

Lucfenyő fűrészáru szilárdsági vizsgálata lézer alapú roncsolásmentes optikai eljárással

SZALAI László¹, PÖDÖR Zoltán¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Informatikai és Gazdasági Intézet

Kivonat

Manapság a fűrészáru gyors és pontos szilárdsági osztályozása egyre fontosabbá válik. A tradicionális vizuális minősítő eljárások nem adnak elég pontos eredményt, és függenek az emberi tényezőtől, a faanyagok roncsolásos vizsgálata pedig nem alkalmazható minden fűrészárun. Fejlesztettünk egy komplett eljárást, amely képes meghatározni a fenyő fűrészáru hajlítószilárdságát roncsolásmentes úton. A He-Ne lézer alapú eszköz képes előtölés közben pásztázni a fűrészáru felszínét kamerákkal, és az adatokat egy számítógépnek küldeni. A fa felszínére lézerpontok vannak rávetítve. A számítógépes szoftver meghatározza a göcs, korhadás elhelyezkedéseket, illetve szálfifutás anomáliákat a lézerpont alakjának változása alapján. A fűrészáru végleges hajlítószilárdsága statisztikai módszerekkel elemzett vektorhalmazból becsülhető meg. A módszer valós idejű eredményt ad. Nagy előnye ennek az eljárásnak, hogy az eredmény nem függ a fafelszín színváltozásaitól, mert a színváltozás legtöbb esetben rossz eredményt ad a szín alapú optikai elemzőrendszereknél. A fűrészáru mindkét oldali elemzése még pontosabb 3D-s göcs elhelyezkedést és méretbecslést eredményez a fűrészárun belül.

Kulcsszavak: szilárdsági osztályozás, roncsolásmentes vizsgálat, lézer, statisztikai adatfeldolgozás

Laser based optical nondestructive method for evaluating spruce timber strength

Abstract

Nowadays the fast and reliable strength classification of the timber is becoming more important. The traditional visual methods can not provide sufficient accuracy and are dependent on human factors. Destructive processes are slow and can not be used on every sample. We developed a complete technology, which is capable of determining the bending strength of spruce timber nondestructively. The He-Ne laser-based tool is able to scan the surface of the timber using a camera while feeding and transmitting the data to the computer. Laser spots are projected onto the timber surface. The computer software determines the knot locations, decays and grain anomalies based on the change of the laser spot's shape. The final strength of the timber is calculated by analyzing the sets of numerical vectors by various statistical methods. The method is real time. The big advantage of this method is that the results do not depend on color changes on the surface. The color change deceives the color-based optical systems in many cases. The analysis on the upper and bottom surface results in a more accurate 3D representation of the knot size and position inside the timber.

Keywords: strength classification, nondestructive investigation, laser, statistical data analysis

Bevezetés

Több szabvány is létezik a faanyag szilárdsági minősítésére Európában. E szabványok (EN 408, EN 338) egyre jobban előtérbe kerülnek az egyes termelőcégeknél, ugyanis ezen szabványok használata nélkül nehéz az európai piacra betörni. Az egyes fűrészárak szilárdsági osztályozása sok esetben még a hagyományos, emberi beavatkozást igénylő, vizuális eljárással történik, ami azt jelenti, hogy a minősítő munkás szemrevételezéssel dönti el, mennyi hibát tartalmaz a faanyag. E módszer hatékonysága nagymértékben függ az emberi tényezőtől, illetve a sebesség sem kielégítő a nagy mennyiségű faanyagot feldolgozó üzemekben. Viszonylag új megközelítés a roncsolásmentes fűrészáru-vizsgálat, amelynek a legnagyobb előnye, hogy a művelet során a faanyag nem roncsolódik.

