

FAIPAR 63. évf. (2015)
2. szám

DOI: 10.14602/WoodScience-HUN_2015_2

Spline függvények története és faipari alkalmazásuk

I. rész

POLGÁR Rudolf¹, PÁSZTORY Zoltán¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Innovációs Központ

Kivonat

Tanulmányunkkal szeretnénk bepillantást adni a spline függvény felfedezésének történetétől a jelenleg alkalmazott módszerekig. Első cikkünk foglalkozik a spline függvények feltalálásával és az elmúlt évszázadokban történt fejlődésükkel. A látszólag száraz matematikai képletekben megjelenő függvények nagyon gyakorlatias megoldások, éppen ezért a mai terméktervezés egyik fő eszközei. A különböző spline típusokat mutatjuk be, mint a Bézier-spline, az interpolációs spline, a B- és a T-spline, valamint a NURBS felületképzési módszerek. Az elmúlt évtizedekben fokozódó ipari verseny és az informatikai technológiák fejlődése kedvező környezetet biztosított a spline függvények fejlődéséhez és széleskörű alkalmazásához. Jelen cikk megadja a spline függvények matematikai formuláit a hasznosítás számára, a következő cikk pedig az ipari alkalmazásba, kiemelten a faipari alkalmazásokba ad betekintést.

Kulcsszavak: spline, Bézier-görbék, approximáció, interpolációs spline

History of Spline Functions and Application in Wood Industry

Part 1

Abstract

In our studies we try to give an insight into the development of the spline functions and their applications from the invention of this tool. This first paper explains the invention and development of the spline functions during the past centuries. The seemingly abstract functions appearing in the form of mathematical formulae are very practical solutions and are the main tool in today's product design. The different types of spline are shown such as the Bezier, the interpolations, the B-spline, the T-spline and NURBS solutions for defining surfaces. The increasing industrial competition and development of information technology provided a favourable environment for development and wide utilization of spline functions in the last decades. This article gives the mathematical forms of splines for utilization and the next article will show the industrial utilization, especially the utilization in wood industry of spline functions.

Keywords: spline, Bézier spline, approximation, interpolation spline

Bevezetés

A tudomány szerepe az emberi társadalomban az ismeretek megszerzése és bővítése, tágabb értelemben pedig ezen ismeretek alkalmazásának lehetővé tétele, annak érdekében, hogy egészséges, élhető és fenntartható környezet alakulhasson ki. A tudomány egyik hajtóereje – az emberi kíváncsiságon felül – a gazdasági fejlődés és manapság egyre inkább a környezet megóvása. Ezen célok megvalósításához járulnak hozzá a tudományágak a természeti törvényszerűségek felismerésével, azok leírásával és alkalmazásával.

A spline függvény felismerése több évszázada nagyon gyakorlatias céllal történt, és hosszú ideig csak csekély mértékben foglalkoztak vele, mondhatni alig alkalmazták. Az ipari igények növekedésével került újra felszínre és a spline függvények alkalmazásának különféle fajtáit dolgozták ki és ma is folyamatos fejlődés jellemzi. A számítástechnikai háttérrel támogatott közelítő eljárásoknak ma elengedhetetlen kelléke. A spline függvények segítségével adott pontokon átmenő vagy azokat a legjobban megközelítő görbék lehet rajzolni. Ezek a görbék valamilyen cél szerint ideális görbének nevezhetőek vagy igyekeznek azt a lehető legjobban megközelíteni. A spline használata a hajótervezésben és -építésben kezdődött, még akkor, amikor a csónakok, hajók és hadihajók fából készültek.

Története egy balsikernek köszönhető, az ún. „svéd Titanic”-nak. A „Vasa” hadihajó, II. Gusztáv svéd király megbízásából készült el, melyet a Balti-tengeri erődemonstráció miatt készítettett, az akkori klasszikus hajóépítési szokásoknak megfelelően. Akkoriban ugyanis a hadi igényekhez igazították a hajók tulajdonságait, mint például a raktér nagysága, és a tervek alapján munkálták meg az elkészítésre szánt fát is. A kapacitás növelésével a hajók lomhasága is megnőtt, így hiába bírt el több fegyverzetet, ha nem tudta megfelelően pályáját korrigálni, esetleg billegett a nagy súlytól a fedélközben vagy a fedélzeten. A „Vasa” (1. ábra) – korának legnagyobb fegyverezéssel rendelkező hajója volt – méreteihez képest túl nehéz és instabil lett. 1628. augusztus 10-én futott ki a tengerre, de 1300 méterre a partoktól elsüllyedt (w1). A kudarc okán a király elrendelte egy modern hajóépítési eljárás kidolgozását.

Az új technológia és eljárás segítségével méretükhöz képest fordulékony, gyors, nagy raktárkapacitású, és legfőképp stabil hajókat hoztak létre. A technológia alapötlete egyszerű és zseniális: ne a hajó terve készüljön el először és készítsük el fából, hanem először vizsgáljuk meg, hogy mit tud maga az építőanyag – jelen esetben a fa –, és ehhez igazítsuk a terveket. Így találták fel a spline-t, a hajótervezési vonalzó. Ennek segítségével tervezték meg az íves részeket. Az eszköz kitalálói nem is sejtették, hogy találmányukat több mint 300 év múlva a járműipar fogja ismét felfedezni, újragondolni. A XX. század közepén a matematika és fizika igazolta, hogy az eszköz több szempontból is ideális.

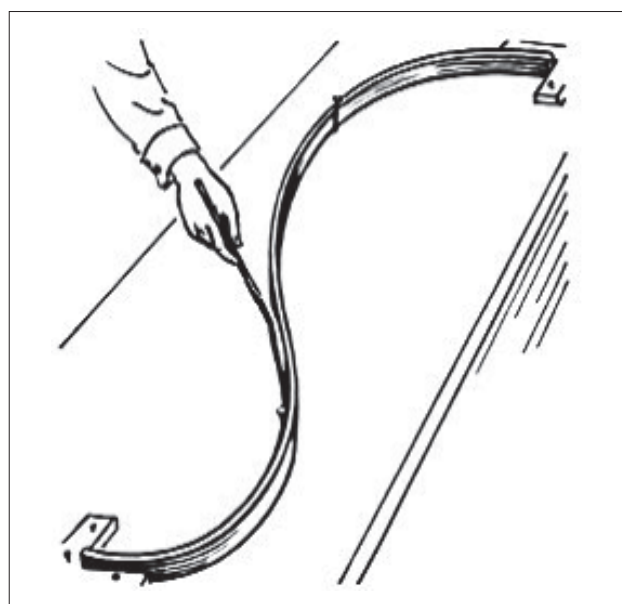
Spline vonalzó

A spline az a segédeszköz, ami rugalmas fából, illetve az 1960-as évektől kezdve acélszálból készült (2. ábra). Két végén rögzített, közepén súlyokkal vagy kitámasztással terhelt. Ezt a vonalzókat használták csónak- és hajóépítésben. A spline függvényeket akkoriban még nem tudták matematikailag leírni, de érzékelték, hogy az ívesre hajlított vonalzó a különböző görbületű íveket vagy görbét egyenessel, töréspont nélkül illeszti egymáshoz. A mai matematikai eszközök és ismeret már lehetővé teszi, hogy a spline függvényt egzaktul leírjuk és az informatika segítségével a számítástechnikával támogatott terméktervezésben alkalmazzuk. A számítógép már természetesen a függvény matematikai alkalmazásával rajzolja ki a görbét.

A közegellenállás leküzdésében nagy szerepet játszanak a segítségével rajzolt görbék, ezért napjainkban a gépjárműgyártásban is széles körben alkalmazzák.



1. ábra A rekonstruált Vasa hadihajó (Stockholm, Vasa Múzeum)
Figure 1 The reconstructed Vasa warship (Vasa Museum, Stockholm)



2. ábra A spline vonalzó (w2)
Figure 2 The spline ruler (w2)

A matematikai számításokban és eljárásokban, az informatikai programokban, tervezőrendszerekben, mérnöki feladatok és problémák megoldásaiban a spline ugyanazt a szerepet tölti be, mint a hajókészítők esetében. Meghatározott feltételek mellett alkalmasan illeszkedő, „szépen simuló”, csatlakozó görbesereget ad eredményül.

Modern kor

A spline matematikai újbóli felfedezése Lobachevskij nevéhez fűződik, aki egy speciális esetet vizsgált a XIX. század második felében. Az első név szerinti említés Schoenberg munkásságában (Schoenberg, 1988) jelenik meg, aki statisztikai adatok simítására használta a speciális másodfokú és harmadfokú spline-jait. Ő vezette be a „perfect spline” fogalmát, azaz azon m -ed fokú spline-ok osztályát, amelyek m -ed rendű deriváltja a $+1$ vagy -1 a csomópontokon („knots”) és előjelet vált minden csomópontnál. Napjainkban is használt eljárás szélsőérték feladatok megoldásaiban („extremal problems”) (Schoenberg 1971).

A spline népszerűsége bő évtized elteltével ugrott meg igazán, az autópárhazban két egymástól függetlenül dolgozó tervezőnek köszönhetően. Paul de Casteljaun (matematikus, fizikus) a Citroën fejlesztőjeként és Pierre Bézier (mérnök) a Renault vezetőmérnökeként dolgozott ki egy, a sok alapponthoz illeszkedő grafikus eljárást. 1959-ben de Casteljaun grafikus spline eljárást készített, mely napjainkban is a nevével fémjelzett és használt algoritmus (3. és 4. ábra) (Casteljaun 1959).

Bézier a függvényanalízis eszközeivel, a kontrollpontok konvex kombinációjával, kívánság szerinti m -ed rendű görbét hozott létre. Eljárását már 1960-ban alkalmazták a tervezőasztalon, de a titkosítások miatt csak két év múlva jelenhetett meg tudományos folyóiratban.

A spline a jelenleg használt formáját, bázisfüggvényeit Carl R. de Boor matematikusnak köszönheti. De Boor az 1960-as években a General Motors-nál dolgozott, ahol találkozott de Casteljaun és Bézier munkásságával. Felfedezte a két eljárás közötti rokoni kapcsolatot, és megalkotta a neves B-spline-okat. 1965-ben Garrett Birkhoff matematikussal (Harvard) közös cikkükben a „Pewise polynomial interpolation and approximation” címmel jelent meg (Birkhoff és Boor 1965) a B-spline alap polinomok és azok Bernstein polinommal való leírása. 1966-tól kezdve olvashatunk önálló fogalomként használva, „spline”-os cikkeket.

A spline-ok típusai

Spline alatt szakaszosan polinomokkal leírt görbesereget vagy függvényt értünk. Az m -ed fokú spline-ban legfeljebb m -ed fokú polinomok csatlakoznak egymáshoz. Az esetek többségében nemcsak a folytonosságot írjuk elő, hanem akár az $(m-1)$ -szeri folytonos differenciálhatóságot is. Gyakran használt típusai a szakaszonként elsőfokú (lineáris) és harmadfokú (körös vagy kubikus) spline-ok. Ritkábban használatosak a másodfokú (kvadrátikus) és ötödfokú spline-ok.

Mozgások vizsgálata esetén a spline fizikai értelmezése megfelel annak, hogy ne csak a pálya legyen folytonos, hanem a sebesség és gyorsulás értékei is folyamatosan változzanak. Mechanikai, statikai vizsgálatok esetén ugyanez mondható el a feszültségvizsgálatra, mérnöki-grafikus tervezéseknél a görbületváltozásra.

A célfeladatok megoldásai mellett leggyakrabban a számítógéppel segített tervezésben (CAD rendszerek) és a számítógépes grafikában használják. Pontossága, stabilitása és könnyű algoritmizálhatósága miatt bonyolult formákat is jól lehet közelíteni vele.



3. ábra Citroën DS 21 Pallas

Figure 3 Citroën DS 21 Pallas



4. ábra 1961-62 Renault 3

Figure 4 Renault 3 1961-62

A spline-okat a grafikus ábrázolás mellett interpolációra, approximációra és robusztus becslésekre is alkalmazzák. A szakaszonként illesztett kisebb fokszámú polinom sereg rugalmasabb módosíthatóságot tesz lehetővé, a kapott görbék és felületek meglehetősen simák.

Feladattól függően választhatunk globális vagy lokális változást figyelembe vevő spline-okat. Lényeges elem a módszer használatakor a peremfeltételek megadása. Tudnunk kell, hogy zárt görbéről vagy esetleg periódusos problémáról van-e szó. Nem záródó görbék esetén a fokszám és a folytonossági igények függvényében megfelelő zárási feltételeket kell választanunk.

A továbbiakban röviden bemutatjuk a spline-ok három leggyakrabban használt típusát. Először a klasszikus Bézier-görbét, amelyek elsőként kerültek alkalmazásba, mint görbeapproximációk. Másodjára az interpolációs spline-okat tárgyaljuk, majd pedig érinteni fogjuk a statisztikai módszerek és spline-ok összefonódását.

Bézier-görbék

A görbeapproximációk a számítógépes grafika nagy fejezetét jelentik. Az approximációk alapfeladata, hogy adott pontokhoz legjobban közelítő görbét találjunk. A görbének nem kell feltétlenül átmennie a megadott pontokon, vagy olyan igény is felmerülhet, hogy a függvény ne érintse a megadott pontokat vagy a lehető legkevesebben menjen át.

A függvény approximációknál egy valódi függvény közelítését keressük, melynek csupán néhány pontját ismerjük. Általában a függvény azon értékeit keressük, melyeket pont nem ismerünk, vagy ismert pontok mérési pontossága nem ismert, illetve akár mindkét szempont figyelembe vétele is lehetséges. Minél több pontot ismerünk a függvényből, nyilvánvalóan annál pontosabb lesz az approximáció.

Az approximáció Bézier-görbékkel történő megvalósításánál feltételezzük, hogy ismert a P_0, P_1, \dots, P_n közelíteni kívánt $n+1$ darab pont és legyen $t \in [0,1]$. A kontrollpontokhoz közelítő görbét ekkor az

$$r(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t) \quad [1]$$

összefüggés adja meg, ahol a $B_i^n(t)$ függvények a Bernstein-polinomok:

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad [2]$$

A Bézier-görbe fő tulajdonságai:

- globálisan változtatható görbe. Ha lokálisan változtathatóvá kívánjuk tenni, akkor több csoportba kell bontanunk a kontrollpontokat és a csatlakozási feltételek ismeretében kisebb fokszámú görbékkel közelíthetünk. Ekkor a csoporton belül globálisan viselkedik egy kontrollpont megváltoztatása, de az összes pontra nézve lokális lesz a módosulás.
 - $(n-1)$ -szer differenciálható;
 - a görbének $\vec{r}(0)$ a kezdő- és $\vec{r}(1)$ a végpontjában megadott érintői, melyek darabolás esetén a kapcsolódás miatt szükségesek
- $$\vec{r}(0) = n\overrightarrow{P_1P_0} \quad \vec{r}(1) = n\overrightarrow{P_{n-1}P_n} \quad [3]$$
- lineáris precizitással bír;
 - affin invariáns, azaz a kontrollpontok affin transzformációja ugyanazt a görbét eredményezi, mint a görbe pontonkénti affin transzformációja;
 - nem hagyja el a konvex burkát.

A Bézier-görbékkel kapcsolatban két fő probléma merül fel:

1. a pontok növelésével nő a fokszám, nő a számítási igény;
2. egyenes és „parabolaív” modellezhető vele, de nem tudunk kört vagy ellipszist rajzolni.

Egy lehetséges megoldás erre a racionális (súlyozott) Bézier-görbe használata.

A racionális Bézier-görbék további súlyokat adnak a függvényekhez abból a célból, hogy pontosabban közelítsék a kívánt alakot. A számláló súlyozott Bernstein formájú Bézier-görbe, a nevező pedig Bernstein-polinomok súlyozott összege. A racionális Bézier-görbék többek között kúpszelet szakaszok pontos megjelenítésére használhatók.

