

A fa nedvességtartalmának mérése NIR lézer diódák alkalmazásával

Wood Moisture Content Determination Using NIR laser

Bejő László^a, Ahmed Altaher Omer^b, Divós Ferenc^c

^a egyetemi tanár, Soproni Egyetem, Faipari és Műszaki Intézet, bejo.laszlo@uni-sopron.hu

^b PhD hallgató, Soproni Egyetem, Faipari és Műszaki Intézet, ahmed.almash@gmail.com

^c ügyvezető, Fakopp Enterprise Bt., divos@fakopp.com

Kulcsszavak

faanyag,
nedvességtartalom,
NIR,
lézer,
érintésmentes nedvességmérés

Absztrakt

A gyors, érintésmentes nedvességtartalom meghatározás sok területen fontos a gyakorlatban. A közeli infravörös tartomány egyes hullámhosszain a vízmolekulák hatékonyan el tudják nyelni a sugárzás energiáját, így ez a tartomány jól használható nedvességmérésre. Több ipari alkalmazás is létezik, amely ezen az alapon működik. Ezek a berendezések jellemzően forgó szűrők segítségével állítják elő a kívánt hullámhosszú infravörös sugárzást. Infravörös lézer alkalmazásával ezek a mérések, egyszerűbb, megbízhatóbb módon végezhetőek el, és kisebb a mechanikai meghibásodás veszélye.

E tanulmányban három különböző hullámhosszú NIR lézerforrást alkalmaztunk, négy különböző fafaj nedvességtartalmának a meghatározásához. A próbatesteket három különböző nedvességtartalomra kondicionáltuk, majd 1450, 1310 és 980 nm-es lézer fényforrás visszaverődési intenzitását vizsgáltuk a felületről egy erre a célra kialakított berendezés segítségével. A mért intenzitás értékek hányadosait összehasonlítottuk a kiszáritásos eljárással mért referencia nedvességtartalom értékekkel. Az egyes hányadosok alapján mért korrelációs együtthatók mellett többparaméteres lineáris becslő modelleket is felállítottunk az egyes fafajok esetében, az összes hányados felhasználásával. A modellek együtthatói eltérőek voltak a vizsgált fafajoktól függően. A determinációs együtthatók értékei 0,77 és 0,90 között változtak.

Keywords

wood,
moisture content,
NIR,
laser,
non-contact moisture
measurement

Abstract

Fast, non-contact moisture content determination is useful in many applications. Water molecules absorb electromagnetic waves of various wavelength, especially in the NIR range. Several industrial applications exist based on this principle. These instruments typically employ rotating filters to create the NIR light of the desired wavelengths. NIR lasers could achieve the same results, and make the applications simpler, more reliable and less prone to mechanical failure.

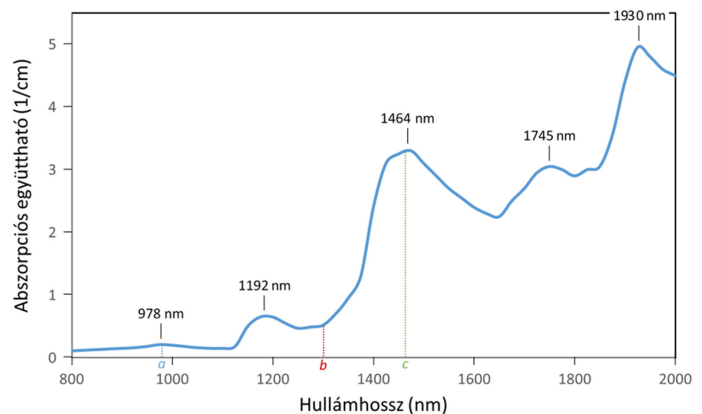
The reflection intensity of NIR laser light of three different wavelengths was used in this study to measure the moisture content of four different wood species. Specimens were conditioned to three different target moisture content values, and exposed to NIR laser light of 1450 nm, 1310 nm and 980 nm, measuring the intensity of the reflected light, using a specially constructed device. Ratios of the measured intensity values were correlated against the experimentally measured moisture content of the specimens. Multi-parameter linear prediction models were created for each species for the best possible moisture content estimation. The models were markedly different for the examined species, and the determination coefficient values varied between 0.72 and 0.94.