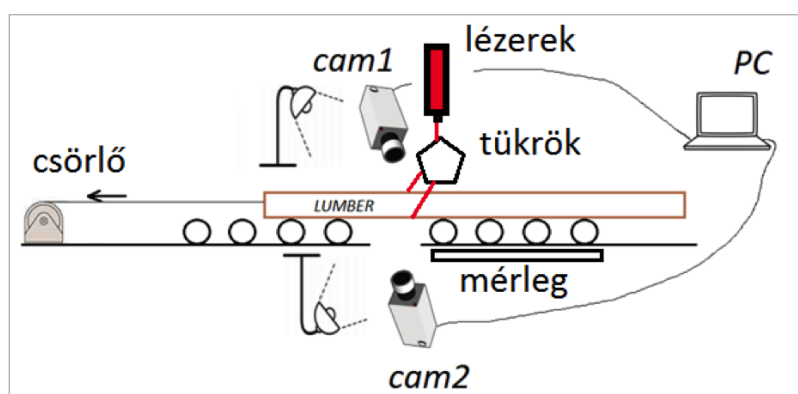
Tény, hogy a fűrészáru száliránya és a rostok kifutásának egyenetlenségei nagymértékben befolyásolják a szilárdságát (Tsoumis 1991). Korábbi kutatásaink (Szalai 2013) során már alkalmaztunk vizuális roncsolásmentes vizsgálatot. Ez a korábbi kutatás a felület színe alapján készített egy profilt a rajzolatról, majd osztályozta a fűrészáru szilárdságilag. Jó minőségű vágásfelületnél ez is megfelelő eredményt produkált, de ha elszíneződések, a vágásból adódó egyenetlenségek voltak a felszínen, akkor rossz eredményt adott. Ennek a kiküszöbölésére lézerrel lett bevilágítva a fűrészáru felszíne a rostirány meghatározásánál, majd a szóródás (scattering) elemzése alapján készült el az új profil. Ez sokkal pontosabb eredményt adott, mint az előző módszer. Több próbálkozás is volt már korábban a lézerpont besugárzásos módszerrel (Simonaho et al. 2004, Autolog 2015, Nieminen et al. 2012), illetve alkalmaztak már vonallézer-technológiát is (Åstrand 2014). A mi módszerünk valós időben, nagy sebességgel képes becsülni a szilárdsági minősítéshez szükséges paramétereit.

Anyagok és módszerek

Kutatásunk során 40 db gyalult oldalfelületű lucfenyő (*Picea abies*) pallót (10 cm x 5 cm x 2 m) használtunk alapanyagként, amelynek darabolása normál körfűrész technológiával történt. A fűrészáru átlagosan 18%-os nedvességtartalmú volt, ennek a meghatározása nedvességmérővel történt. A faanyag ránézésre aránylag egyenes volt, 5% alatt volt a csavarodása és a görbesége, így alkalmas volt arra, hogy vonszoló eszközzel precíziósan mozgassuk. A görbeséget az analizáló eszköz házának bemenete segítségével mértük. A laboratóriumi körülmények között elkészült szerkezet szimulálja a fűrészüzemben használatos előtoló eszközt. A rendszer alapfelépítése az 1. ábrán látható.

A fűrészáru egy rögzített görgősoron mozog hosszirányban, egy vonszoló eszköz segítségével. A csörlő egyenletes sebességgel húzza az anyagot. A görgősorba be van építve egy mérleg, amely méri a fűrészáru tömegét, illetve ismertek a méretei, ebből a szoftverünk képes kiszámolni a sűrűséget. A fűrészáru felszíne meg van világítva alulról és felülről is homogén lámpafénnyel. A felületre vörös színű He-Ne lézerek segítségével lézerpontokat vetítünk, amelyeket egy féligáteresztő tükörrendszer oszt el. A tükrök legyártása, összeállítása és a szórási intenzitások kimérése a kutatásunk feladata volt. Segítségükkel csökkenthető a rendszer alapanyagköltsége. Hasonló megoldást korábban is alkalmaztak már faanyag besugárzására (Jolma és Makynen 2008). A lézerek fényének hullámhossza 633 nm, az erőssége 2 mW volt. Ez a lézer spektrálisan nagyon tiszta. Meghatározott távolságra kerülnek egymás mellé a lézerpontok két vonalban a felületen. Teljesen homogén anyag esetében a He-Ne lézer kör alakú pontot rajzol a felületre, ennek átmérője kb. 6 mm. A fában lévő tracheidák torzítják a lézerpont alakját, aminek következtében egy ellipszis alak rajzolódik ki (Hu és tsai. 2004, de Oliveira Faria és tsai. 2008). Ez látszik a 2. ábrán.