A w súlyok megválasztásával van lehetőség szabályozni a görbének a kontrollpontoktól való távolságát vagy közelségét. Definíciója szerint:

$$\bar{r}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i B_i^n(t)}{\sum_{j=0}^n w_j B_j^n(t)} \quad [4]$$

A számításokban pozitív súlyokat szokás használni, elkerülve ezáltal a szingularitásokat.

Érdeemes néhány gondolat erejéig megállni az n -ed fokú Bernstein-polinomok tulajdonságainál, mivel általa könnyebben megérthetjük a de Casteljau-algoritmust, ami a Bézier-görbe szerkesztésének lépéseit írja le a rajzasztalon.

A Bernstein-polinomok fő tulajdonságai:

- $B_i^n(t)$ egy n -ed fokú polinom;
- n -ed fokú polinomtér bázisát alkotják, sőt normál bázis, azaz

$$\sum_{i=0}^n B_i^n(t) \equiv 1 \quad [5]$$

- minden $B_i^n(t)$ polinomnak van egy maximuma a $t = \frac{i}{n}$ helyen;
- n -ed fokú tag rekurzívan előállítható az $(n-1)$ -ed fokú tagok komplex kombinációjával (5. ábra) (ez a legfontosabb a de Casteljau-algoritmus és a Bézier-görbék értelmezése között), azaz

$$B_i^n(t) = (1-t)B_i^{n-1}(t) + tB_{i-1}^{n-1}(t) \quad [6]$$

A de Casteljau-féle szerkesztési eljárás rekurzív rajzolóalgoritmusát a

$$P_i^k(t) = (1-t)P_i^{k-1}(t) + tP_{i+1}^{k-1}(t) \quad [7]$$

összefüggés adja, ahol $t \in [0,1]$ mellett

- k a rekurzió lépésszámát mutatja (a k 1-től n -ig megy);
- a k rekurziós lépésben $i=1, \dots, n-k$, valamint
- $P_j^0(t) = P_j$, minden $j=0, 1, \dots, n$ esetén.

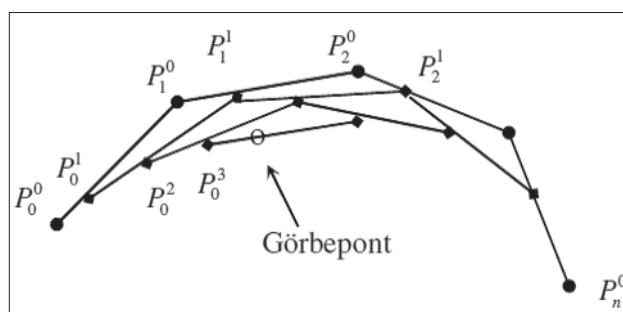
Interpolációs spline-ok

Az interpoláció egy olyan matematikai módszer, amely egy függvény nem ismert értékeire az ismert értékek alapján ad közelítést, vagy más néven becslést. Követelmény, hogy az ismert pontokra illeszkedjen az interpolációs görbe.

Legismertebb interpolációs eljárások a Lagrange-féle, a Newton-féle és a Hermite-féle interpoláció. A legnagyobb probléma velük, hogy csak kevés pontra és legfőképp alkalmasan megválasztott pontok esetén adnak elfogadható megoldást. Ha a függvényről $n+1$ adat ismert, amik lehetnek függvény értékek és adott pontbeli derivált értékek is, akkor egy legfeljebb n -ed fokú polinomot adnak megoldásul.

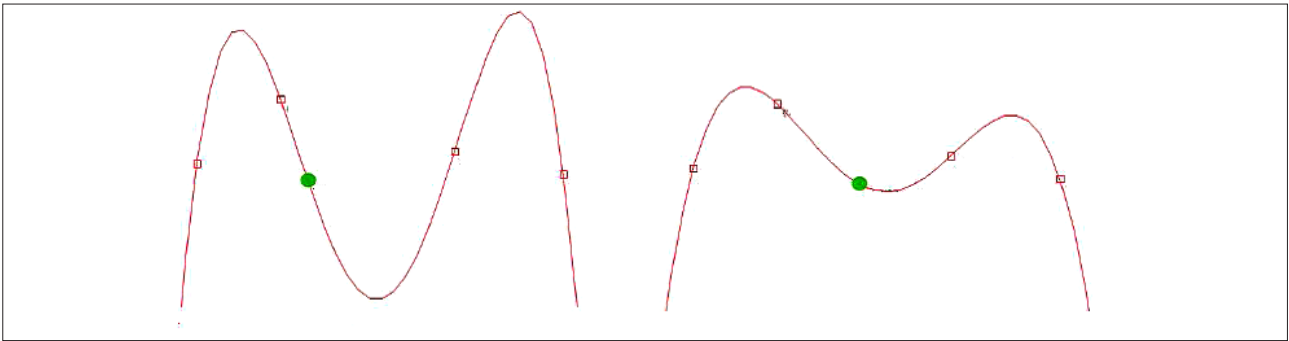
Az alapfeladat kívánalmait teljesítik a megoldások, de sok probléma adódik velük. Túl nagy a kilengésük már alacsony fokszám esetén is, a módszerek numerikusan instabilak, kis változtatás esetén már nagy eltérést mutat a két megoldás (6. ábra), rosszul kondicionáltak.

Egy lehetséges módszer a szakaszonkénti polinomiális interpoláció használata. Itt viszont gondot jelent a csatlakozási feltételek teljesítése. Gondot jelenthet akár magasabb fokszám választása esetén is a függvény első deriváltjának szakadása, azaz a görbén töréspontok keletkezhetnek. Ha fontos a számításban vagy tervezésben a folytonos differenciálhatóság, akkor általában a spline interpoláció használata válik szükségessé.



5. ábra Bézier-görbe szerkesztése de Casteljau-algoritmussal $t=1/3$ esetén

Figure 5 Construction of Bezier curve by using Casteljau method in case of $t=1/3$



6. ábra Egyetlen pont megváltoztatásának hatása az interpolációs polinomra

Figure 6 The effect of changing one point on the interpolation polinom

A spline interpoláció alapja az, hogy az egész intervallumot részintervallumokra osztjuk, a részintervallumokban pedig alacsony fokszámú polinomokat használunk. A megfelelő eredmény érdekében még annak is teljesülnie kell, hogy az intervallumhatároknál a polinomok illesztése folyamatos legyen. Így több alacsony fokszámú polinomból összerakott függvényt keresünk úgy, hogy az adott pontokon való áthaladás megkövetelése mellett a polinomok a szomszédos intervallumok csatlakozási pontjaiban előírt differenciálhatósági feltételnek is eleget tegyenek.

A spline interpoláció további bemutatásához tételezzük fel, hogy a vizsgált és keresett $f(x)$ függvényről adott $[a, b]$ intervallum ismertek az

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b \quad [8]$$

felosztás mellett a $P_i = P(x_i, y_i)$ értékek, minden $i=0, 1, \dots, n$ esetén. Feltételezzük egyben azt is, hogy minden i esetén fennáll $y_i = f(x_i)$ összefüggés. A spline függvény legyen $S(x)$, ami az összes $]x_{i-1}, x_i[$ részintervallumon értelmezett függvény darabokból áll, amelyeket $S_i(x)$ -vel jelölünk. A spline függvényeknél szokásjog alapján illik megjelölni a fokszámot, ekkor az $S^m(x) \equiv S(x)$, ahol m jelöli a fokszámot. Értelemszerűen használt az $S_i^m(x) \equiv S_i(x)$ jelölés is.

Néhány speciális esetben (pl. nagy tűréshatár mellett) használjuk a lineáris spline-okat, ami tulajdonképpen a megadott pontokat adott sorrendben törött vonallal köti össze. A bázisfüggvényei (az ún. kalapfüggvények) nagyon egyszerűen felírhatók:

$$u_0(x) = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} x_0, \quad u_n(x) = \frac{x - x_n}{x_n - x_{n-1}} x_{n-1} \quad [9]$$

$$u_i(x) = \frac{x - x_i}{x_i - x_{i-1}} x_{i-1} + \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} x_i \quad [10]$$

minden $i=1, \dots, n-1$ esetén,

Ekkor a lineáris spline függvény („dongafüggvény”)

$$S^1(x) = \sum_{i=0}^n y_i u_i(x) \quad [11]$$

alakban írható fel.

Leggyakrabban a köbös spline-okat használják. A görbék simán, szépen illeszkednek.

Kívánalmak a köbös spline-nal szemben:

- $S(x)$ haladjon át a megadott pontokon, azaz $S(x_i) = y_i$. Ezzel egyidejűleg teljesül a folytonosság feltétele is, azaz $S_i(x_i) = S_{i+1}(x_i)$
 - törésmentes legyen, azaz folytonosan differenciálható, tehát
- $$S'_i(x_i) = S'_{i+1}(x_i) \quad [12]$$

- folytonos legyen a görbülete, vagyis $S''_i(x_i) = S''_{i+1}(x_i)$;

- nem utolsó sorban eleget tesz a

$$\int_{x_0}^{x_n} (g''(x))^2 dx \rightarrow \min \quad [13]$$

variációs feladatnak, ami jó közelítéssel az összgörbület minimumának keresésével egyenértékű, vagyis a legsimább görbét adja. A variációs feladatban $g(x)$ függvény jelöli az $f(x)$ függvény interpolációs függvényeit, a variációs feladat pedig ezen függvények közül a minimum keresésre vonatkozó legjobb $g(x)$ függvény keresésével foglalkozik, ami esetünkben az $S^3(x)$ spline-t adja (természetes peremfeltétel esetén).

Az egyértelmű megoldáshoz szükség van még két egyenletre, amiket a peremfeltételek valamelyikéből kaphatunk meg. Ezek közül a nevesebbek:

$$\text{– természetes: } S'_1(a) = S'_n(b) = 0 \quad [14]$$

$$\text{– Hermite (clamped): } S'_1(a) = f'(a) \text{ és } S'_n(b) = f'(b) \quad [15]$$

$$\text{– periodikus: } S'_1(a) = S'_n(b) \text{ és } S''_1(a) = S''_n(b) \quad [16]$$

B-spline-ok, NURBS, T-spline

Az előzőekben már említést nyert a racionális Bézier-görbe, ami képes megoldani kúpszeletek approximációját. Az informatika fejlődésével minél gyorsabban szeretnénk eredményeket kapni és produkálni. Lényegessé vált a gyorsaság mellett, hogy könnyen algoritmizálható, jól kondicionált, stabil módszerek kerüljenek kidolgozásra.

Az első nagy lépést Cox és de Boor matematikusokról elnevezett módszer adta. De Boor javasolt egy algoritmust arra, hogy B-spline görbe pontot állítsunk elő rekurzívan, lineáris műveletek segítségével, ezzel kikerülve a rosszul kondicionáltságot. Alapját a de Casteljau elve adja, de a Bernstein-polinomok helyett a normalizált B-spline alapfüggvényeket használják. A k -ad fokú B-spline görbe definíciója

$$\bar{r}(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_i^k(u) \quad [17]$$

alakra módosul, ahol P_i -k továbbra is a kontrollpontokat jelentik. A B-spline függvények felírásához meg kell választanunk a spline rendjét az $1 \leq k \leq n$ feltétel mellett, ami $(k-1)$ -ed fokú közelítést jelent, illetve meg kell adnunk az $u_0 \leq u_1 \leq \dots \leq u_n = u_{n+1} = \dots = u_{n+k+1}$ csomóértékeket (*knots value*). A normalizált B-spline alapfüggvények definíció szerint

$$N_i^1(u) = \begin{cases} 1, & \text{ha } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{egyébként,} \end{cases}$$

$$N_i^j(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+j-1} - u_i} N_i^{j-1}(u) + \frac{u_{i+j} - u}{u_{i+j} - u_{i+1}} N_{i+1}^{j-1}(u) \quad [18]$$

ahol:

$j=2, \dots, k,$

alakúak (0-val történő osztás esetén 0-nak kell venni az érintett tagot).

A B-spline görbe tulajdonságai:

- lokálisan változtatható, azaz a P_i kontrollpontnak csak az $[u_i, u_{i+k}]$ részintervallumra van hatása;
- a B-spline görbe (szemben a Bézier-görbével) tartalmazhat egyenes szakaszt akkor is, ha nem minden kontrollpontja kollineáris;
- egy $(k-1)$ -ed fokú B-spline görbe bármely pontja a görbe legfeljebb k darab kontrollpontjának konvex burkában van. Ez a konvex burok tulajdonság jóval szigorúbb, mint a Bézier-görbe esetén, mivel itt a görbe a konvex burkok uniójában halad;
- affín variáns;
- a görbe legalább annyiszor metsz egy hipersíkot (2D-ben egyenest), mint a hipersík a kontrollpoligont (variation-diminishing property).

A jelenlegi tervezési rendszerekben a nem uniform racionális B-spline görbék, amelynek szokásos rövidítése NURBS (nonuniform rational B-spline), biztosítják a legtöbb szabadságot, és a legtöbb alakváltoztatási lehetőséget a tervezők számára. A fent említettek alapján teljesen analog módon megadhatjuk a racionális Bézier-görbéhez hasonlóan a racionális B-spline görbét is, melynek alakja

$$\bar{r}(u) = s(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i N_i^k(u)}{\sum_{j=0}^n w_j N_j^k(u)} \quad [19]$$

A w_i súlyokat a szingularitások elkerülése végett pozitívnak szokták választani, mivel ebben az esetben nem csak a nem racionális B-spline görbék kedvező tulajdonságait tartja meg (lokalitás, konvex burok, folytonosan differenciálhatóság), hanem még újabb alakváltoztatási lehetőséghez is jutunk. A racionális Bézier-görbéhez hasonlóan a w_i súlyokat alakparamétereknek nevezzük.

Kétdimenziós feladatok (felületek meghatározása) esetén feltételezzük, hogy adott koordináta-rendszerben a vizsgált téglalap rácson ismertek a P_{ij} kontrollpontok, illetve az u és v koordináták szerinti csomópontok. Ekkor a B-spline felületet, vagy más néven tenzor szorzattal előállított B-spline felületet a

$$s(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{ij} N_i^{k_1}(u) N_j^{k_2}(v) \quad [20]$$

képlet adja. Természetesen itt is értelmezzük a racionális esetet, illetve a NURBS felületeket.

A legújabb irány a spline-ok történetében a T-spline. A NURBS felületekhez képest ez annyi változást jelent, hogy optimalizálva van a rácspontok száma. A T-spline nem más, mint hiányos rács struktúrára lefuttatott NURBS-nak megfelelő algoritmus, melyen T-elágazások keletkeznek.

Összefoglalás

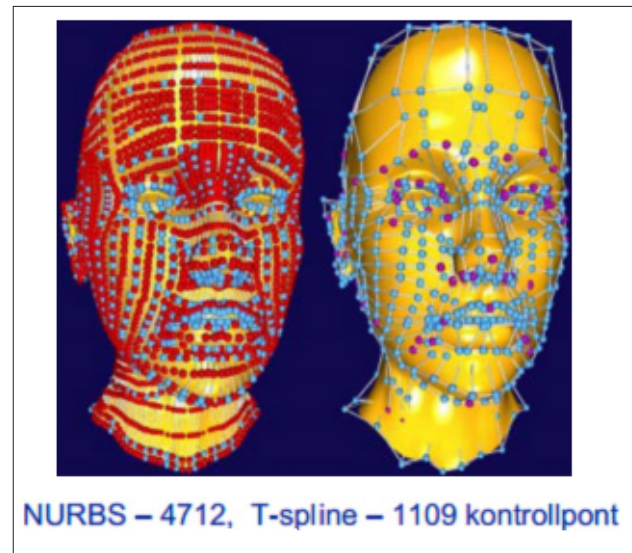
A kezdetleges spline vonalzó ötletéből kiindulva napjainkra külön tudományos részterületté nőtt a matematikán belül a spline-ok elmélete. Könnyű algoritmizálhatósága ellenére sokáig nem tudták alkalmazni, mivel nagy mennyiségű számítást igényel. A számítástechnika utóbbi évtizedekben történő robbanásszerű fejlődésével lehetőség nyílt a Bézier-görbék programozásától eljutni a jelenlegi legmodernebb eljárások (NURBS, T-spline) programozásáig, amelyek a hardverek fejlődésének köszönhetően gyors számítást eredményeznek. Megjósolhatatlan, hogy holnap hol találkozunk egy újabb variációval, mivel a spline-ok a tudomány egy nagyon dinamikus területét jelentik.

