt az FPZ-100 anyagvizsgáló berendezés biztosította, az alakváltozás méréséhez az ME-46 videoextenzométert használtuk.

A kutatómunka harmadik, befejező szakaszában Kőris (*Fraxinus Excelsior*) faanyagból alakítottunk ki összesen 175 db húzó és nyomó próbatestet. Szükségesnek

tartottuk, hogy egy alkalmasan kiválasztott fafaj mind a három anatómiai fősíkjához tartozó nyíró-rugalmassági moduluszát is meghatározzuk. E mérések során kívántunk meggyőződni az elméleti háttér helyességéről. A normálfeszültséget nem csak húzó, hanem nyomó igénybevétellel is létrehoztuk, hiszen a mérés –az elmélet szerint – mindkét igénybevételre működik. Ugyanazon mintadarabból, egymás mellől került kivágásra húzó és nyomó próbatest. A méréseket Sopronban végeztük el az FPZ-100 és ME-46 videoextenzométer alkalmazásával.

Az adatok feldolgozásához, értékeléséhez és összehasonlításához mindhárom esetben az Excel táblázatkezelő programot használtam.

4. Az eredmények összefoglalása

Az eredmények ismeretében kijelenthető, hogy az orientációs elmélet alkalmas anizotrop anyagok anatómiai fősíkjaihoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszainak a meghatározására. Ezt igazolja a mérési adatok statisztikai feldolgozása és irodalmi értékekkel történt összehasonlítása is. Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy az alakváltozás mérés technikai háttere csupán a kétparaméteres modell alkalmazását tette lehetővé.

Mérési eredmények összefoglalása a lucfenyő L-R síkhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszára

(u=12%, $\rho_{\text{átlagos}} = 370 \text{ kg/m}^3$)	G_{LR} [MPa]	
	DIC-2D	Videoextenzométer
Próbatestszám [db]		97
Értékelések száma [db]	94	76
Átlagos sűrűség [kg/m ³]		370
Átlag [Mpa]	519,7	410,7
Szórás [Mpa]	55,05	216,60
Max. [Mpa]	764,40	944,30
Min. [Mpa]	443,70	101,40
CV [%]	10,59	52,73
Átlagos R ² [1]	0,995	0,835

Mérési eredmények összefoglalása a kőris R-T síkhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszára

(u=12%, $\rho_{\text{átlagos}} = 670 \text{ kg/m}^3$)	G_{RT} [MPa]	
	húzás	nyomás
Próbatestszám [db]:	35	28
Értékelések száma [db]:	33	28
Átlagos sűrűség [kg/m ³]:		670
Átlag [MPa]:	284,0	310,7
Átlag (húzás-nyomás)[MPa]:		297,35
Szórás [MPa]:	63,6	66,7
Max [MPa]:	418,5	551,2
Min [MPa]:	165,8	217,7
CV [%]:	22,4	21,5
Átlagos R ² [1]:	0,911	0,980

Mérési eredmények összefoglalása köris L-R síkhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszára

(u=12%, $\rho_{\text{átlagos}} = 670 \text{ kg/m}^3$)	G_{LR} [MPa]	
	húzás	nyomás
Próbatestszám [db]:	28	28
Értékelések száma [db]:	27	28
Átlagos sűrűség [kg/m ³]:	670	
Átlag [MPa]:	1116,6	921,1
Átlag (húzás-nyomás)[MPa]:	1018,85	
Szórás [MPa]:	333,6	166,8
Max [MPa]:	2007	1181
Min [MPa]:	461,6	413,3
CV [%]:	29,9	18,1
Átlagos R^2 [1]:	0,876	0,978

Mérési eredmények összefoglalása köris L-T síkhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszára

(u=12%, $\rho_{\text{átlagos}} = 670 \text{ kg/m}^3$)	G_{LT} [MPa]	
	húzás	nyomás
Próbatestszám [db]:	26	30
Értékelések száma [db]:	24	30
Átlagos sűrűség [kg/m ³]:	670	
Átlag [MPa]:	806,6	1042,7
Átlag (húzás-nyomás)[MPa]:	924,65	
Szórás [MPa]:	241,4	189,0
Max [MPa]:	1531	1456
Min [MPa]:	511,7	723,5
CV [%]:	29,9	18,1
Átlagos R^2 [1]:	0,865	0,986