Két kamera pásztázza a vágott felületet alulról és felülről, a kamerák képe pedig egy számítógéphez továbbítódik, amely elemzi azt. A kamerák jobb minőségű webkamerák, kereskedelmi forgalomban egyszerűen vásárolhatók. Specifikációjukban megjelenik a HD felvételi minőség, és a 15 frame/sec felvételi sebesség. A kamerák felbontása 960x720 HD pixel volt



1. ábra Lézer alapú szilárdsági osztályozógép alapfelépítése

Figure 1 The setup of the laser based lumber surface analyzer



2. ábra Rávilágított és szórt lézerpontok a felületen

Figure 2 Scattered laser dots on the surface

és átlagban 2700 Kbps bitráta sebességgel dolgoztak. A felvett stream-eket egy négymagos processzorral szerelt számítógép rögzítette, és a kiértékelést is ez végezte. Természetesen ez egy laboratóriumi hardver összeállítás, ipari körülmények között professzionális eszközök felhasználásával történhet az elemzés.

Szilárdsági osztályba sorolás, minősítés

A lézeres vizsgálatot követően EN408-as szabványnak megfelelő hajlítószilárdsági vizsgálatot hajtottunk végre minden próbatestenen. Meghatároztuk a maximális törőerőt (f_{max}), a rostirányú rugalmassági modulus (E_{mg}), a hajlítószilárdságot (f_m) és sűrűséget (ρ). Az EN338-as szabványban az utóbbi három paraméter segítségével a szilárdsági osztályokba sorolás megtörtént, azaz a három paraméter alapján besorolt osztályok közül a legkisebb érték adta a fűrészáru végleges szilárdsági osztályát. Megállapítottuk, hogy a sűrűség az esetek 67%-ában minősít, 23%-ban a rugalmassági modulus alapján felülminősíthetők az egyedek, és 10%-ban alulminősíthetők. A hajlítószilárdság az esetek 0,2%-ában minősített. Az adatokból látszik, hogy az esetek 33%-ában szükség van a két szilárdsági paraméter (f_m , E_{mg}) becslésére is, ez nagyobb mennyiségű fűrészárúnál jelentős költséget jelenthet.

Feldolgozás valós időben

Kizárólag lucfenyő faanyagban teszteltük a rendszert, mivel ennek az anyagnak a rajzolata felel meg leginkább a követelményeknek. A tesztelt palló 70%-a sugármetszet, 30%-a húrmetszet volt, jól látszó rajzollal. A vágásfelületen jelentkező göcsök rajzolatra gyakorolt hatása jelentős. A hibamentes faanyagban, normális szálkifutás esetében jellemzően párhuzamos vonalakat látunk a felületen. A göcsös, illetve szabálytalan szálkifutású faanyagban megjelennek a párhuzamostól eltérő rajzolati minták is, többnyire jól lokalizálhatóan. Mint már említettük, az előtolás alatt lévő fűrészáru felszínét pásztázó kamerák elkészítik mindkét oldalról a videofelvételt, amit majd az általunk fejlesztett számítógépes szoftver feldolgoz.

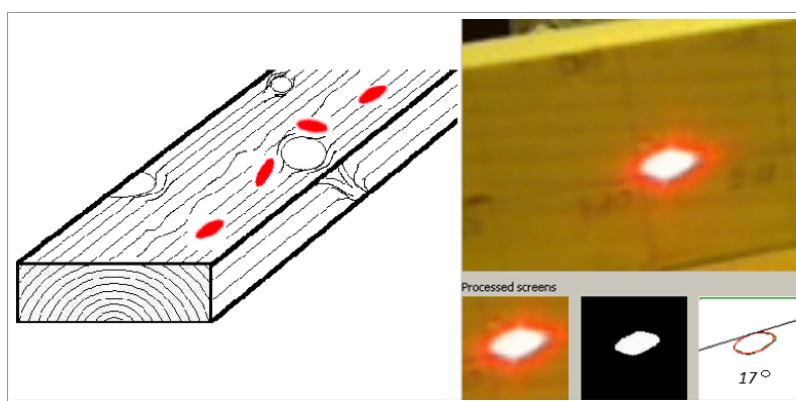
A 3. ábrán látható, hogy az adatsorosítás a felületre vetített ellipszis nagytengelyének változására épül. A szórt ellipszis nagytengelyének a fűrészáru rostirányához viszonyított szöge pontosan jelzi a fűrészáru adott szeletének szálkifutás irányát. Emellett figyelembe vesszük az ellipszis nagytengely (E_b) és kistengely (E_s) nagyságának arányát (r , ratio) is.