Köszönetnyilvánítás

Ez a tanulmány a Környezettudatos energia hatékony épület című TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0068 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Birkhoff G., Boor C. (1965) Piecewise polynomial interpolation and approximation. In: H. Garabedian szerk. Approximation of Functions. Elsevier, New York, 164–190. old.
- Schoenberg I. J. (1988) Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions, Part A: On the problem of smoothing of graduation, a first class of analytic approximation formulae, Quart Appl. Math. 4., 45–99.
- Schoenberg I. J. (1971) The perfect B-splines and a time optimal control problem, Israel J. Math. 10., 261–274.
- David L. Cardon D. L., Finnigan G. T., North N. S., Sederberg T. W. (2004) T-spline Simplification and Local Refinement, Brigham Young University, BYU ScholarsArchive, pp. 2., <http://dx.doi.org/10.1145/1015706.1015715>
- Casteljau de P. (1959) Courbes à pôles, (Pole görbék) INPI (w1) http://vilagutazo.blog.hu/2011/08/14/a_vasa_sved_kiralyi_hadihaj_o_tortene_t (w2) <http://grafit.netpositive.hu/?p=2520>



7. ábra NURBS és T-spline kontrollpontjainak összehasonlítása (David et al 2004)

Figure 7 Comparison of T-spline and NURBS control points (David et al 2004)

Spline függvények története és faipari alkalmazásuk

II. rész

POLGÁR Rudolf¹, PÁSZTORY Zoltán¹

¹Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Innovációs Központ

Kivonat

Ez a tanulmány a spline függvények feltalálásával, történetével, fajtáival és alkalmazásukkal kapcsolatos sorozat második része. A spline-okat elsődlegesen mérnöki feladatok és problémák megoldására fejlesztették ki. A spline módszerek könnyű kezelhetősége viszont megnyitotta az utat specifikus spline módszerek kifejlesztésére. Az első részben áttekinttük a spline függvények történetét és fajtáit, e cikkben pedig a spline alkalmazásokra fókuszálunk. Több példán keresztül igyekszünk bemutatni a spline-ok ipari, különös tekintetben a fa- és bútorigipari alkalmazásokat.

Kulcsszavak: spline, Bézier-görbék, approximáció, interpolációs spline

History of Spline Functions and Application in Wood Industry

Part 2

Abstract

This is the second paper related to the invention history types and application of spline functions. Splines were developed mainly for solving engineering problems. Their easy way of handling opened new possibilities for the development of specific spline methods. The first paper discussed the history and types of splines while the present paper focuses on the applications of spline. Several industrial examples are shown, especially ones related to the wood and furniture industry.

Keywords: spline, Bézier spline, approximation, interpolation spline

Jelentősebb spline módszerek és alkalmazási területeik

A spline függvények alkalmazhatóságát a számítástechnikai fejlődés nagyban elősegítette, a nagy művelési kapacitással és a kiváló megjelenítési technikákkal. Ennek köszönhetően a spline függvények alkalmazása egyre szélesebb körben terjed el és az alkalmazásuk is egyre „felhasználóbarátabb” formát ölt (Schumaker 2007). Az egyre szélesebb körű alkalmazás magában foglalja az esztétikai szempontokat kiemelten kezelő formatervezést, a szemnek kellemes látványt nyújtó ívek kialakítását, de kiterjed mérnöki és tudományos célokra is, mint pl. az L-spline használata az elektrosztatikai és -dinamikai rendszerek töltésselosztás vizsgálatában, a Poisson-egyenletek Green-függvényekkel történő megoldásánál (Schumaker 2007) (w1).

A mérnöki gyakorlatban sokszor a kiegyenlítő spline-okat alkalmazzák a mérési eredmények simítására. Azt keressük, hogy az egyik változó különböző értékeinek hatására a folyamat más változói milyen értékeket vesznek fel. A mérnöki gyakorlatban a vizsgált folyamat determinisztikus jellege miatt a változók közötti kapcsolat léte és a kapcsolat függvényyszerű volta elfogadott.

Ebben az esetben a kapcsolatot méréssel igyekeznek feltárni. A méréseket gyakran hiba terheli, így (két változót tekintve) nem a mérési pontok összekötése-interpolációja, hanem a pontok között haladó „kiegyenlítő” grafikon ad helyes tájékoztatást a két változó kapcsolatáról. Ekkor a „kiegyenlítő” görbe megrajzolása vagy egyenletének meghatározása a mérésikiértékelés célja. Ilyen típusú kérdésekre kezelésére alkalmas a kiegyenlítő spline módszer (Halász és Huba 2003).

A kiegyenlítő spline módszer geodéziai alkalmazásának jelentős magyar vonatkozásai is vannak. A módszert Závoti József vezette be, aki korát megelőzve elsőként már 1979-ben a Föld felszínének modellezésére használta, és nagyon jó eredményeket ért el (Závoti, 1979, 1980, 1982, Somogyi és Závoti, 1981).

A simító spline a statisztikában a regresszió számítás vagy regresszió analízis során két vagy több sztohasztikus változó között fennálló kapcsolatot modellez. A regressziós modell tulajdonságai alapján megkülönböztetünk lineáris, illetve arra visszavezethető, és nemlineáris regressziót. A legjobban illeszkedő regressziós görbe meghatározását leggyakrabban a legkisebb négyzetek módszerével határozzák meg.

A spline-ok jó tulajdonságaival ötvözve a legkisebb négyzetek módszerét egy olyan regresszió-számítási módszerhez jutunk, ahol a görbétől megkövetelhetjük a „legkisebb görbületek felvétele” tulajdonságot is. Ehhez meg kell adnunk a

$$\sum_{i=0}^n (y_i - g(x_i))^2 + \lambda \int_{x_0}^{x_n} (g''(x))^2 dx \rightarrow \min \quad [1]$$

szélsőérték feladat megoldását, ahol a λ -t simítási paraméternek nevezzük. Az elvet de Boor általánosította, figyelembe véve a regresszió görbe és adatok szórással való korrekcióját, illetve az illeszkedés rendjének választási lehetőségét:

$$p \sum_{i=0}^n \left(\frac{y_i - g(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 + (1 - p) \int_{x_0}^{x_n} (g''(x))^2 dx \rightarrow \min \quad [2]$$

ahol a p paraméter a simítási faktor.

A fenti szélsőérték feladatok megoldását nevezzük *simító spline*-nak.

A k-spline módszert 2008-ban Cudby publikálta (Cudby 2008). A módszert fából épített csónakok és jachtok tervezésére fejlesztették ki, mellyel a későbbiekben még foglalkozunk. A k-spline tipikusan hajótervezésre kifejlesztett spline módszer. A hajótestnek mind a vízbe merülő, mind a víz feletti részét széles körben lehet variálni (1. ábra).

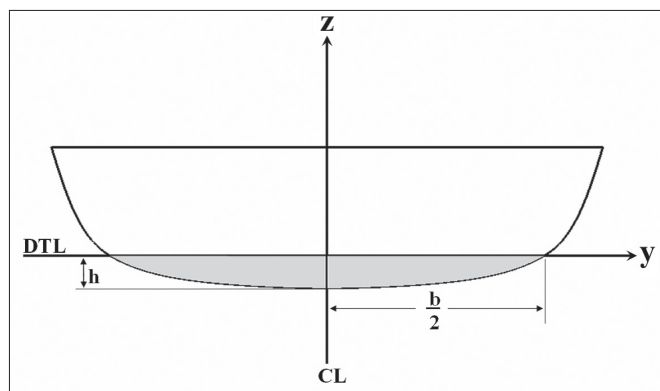
Fontosabb alkalmazási területek

Talán már nincs is olyan ág a matematika tudományán belül, ahol ne kapna szerepet a spline (geometria, analízis, funkcionál analízis stb.) A számítógépes grafikának jelentős, már-már kihagyhatatlan szereplője. A dizájn/tervező (CAD) és a mérnöki számításokat végző (CAE) rendszerek szereplője. Kevésbé ismert, de a „truetype” fontkészlet is a spline-oknak köszönheti létét, egész pontosan a Bézier- és a racionális Bézier-görbéknek.

A bankszektor a hozamgörbe-számítás, a különböző lejáratú, de azonos kibocsátótól származó hitelpapírok hozamát mutató és összekötő görbék területén használja a spline-okat. A hozamgörbe szinte minden esetben az állampapírok hozamgörbéjét jelenti. A normál hozamgörbe egy növekvő függvény, mivel az egyre hosszabb lejáratú kötvények egyre nagyobb kockázati prémiumot tartalmaznak (hosszabb lejáratú kötvények magasabb hozamot fizetnek). A hozamgörbe változását sokan figyelik, mint a gazdaság várható változásainak előjelét. Egy normálból kiegyenesedő vagy inverzzé váló görbe rossz előjel. A hozamgörbe kisimulását flattening-nek, meredekebbé válását steepening-nek nevezik a kötvénypiacon.

A kockázati prémium meghatározásának napjára az alapkezelő harmadfokú spline módszerrel hozamgörbét illeszt, a magyar állam által kibocsátott fix kamatozású állampapírok legjobb vételi és eladási árfolyamának számtani átlagát felhasználva (Koppányi 2009).

Tőzsdei előrejelzések vizsgálata: az előrejelzés lehet kvantitatív és kvalitatív, azaz a számokon alapuló, illetve minőségi. Ezek közül a kvantitatív előrejelzések az objektívebbek. Attól függően, hogy az adott jelenség okát vagy a múltbeli értékeit tekintjük a vizsgálat alapjának, beszélünk kauzális vagy projektív módszerről. A kauzális módszerek az



1. ábra Hajó merülési keresztmetszet és szükséges paraméterek a k-spline-hoz

Figure 1 Parameters for k-spline in the immersed cross section of the boat

idősorokat használják fel, a múltból (mint egyetlen vizsgált változóból) indulnak ki, azt vizsgálják, majd pedig annak felhasználásával próbálnak a jövőre vonatkozó prognózisokat adni. Míg a projektív módszerek egyik csoportja szerint elfogadható minden előre elrendelt determinisztikus idősor elemzés, addig más módszerek szerint nem elegendő a tendenciák automatikus jövőre való kivetítése, mint például a kiegyenlítő eljárás, sztochasztikus idősor elemzés AR, MA, ARMA modellek (Bajcsay 2012).

A spline-ok felhasználása a determinisztikus trendszámításban a hagyományos függvényformák illesztését helyettesíti, a polinomiális trendekkel szembeni ismert előnye miatt (2. ábra) (Polgárné 2011).

Az időjárás, vízállás-előrejelzés területén a tőzsdei vizsgálatokhoz hasonló köbös spline illesztéssel történnek a becslések, elsődlegesen simító spline-okkal.

Vasútépítés, hibalokalizálás során a vasúti pályatervezésben három klasszikusnak nevezhető fő tervezési görbét alkalmaznak az átmeneti ívekhez (egyenes és köríves szakaszok összekötése): klotoid ív, koszinusz ív és szinusz hiperolikusz ív. A mozgásgeometriai jellemzők vizsgálata a negyedrendű momentumok folytonosságáig és simaságáig lényeges. A mozgásgeometriai jellemzőket a klasszikus deriválási szabályokkal nem lehetséges számolni (a harmadfokú klotoid ív a leggyakrabban alkalmazott megoldás) vagy csak numerikusan lehet közelíteni. A klotoid ív esetén nem lehet a harmad- és negyedrendű jellemzőket klasszikus differenciálgeometriai módszerekkel leírni, mivel a másodrendű jellemző lineáris görbe, azaz a magasabb rendű jellemzők szakadásosak lennének, illetve szingularitással rendelkeznek, miközben ismeretes és feltételezhető a mozgás folyamatosága. Ezért a vizsgálat a kitézési pontokra illeszkedő ötödfokú simító spline-ok segítségével történik, ezáltal a negyedrendű momentumokra is becslést lehet adni.

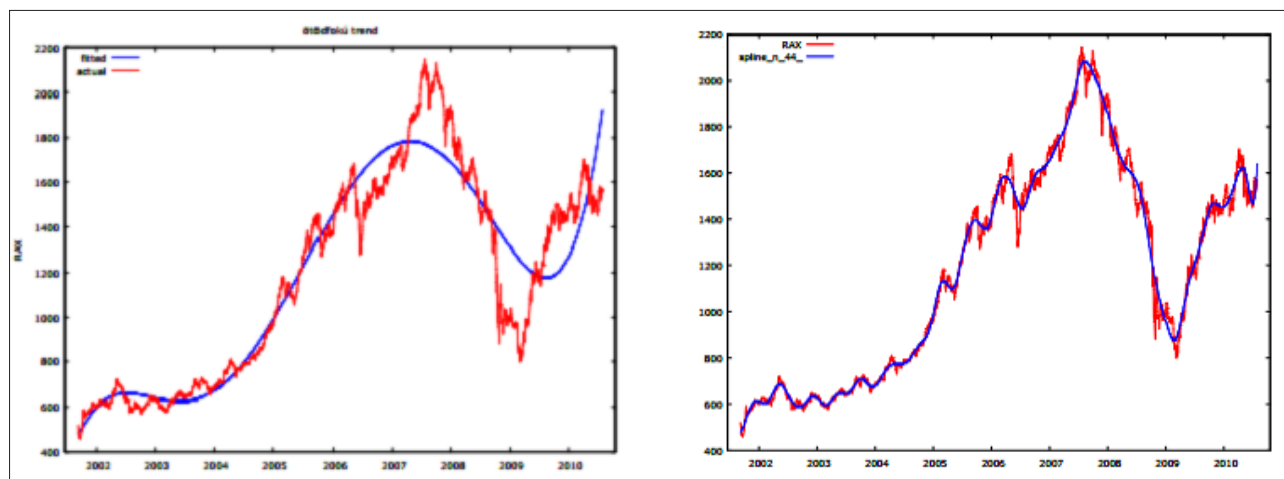
A spline-ok segítségével megoldható másik fontos vizsgálat a hibalokalizálás. A vasúti sínek a használat során elmozdulhatnak. A nagysebességű pályákon a kis kitérés is súlyos problémát okozhat a szerelvények mozgásában (kisiklás). A vizsgált és elmozdult helyeket a simító spline-okkal történő elemzéssel lokalizálni lehet, illetve egyúttal meg lehet adni a hiba mértékét.

Faipari alkalmazások

A gyors és eredményes tervezés érdekében – kihasználva az informatika robbanásszerű fejlődését – rengeteg cél- és segédprogramot, tervezőszoftverek seregét fejlesztették ki. A következőkben a spline-technika faipari alkalmazásának néhány példája kerül bemutatásra, egy-egy, az adott témát érintő program említésével.