Úgy vélem, hogy az orientációs elmélet alkalmazásának további bizonyítása abban az esetben lehetne teljes, ha az infrastrukturális háttér lehetővé tenné olyan alakváltozás-mérő berendezés alkalmazását, amely egyszerre három irányban lenne képes mérni a fajlagos hosszváltozást. Ebben az esetben a közvetett módszer három-paraméteres modelljét választjuk, azaz a normálfeszültség és az anatómiai főirány közötti szöveget 45°-tól eltérően is felvehetnénk. Ennek már a próbatest-gyártás során is nagy előnye lenne. A három fajlagos alakváltozás mérésének pontossága pedig biztosítéka az adott fősíkhöz tartozó nyíró-rugalmassági modulusz pontos meghatározásának. Az ilyen módon nyert modulusz valódi anyagjellemzőnek tekinthető, amely alapvetően független a vizsgálati technológia kivitelezési formájától.

Tézisek

1. tézis

Elméleti megfontolások és kísérleti eredmények alapján megállapítottam, hogy a napjainkig alkalmazott közvetlen vizsgálati módszerek nem alkalmasak az izotrop és anizotrop anyagok nyíró-rugalmassági modulusának, mint tiszta anyagjellemzőnek az egyértelmű és széles körben elfogadott meghatározására. A közvetlen módszerekkel meghatározott nyíró-rugalmassági modulus az alkalmazott kísérleti technika függvénye, ilyen módon nem valódi anyagjellemzőt kapunk, hanem a kísérleti technikára jellemző moduluszt. A különböző technikákkal meghatározott nyíró-rugalmassági értékek egymással nem kompatibilisek, egy adott kísérleti technika legfeljebb a különböző kezelések nyíró-rugalmassági moduluszra gyakorolt befolyásoló hatásának vizsgálatára alkalmazhatók.

A közvetlen módszerek hátrányos tulajdonságai:

a/ Tiszta nyírás létrehozása egy előre kijelölt keresztmetszetben ritkán sikerül maradéktalanul. Főleg a régebben alkalmazott módszereknél járulékos igénybevételként kisebb-nagyobb hajlító-nyomaték is ébred, azaz a nyírási síkon a nyírófeszültségek mellett, a nyírási síkra merőlegesen, normálfeszültségek is keletkeznek (azaz a feszültségi állapot összetett és nem tiszta nyírás), ami meghamisítja a mérési eredményeket.

b/ Néhány újabban kidolgozott módszernél a tiszta nyírás elvileg megvalósítható, de még ilyen esetekben sem lehet elérni, hogy a nyírófeszültség, ill. a nyírási deformáció eloszlása a nyírási réteg hossza mentén egyenletes legyen. A pontos eloszlás meghatározása igen körülményes, ezért pontatlan (pl. egyéb anyagjellemzőket kellene ismerni a nyírási réteg környezetében)

c/ A nyírási szögváltozás méréséhez általában bonyolult berendezésekre van szükség. Általában nem is szögváltozást mérnek, hanem alkalmasan választott irányokban a fajlagos hosszváltozásokat. Az átszámítási technika újabb pontatlanságokhoz vezethet.

d/ Anizotrop testek esetén bizonyos orientációkban a nyíró-rugalmassági modulusz mérése a közvetlen módszerekkel el sem végezhető.

2. tézis

Anizotrop testek rugalmassági alapegyenleteinek felhasználásával szakirodalom alapján levezettem egy olyan összefüggést (közvetett módszer, orientációs elmélet), amelynek kísérleti megvalósításával meghatározhatók az anatómiai, ill. szerkezeti fősíkokhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszok. Az eljárás a közvetlen módszerek hátrányainak jelentős részét kiküszöböli.

A közvetett módszer előnyei:

a/ Nincs szükség különleges alakú próbatestre és bonyolult befogó berendezésre.

b/ Az alakváltozási és feszültségi állapot a befogópofáktól elegendően távol a próbatest nagy részén egyenletes eloszlású.

c/ Nem kell szögváltozást mérni, csupán hosszváltozást három, speciális esetben két irányban.