1. Bevezetés

A gyors, érintésmentes nedvességtartalom meghatározás sok területen fontos a faipari gyakorlatban, pl. a fűrészipar, ragasztott faszerkezet gyártás, bútorgyártás, faalapú termékek gyártása során, stb. Erre a célra jól alkalmazhatók az elektromágneses sugárzáson alapuló berendezések, különösen a közeli infravörös tartományban.

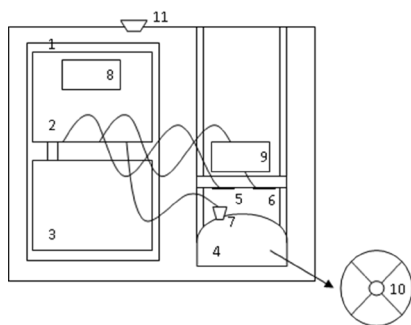
A vízmolekulák különböző sajátrezgési módusainak (az O-H kötések szimmetrikus és aszimmetrikus nyújtása és hajlítása) megfelelően bizonyos hullámhosszú sugárzások esetében különösen magas elnyelést mutatnak. Ezek rendre megfelelnek a 2,734 mm, 2,662 mm, illetve 2,269 mm-es hullámhossznak. Az ilyen hullámhosszú elektromágneses sugárzások, illetve azok felharmonikusait a vízmolekulák hatékonyan nyelik el, ami lehetőséget teremt a nedvességtartalom pontos meghatározására. Ez különösen jól működik a gáznemű fázisban (vízgőz, ld. 1. ábra). Az összefüggés kevésbé egyértelmű folyékony halmazállapotban, ahol a molekulák rezgése korlátozott. A helyzet még kevésbé egyértelmű a faanyag sejtfaiban található, ún. kötött víz esetében. A fa felületi nedvességtartalma és az adott hullámhosszú infravörös sugárzás elnyelése között ennek ellenére nagyon jó összefüggés található [1].

A (közeli) infravörös sugárzáson alapuló berendezéseket régóta használják az ipari gyakorlatban, faanyagok, illetve sok esetben faforgácsok nedvességtartalmának meghatározására. Számos gyártó kínál ilyen berendezéseket



1. ábra: A vízgőz abszorpció spektruma a közeli infravörös tartományban. (Saját szerk., Torgovnikov 1993 alapján. a, b, c – az alkalmazott lézerdiódák hullámhossza)

(pl. GreCon, NDC Technologies, US, JWII, Ausztrália, M.C.Tec, Hollandia stb). Ezek a berendezések jellemzően IR lámpákat használnak, amely elé forgó szűrőt szerelnek, amellyel adott hullámhosszú IR sugárzást állítanak elő. Míg ezek általában elfogadható pontosságú méréseket eredményeznek, viszonylag széles hullámhossz tartományban mérnek, és a forgó szűrőknek köszönhetően a mechanikai tönkremenetel veszélye viszonylag magas. NIR lézer sugárzás alkalmazásával ezek a hátrányok jól kiküszöbölhetőek.



2. ábra: Az NIR lézer mérési összeállítás működési vázlatja és fényképe
(1 – Elektronika; 2 – Áramforrás; 3 – Processzor; 4 – Parabola tükör; 5, 6, 7 – a, b és c dióda; 8 – Áramforrás hűtése; 9 – Diódák hűtése; 10 – Érzékelő dióda a parabolatükör fókuszpontjában; 11 – Soros kimenet)

A NIR lézerek alkalmazása a faanyag nedvességtartalmának a mérésére több előnyt is kínál. A lézerek természetüknél fogva nagyon keskeny hullámhossz tartományban sugároznak. Nincs szükség szűrőkre egy adott hullámhossz előállításához. A besugárzás iránya és a kibocsátott sugárzás intenzitása nagyon pontosan szabályozható.

A szakirodalomban az utóbbi időben számos cikk jelent meg az infravörös spektroszkópia alkalmazásáról, többek között a fa sűrűségének, szilárdsági tulajdonságainak, anatómiai jellegzetességeinek, kémiai összetételének és egyéb paramétereinek becslésével kapcsolatban [2-5]. A NIR spektroszkópia további alkalmazásai között megtalálható a fafajmeghatározás [6, 7], nedvességáramlás követése [8], a fa biodegradációjának vizsgálata [9], és számos egyéb terület.