Terméktervezés

Ha megszületett az ötlet és a dizájnt szeretnénk bemutatni, akkor tökéletes választás a CAD rendszerek használata. Történetileg az első CAD szoftverek 2D rajzolóprogramok voltak. Tulajdonképpen egy intelligens rajztábla funkcióját töltik be. Legismertebb és világszerte leggyakrabban használt képviselőjük az asztali számítógépekre készült AutoCAD. A Bézier-spline-októl kezdve a NURBS-ig, az interpoláció és approximáció választása általában be van építve a programokba (3. és 4. ábra). A spline alkalmazások a legtöbb esetben a



2. ábra Ötödfokú trend (bal oldalon) és a harmadfokú spline (jobb oldalon) összehasonlítása (Polgárné 2011)

Figure 2 Comparison of a fifth degree trendline (left) and third degree spline (right) graphs

díjazn terén jelennek meg az ülőbútorok esetében, így a 3. és 4. ábrán látható ívek tervezésénél használták a spline függvényeket.

Külön kiemelendő egy soproni formatervező művész- és mérnökhallgató sikere a spline-okkal történő tervezésben. Tari Attila, a NymE SKK volt hallgatója hypo-Spline fantáziánévvel egy ergonomikus kialakítású számítógépes terminált fejlesztett ki (5. ábra). Terméke a kényelem és funkció párosítása, mellyel 2008 óta számos díjat elnyert. A termék célközönsége az irodai munkát végzők csoportja, azok a felhasználók, akik naponta 8–10 órát használják a számítógépet (Tari 2008).

Faszerkezetek mechanikai és statikai vizsgálata VEM segítségével (ANSYS)

Az utóbbi évtizedek egyik leglátványosabban terjedő, nagy hatékonyságú számítástechnikai módszere a véges-elem-módszer (VEM). A mérnöki tervező munkában hatékonyságára való tekintettel kitüntetett szerepet vívott ki (Páczelt és tsai. 2007). Az informatikában beálló gyors fejlődés, a számítógépek kapacitásának, sebességének



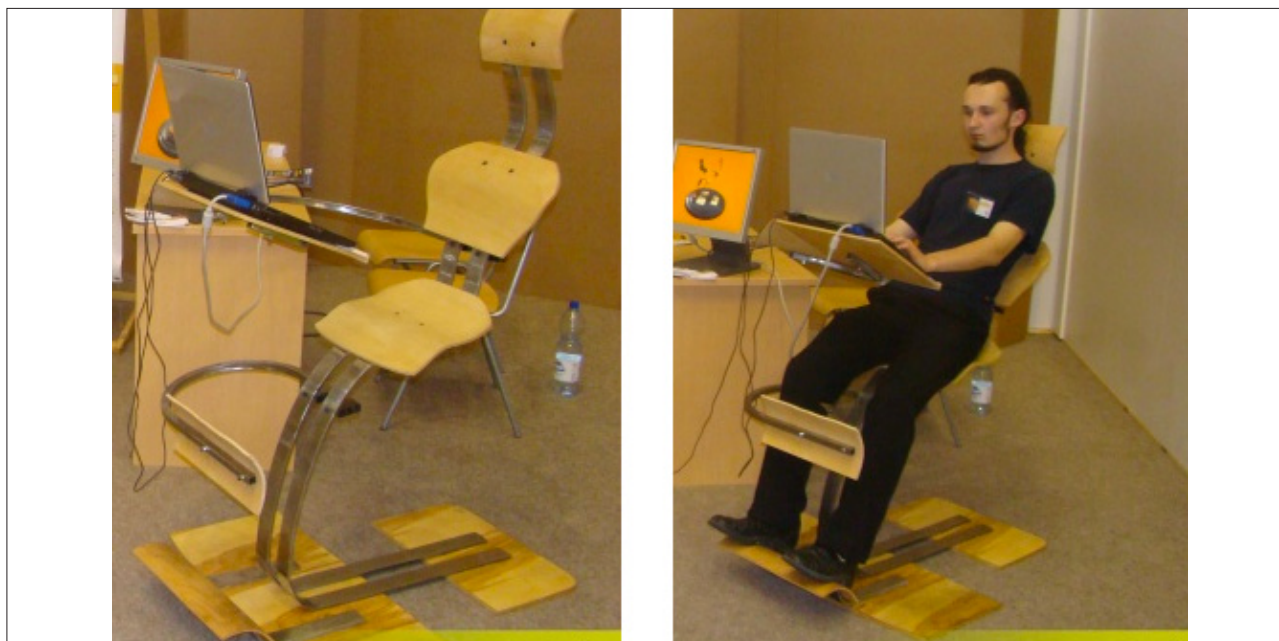
3. ábra Ülőbútorok tervezése NURBS, illetve spline segítségével (w4)

Figure 3 Design of chairs



4. ábra Lépcsők tervezése és egy megvalósított modell

Figure 4 Design of stairs and an implemented model



5. ábra A hypo-Spline szék terve és a tervező a megvalósított termék használata közben

Figure 5 The design of the hypo-Spline chair and the designer using the product

nagymértékű növekedése és a grafikai műveletek megszervezhetősége a fizikai jelenségek korábbi években még nem látott bonyolultságú modellezésére, gyors számításokra, az eredmények sokoldalú analizálására adnak módot.

A VEM numerikus módszer parciális differenciálegyenletek (PDE) közelítő megoldására alkalmas. Alapvetően a lineáris spline adja a számítások alapját, de vannak magasabb (de nem nagy) fokszámú modellek is. Első lépésben a PDE rendszert energetikai egyenletté alakítja, majd egy diszkrét rácson vett funkcionál minimalizálás után, a lineáris algebra eszközeivel nagyméretű lineáris egyenletrendszer megoldását teszi szükségessé. A rácson kapott függvényértékekből ezután egy geometriai modellt állít elő, szintén alapvetően spline technikával (általában köbös vagy lineáris). A VEM számos CAD/CAE típusú program alapját képezi, egyik neves képviselője az ANSYS.

Az ANSYS egy átfogó szimulációs szoftvercsomag, mely a fizika minden területét átöleli, lehetőséget biztosít valamennyi, gyakorlatban előforduló mérnöki szimulációra, melyet a tervezési, fejlesztési folyamat megkövetel. A Szimuláció Alapú Termékfejlesztés új szintre emeli a mérnöki szimulációt – az ANSYS által nyújtott lehetőségek a benne rejlő tudásmélységgel és tudásszélességgel, a páratlan kapcsolt fizikai lehetőségekkel kiemelkedőek (w5). Az előnyök kiterjesztik a műszaki tervezés lehetőségeit, fokozva ezáltal a hatékonyságot és az innovációt, csökkentve a fizikai korlátokat, és biztosítva olyan tesztek, kísérletek elvégzését is, melyek másképp költséghatékonyan nem lennének megvalósíthatóak.

A végeelem-programok nemcsak látványtervet nyújtanak, hanem pl. statikai (és egyéb fizikai) számításokra is alkalmasak. Az eredményt mind számszerűen, mind grafikusán megjelenítik. A teherbírást a színezés alapján könnyen ellenőrizhetjük (5. ábra).

Hajótervezés

Végül visszaérkeztünk oda, ahonnan a spline módszer fejlesztése elindult: a hajótervezéshez (6. ábra). Napjainkban is legalább ugyanannyira fontos, hogy gyors, fordulékony, könnyűszerkezetű, nagy teherbírású hajók, csónakok készüljenek, mint az elmúlt évszázadokban. A fából épített konstrukciók ma is a legszebbek. Legjobb példa erre Cudby 2008-ban kidolgozott spline elmélete és a segítségével megépített csónakja. Nagyobb hajók tervezésében a T-spline-ok kapnak kiemelt szerepet (7. ábra).

Összefoglalás

A leírtakból kiderül, hogy immár számos területen alkalmazzák a különféle spline módszereket, és az alkalmazási területek száma folyamatosan bővül. A faipari terméktervezésben, -fejlesztésben és -kivitelezésben is szerepet kap közvetlen vagy közvetett módon a spline-ok alkalmazása. Az elért sikereken felbuzdulva, korunk

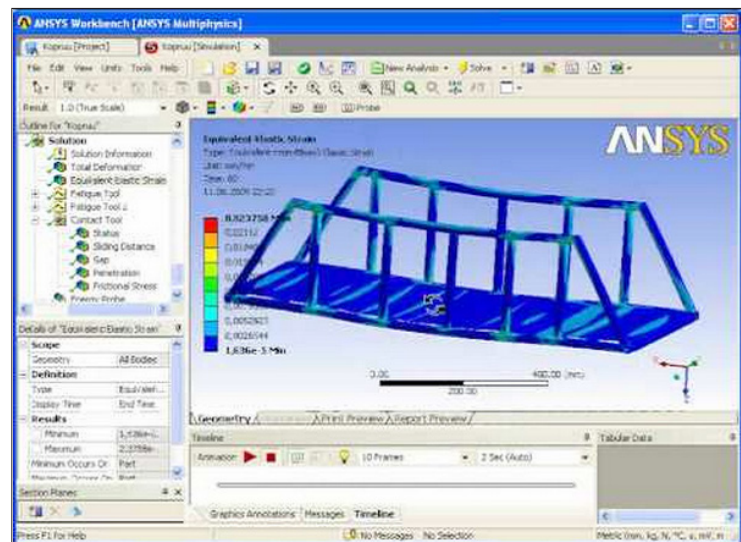
modern tervezési technikáinak és módszereinek megismerési lehetőségét szem előtt tartva fontosnak tartjuk, hogy a felsőoktatásban tanuló mérnök-, művész- és informatikus hallgatók képet kapjanak, kaphassanak a spline-okról és azok alkalmazási lehetőségeiről. Azonban a spline függvények nem csupán mint mérnöki eszközök alkalmazhatók, hanem a tudományos kutatásban is megoldási lehetőségeket kínálnak.

Köszönetnyilvánítás

Ez a tanulmány a Környezettudatos energia hatékony épület című TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0068 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Bajcsay K. A. (2012) Függvényközelítés szemléltetése AR kóddal, ELTE, diplomamunka, Budapest
- Cudby K. (2008) K-spline: a new curve for advanced hull modelling, Royal Institution of Naval Architects – New Zealand Division, AMSC, Auckland, 3rd High Performance Yacht Design Conference, 74. old.
- Halász G., Huba A. (2003) Műszaki mérések, BME Műegyetemi Kiadó, Budapest
- Páczelt I., Szabó T., Baksa A. (2007) A végeelem-módszer alapjai, a Miskolci Egyetem kiadványa, Miskolc. 7. old.
- Polgárné Hoschek M. (2011) Statisztikai időszorelemzés a tőzsdén, doktori értekezés, NymE KTK Sopron 85.,111. old.
- Kopányi Sz. A. (2009) A hozamgörbe dinamikus becslése, doktori értekezés, BCE, 58. old.
- Schumaker L. (2007) Spline functions: Basic Theory (3. kiadás), Cambridge University Press, Cambridge, UK 373. old.
- Závoti J. (1979) A spline interpoláció alkalmazása a geodéziában, Kozmikus Geodézia, Budapest, 105–126.
- Závoti J. (1980) A spline függvények alkalmazása digitális felületmodellek leírásához, Geodézia és Kartográfia, 32: 409–414.
- Závoti J. (1982) Sopron Surface Modelling by Splines, Proceeding of the Symposium Mathematical Models: Accuracy Aspects and Quality Control Helsinki, 540–551
- Somogyi J., Závoti J. (1981) Anwendung von Spline Funktionen zur Prüfung von Invarband-nivellierlatten. AVN, 88: 213–219
- Tari Attila (2008) Ergonomikus kialakítású számítógépes terminál, Tudományos Diákköri Konferencia, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, 2008. december 4.
- (w1) <http://www.phy.bme.hu/~jakovac/Eldin.pdf>
- (w2) <http://kspline.com/>
- (w3) http://www.cib.hu/system/files/flashCompliant=true&session_id=NpxThNZrR6bSuQt4emctb3ol&flashVersion=3&b=121&w=1920&h=1080
- (w4) <http://www.los-list.com/blog/wp-content/uploads/2010/07/UntoThisLastSplineChair.jpg>
- (w5) <http://www.econengineering.com/hu/szoftvereink/ansys.html>
- (w6) <http://orca3d.com/Orca3dJ/>



5. ábra Hídtervezés ANSYS-szel (w5)

Figure 5 Bridge design by ANSYS (w5)

A gyökér stabilitásának vizsgálata statikus és dinamikus dőlésméréssel, valamint a gyökérzet vizsgálatával

BUZA Ágnes Kinga¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratórium

Kivonat

A városias környezetben lévő fák biztonságossága fontos kérdés. Kár keletkezhet többek között a fák tövestül kifordulásakor, aminek az esélye a gyökérzet stabilitásától függ. Ennek vizsgálatára jelenleg egyetlen, kellőképpen megbízható eredményeket adó mérési módszer ismeretes, a dőlésmérési húzóvizsgálat. Munkánk célja a húzóvizsgálat kiváltása más, új mérésekkel, illetve a kiválthatóság vizsgálata volt. Két módszert vizsgáltunk. Az egyikben a dőlésmérőt és a húzó acélkötelet helyettesítettük lézeres elmozdulás-méréssel illetve széléréssel. A másik módszer a gyökérzet feltérképezése. A lézeres elmozdulás-mérés megfelelőnek bizonyult, helyettesítheti a nagyobb tehetetlenségű dőlésmérési eljárást. A szélben történő mérés szabadon álló fák esetében helyettesítheti a húzóvizsgálatot. A gyökértérképezés sikeres volt, azonban a számított eredmények a húzóvizsgálathoz képest konzisztensen alacsonyabbak lettek, ezért ez a módszer még finomításra szorul.

Kulcsszavak: dőlésmérés, húzóvizsgálat, fák stabilitása, dinamikus stabilitásvizsgálat, statikus stabilitásvizsgálat, biztonsági faktor, gyökértérképezés

Static and dynamic root stability evaluations with inclinometer, and the examination of the roots

Abstract

The safety of the trees in urban areas is an important topic. Among others, one of the safety risks is the uprooting of the tree. The chance of uprooting depends on the stability of the roots. Currently, there is only one method, the inclino-type pulling test, that brings sufficiently reliable information to evaluate the stability of the roots. The aim of the work was to develop other measuring systems for the evaluation of root stability, to establish if these methods can replace the pulling test. Two new methods were tested. Firstly, the inclinometer and the pulling cable were replaced by laser movement tracking and wind measurement, respectively. Secondly, the main roots were mapped. The laser movement measurement provided acceptable results. Monitoring the movement of trees due to wind may replace the pulling test for free-standing trees. Root mapping was successful, but the calculated safety factors were consistently lower than the data from the pulling test. This latter method needs further refinement.

Keywords: pulling test, safety of trees, dynamic stability test, static stability test, safety factor, root mapping

Bevezetés

A közterületeken, parkokban, kertekben, óvodák vagy iskolák udvarain álló fák biztonságossága fontos kérdés. A közfigyelem általában a már megtörtént vagy éppen még megelőzhető kárkeletkezések, sérülések kapcsán foglalkozik ezzel a témával. A stabilitással, biztonságossággal foglalkozó vizsgálatok általában vagy a gyökérzet, vagy a törzs állapotára irányulnak, illetve létezik olyan módszer, mely egyszerre vizsgálja mindkettőt (Wessolly és Erb 1998).

A fa törzsének felmérésére több lehetőségünk van, mint például az akusztikus vagy ultrahang tomográfia, a törzs fúrásos vizsgálata, vagy a nyúlásmérési húzóvizsgálat (Brudi és Wassenaer 2002, Rinn et al. 1996, Divós és Mészáros 1994, Wang et al. 2001, Bucur 2005, Kahl et al. 2009). Ezzel szemben a jelenleg elérhető és megbízható módszerek közül csupán egyetlen, a dőlésmérési húzóvizsgálat vonatkozik a gyökérezet állapotának, biztonságosságának felmérésére. Ezért munkánk célja a gyökérre vonatkozó mérések, biztonságossági becslések körének bővítése volt.