$$r = \frac{E_b}{E_s} \cdot 10 \quad [1]$$

Ha a 2. ábrán látható összes pontra meghatározzuk ezt, jó felbontással átfogó képet és adatsort kapunk a teljes fűrészáruról. Ahhoz, hogy képesek legyünk az anomáliák mindkét oldalon történő pontos detektálására, a fűrészáruk mindkét oldalára elvégeztük a folyamatot. Ez szükséges ahhoz is, hogy a deszkán átmenő göcsök helyét és méretét is képesek legyünk meghatározni. A feldolgozó szoftver első lépésben színszűréssel pontosítja az ellipszisek formáját, majd illesztéssel a szögüket és a nagytengely hosszakat. A 15 fps-es mintavételezés miatt nagyszámú méréspont keletkezik mindkét oldalon, összesen 16 sorban, amelyek feldolgozása a kulcsa a hajlítószilárdság becslésének.

Adatfeldolgozás és paraméterek becslése

Mint már említettük, az EN338-as szabványban a szilárdsági osztályba sorolás több paramétertől függ. A sűrűséget az általunk fejlesztett eszköz mérleggel történő tömegmérés segítségével meghatározza, a másik két paramétert pedig az adathalmazok feldolgozása becsli. Így az adatfeldolgozási folyamat célja a rostirányú rugalmassági modulus (E_{mg}) és a hajlítószilárdság (f_m), mint függő paraméterek meghatározása a közvetlenül mért és az ezekből generált további jellemzők, mint független adatok alapján.



3. ábra Göcsök hatása a lézerpontra és a szórt ellipszis „szöge”
Figure 3 The scattered laser dot and the "angle" of the ellipse

A 4. ábra mutatja a tényleges elemzési folyamatot. Két szoftver végzi a tényleges adatfeldolgozást. Az első szoftver a lézerekép adatsorosítását végzi, a második pedig az adatsorok feldolgozását és kiértékelését. Mindenképpen olyan módszert kerestünk, amely képes megfelelően kezelni az érvénytelen adatokat, amelyek a mérési hibákból következnek.

Az adatfeldolgozás első lépéseként az adatsorokat előkészítettük az elemző folyamat számára. Ez egyrészt az egyértelműen hibás adatok (99999-es értékek) adathiánnyá (NA) konvertálását jelentette, másrészt simítást alkalmaztunk a nyers mérési adatokon. A simítást mozgóátlagolással valósítottuk meg, melynek rendjét $n=5$ -ben határoztuk meg a feladat célja és a mérési adatsorok struktúrája alapján.