A korábban bemutatott előnyök dacára az infravörös lézer alkalmazására a nedvességmérés területén más kevesebb példát találunk a szakirodalomban. Beguš és tsaí [10] NIR lézer szenzorokat használtak különböző polimerek felületi nedvességeloszlásának a vizsgálatára. Vizsgálataik alapján a minták nedvességtartalma az alacsony (2% alatti) tartományban nagy pontossággal (0,1%) becsülhető ezzel a módszerrel. Egy másik tanulmányban [11] 8 különböző hullámhosszú NIR lézer diódákból álló műszert használtak gabonafélék keménységének, nedvességtartalmának és viaszosságának a mérésére. A nedvességtartalmat 0,5%-os pontossággal tudták becsülni.

Han és Fang [12] tanulmányában elosztott visszacsatolású (DFB) lézer diódákat használtak nyár faanyag nedvességmérésére. Az eredmények nagyon jó egyezést mutattak a visszaverődő sugárzás energiája és a faanyag nedvességtartalma között ($r^2 > 0,9$), bár a szerzők rámutattak, hogy ez az eredmény egy fajfaj szíjácsának vizsgálatán, és viszonylag alacsony mintaszámú mérésen alapszik. További NIR lézeres tanulmányok, melyek a faanyag sejtszerkezetének és optikai tulajdonságainak a tanulmányozására [13], vagy bizonyos kémiai összetevők kimutatására irányultak a faanyagban [14], kevésbé relevánsak az itt bemutatott kutatás szempontjából.

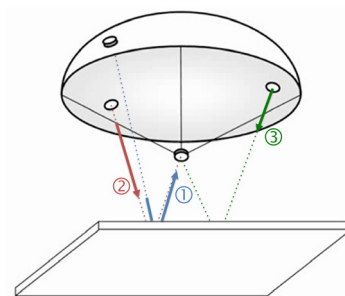
A közeli infravörös sugárzás, a sugárzás intenzitásától is függően az anyagba behatolva viszonylag gyorsan disszipálódik, így a visszavert sugárzás elsősorban az anyag felületi rétegeinek nedvességtartalmáról szolgáltat információt. Az itt bemutatott kutatás célja egy nagyon egyszerű mérési eljárás kifejlesztése, amely több különböző

fajfaj nedvességmérésére is alkalmazható. A nedvességmérés pontosságát több különböző fajfaj vizsgálatával kívántuk igazolni.

2. Anyagok és módszerek

A vizsgálatokat egy erre a célra speciálisan készített berendezés segítségével végeztük. Az infravörös jelet 3 lézer dióda szolgáltatotta, 980, 1310, és 1450 nm-es hullámhosszon (a cikkben rendre a, b és c betűvel jelölve). A faanyag felületéről visszaverődő jelek egy parabolatükörré érkeztek, és a tükör fókuszpontjába helyezett érzékelődióda mérte azok amplitúdóját. A berendezés működési sémáját és fényképét a 2. ábra mutatja.

A mérések során a berendezés 2 s-ként küldött 1-1 jelet mindhárom lézerdiódából, felváltva (3. ábra). A mérések során minden próbatesten minden alkalommal legalább 10 mérés történt, és a mért értékekből átlagot számítottunk. A mérési eredményeket erősen befolyásolja a próbatestek és a diódák távolsága. Esetünkben a műszer állandó, 60 mm-es távolságban volt a mért próbatestektől (4. ábra).



3. ábra: A parabolatükör a diódákkal és a mérés elvi vázlatja



4. ábra: NIR lézer mérési összeállítás

A vizsgálatokat 4 különböző fajtából készült próbatesten végeztük (magas kőris – *Fraxinus excelsior*, kocsányos tölgy – *Quercus robur*, erdei fenyő – *Pinus sylvestris* és Sapelli mahagóni - *Entandrophragma cylindricum*). A négy faj három markánsan különböző anatómiai struktúrát (keménylombos, fenyő és egzóta) képvisel, ami hatással lehet a mérési eredményekre. 12 db kőris és tölgy, 6 db fenyő és 11 db mahagóni próbatestet használtunk. A próbatestek mérete 20×80×200 mm volt.