A dőlésmérési húzóvizsgálat a statikus módszerek közé tartozik. A mérés során egy sodronykötél szimulálja a szélterhelést. A kivitelezéshez elengedhetetlen a megfelelő horgonyzás biztosítása a kötélen számára, és a mérés csak a 0–15 km/h szélsébség-tartományban végezhető. A használt eszközök nagyok, nehezek, és a méréshez általában létra is szükséges, hogy a húzó kötelet megfelelő magasságban lehessen rögzíteni a vizsgálandó fán.

Két célt fogalmaztunk meg munkánk során. Az egyik a statikus vizsgálat dinamikussá tétele, vagyis a valós szélben történő mérés kidolgozása és tesztelése. A másik egy, a húzóvizsgálatnál egyszerűbb, kisebb méretű és tömegű, könnyebben szállítható eszközzel való biztonságosságbecslés lehetőségének megteremtése. Ez utóbbira a korábban kidolgozott gyökértérképezést használtuk (Divós 2008), itt a biztonsági faktor számítása jelent újítást.

Természetesen mindkét elrendezést, és a mérésekből számolt biztonságossági faktorokat összehasonlítottuk a dőlésmérési húzóvizsgálattal, illetve annak adataival. Az összehasonlítás célja volt az ún. ellenállás tényező meghatározása is.

Elméleti háttér

Biztonsági faktor

A fák gyökérezetére vonatkozó biztonsági faktor (angolul: „safety factor”, SF):

$$SF = \frac{M_b}{M_{sz}} \quad [1]$$

ahol:

M_b – a valamely mérési módszer segítségével számolt, az adott gyökérezet által kibírható maximális forgatónyomaték [Nm],

M_{sz} – a szél forgatónyomatéka, amit a [2] szerint számítunk ennél a becslésnél. A gyakorlatban a biztonsági faktor a fa tövestől kifordításához szükséges nyomatékot hasonlítja az adott területen várható maximális szélterheléssel [Nm].

A szélterhelés a következőképpen számítható (Divós 2008):

$$M_{sz} = F_{sz} h_k \quad [2]$$

$$F_{sz} = \frac{\rho}{2} v^2 AC \quad [3]$$

ahol:

F_{sz} – a szél által létrehozott erő [N],

h_k – a koronaközép magassága [m],

ρ – a levegő sűrűsége [kg/m^3],

v – a szél sebessége [m/s],

A – a korona és a törzs adott iránybeli felülete [m^2],

C – a fafajfüggő ellenállás tényező (Wessolly és Erb 1998).

A szélsébség Brudi és Wassenaer 2002 nyomán elfogadott értéke 33,3 m/s. A helyi viszonyokat, a terület beépítettségét és a magasság függvényében változó szélsébséget is figyelembe veszi az EN 1991 szabvány. A számításnál a javasolt 33,3 m/s értéktől az említett szabvány szerint eltérések lehetnek. Városias környezetben alacsony fák esetén a figyelembe veendő szélsébség kisebb, de tengerparton magas fák esetében nagyobb is lehet.

A biztonsági tényezőt 1,5-ös érték felett tartjuk elfogadhatónak (Brudi és Wassenaer 2002). Ez alatt – a becslés bizonytalanságai miatt – az adott fa nem tekinthető biztonságosnak.

Az [1] definícióval a gyökérezetre vonatkozó biztonsági faktor számítható. A törzs egy adott magasságban történő kettétörésére is számolnak biztonsági tényezőt, ez azonban – az adott magasság feletti részek tömegének változása miatt – másként definiálendő, más képlet szerint számítandó.

Az ellenállás tényező meghatározása

A dőlésmérési húzóvizsgálat kiértékelésénél használt, fafaj függő ellenállás tényezők többsége viszonylag állandó, erős szélben került meghatározásra (Wessolly és Erb 1998). Mivel a szél sok helyen nem állandó, hanem lökésekben érkezik, ezért – élve a méréseink adta lehetőségekkel – olyan ellenállás tényezőt számítottunk, mely a fafaj „széllökésekkel szembeni” ellenállását jellemzi.

A szélben történt mérés elmozdulás-idő és szélesség-idő adatai esetében idő szerinti illesztésre volt szükség, mivel a fa tövének elmozdulása néhány másodperccel később következett be, mint ahogy a széllökést mérhettük. A szélmérő által 10 méteres magasságban mért szélességeket a fa koronaközép magassága szerint számítottuk át a megfelelő képlet segítségével (Brudi és Wassanaer 2002).

Egy, kalibrációként elvégzett dőlésmérési húzóvizsgálat-sorozat dőlés-erő értékei segítségével a szélben történt mérés dőléseihez erő, illetve forgatónyomaték rendelhető. A szélesség ismeretében a [3] szerint az ellenállás tényező meghatározható.

Anyagok, eszközök, mérések

A kiválasztott fák

A méréseket a Nyugat-magyarországi Egyetem botanikus kertjében két lucfenyőn (*Picea albies*) és a közelben egy vadgesztenyefán (*Aesculus hippocastanum*) végeztük. A fák számításához szükséges adatait az 1. táblázat foglalja össze.

A két lucfenyő a botanikus kert állományának része, míg a vadgesztenyefa szabadon áll, vagyis a helyszínen fújó főszélirányban nem volt más fa a környezetében, míg a főszélirányra merőlegesen néhány méterre voltak fák.

1. táblázat A mérésre kiválasztott fák adatai (*az ellenállás tényezők Brudi és Wassanaer 2002 szerint)

Table 1 The data of the trees chosen for the measurements (*drag factors from Brudi and Wassanaer 2002)

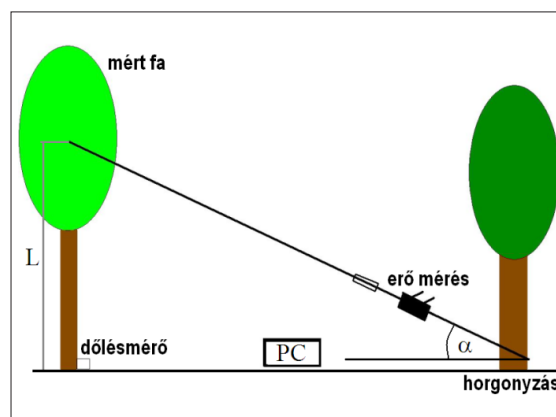
A vizsgált fa sorszáma	Fafaj	Magasság [m]	h_k [m]	A [m ²]	Ellenállás tényező [C*]
1.	Lucfenyő	20,5	13,3	23,7	0,20
2.	Lucfenyő	20,0	12,7	30,4	0,20
3.	Vadgesztenye	12,0	6,5	95,7	0,35

A gyökérzet stabilitásának becslése – dőlésmérési húzóvizsgálat

A dőlésmérési húzóvizsgálat során egy acélsodrony kötél szimulálja a szélterhelést, miközben mind a húzóerőt, mind a törzs dőlését mérjük. Az 1. ábrán is látható, hogy a kötelet a mért fán – a lehetőségekhez képest – a korona közepéhez minél közelebb kell rögzíteni, a dőlésmérőnek pedig a talajhoz minél közelebb kell történnie, mert a vizsgálat célja a gyökérzet állapotának felmérése. Mivel a törzs anyaga nem teljesen merev, ezért amennyiben a dőlésmérő magasabban kerül fel a fára, akkor a törzs tulajdonságai miatt az eredmény torzul. A horgonyzásra szolgáló másik fa természetesen helyettesíthető más, megfelelő tereptárggyal is (Neild és Wood 1999, Peltola et al. 2000).

A vizsgálathoz használt dőlésmérő egy buborék helyzetváltozása miatt bekövetkező kapacitás változásának segítségével mér, vagyis viszonylag nagy tehetetlenségű, lassú. A dőlésmérési húzóvizsgálathoz jól használható, ellenben a szélben történő mérés esetében azt tapasztaltuk, hogy időben kiátlagolja a törzs finomabb mozgásait.

A dőlésmérési húzóvizsgálat során a kötéllal maximum 0,2°-os dőlésig húzzák a fát, folyamatosan mérve az erőt és a dőlést. A dőlés-erő értékekre a [4] függvény illeszthető. Ebből megbecsülhető a fa gyökereitől történő kifordulásához szükséges forgatónyomaték. A mért adatokból, valamint a már részletezett szélterhelés becslés felhasználásával a gyökér biztonsági faktora, SF számolható Divós 2008 nyomán az alábbiak szerint.



1. ábra Dőlésmérési húzóvizsgálat áttekintő rajza

Figure 1 The model of the „inclinometer”-type pulling test

A mért dőlés-erő adatokra egy tangens függvény illeszthető, melyből F_{ki} [N] a fát gyökerestül már éppen kifordítani képes erő becsülhető.

$$\varphi_c = 0,33 \tan(1,34 (F/F_{ki})) + 0,5 (F/F_{ki})^2 - 0,1 (F/F_{ki}) \quad [4]$$

ahol:

ϕ – a mért dőlés [°],

ϕ_c – az illesztett görbe dőlés értékei [°],

F – a mért erő [N].

A függvény illesztése a legkisebb négyzetek elvén történik.

A számítógép által illesztett függvény ϕ_c értékei a mért ϕ értékeiből következnek, az ezekhez tartozó F erők szintén ismertek. Így meghatározható a F_{ki} kifordulást létrehozni képes erő, mely az adott kötél helyzetben értendő (lásd 1. ábra). A fa kifordításához elegendő forgatónyomaték M_{ki} :

$$M_{ki} = (F_{ki} L) \cos \alpha \quad [5]$$

ahol:

L – a kötél rögzítésének magassága [m],

α – a sodronykötél vízszintessel bezárt szöge.

A dőlésméréses húzóvizsgálat esetén az SF biztonsági faktor [1] szerinti számításakor az itt kiszámolt M_{ki} kerül M_b helyére.

A leírtak szerint 4-4 dőlésméréses húzóvizsgálatot végeztünk és biztonsági faktort számítottunk mindkét lucfenyőre és a vadgesztenyefára.

Gyökértérképezés

A gyökértérképezés során a főbb gyökerek helyzetét lehet meghatározni, mivel a hang terjedési sebessége jelentősen eltér talajban (kb. 300 m/s) és a gyökérzetben (kb. 3000 m/s) (Bucur 1995). Ezt a jelenséget kihasználva feltérképezhetjük a vastagabb gyökereket, a gyökerek megléte, szerkezete, helyzete pedig fontos lehet a stabilitás becsléséhez (Coutts 1983). Építési, ásási munkáknál is érdemes lehet figyelembe venni a főbb gyökerek helyzetét.

A mérés során a fa törzsére, a talajhoz közel felhelyezünk egy jeladó tüskét. Ezt kalapáccsal megütve hang indul el a fában, a gyökerekben. A hang megérkezését detektáljuk egy talajszondával, mely egy 40 cm hosszú alumínium tüskével szerelt. Ez biztosítja az érzékelő és a talaj közt az akusztikus csatolást. A mérési elrendezés látható a 2. ábrán. Így 0,5 méteres mélységig találhatjuk meg a gyökereket (Divós et al. 2009).

A jeladóból indított jel és a detektálás között eltelt időt mérjük, a fa törzsétől adott, állandó távolságban. A mérést általában a törzstől 0,5 méteres távolságú kör kerülete mentén, 15 cm-es lépésekben végzik, a talajszondával. A mérés ismételhető a törzstől nagyobb távolságban. Amennyiben egy adott ponton a mért idő a többi ponthoz képest nagyságrendi csökkenést mutat, az a gyökérzet jelenlétére utal (Divós 2008).

Esetünkben a méréseket a tőtől 0,5 m, 1 m és 1,5 m-es távolságban végeztük. (Achim és Nicoll 2009-es cikke szerint a gyökértányér sugara jellemzően nem nagyobb, mint a mellmagassági átmérő háromszorosa; a mérést ennek megfelelően végeztük.) A talajon megjelöltük a helyeket, irányokat ahol a gyökérzetet érzékeljük (8A ábra). Helyszíni felmérés, illetve a készített fényképek segítségével gyökértérképet készítettünk (8B ábra).

Az így kapott gyökértérkép által becsültük azt a területet, ahol a gyökerek kapcsolatban vannak a talajjal, ahol „kapaszkodnak”. A 3. ábrán látható a becslésre egy példa (2. fa).

A meghatározott terület segítségével egy egyszerű modellt kívántunk alkotni a fa biztonságosságának becslése céljából.

A meghatározott terület (A_{gy}) segítségével egy egyszerű modellt állítottunk fel a fa biztonságosságának becslésére, a következő képlet szerint:



2. ábra A gyökértérképező eszköz használatban
Figure 2 The root mapping tool

$$M_{ka} = c_t A_{gy} h_{gy} \quad [6]$$

ahol:

M_{ka} – a gyökérzet a talajba kapaszkodásának forgatónyomatéka [Nm],

c_t – a talaj nyírószilárdsága [N/m²],

A_{gy} – a becsült „kapaszkodási” terület [m²],

h_{gy} – a gyökérzet mélysége a talajban [m].

(A talaj nyírószilárdságának értékét és gyökérzet becsült mélységét Péterfalvi József* szakértői véleményére alapoztuk.)

M_{ka} segítségével [1] szerinti SF, biztonsági faktor számítható. A képletben az M_{ka} kerül M_b helyére. A gyökértérképezést a helyszínek adottságai miatt csak a két lucfenyőre végeztük el.

Lézeres elmozdulásmérés

A dőlésmérőt helyettesítő elmozdulásméréshez egy zöld lézer pointert használtunk, amit a fa törzsére, a talajszinthez a lehető legközelebb rögzítettük. A lézer fényét a fától 15–30 m távolságban elhelyezett ernyő fogta fel, amelyet beárnyékolunk a jobb kontraszt érdekében, és amelyhez fixen egy webkamerát rögzítettünk, mely egy számítógépre továbbította a képet. Ezt egy megfelelő képelemző program dolgozta fel. Az így kapott mozgás adataiból, a webkamera felbontásának, valamint az ernyő a lézerforrástól való távolságának ismeretében a valós elmozdulás, abból pedig a dőlés számolható.

Az elmozdulásmérést először a korábbi, mesterséges dőlésméréssel megegyezően végeztük, olyan módon, hogy közben a lézert is a vizsgált fa törzséhez, a talajszinthez lehető legközelebb rögzítettük. A dőlés, az erő és a lézer elmozdulás adatait egyaránt mértük és rögzítettük. Ezután gyenge szélben végeztünk összehasonlító méréseket.

Szélmérés

A szél fára, fákra gyakorolt hatásának vizsgálatához egy olyan szélsébségmérő eszközre volt szükség, melynek időbeni felbontása elegendő ahhoz, hogy ne átlagolja ki a szellökéseket.

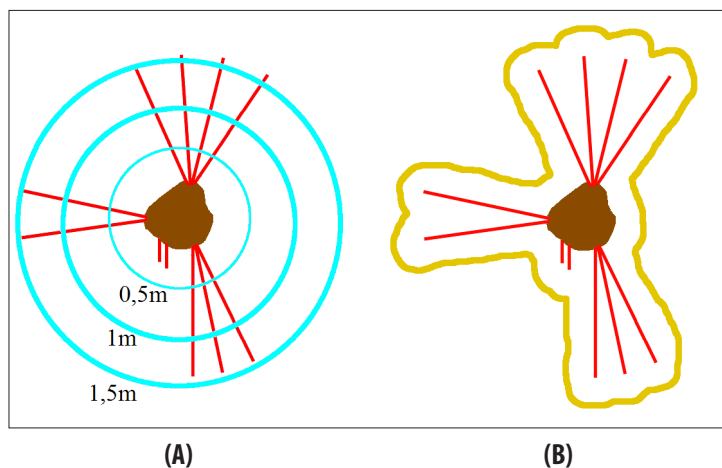
A használt, ultrahangos szélmérő a Fakopp Bt. fejlesztése (a fejlesztők egy későbbi publikációban kívánják részletesen bemutatni az eszközt). Működési elve a Doppler-effektuson alapszik. A szélsébségmérő látható a 4. ábrán.