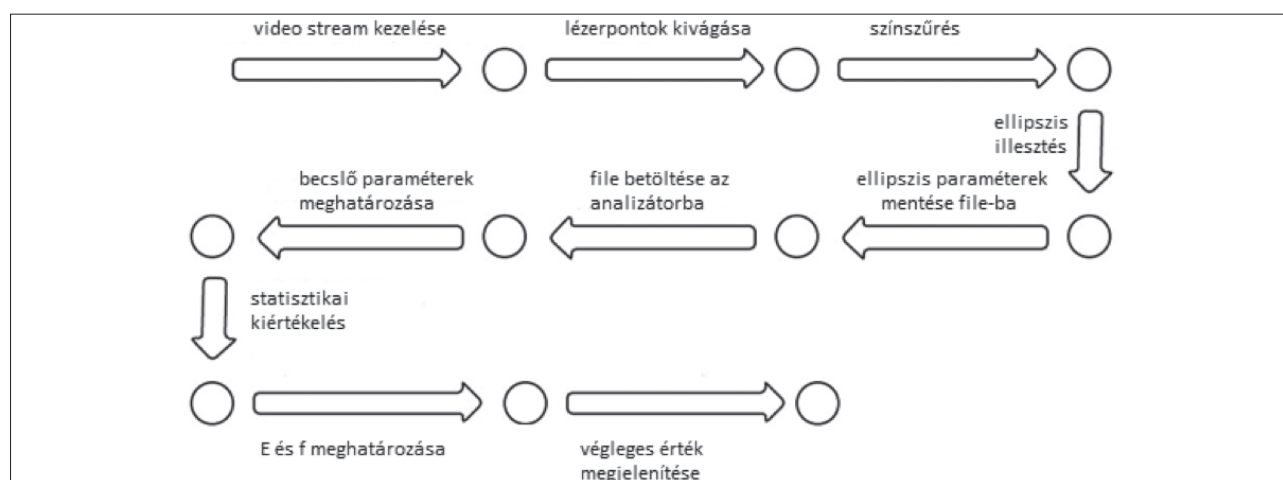
A korábban említett ratio (r , ld. [1]) értékek nagysága utal arra, hogy a hozzájuk tartozó egyéb mért értékek esetében mekkora lehet a hibás mérési adat valószínűsége. A mérési adatok áttekintése során azt tapasztaltuk, hogy a 10-11-es ratio értékek esetében gyakran tapasztalható, hogy a további mért értékek nem reálisak, ezért a detektáló folyamatban definiáltunk egy, a ratio-ra vonatkozó küszöbértéket, mely alatti r értékek esetében az adott rekord adatait nem vesszük figyelembe az elemző folyamatban.

Végeztünk egy előkészítő elemzést, melynek során azt vizsgáltuk, hogy a négy mért paraméter (ellipszis szélesség, magasság, ratio és szög), mint egyszerű független változók, kapcsolatba hozhatóak-e a vizsgálni kívánt jellemzőkkel (E_{mg}, f_m), mint függő paraméterekkel. Ehhez képeztük minden egyes deszkára a mért paraméterek adott elemre jellemző átlagértékét. Így minden egyes deszkára $2 \cdot 4 = 8$ átlagérték adódott, négy-négy a vizsgált deszka egy-egy oldalára. Ezt a nyolc paramétert – mint független változókat – vetettük össze a két vizsgált jellemzővel, mint függő paraméterrel. Ehhez lépésenkénti többváltozós regressziót alkalmaztunk (Montgomery et al. 2012). A kapott modellek ugyan statisztikai értelemben szignifikáns kapcsolatot mutatnak, azonban a kialakított modellek mögé nehéz fizikai magyarázatot tenni, és a modellbe bevont paraméterek száma is magas statisztikai értelemben a vizsgált adatsor mintaszámához (40) képest.

Azt feltételezzük, hogy a deszkákon tapasztalható anomáliák alapján jobb paraméterek definiálhatóak a vizsgált jellemzők modellezése vonatkozásában. A deszkákban található anomáliák detektálására a rendszer által mért négy ellipszis paraméter közül (ellipszisek nagy- és kistengelyének hossza, ezek aránya és a nagytengely szöge) a szöget választottuk ki. Minden deszkára elkészítettük a szögértékek alapján az 5. ábrán látható profilt, amelyen megjelenítjük a mért szögekhez tartozó, szálirányt jelző vektorokat (a szög alapadatait is ötödrendű mozgóátlagolással simítottuk). Figyelembe véve a mérési adatsűrűséget, és az eredmény vizuális áttekinthetőségét, a szögadatokat hármasával átlagolva jelenítettük meg az ábrákon (5. ábra).