A próbatesteket szobahőmérsékleten, különböző relatív páratartalomra beállított klímakamrában három különböző nedvességtartalmi értékre kondicionáltuk. Először 80%-os relatív páratartalommal tárolva, kb. 20% nedvességtartalomra, majd 50%-os relatív páratartalom mellett kb. 8%-os nedvességtartalomra, végül 0%-os relatív páratartalom (deszikkátorban) tárolva közel abszolút száraz értékre szárítottuk a próbatesteket. A kondicionálás során a próbatestek nedvességtartalmát folyamatosan nyomon követtük a tömegállandóság eléréséig. Az egyes kondicionálási lépéseket követően rendre elvégeztük a méréseket az NIR lézer berendezéssel, valamint mértük a próbatestek tömegét laboratóriumi mérleggel, 0,01 g pontossággal.

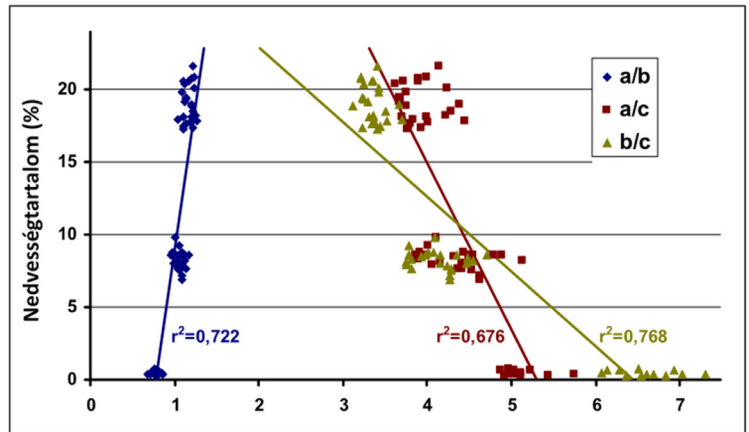
A referencia nedvességtartalom értékeket kiszáritásos eljárással állapítottuk meg. Ennek során a próbatesteket száritókamrában 24 h-n keresztül száritottuk 100±3 °C-os hőmérsékleten, a faiparban megszokott gyakorlatnak megfelelően. A száritást követően a próbatestek tömegét a korábbiakban leírtaknak megfelelően mértük.

3. Eredmények és értékelés

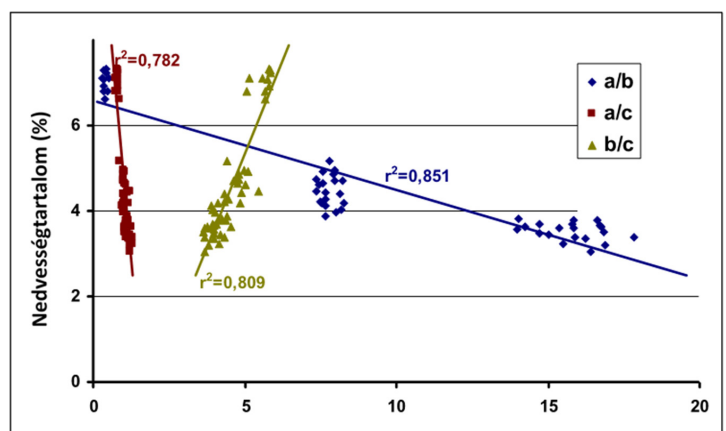
A mérések értékelése során a mért amplitúdók abszolút értékei (a, b, c) kevésbé alkalmasak a nedvességtartalom becslésére. Az alkalmazott lézerguság hullámhossz értékek közül a 980 nm és az 1450 nm-es hullámhosszak közel vannak a vízmolekulák sajátrezgési frekvenciáihoz, míg 1310 nm-nél viszonylag alacsony a vízmolekulák elnyelése (ld. 1. ábra). A nedvességtartalom meghatározásához ezért a különböző hullámhosszokon mért intenzitások relatív értékeit (azaz a jelamplitúdók hányadosát, a/b, a/c, b/c) alkalmaztuk becselő paraméterként.

Az értékelés során először közvetlenül vizsgáltuk az amplitúdók hányadosa és a nedvességtartalom közötti összefüggést. Az összefüggés jó közelítéssel minden esetben lineáris volt; a determinációs koefficiens értékek 0,61 és 0,85 között változtak fajfajtól és a számított hányadostól függően, ami elfogadható pontosságú becslést jelent faanyag esetében. Az eredményeket az 5. és 6. ábra szemlélteti tölgy illetve mahagóni anyag esetén.