A szélmérő 5 adat/2 másodperces mintavételezési frekvenciával működik, amit elégségesnek találtunk a szellökések detektálására. A szélméréseket egy összerakható torony segítségével, 10 méteres magasságban végeztük. Mindhárom kiválasztott fán elvégeztük a méréseket.

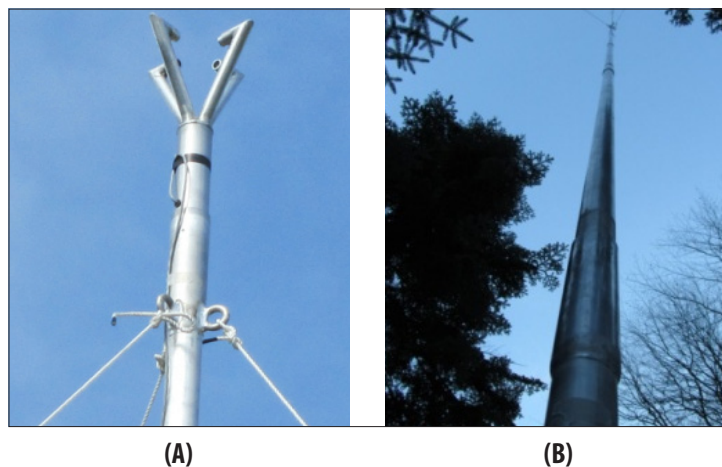
Az ellenállás tényező meghatározásának lépései

A vadgesztenyefán történt dőlésmérési húzóvizsgálat, valamint a valós szélben történt mérés által lehetőség volt az ellenállás tényező meghatározására. Ez a következő lépések szerint történt:

1. A húzóvizsgálat értékeire illeszthető függvény ábrázolása (a [4] szerinti tangens-függvény).
2. A szélsébség-dőlés értékek időillesztése, majd az egyes szellökések által a tőben létrehozott dőlés értékelése.



3. ábra A 2. fa gyökértérképe (A) és a gyökerek által lefedett területtel (B)
Figure 3 The root map (A) and the surface reached by the roots (B) of tree No. 2.



4. ábra A szélsébségmérő (A) és a széltorony (B)
Figure 4 The wind measuring tool (A) and the wind tower (B)

* egyetemi docens, a Nyugat-magyarországi Egyetem Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézetének igazgatója

3. A szél által létrehozott dőlés értékek visszakeresése a húzóvizsgálat által számított tangensfüggvényen, ennek segítségével forgatónyomatékok hozzárendelése a dőlés értékekhez.
4. A szélesség adatok forgatónyomatékokhoz rendelése, majd az ellenállás tényező számítása [2] és [3] alapján.

Eredmények és értékelés

A dőlésmérés és az elmozdulásmérés összehasonlítása

A dőlésmérési húzóvizsgálat kiválthatóságának értékeléséhez ellenőriznünk kellett, hogy a lézer mozgása képes-e a dőlésmérőhöz hasonló, azzal megfeleltethető, annak helyettesítésére is használható adatsort adni. Ezért húzóvizsgálatok során egyszerre mértük a lézer elmozdulását és a dölést.

Az adatsorokat az idő függvényében ábrázoltuk. Egy ilyen grafikon látható az 5. ábrán, amelyen az erő, elmozdulás és dőlés adatokat az összehasonlításhoz célszerű skálán ábrázoltuk.

A mérés során megállapíthattuk, hogy a lézer mozgásának követése az általunk létrehozott mérési összeállításban megfeleltethető a dőlésmérő adatainak. A dőlésmérő időbeli felbontása 10 Hz, míg a lézer mozgását 5 adat/2 másodperccel mértük (mivel ez felel meg a szélmérő által küldött jeleknek, a program, amivel követni tudtuk a lézer elmozdulását ezzel az időfelbontással dolgozott).

Igaz, hogy a dőlésmérő több adatot szolgáltat (10 Hz), a lézer elmozdulásának követésével mégis finomabb mozgást figyeltünk meg, melyről feltételezhető, hogy ez a dőlésmérő tehetetlensége miatt nem látható a dőlésmérő által mért adatsorban (5. ábra). Valós, de nem viharos szélben a lézeres követés valószínűleg jobban megfelel a mérés céljaira, mint a hagyományos dőlésmérő.

Dőlésmérési húzóvizsgálatot sikeresen végeztünk mindhárom, a mérésre kijelölt fán. A biztonsági faktor számításához szükséges függvény illesztés látható a 6. ábrán. A mérés és a kiértékelés a PullingTest nevű program segítségével történt.

A valós szélben történő mérés eredményei

Első méréseink során állományban álló fák (1. és 2. fa) mértünk az elmozdulást a szélesség méréssel párhuzamosan. Ekkor azt találtuk, hogy míg a szél által a tőben létrehozott mozgásokat a dőlésmérővel nem tudtuk követni, addig a lézeres elmozdulásmérés sikeresnek bizonyult. Azonban a szélesség és a tő elmozdulása között nem tudunk korrelációt megállapítani. Vagyis az állományban álló fák tövének mozgása és a tőlük néhány méterre, 10 méter magasan mért szélesség között nem találtunk összefüggést.

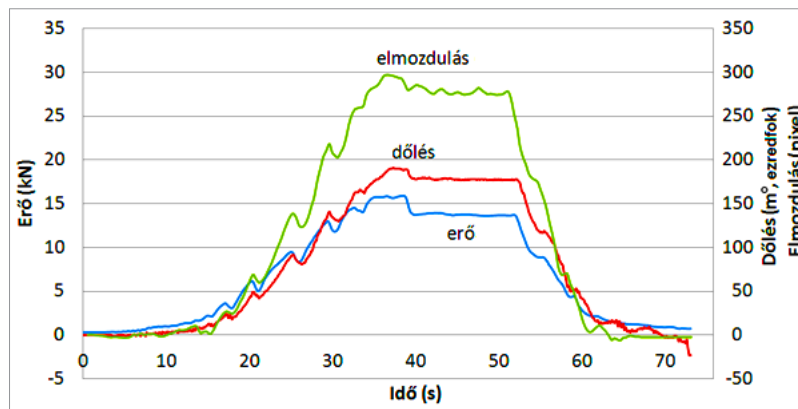
A 3. fa kellően szabadon állt, a helyszínen fújó főszélirányban nem volt más fa a környezetében, míg a főszélirányra merőlegesen néhány méterre voltak fák. Erre a vadgesztenyefára sikerült megállapítani a főszélirányból fújó szél sebessége és a tő dőlése közötti összefüggést. Egy ilyen mérés látható a 7. ábrán.

Megállapítható, hogy a lézeres elmozdulásmérés alkalmas a fa dőlésének mérésére valódi, szeles körülmények között, azonban a mérés csak szabadon álló fák esetében alkalmazható, mivel a jelenlévő más, kellően magas vagy nagyméretű tereptárgyak jelenléte, takarása mind a mérendő szél nagyságát és irányát, mind a fa koronáját és törzsét erő szélterhelést befolyásolhatják.

Az ellenállás tényező meghatározása

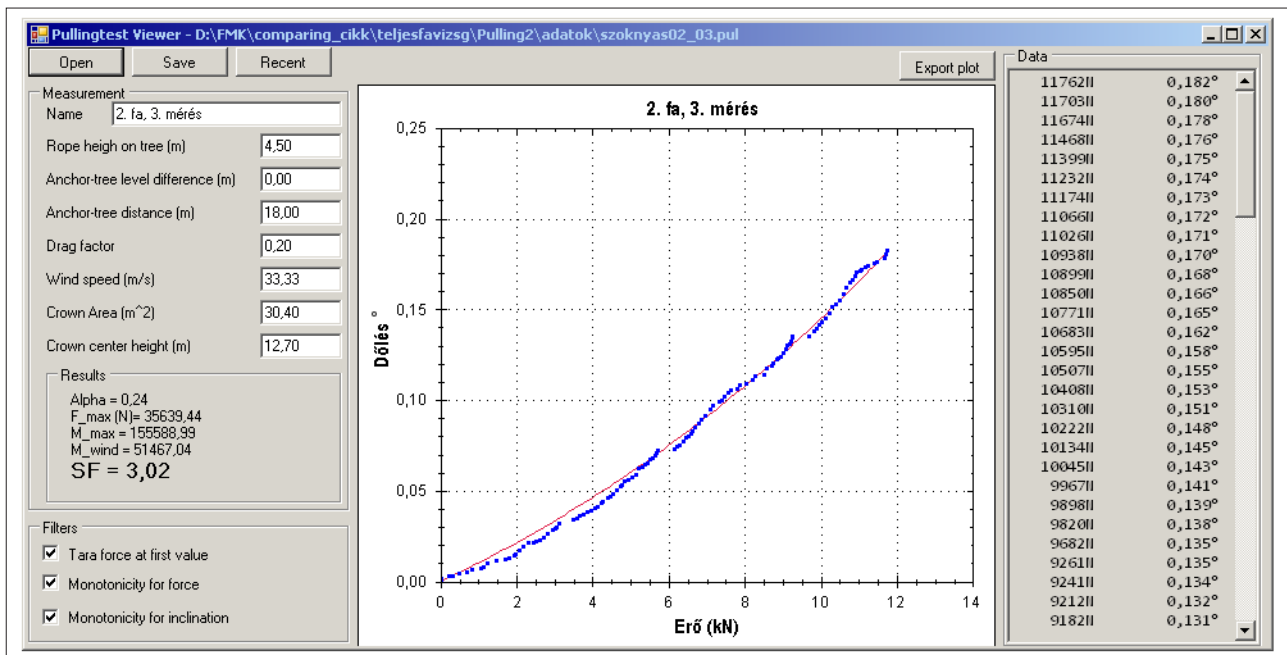
A vizsgált vadgesztenyefán dőlésmérési húzóvizsgálatot is végeztünk és értékeltük a valós szél hatására létrejövő mozgásokat is. A két mérés során gyűjtött adatok segítségével meg tudtuk határozni a fa ellenállás tényezőjét. Az általunk számított ellenállás tényező $0,302 \pm 0,049$. Az irodalomból ismert adat $0,35$ (Wessolly 1989).

Sajnos az egyetlen, élőfa ellenállástényezőt megadó publikációban (Wessolly 1989) nincsenek hibahatárok megadva.



5. ábra Az 1. fatörzs dőlésmérési vizsgálatának eredményei

Figure 5 Measured laser movement (green), inclination (red) and load (blue) data of tree Nr. 1 as a function of time



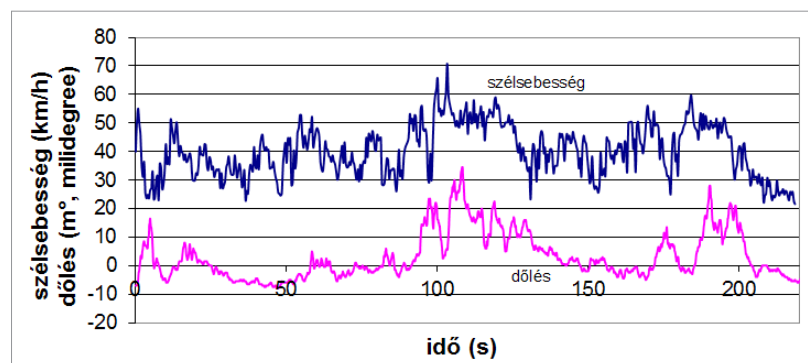
6. ábra Függvény illesztés a biztonsági faktor számításához a 2. fa egyik mérése után

Figure 6 Function fitting for calculating the safety factor, after testing tree No. 2.

Azt látjuk, hogy vizsgálataink során megadott intervallumban benne van a Wessolly által mért érték is. Ha bármilyen kicsi hibát is feltételezünk a Wessolly-értékhez, akkor is elmondható, hogy a megadott és a feltételezett hibahatárok átfedik egymást. Ez hibahatáron belüli egyezést jelent, tehát a mérés megbízhatónak bizonyult.

A gyökérkeresés eredménye

A gyökértérképezést a két lucfenyőn végeztük el. Megtaláltuk a főbb gyökereket, és elkészítettük a gyökértérképet, ami a 8B. ábrán látható.

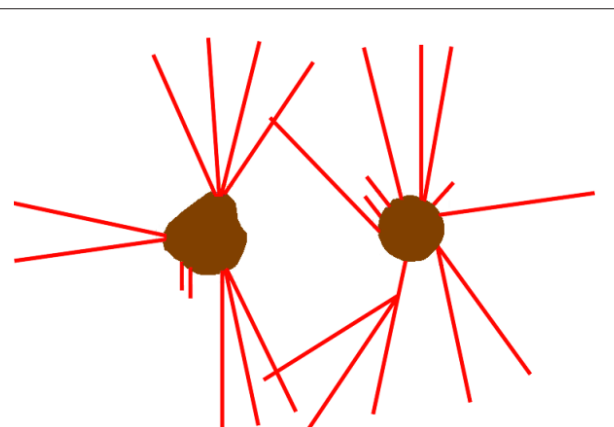


7. ábra A szabadon álló vadgesztenyefa tővének mozgása és a szélsebesség (a fa tővének mozgása néhány másodperc késéssel követi a szelet)

Figure 7 The wind velocity data (blue) and the movement (pink) of a free-standing horse chestnut tree. The movement of the trunk shows a few seconds of lag



(A)



(B)

8. ábra Fényképfelvétel (A) a feltérképezett gyökerekről és számítógép segítségével megrajzolt gyökértérkép (B)

Figure 8 Root mapping. A photo of the roots found (A) and the model made by a computer (B)

A gyökértérképből becsültük a kapaszkodási terület méretét, aminek segítségével biztonsági faktort számítottunk.

A biztonsági faktorok összehasonlítása

A lucfenyőkön dőlésmérési húzóvizsgálatot és gyökértérképezést is végeztünk. A 2. táblázat foglalja össze a számított biztonsági faktorokat.

Az adatokból jól látszik, hogy a gyökértérképezés kifordulási tényérbecsléséből számított biztonsági faktor kb. 2,5-szer kisebb, mint a húzóvizsgálat során mért. Ugyanakkor a két fa biztonsági tényezőinek viszonylagos értéke nagyon hasonló mind a két módszer esetében. Ez azt sugallja, hogy ugyan a gyökértérképezés jelenleg még nem adja vissza a valós biztonsági faktorokat, de azokkal arányos értékeket ad. A gyökérzet felülete arányosnak tűnik a fa biztonságosságával.

Az eltérés oka pontosan nem ismert. Elképzelhető, hogy a módszerrel nem detektálható kisebb gyökerek okozhatják az eltérést. Ezek nem vehetőek figyelembe a számításnál, azonban az eddigi eredmények alapján úgy tűnik, hogy ez arányos a detektálható gyökerekből számított felülettel. Ez alapján bevezethető lehet egy korrekciós tényező, amivel a gyökérből számított tényezőt megszorozva becsülhető a valós biztonsági faktor. Természetesen két fából erre nézve nem lehet megbízható következtetéseket levonni, de jövőbeni vizsgálatok erre választ adhatnak, ahogy a mérés különböző fafajokon történő megismétlése is fontos lenne azért, hogy a végén egy könnyen felhasználható eszközt kapjunk.