3. tézis

Az orientációs elmélet alapján húzó vizsgálatokat végeztem lucfenyő próbatesteken. A mérési adatok alapján meghatároztam a lucfenyő LR anatómiai fősíkhöz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszát a videoextenzométer és a DIC-2D alakváltozás-mérő eszköz alkalmazásával.

4. tézis

Az orientációs elmélet alapján húzó és nyomó vizsgálatokat végeztem kőris próbatesteken. A mérési adatok alapján meghatároztam a kőris valamennyi anatómiai fősíkjához tartozó nyíró-rugalmassági moduluszait a videoextenzométeres alakváltozás-mérő eszköz alkalmazásával.

5. tézis

Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy az orientációs elmélet alkalmas anizotrop anyagok nyíró-rugalmassági moduluszának a meghatározására.

A vizsgálatok során felmerült problémák arra utalnak, hogy érdemes lenne próbálkozni a közvetett módszer három-paraméteres modelljével, azaz a normálfeszültség és az anatómiai főirány közötti szöget nem 45° -nak választjuk. Ilyenkor ugyan három irányban kell mérni a fajlagos hosszváltozást, de ezek egyike sem lesz nagyon kicsi érték, így meghatározásuk pontosabb. A három fajlagos alakváltozás pontossága pe-

dig a biztosítéka az adott fősíkhoz tartozó nyíró-rugalmassági modulusz minél pontosabb meghatározásának. Az ilyen módon nyert modulusz valódi anyagjellemzőnek tekinthető, amely független a vizsgálati technológia kivitelezési formájától. E megoldás hátránya, hogy olyan alakváltozás-mérési technikát kell alkalmazni, amely képes egyidejűleg három irányban mérni a fajlagos hosszváltozást. Ezek a műszerek napjainkban meglehetősen drágák.

6. tézis

A kétparaméteres nyíró-rugalmassági modulusz meghatározásának elméleti vizsgálatánál bebizonyítottam, hogy a Poisson tényező éppen a 45° -os orientációnál kicsi értékeket vesz fel (sőt, kis negatív értéket is felvehet). Ez a megállapítás a keresztirányú fajlagos hosszváltozás mérését igen pontatlanná teheti, és így a G-modulusz értékében jelentős hiba keletkezhet. Ennek kiküszöbölésére meg kell vizsgálni a 45° -tól eltérő orientációjú próbatestek használatának lehetőségét. Ehhez olyan mérőberendezésre van szükség, amely megengedi az egyszerre háromirányú fajlagos alakváltozás mérését.

7. tézis

A közvetett nyíró-rugalmassági modulusz a tapasztalatok alapján nagyon érzékeny a kísérleti körülményekre. A vizsgált fafajtól függően az alkalmazott erők és deformációk kicsinyek, ami mindkettő mérésének pontosságát befolyásolhatja. Kis erőknél az ékpofás megfogásban a próbatest megcsúszik, ezért az alakváltozási diagram szálkás alakot vesz fel, az összetartozó feszültségi alakváltozási értékpárok kitérése jelentős. Szorítópofás megfogásnál a próbatest megcsúszása nem következik be. A befogó pofa jelentőségére utal az is, hogy kőris vizsgálatainknál a nyomással kapott nyíró-rugalmassági modulusz értékek szórása 18 % volt, míg ugyanez az eredmény húzásnál 30% volt.

A dolgozat témájához kapcsolódó publikációk:

1. Karácsonyi, Zs. (2008)- A faanyag anatómiai fősíkokhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszainak kísérleti meghatározása, konferencia-előadás – III. Regionális Természettudományi Konferencia, Szombathely, 2008. január 31,
2. Karácsonyi, Zs. (2009): A faanyag anatómiai fősíkokhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszának meghatározása, Faipar, 57, 5-10.,
3. Karácsonyi, Zs. (2009)– Determination of shear moduli of wood using normal stress, 26th Danubia-Adria Symposium, Mountanuniversität Leoben (ISBN 978-3-902544-02-5), 101-102,
4. Karácsonyi, Zs., Garab, J. (2010): Determination of the shear modulus of European ash (*Fraxinus excelsior* L.) – The 4th Conference on Hardwood Research and Utilisation in Europe, Sopron, May 17-18. 2010 (ISBN 978-963-9883-52-9), Poster Session 1, 14-18,
5. Karácsonyi, Zs. (2011): Anizotrop anyagok nyíró-rugalmassági moduluszának meghatározása az orientációs elméleten alapuló közvetett módszerrel - a kőris (*Fraxinus excelsior*) faanyagon végzett kísérletek bemutatása. „XI. Magyar Mechanikai Konferencia (MaMeK 2011), 2011. augusztus 29-31, Miskolc,
6. Karácsonyi, Zs. (2011): Anizotrop anyagok nyíró-rugalmassági moduluszának meghatározása - kőris (*Fraxinus excelsior*) és lucfenyő (*Picea abies*) faanyagokon végzett kísérletek bemutatása, Faipar, (megjelenés alatt),
7. Karácsonyi, Zs., Garab, J. (2011): Optical systems application to determine deformations – orientation method application to determine shear modulus - The 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sopron, Hungary, (megjelenés alatt)
8. Karácsonyi, Zs. (2011): Determination of the shear modulus of anisotropic materials - application normal stress, experiment by Common ash (*F. excelsior*) - 28th Danubia-Adria Symposium (DAS2011) in Siófok, Hungary, (megjelenés alatt)

Egyéb publikációs tevékenység:

1. Hantos, Z., Karácsonyi, Zs. (2007): Fa bordavázás épület hőátbocsájtási tényező számítása, Faipar, 55, 28-32.,
2. Karácsonyi, Zs. - Az új hőtechnikai előírások használata a faépületeknél, konferencia-előadás – Faépítészeti Konferencia, Sopron, 2007. szeptember 6.,
3. Dr. Bejő László, Dr. Szabó Péter, Dr. Andor Krisztián, Sági Éva, Hantos Zoltán, Karácsonyi Zsolt (2007) – Faépítés (Fa az építészetben-DIGIT-1-2005-0001), digitális tankönyv (www.tankonyvtar.hu/konyvek/faepites/faepites) - Educatio Kht., Hallgatói Információs Központ,
4. Karácsonyi, Zs. (2008): Boronafalás lakóépület tervezése – energetikai vizsgálata, Magyar Asztalos és Faipar, Kutatás és fejlesztés a faiparban – Tudományos melléklet 5, 26,
5. Hantos, Z., Karácsonyi, Zs. (2009): A hőátbocsájtási tényezők számítása egy fa bordavázás épület esetén II., Faipar, 56, 5-10.,
6. Karácsonyi, Zs. (2009) – Energiatakarékos faházak, konferencia-előadás – Faépítészeti Konferencia, Sopron, 2009. szeptember 3.,
7. Garab, J., Karácsonyi, Zs. (2010): Engineering strength of European ash (*Fraxinus excelsior* L.) – The 4th Conference on Hardwood Research and Utilisation in Europe, Sopron, May 17-18. 2010 (ISBN 978-963-9883-52-9), Poster Session 1, 35-39,
8. Kánnár, A., Karácsonyi, Zs., Garab, J. (2010): Influence of climate change on mechanical properties of hardwood – The 4th Conference on Hardwood Research and Utilisation in Europe, Sopron, (ISBN 978-963-9883-52-9), Scientific Oral Session 1, 106-112,
9. Garab, J., Karácsonyi, Zs., Kánnár, A. (2010) Influence of the carbon dioxide emissions on selected mechanical properties of wood. 9th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Trieste, Italy (Poster), ISBN 978-88-95940-30-4, 231-234
10. Dr. Tolvaj László, Dr. Kánnár Antal, Dr. Barta Edit, Karácsonyi Zsolt, Garab József (2010); A légköri széndioxid koncentráció növekedésének hatása a faanyag fizikai és mechanikai tulajdonságaira. „A fa, mint a fenntartható fejlődés alapanyaga” Konferencia előadás, Sopron, 8
11. Karácsonyi, Zs. (2010); Mérnöki faépítészet. „VIII Faépítészeti Konferencia” – Konferencia előadás, Sopron, 10,
12. Dr. Kánnár Antal, Dr. Barta Edit, Karácsonyi Zsolt, Garab József, Dr. Tolvaj László (2011); A légköri széndioxid koncentráció hatása a faanyag fizikai és mechanikai tulajdonságaira. „A fa és a fafeldolgozás szerepe a klímavédelemben” Konferencia előadás, Sopron, 18