A becslés pontosságának javítása érdekében a három becselő paraméter bevonásával többparaméteres lineáris regressziót végeztünk. A regresszió-analízist a Statistica® programmal végeztük el. Az 1. táblázat mutatja a felállított lineáris modelleket, és a hozzájuk tartozó determinációs koefficiens értékeket.



5. ábra: A kocsányos tölgy faanyagban mért amplitúdó hányadosok és a nedvességtartalom összefüggése



6. ábra: A mahagóni faanyagban mért amplitúdó hányadosok és a nedvességtartalom összefüggése

Mint az 1. táblázatból látható, a többparaméteres regresszió alkalmazásával felállított modellek nagy pontossággal becsülték a keménylombos és egzóta próbatestek nedvességtartalmi értékeit ($r^2 = 0,87 \dots 0,90$). Fenyő anyag esetében az összefüggés kevésbé volt szoros ($r^2 = 0,77$).

Érdekes eredmény, hogy az egyes becselő paraméterekhez tartozó koefficiensek markánsan eltérnek az egyes fajfajcsoportok között. Míg a két keménylombos faj esetében az együtthatók hasonlóak, a fenyő és az egzóta fajhoz tartozó koefficiensek nagymértékben eltérnek ezekről, és egymástól is. Az utóbbi esetében különösen szembetűnő az eltérés a keménylombosokhoz képest; a

1. táblázat: A különböző fajok nedvességtartalma és NIR paramétere közötti összefüggést leíró többparaméteres becselő modellek ($u = \text{nedvességtartalom, \%}$)

Kocsányos tölgy:	$u = 82,06 \frac{a}{b} - 18,12 \frac{a}{c} + 11,17 \frac{b}{c} - 44,07$	$R^2 = 0,90$
Magas kőris:	$u = 63,42 \frac{a}{b} - 14,44 \frac{a}{c} + 7,12 \frac{b}{c} - 23,16$	$R^2 = 0,87$
Erdei fenyő:	$u = -368,13 \frac{a}{b} + 49,1 \frac{a}{c} - 89,12 \frac{b}{c} + 674,66$	$R^2 = 0,77$
Mahagóni:	$u = 33,73 \frac{a}{b} - 8,41 \frac{a}{c} + 3,06 \frac{b}{c} - 0,90$	$R^2 = 0,89$

koefficiensek előjele rendre ellentétes. Ez valószínűsíti, hogy a NIR jelek visszaverődését a nedvességtartalom mellett jelentősen befolyásolják az egyes faanyagok mikroszerkezeti, anatómiai jellegzetességei is.

A fenti eredmények biztatóak a tekintetben, hogy az egy fafajcsoportba tartozó (lombos, fenyő, egzóta) anyagok vélhetően hasonlóan reagálnak az infravörös sugárzásra. Mivel azonban e vizsgálat során mindössze két lombos, egy fenyő és egy egzóta fafajon végeztünk méréseket, további mérésekre van szükség annak igazolására, hogy ezek a mérések elsősorban a fafajcsoportok közötti eltérésekből fakadnak-e, vagy az egyes fafajok közötti eltérések is jelentősen módosíthatják az együtthatókat (azaz az eljárást minden fafajra külön kell-e kalibrálni.)

4. Összefoglalás és következtetések

Kutatásunk során különböző hullámhosszú NIR lézer visszaverődési intenzitása alapján becsültük a faanyag nedvességtartalmát. A négy fafajon végzett kísérletek eredményei alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

- A különböző hullámhosszon mért visszaverődési intenzitás értékek hányadosai alapján a különböző fafajok nedvességtartalma eltérő, de elfogadható pontossággal becsülhető.
- A hányadosok kombinálásával generált többparaméteres lineáris regressziós modell kitűnő pontossággal illeszkedik a lombos és egzóta fafajok valós nedvességtartalmi értékeire, míg fenyő esetében az illeszkedés kevésbé szoros.
- A keménylombos fafajok esetén a többparaméteres regressziónál adódó együttható értékek hasonlóak, míg a fenyő és egzóta anyag koefficiensei markánsan eltértek a lombos anyagtól és egymástól is. További vizsgálatok szükségesek annak igazolására, hogy a különböző fafajcsoportok összevontan kezelhetők-e, vagy a fafaji sajátosságok eltérései miatt minden fafajra külön kell-e kalibrálni az eljárást.