Az eltérés oka pontosan nem ismert. Elképzelhető, hogy a módszerrel nem detektálható kisebb gyökerek okozhatják az eltérést. Ezek nem vehetőek figyelembe a számításnál, azonban az eddigi eredmények alapján úgy tűnik, hogy ez arányos a detektálható gyökerekből számított felülettel. Ez alapján bevezethető lehet egy korrekciós tényező, amivel a gyökérből számított tényezőt megszorozva becsülhető a valós biztonsági faktor. Természetesen két fából erre nézve nem lehet megbízható következtetéseket levonni, de jövőbeni vizsgálatok erre választ adhatnak, ahogy a mérés különböző fafajokon történő megismétlése is fontos lenne azért, hogy a végén egy könnyen felhasználható eszközt kapjunk.

Összefoglalás

Munkánk során két új, a gyökérzet biztonságosságát becsülő módszert hasonlítottunk a már jól bevált dőlésmérési húzóvizsgálathoz. Az egyik új eljárás során a valós szélben történő mérést próbáltuk ki. A másik, a gyökértérképezés célja egy, a húzóvizsgálathoz egyszerűbben kivitelezhető mérés és ehhez tartozó kiértékelés kidolgozása volt.

A lézeres elmozdulásmérést a dőlésméréssel összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a dőlésmérési húzóvizsgálatban a dőlésmérő helyettesíthető lézeres elmozdulásméréssel. Az elmozdulás adatai jól megfeleltethetőek a dőlés értékeinek, s a mérés felbontása is jobb.

A dőlésmérő egy buborék helyzetváltoztatása miatt bekövetkező kapacitásváltozást méri, ebből számítja magát a dőlést. Mivel a buborék elmozdulása nem lehet tetszőlegesen gyors, ezért feltételezhető, hogy lézeres elmozdulásmérés során látható apróbb mozgások valódi mozgásnak felelnek meg.

Állományban álló fákkal kapcsolatban a valós szélben végzett mérések során arra jutottunk, hogy nem javasolt a sodronyköteles dőlésmérés kiváltása valós széllal történő méréssel. Mert a törzs dőlése, elmozdulása a méréseink során nem volt összefüggésbe hozható a mért szélesebességekkel, így ezekből számítani nem lehetett. Szabadon álló, a fő szélirányból nem takart fa esetében viszont sikerült összefüggést találnunk a széllökések, a szélesebesség és a tő mozgása között. Ebben az esetben egy kalibrálásra szolgáló húzóvizsgálat elvégzése után ellenállás tényezőt is számítottunk.

Az ellenállás tényező a szélterhelés számításában jelentős. A jelenleg a számításokhoz használatos fafajfüggő ellenállás tényezők többsége viszonylag állandó, erős szélben került meghatározásra (Wessolly és Erb 1998). Ezért érdekes az általunk számított, a széllökéssel szembeni ellenállás tényező, melyre $0,302 \pm 0,049$ -t kaptunk, míg az irodalomból ismert adat $0,35$ (Wessolly 1989). Az általunk mért érték szórása jelenleg jelentős, ennek csökkentése további feladat, mely után lehetséges az értékek érdemi összehasonlítása. Jelenleg az állapítható meg, hogy a mérés alkalmas lehet ellenállás tényező mérésére is.

Gyökértérképezést is folytattunk, mely során a főbb gyökereket sikeresen megtaláltuk. A gyökerek alapján becslést végeztünk arra nézve, hogy mekkora lehet az a terület, amelyen a fa a talajjal érintkezik, abba „kapaszkodik”. E terület felhasználásával becslést adtunk a fa tövestől való kifordulására vonatkozó biztonsági faktorára.

A számított biztonsági faktort a dőlésmérési húzóvizsgálat során megállapított biztonsági faktoralal vetettük egybe. A gyökértérképezés után számított érték kb. 2,5-szer alacsonyabb, mint a húzóvizsgálat által meghatározott. Emiatt ez a mérés a biztonsági becslésre jelenlegi állapotában nem alkalmas, a számítás so-

2. táblázat A két vizsgált lucfenyő dőlésméréssel (SF_d) és gyökérkeresés után (SF_{gy}) számított biztonságossági faktorai és azok arányai

Table 2 The data of the trees chosen for the measurements (*drag factors from Brudi and Wassenaer 2002)

	SF_d	SF_{gy}	SF_d / SF_{gy}
1. fa	5,07	1,94	2,61
2. fa	3,02	1,27	2,38
1. fa / 2. fa	1,68	1,53	

rán végzett becslések azonban finomíthatóak, további vizsgálatok elvégzése után a biztonságosság becslése sikerrel járhat. Erre utal az is, hogy a két fa biztonságosságának aránya majdnem azonos a gyökértérképezés során kapott értékek arányával. A gyökérzet mennyisége, helyzete ilyen módon összefüggésbe hozható lehet a biztonságossággal, bár a mérés és a kiértékelés még pontosításra szorul.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Talentum Műhely – a tudományért és tehetségekért a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0005 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Achim, A., Nicoll, B. C. (2009) Modelling the anchorage of shallow-rooted trees. *Forestry*, 82. 273-284.
- Brudi, E., van Wassenaeer, P. (2002) Trees and statics: Nondestructive failure analysis. In: *Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings*. Savannah, Georgia, USA, October 2002. International Society of Arboriculture. pp. 53-69.
- Bucur, V. (1995) *Acoustics of Wood*, CRC Press, 393 old.
- Bucur, V. (2005) Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees, *Ultrasonics* 43: 237-239
- Coutts, M. P. (1983) Root architecture and tree stability, *Plant and soil* 71: 171
- Divós F., Bejő L., Tóth Á. (2009) Instrument Supported Tree Evaluation in Hungary, In: *Proc. 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Beijing Forestry University, October 12-14, 2009. pp. 71-76.
- Divós F. (2008) Fák gyökérzetének akusztikus vizsgálata a stabilitás meghatározásához. Szakmai beszámoló a FAGYOKER, NKTH (Baross)-06 „Fák gyökérzetének akusztikus vizsgálata” 2007.07.02.-2008.06.30. pályázat keretében.
- Divós F., Mészáros K. (1994) Root decay detection by stress wave technique. In: *Proc. 1st European Symposium on Nondestructive Testing*, University of Forestry and Wood Science, Sopron, September 21-23, 1994. pp. 524.
- Kahl, T., C. Wirth, M. Mund, G. Böhnisch, E. Schulze (2009) Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway Spruce, *European Journal of Forest Research* 128:467-473
- Neild, S.A., Wood, C.J. (1999) Estimation of stem and root-anchorage flexibility in trees, *Tree Physiology* 19:141-151
- Peltola, H., Kellomaki, S., Hassinen, A., Granander, M. (2000) Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland, *Forest Ecology and Management* 135(1-3):143-153
- Rinn, F., Schweingruber, F. H., Schar, E. (1996) Resistograph and x-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species, *Holzforschung* 50(4): 303-311
- Wang, L., Yang, X., Xu, K. (2001) Current situations and research development of non-destructive testing for wood properties, *Forestry Engineering*, 17(6): 1-3
- Wessolly, L. (1989) A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees – Summary, *Arboricultural Journal* 13. 45-65
- Wessolly, L., Erb, M. (1998) *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer Verlag, Berlin, Germany, 272 old.
- I.S. EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Wind actions (British Standard), British Standards Institution (BSI)

A tölgy, a nyár és az akác kérgének hőszigetelő képessége

MOHÁCSINÉ RONYECZ Ildikó¹, PÁSZTORY Zoltán¹

¹Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Innovációs Központ

Kivonat

Magyarországon évente közel 600 000 m³ kéreg keletkezik az elsődleges fafeldolgozás során. A legtöbb esetben melléktermék szerepbe szoruló kéregapríték hőszigetelő képessége megfelelő előkészítés mellett alig marad el az általánosan használt szálal és habosított szigetelőanyagokétól. Az ismertetett kutatás során a tölgyfa (*Quercus robur L.*), a fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) és a nyárfa (*Populus euramericana cv. Pannónia*) aprított kérgének hőszigetelő képességét vizsgáltuk különböző mértékű tömörítés mellett. A hőáramok iránya miatt a próbatest vastagsági méreteihez viszonylag nagy szélességi méreteket választottunk, hogy az oldalirányú hőáramokat a szigetelésel csökkentjük. A kísérleti eredmények azt igazolták, hogy a tömörítés mértéke befolyásolja a kéreg-levegő keverék hővezetési tényező értékét.

Kulcsszavak: fakéreg, hőszigetelő képesség, tömörítés, környezettudatosság

Heat insulation capacity of oak, poplar and black locust bark

Abstract

In Hungary, primary wood processing produces about 600 thousand cubic meters of bark every year. In most cases, with adequate preparation, the insulation capacity of bark chips used mostly as by-product is comparable to that of the commonly used rock and glass wool and foam insulation materials. In the present work the heat insulation capacity of English oak (*Quercus robur L.*), black locust (*Robinia pseudoacacia*) and poplar (*Populus euramericana cv. Pannónia*) bark was investigated, applying different level of compression. Our results proved that the degree of compaction affects the thermal conductivity of the bark-air mixture.

Keywords: wood bark, heat insulation, compression

Bevezetés

A környezetvédelmi kérdések megoldása egyre fontosabbá válik. A folyamatosan felmerülő környezeti problémák rámutatnak a környezettudatosság szükségességére az élet minden területén. Egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a környezeti terhelés csökkentésének érdekében a termék előállításánál és életciklusa végén a megsemmisítésnél.

Hazánkban már több rendelet is született az épületek energetikai jellemzőinek meghatározására, ám nem csupán a jogi szabályozások miatt érdemes épületeink energiafogyasztásának minimalizálására törekednünk. A klímaváltozás legfőbb okozója ugyanis energiatermelésünk és -felhasználásunk jelenlegi szintje, hiszen az összes szén-dioxid kibocsátás döntő része valamilyen energiafogyasztás eredménye (Energiaklub 2011). Számos tanulmány és vizsgálat igazolja, hogy a fa építési célú felhasználása kevesebb CO₂-kibocsátással jár, megmunkálásakor kevesebb energiát használunk fel, újrahasznosítható, ezáltal sokkal környezetkímélőbb az általánosan elterjedt építőanyagokhoz képest (Bozsaky 2011). Munkánk során a fakéreg speciális felhasználási lehetőségeit keressük olyan területen, ahol az elégetéshez képest lényegesen nagyobb energia- és CO₂-megtakarítási egyenleg érhető el.

Az élő fa fontos védőszövege a kérgé. A kéreg választja el a fatestet a külvilágtól, az időjárási viszonyoktól, védelmezi a különböző károsítókkal szemben (Molnár és tsai. 2007). Az élő kéreg fontos szerepet tölt be, meg-

védi a fát, és élőhelyet nyújt több ökoszisztémának is (Michel és tsai. 2011, MacFarlane 2009) és az erdőtüzek káros hatásától is korlátozott védelmet biztosít a kambiumnak (Bauer és tsai. 2010, Wang és Wangen 2011). A kéreg (cortex) két fő részre bontható, háncsra (floem) és héjkéregre (ritidoma), mely egyes fajoknál kiemondottan rostos szerkezetű, bár a fajok között jelentős különbségek lehetnek (Molnár 2004). Egyes kéregtípusok gazdagon tartalmaznak rostokat, mint az akác, a nyár, a tölgyek; mások rostszegényebbek, ilyenek a fenyőfélék és a platán (Lotova 1987).

A kéreg nagyobb mértékben tartalmaz védő szerepet betöltő anyagokat (csersav, szuberin stb.), mint a faanyag, hiszen a természetben is a kéregnek van védő szerepe a biotikus károsítókkal szemben, így a kéreg – hordozva ezen anyagokat – kevésbé szorul vegyszeres védelemre, mint a fa, vagy a cellulózbázisú szigetelőanyagok.

A hazai erdőkben kitermelt faanyagról eltávolított kéreg mennyisége évente országosan eléri az 5–600 000 köbmétert, ami összességében óriási mennyiséget képvisel. Ez a mennyiség folyamatosan oszlik el az elsődleges fafeldolgozás folyamatában (Börscsök 2010). A kéreg részaránya a fatesthez képest akár 10–20% is lehet (Molnár 2004). Fontosabb fajok kéregszázalékát elemezve Sopp és tsai. (2000) viszont azt állapították meg, hogy a fatesthez viszonyítva a kéreg mennyisége 5–24% között változik. A magyarországi fakitermelésben döntő szerepet játszó akác, tölgy és nyár különösen nagy kéreghányadúak. Polubojarinov (1976) vizsgálta a kéreg sűrűségét. Légszáraz (12%) állapotban a következő eredményeket kapta:

- tölgy (kocsányos, kocsánytalan): 480 kg/m³
- rezgő nyár: 590 kg/m³
- nyár: 480 kg/m³
- erdeifenyő: 370 kg/m³

Természetesen a kéreg sűrűsége számos tényezőtől függ (életkor, földrajzi elhelyezkedés, nedvességtartalom). A kéreg a fafeldolgozás során a legtöbb esetben – jellegéből fakadóan – melléktermék szerepbe szorul. Fő felhasználási területei az energiatermelésre (magas hamutartalma és nagy térfogata miatt nem ideális energiahordozó) és bizonyos fajok esetében a talajtakarásra korlátozódik, bár kémiai összetétele miatt több hazai faj nem alkalmas e célra (Molnár 2004, Filbakk és tsai. 2011).

Anyag és módszer

Az előkísérletek során megállapítottuk (Ronyecz és tsai, 2012), hogy a hazánkban előforduló, iparilag jelentős mennyiségben hasznosított fajok közül melyek kérgé alkalmas a leginkább hőszigeteléshez, azaz mely kérgék rendelkeznek a legjobb hőszigetelési tulajdonságokkal. A most ismertetett kutatásban arra kerestük a választ, hogy a vizsgált fajok hőszigetelési tulajdonságai hogyan változnak összenyomás hatására.

A Magyarországon legnagyobb számban kitermelt, vastag háncstesttel rendelkező fajokot választottuk: tölgyfa (*Quercus robur* L.), fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) és a nyárfa (*Populus euramericana* cv. *Pannónia*). Mindhárom faj kísérleti mintadarabjait fűrészüzemi rönktéren gyűjtöttük be. A mintagyűjtés után késes erdészeti aprítóval (Bandit Model 1890) a kérget felaprítottuk. Mindhárom faj nedvességtartalmának meghatározása után szárítószekrényben szárítottuk az 1. táblázatban látható egyensúlyi nedvességtartalom eléréséig. A minták nedvességtartalmának meghatározását a szárítási eljárás követelményei szerint végeztük.

A hővezetési értékek vizsgálatához stacioner (állandósult) állapotban mérő, nagy pontosságot biztosító berendezést alkalmaztunk. Állandósult állapotról beszélünk, ha a hőmérsékletmérő hőmérséklete nem függ az időtől, tehát időben állandó.

A hővezetési tényező mérőberendezés beállításait, az adatgyűjtést, az adatok feldolgozását számítógépre telepített, e célra készített alkalmazás segítségével végeztük. A párhuzamos hőáram-vonalak biztosítása érdekében a mérést az 500x500 mm-es fűtőlap középső, 120x120 mm-es felületén végeztük (1. ábra). Így az anyag mérési felületén kívül eső része szigetelésként szolgált és a perem közelében fellépő hőáram-vonalak esetleges elhajlását kiegyenlítette. A kedvező mérési geometria és az oldalszigetelések miatt permfűtést nem alkalmaztunk (1. ábra).