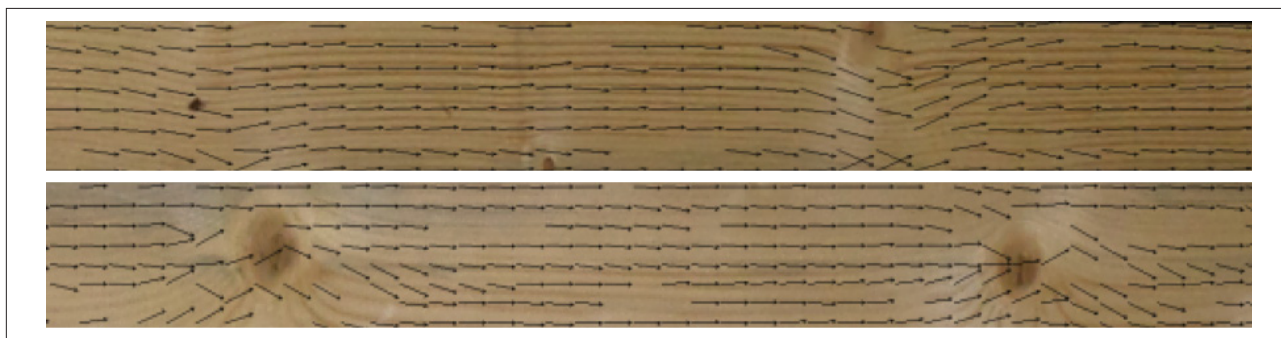
A vizsgált próbatestekre kapott ábrák vizuális áttekintése alapján megállapítottuk, hogy a szögértékek jól mutatják az anomáliák előfordulását.

Anomália ott fordul elő a deszkában, ahol az aktuális szög értéke egy adott küszöbnél nagyobb értékkel tér el a szögadatok középvértéktől. A küszöbértéket a kiugró adatok definiálásában ismert módszer alapján értelmeztük (Ramachandran and Tsokos 2009). Minden egyes deszka esetében minden szögadatsorra (deszkánként négy-négy) számítottuk az átlagot és a szórást, majd küszöbértékként az átlagtól a szórás megfe-



4. ábra A szilárdsági osztályba sorolás folyamata

Figure 4 Strength classification process



5. ábra Számított rostirány vektorok a próbatesteken

Figure 5 Calculated grain orientation vectors of the timber's surface

lelő konstansszorosával (ezt 1,5-nek választottuk, mint a statisztikában szokásos alapérték) való eltérés értékét határoztuk meg. Így azokat a szögadatokat tekintettük anomáliát jelzőnek egy adott deszka adott oldalán, amelyekhez tartozó ratio érték legalább 12, és melynek nagysága abszolút értékben meghaladja a fenti módon definiált küszöböt. Az így kinyert releváns szögadatok alapján képesek vagyunk az anomáliák detektálására, illetve azok bizonyos jellemzőinek meghatározására minden egyes deszka esetében.

Az anomáliákra az alábbi jellemzőket állítottuk elő: az anomáliák darabszáma, horizontális és vertikális pozíciója a deszkán, hosszúság és szélesség értékek, átéri-e a deszkát az anomália, vagy sem (3D tulajdonság), illetve egyedi deszka jellemző érték. A paramétereket cm-ben kifejezve állítottuk elő a deszka hosszának ismeretében, majd ahol ez értelmezhető volt, ott ezekből %-os formában is előállítottuk az adott jellemzőt. A függőleges pozíció esetében csak azt tartottuk relevánsnak, hogy a deszka szélén vagy közepén helyezkedik-e el a göcs (1. táblázat). Mivel a deszkák mindkét oldalára előállítottuk ezeket a paramétereket, így az anomáliák pozíciója alapján meghatározhatóvá vált, hogy az anomália keresztülmegy-e a deszkán, azaz hasonló pozícióban van-e mindkét oldalon.

Figyelembe kell ugyanakkor venni, hogy egy-egy egyedülálló releváns szögadat jellemzően nem anomáliára utal, hanem inkább a mérés technikából fakadó hibára, vagy a folyamat meglehetősen összetett felparaméterezéséből adódó hibás anomáliajelzésre. Ennek kezelésére jelen verzióban a felhasználó által definiálható, hogy mekkora legyen az a minimális, egymással szomszédos anomáliát jelző szög darabszám, amit anomáliaként detektálunk. Ez a megoldás a további változatokban fejlesztést, javítást igényel.