Köszönetnyilvánítás

Jelen publikáció az „EFOP-3.6.1-16-2016-00018 – A felsőoktatási rendszer K+F+I szerepvállalásának növelése intelligens szakosodás által Sopronban és Szombathelyen” című projekt támogatásával valósult meg. A szerzők köszönik Miriam Bradley hozzájárulását a kísérletek elvégzéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Torgovnikov G. I.: 1993. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials (Springer Series in Wood Science); 196 S. ISBN 3-540-55394-0. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- [2] Inagaki, T.; Ahmed, B.; Hartley, I.D.; Tsuchikawa, S.; Reid, M.

2014. Simultaneous prediction of density and moisture content of wood by terahertz time domain spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 35(11): 949–961.
- [3] Karlinasari, L., M. Sabed, I.N.J. Wistara, Y.A. Purwanto. 2014. Near infrared (NIR) spectroscopy for estimating the chemical composition of (*Acacia mangium* Willd.) wood. *J. Indian Acad Wood Sci* 11:162–167 <https://doi.org/10.1007/s13196-014-0133-z>
- [4] Raturi, A., V. Kothiyal, P.D.Semalty. 2000. FT-NIR Spectroscopic Assessment of Compressive Strength of Wood of *Eucalyptus tereticornis*. Proc. 21st Int. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium., Freiburg, Germany, September 24-27, 2019. USDA FPL–GTR–272. pp. 341-357
- [5] Iki, T., T. Iwate, T. Fujimoto, Y. Hiraoka, Y. Takashima, E. Fukatsu. 2020. Estimating Microfibril Angle of S2 Layer Tracheids in Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) with Near Infrared Spectroscopy. Proc. 21st Int. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium., Freiburg, Germany, September 24-27, 2019. USDA FPL–GTR–272. p. 680 (Abstract only)
- [6] Russ, A., M. Fišerová, J. Gigac. 2019. Preliminary Study of Wood Species Identification by NIR Spectroscopy. *Wood Research* 54(4):23–32
- [7] Pan, X., J. Qiu, Y. Zhu, Z. Yang. 2000. Rapid Identification of Five Similar Wood Species of *Cinnamomum* Using Near Infrared Spectroscopy. Proc. 21st Int. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium., Freiburg, Germany, September 24-27, 2019. USDA FPL–GTR–272. pp. 325-332
- [8] Alkadri, A., D. Coquillat, O. Arnould, D. Jullien, J. Gril. 2019. TeraHertz Observation of Moisture Convection - Diffusion in Wood. Proc. 21st Int. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium., Freiburg, Germany, September 24-27, 2019. USDA FPL–GTR–272. pp. 317-324.
- [9] Stirling, R., T. Trung, C. Breuil, P. Bicho. 2007. Predicting Wood Decay and Density Using NIR Spectroscopy. *Wood and Fiber Science*, 39(3):414–423
- [10] Beguš, S., G. Begeš, J. Drnovšek, D. Hudoklin. 2015. A novel NIR laser-based sensor for measuring the surface moisture in polymers. *Sensors and Actuators A: Physical* 221(1):53-59. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.10.032>
- [11] Dowell, F.E., E.B. Maghirang, V. Jayaraman. (2009) Measuring Grain and Insect Characteristics Using NIR Laser Array Technology. Technical Note. *Applied Engineering in Agriculture*. 26(1):165-169. (doi: 10.13031/2013.29464)
- [12] Han, Y. és J. Fang 2020. Spectral Detection of Wood Moisture Content at 1899.703 Nm. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 598 012011
- [13] Tsuchikawa, S. és S. Tsutsumi. 2002. Application of Time-of-Flight Near-Infrared Spectroscopy to Wood with Anisotropic Cellular Structure. *Applied Spectroscopy* 56(7):869-876
- [14] Holmgren, A., B. Bergström, R. Gref és A. Ericsson. 1999. Detection of Pinosylvins in Solid Wood of Scots Pine Using Fourier Transform Raman and Infrared Spectroscopy, *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 19(1-2):139-150, DOI: 10.1080/02773819909349604