Az így kapott értékeket felhasználva további anomália jellemzőket is előállítottunk, mint a teljes göcsterület arány, illetve koncentrált göcsátmérő arány. Fontosnak ítéltük meg annak figyelembe vételét is, hogy az adott anomália a deszka szélén, vagy közepén helyezkedik-e el. Ennek figyelembe vételéhez horizontálisan három részre osztottuk a deszkát: a középső 50%, és a szélső 25–25%. Ennek megfelelően a teljes deszkára jellemző paraméterek mellett (1. táblázat) képeztük azoknak a deszka közepére, illetve periferiájára vonatkozó értékeit is (a felfedett anomáliák horizontális pozíciója alapján). Így összességében a deszkák egy-egy oldalára több mint 20 jellemző paraméter áll rendelkezésre.

Eredmények

A feltárt anomáliák megjelenítése leegyszerűsítve egy-egy téglalappal történik, melyek méretét, elhelyezkedését a kapott anomáliajellemzők definiálják (6. ábra). A detektáló folyamat eredményeinek ellenőrzése vizuális módon történt meg, és ez alapján megállapítottuk, hogy az anomáliák feltárás pontossága megfelelő.

A detektáló folyamat során előállított jellemzők, mint prediktor paraméterek kerülnek bevonásra a végső elemző folyamatba, amelynek célja a rugalmassági modulus és hajlító szilárdság értékek megfelelő becslése (mint függő jellemzők). Ehhez

1. táblázat Az 1. sz. deszkán detektált anomáliák

Table 1 Anomalies detected on Lumber #1

Deszka 1/a oldal					
Anomáliák	1	2	3	4	5
Vízszintes pozíció	56	114	178	231	280
Vízszintes pozíció [%]	17%	36%	55%	72%	89%
Függőleges pozíció	közép	oldal	oldal	közép	oldal
Hossz	18	14	6	5	12
Szélesség	7	5	2	3	4
3D	igen	igen	igen	nem	nem

az előfeldolgozás során már említett többváltozós lineáris regressziót alkalmaztuk, azonban tervezzük az elemző modulnak az adatbányászatban ilyen feladatokra gyakran alkalmazott osztályozással (Han and Camber 2006) történő bővítését. Az eddig elvégzett elemzések alapján megállapítottuk, hogy a többváltozós lineáris regresszió alapuló megközelítés 80% feletti pontossággal képes becsülni a függő paramétereket a vizsgálatba bevont adathalmaz vonatkozásában (1. ábra).

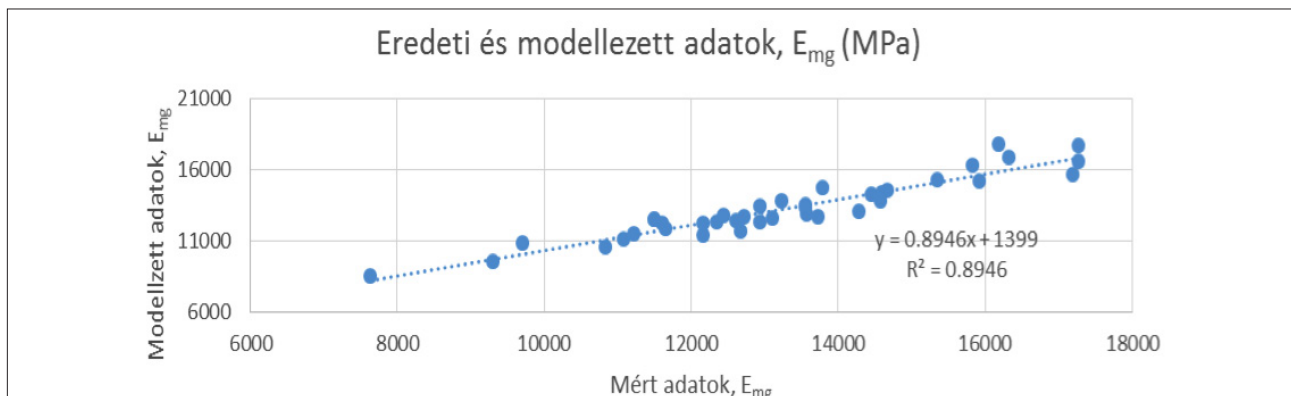
A 7. ábra a rostirányú rugalmassági modulus mért és modellezett értékeit jeleníti meg. Az ezekre illesztett regressziós egyenest jellemző determinációs együttható, az R^2 értéke azt mutatja, hogy a modellezett értékek statisztikailag is igazolhatóan, jól becslik az eredeti mérési adatokat.

A kapott többváltozós modellek meglehetősen magas független paraméterszámmal bírnak, ami statisztikai értelemben felveti a túltanulás problémáját: a modell a tanuló adathalmazra jól illeszkedik, azonban egy ettől független validáló halmazon már gyengébb eredményeket ad. Így fontos rögzíteni, hogy az anomáliákat detektáló folyamat által generált paramétereket felhasználó elemző folyamat még fejlesztés alatt áll, illetve az anomáliákat jellemző paraméterek köre is további vizsgálatok tárgyát képezheti (paraméterek finomítása, újabb paraméterek bevonása). A detektáló és elemző folyamat megvalósítására a szabadon hozzáférhető, nyílt statisztikai R szoftvert használtuk fel.



6. ábra Statisztikailag felderített göcsök a fűrészáru felszínén

Figure 6 Statistically detected knots on the lumber surface



7. ábra Anyagvizsgálógépen mért és a modellezett E_{mg} adatok

Figure 7 Measured vs. modeled E_{mg} data

Összefoglalás

A komplex rendszer, amit fejlesztettünk a fenyő fűrészáru szilárdsági osztályának meghatározására objektív információt ad aránylag olcsó áron. Az osztályozás pontossága, illetve a használt eljárások hatékonysága még javítható ugyan, de egyértelműen ígéretes megoldásnak mutatkozik. A fűrészáru 3D-s kezelése – azaz valósidejű kétoldali elemzése – egyértelműen javítja a minősítés szempontjából fontos rostirányú rugalmassági modulus becslését.

Irodalomjegyzék

- Tsoumis G. (1991) Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall
- Szalai L. (2013) Camera based real time wood evaluation software in application. In: Proc. 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 24–27th Sep. 2013, Madison, USA
- Simonaho S., Palviainen J., Tolonen Y., Silvennoine R. (2004) Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern, Optics and Lasers in Engineering 41:95–103
- Åstrand E. (2014) Building a High Performance Camera for Wood Inspection Using the VITA1300 Image Sensor and the XEM5010 FPGA Integration Module, Vanserum, Sweden, <https://www.opalkelly.com/customers/vanserum/>, [megtekintve: 2015.06.17]

- Autolog Sawmill Automation (2015) New tracheid sensor double laser technology, <http://www.autolog.com/>, [megtekintve: 2015.06.17]
- Nieminen S., Heikkinen J., Lassila E., Alahautala T (2012) Application note – Industrial monitoring solutions - Process industry - Transillumination of wood, Cavitar Ltd. Finland
- Jolma I. P., Makynen A. J. (2008) The detection of knots in wood materials using the tracheid effect, Proceedings of SPIE – Vol 7022
- Hu Cs., Tanaka C., Ohtani T. (2004) On-line determination of the grain angle using ellipse analysis of the laser light scattering pattern image, *J Wood Sci* 50:321–326
- de Oliveira Faria R., Alves Braga Jr. a., R., Elizeu da Rocha Neto A., Trindade N., Akira Mori F., Horgan G. W. (2008) Reliability of wood grain orientation measurements using laser illumination, *Biosystems engineering* 100:47–483
- Divós F., Sismándy-Kiss F. (2010) Strength Grading of Structural Lumber by Portable Lumber Grading – effect of knots. In: Proc. Quality control for wood & wood products 4-7th May 2010., Edinburgh, Scotland
- Ramachandran K. M., Tsokos C. P. (2009) *Mathematical Statistics with Applications*. Elsevier Academic Press, pp. 803.
- Montgomery D. C., Peck A. E., Vining G. G. (2012) *Introduction to linear regression analysis* (fifth edition). John Wiley & Sons, pp. 672.
- Han J., Camber M. (2006) *Data Mining, Concepts and Techniques - second edition*. Morgan Kaufmann Publishers, pp. 772.
- EN 338:2010. Structural timber. Strength classes.
- EN 408:2003. Timber structures. Structural and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.