1. táblázat A minták kezdeti és egyensúlyi nedvességtartalma

Table 1 Moisture content of the samples initially and during the measurement

Faj	Kezdeti nedvesség (%)	Egyensúlyi nedvesség (%)
Tölgy	26	12
Nyár	19	12
Akác	23	12

A próbatesten keresztülfolyó hőáram a fűtő- és a hűtőlap között lévő hőmérsékletkülönbség miatt jön létre. A hőáram függ az anyag hővezetési tényezőjétől (λ), a hőmérsékletkülönbségtől (ΔT) és a próbatest vastagságától (d). Az összefüggést a következő egyenlet mutatja:

$$Q = \frac{\lambda * A * \Delta T}{d} \quad [1]$$

ahol:

Q – a hőáram (W)

λ – a hővezetési tényező (W/mK)

A – a próbatest felülete (m²)

ΔT – a hőmérsékletkülönbség a próbatest két oldalán (K)

d – a próbatest vastagsága (m)

A mérésekhez mindhárom fafaj esetén 1500 g mintát használtunk, melyet a mérőtérben helyeztünk el lazán, úgy, hogy az első mérés induló vastagsága $d_0=100$ mm volt. A mért mintákat 5 mm-enként tömörítettük a fűtő- és a hűtőlapok távolságának csökkentésével. A minták pontos vastagsági méreteit a minta szélein egymásra helyezett 5 mm-es távtartó lécek segítségével biztosítottuk. Egy-egy újabb mérésnél egy-egy 5 mm-es léceket távolítottunk el, majd a fűtőlapot visszahelyezve kezdtük meg a következő mérést.

A 2. ábrán látható a tölgykéreg-apríték porózus szerkezete, amely a tömörítés következtében egyre zártabbá vált.

Eredmények

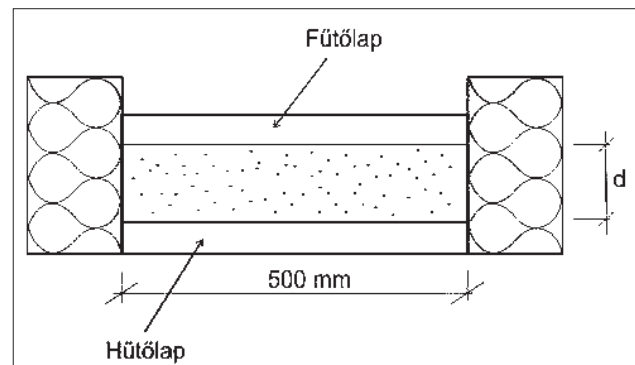
A mért fafajok kérgének sűrűségi és vastagsági értékeit a 2. táblázat tartalmazza. A 3. ábrán láthatjuk a három fafaj hővezetési érték változásait.

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy tömörítés hatására az aprított kéreg és levegő rendszer hővezetési tényező értékei csökkennek.

Értékelés

Kutatásunk során egy természetes eredetű anyag hőszigetelési tulajdonságait vizsgáltuk aprított formában, különböző tömörítési értékek mellett. Mérési eredményeink alapján megállapíthatjuk, hogy a minta sűrűsége az aprított kéreg és levegő rendszer hővezetési tényezőjére jelentős hatást gyakorol.

Az aprított kéregdarabok – geometriájuk miatt – éleik és lapjaik mentén, pontszerűen helyezkednek el egymáson. A köztük lévő szabad teret levegő tölti ki. Összenyomás hatására a kéregdarabok egyre közelebb kerülnek egymáshoz, levegőt szorítva ki maguk közül, így több kisebb légkamrát alakítanak ki, ami a levegő áramlását nagymértékben akadályozza. A nyugvó levegő hővezetési tényezője 0,025 W/mK,



1. ábra A hővezető tényező vizsgáló berendezés elrendezési rajza

Figure 1 Schematic of the heat conductivity measurement



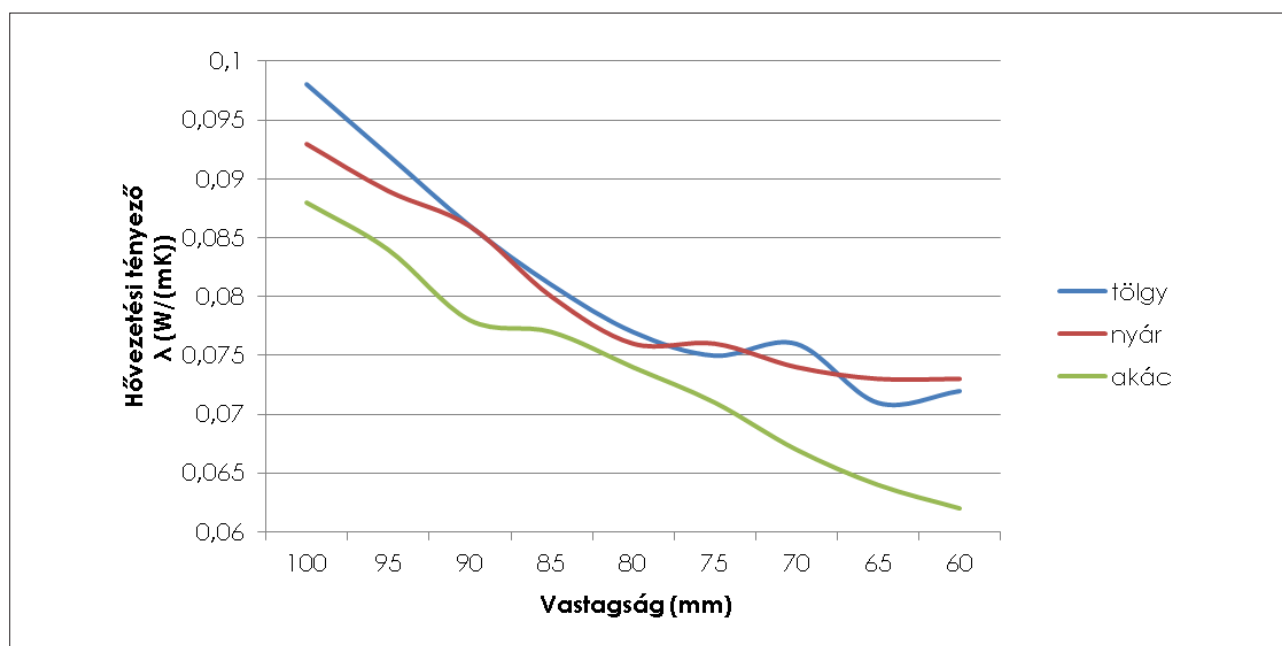
2. ábra A tölgykéreg-apríték minta elhelyezkedése a mérőműszerben

Figure 2 Bark chips in the measuring space

2. táblázat A három fafaj és levegő rendszer sűrűség értékei

Table 2 The three-species system and air density values

Minta sorszáma	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Vastagság	100	95	90	85	80	75	70	65	60
ρ (kg/m ³)	60	63,16	66,67	70,59	75	80	85,71	92,31	100



3. ábra A három fafaj-apríték hővezetési tényezőjének (λ) változása a tömörítettség függvényében

Figure 3 Change of the heat conductivity of oak tree bark chips as a function of the compression

szabad áramlása esetén viszont ennek sokszorososa is lehet a hőszállító képessége. Kisebb áramlási csatornák, kamrák esetén a légáramlás jelentősen alacsonyabb, így a nyugvó levegőhöz tartozó értékek dominálnak. Ez magyarázza az összenyomás hatására történő hővezetési tényező csökkenést.

A fokozódó összenyomás hatására azonban a kéregdarab-elemek egyre több ponton, illetve nagyobb felületeken érintkeznek egymással, ezzel növelve az apríték-levegő mátrixban a kéregelemek okozta hőhíd-rendszer hatását. Ennek eredményeként a kéreg apríték-levegő mátrixban egyre nagyobb arányban jelenik meg a szilárd elemeken keresztül átjutott hő mennyisége, növelve a hővezetési tényező értékeit.

Összefoglalás és következtetések

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a tömörített fakéregalmaz hőszigetelési tulajdonságai nem maradnak el számottevően a szokványosan alkalmazott szigetelőanyagoktól, melyek hővezetési értékei 0,04 W/mK körül vannak. A fakéreg 100%-ban természetes alapanyagból áll, úgy, hogy a tömegének közel felét kitevő szén a levegő szén-dioxid tartalmából épült be. A kéregszigetelés életciklusa végén a környezet károsítása nélkül energetikai vagy más célra újrahasznosítható.

Összességében az is megállapítható, hogy a kéregdarabok hőszigetelő képessége lényegesen jobb, mint ugyanazon fajok fatestének hőszigetelő képessége (Szatmári 2010). A magyarázat egyértelműen a sejtszerkezetre és az aprítás utáni laza szerkezet hatására kialakult közbezárt levegőre vezethető vissza. A kéreg sejtszerkezete „lazább”, mint a tömör fa szöveteié.

További vizsgálatok elvégzése alapján az aprított fakéreg frakcionált, préselt és ragasztott formában akár kereskedelemben kapható építőanyagká is válhat.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az Európai Unió és Magyarország támogatásával a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program - Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretei között valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Bauer G., Speck T., Blömer J., Bertling J., Speck O. (2010) Insulation capability of the bark of trees with different fire adaptation, *J Mater Sci* 45:5950–5959, <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-010-4680-4>
- Bozsaky D. (2011) Természetes és mesterséges hőszigetelő anyagok összehasonlító vizsgálatai és elemzése, Doktori értekezés, SZIE, Győr

- Börcsök Z. (2010) Erdő- és fagazdalkodás, elektronikus oktatási segédlet, Sopron [http://www.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/faanyag/segedanyag/erdo_es_fagazdalkodas/erdoesfagazdalkodas.pdf]
- Energiaklub (2011) NegaJoule 2020, avagy energia megtakarítási lehetőségek lakóépületeinkben, kutatási jelentés
- Filbakk T., Jirjis R., Nurmi J., Høibø O. (2011) The effect of bark content on quality parameters of Scotspine (*Pinus sylvestris* L.) pellets, *Biomass and Bioenergy*, 35(8):3342–3349, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.09.011>
- Lotova L. I. (1987) *Anatomiy akorykhvoynkh (Anatomy of Barkin Conifers)*, Moscow
- MacFarlane D. W., Luo A. (2009) Quantifying tree and forest bark structure with a bark-fissure index *Can. J. For. Res.* 39: 1859–1870, <http://dx.doi.org/10.1139/x09-098>
- Michel A. K., Winter S., Linde A. (2011) The effect of tree dimension on the diversity of bark microhabitat structures and bark use in Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii* var. *menziesii*), *Can. J. For. Res.* Feb2011, Vol. 41 Issue 2, p300-308, 8p, <http://dx.doi.org/10.1139/x10-207>
- Molnár S. (2004) *Faanyagismeret, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest*
- Molnár S., Peszlen I., Paukó A. (2007) *Faanatómia, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 78-84. o.*
- Sopp L., Kolozs L. (2000) *Fatömeg számítási táblázatok, Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest, pp 24-29*
- Szatmári Z. (2010) *Hőhídmentes épületszerkezetek, konferencia kiadvány, Budapest*
- Polubojárinov O. J. (1976) *Plotnosztydreveszini (A faanyag sűrűsége), Lesznejapramislenoszty, Moszkva, 159 p*
- Ronyecz I., Mohácsi K., Pásztor Z. (2012) Néhány hazai fafaj kérgének hőszigetelő képessége, *Faipar – A faipar műszaki tudományos folyóirata, LX. évf. 1. szám pp 16-21,*
- Wang G.G., Wangen S.R. (2011) Does frequent burning affect longleaf pine (*Pinus palustris*) bark thickness, *Can. J. For. Res.* 41: 1562–1565, <http://dx.doi.org/10.1139/x11-074>

Bükk (*Fagus sylvatica*) álgeszt kimutatása elektromos feszültség- és ellenállásméréssel

DIVÓS Ferenc¹, GÖNCZ Balázs²

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Fizikai és Elektrotechnika Intézet

² Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Fa és Papíripari Technológiák Intézet

Kivonat

A bükkfa egyik legjelentősebb esztétikai hibája az álgeszt, melynek elektromos tulajdonságai is eltérnek az egészséges faanyagétól. Ez lehetőséget kínál az álgeszt elektromos ellenállás mérésen alapuló vizsgálatára. Az álgeszt kimutatására irányuló vizsgálataink során először egy 24 csatornás impedancia tomográffal vizsgáltunk bükk törzseket. A jelentősen alacsonyabb ellenállású álgesztes farész jól kirajzolódott a tomográffal előállított ellenállás-térképeken, és jó egyezést mutatott a vágásképen látható álgeszt méretével és alakjával. 8 érzékelővel végzett laboratóriumi előkísérletek segítségével megállapítottuk a legelőnyösebb elektróda-elrendezést, aminek a segítségével a terepen gyorsan és egyszerűen lehet vizsgálni az álgeszt jelenlétét. A tapasztalatok alapján a terepi vizsgálatokhoz kifejlesztett műszer egyértelműen alkalmasnak bizonyult az álgeszt jelenlétének a kimutatására, azonban annak kiterjedését nem lehetett vele megbízhatóan megállapítani. A vizsgált átmérő tartományban a feszültség csak igen kis mértékben függ az átmérőtől, a vizsgálat az átmérőtől függetlenül megbízható, nincs szükség átmérő szerinti korrekcióra.

Kulcsszavak: bükk, álgeszt, élőfa-vizsgálat, roncsolásmentes faanyagvizsgálat, impedancia tomográfia

Detecting red heart in beech (*Fagus sylvatica*) through electric resistance and voltage measurements

Abstract

One of the most important visual defects of beech is red heart, whose electric conductivity is also different from that of sound wood. This offers an opportunity for detecting red heart based on resistance measurements. First, beech trees were investigated using a 24-channel impedance tomograph. Red heart beech wood, which has a much lower electric resistance, was clearly visible on the resulting resistance maps, and it corresponded well to the size and shape seen on the trees' cross-section after felling. The laboratory investigations using 8 detectors helped establish the best arrangement of electrodes for the quick and reliable detection of red heart on site. Based on the on-site tests, the developed instrument is highly reliable for detecting the presence of red heart in beech trees of 40-60 cm in diameter, but could not consistently predict its extent. The measured voltage shows very weak correlation to diameter in the examined range; the diameter does not effect the test significantly, and there is no need for diameter-correction.

Keywords: beech, red heart, live tree testing, non-destructive testing of wood, impedance tomography

Bevezetés

A bükkfa egyik leggyakoribb fahibája az álgeszt. Az idős egyedeknél, vágásérett korban szinte minden esetben jellemző (Tuzson 1904), de fiatalabb példányoknál is gyakran előfordul. Jelentős problémát jelent a faipar – különösen a lemez- és fűrészipar – számára. A bükk faanyag értékét jelentősen csökkenti (Molnár és Bariska 2002). Fizikai és mechanikai tulajdonságok szempontjából nincs jelentős eltérés az egészséges és az álgesztes faanyag között, sőt, nyomószilárdság tekintetében az utóbbi kismértékben jobbnak bizonyul, viszont nehezebben telíthető (Molnár 2006). Egészséges álgeszt esetében elsősorban esztétikai hibáról beszélhetünk.

Az álgeszt a bükkfában megnövekedett elektromos vezetőképességgel rendelkezik a fatest többi részéhez képest (Bíró 2004).

Az álgeszt megjelenés szerint öt csoportba sorolható: egészséges, felhős, csillagos, korhadt és aszimmetrikus (Bíró 2004). Az 1. ábrán egészséges álgeszt látható, közvetlenül döntés után. Jellemző, hogy az évgyűrűhatárokat egyáltalán nem követi (Koch 2003). Többféle hosszanti lefutásban jelenik meg, és ez alapján orsó alakú, kúpos, vagy szabálytalan csoportokba sorolható (Bíró 2004).

Vizsgálatunk célkitűzése egy olyan, a gyakorlatban is alkalmazható módszer kifejlesztése volt, amellyel még döntés előtt kimutatható az álgeszt jelenléte és mérete, az álgesztes és az álgesztmentes faanyag vezetőképessége között fennálló különbségek alapján. A mérési módszert először laboratóriumi kísérletekkel alapoztuk meg, majd terepi mérésekkel igazoltuk annak működőképességét.

Kísérleti anyagok és módszerek

Vizsgálataink az álgeszt elektromos tulajdonságain alapulnak. Ha a törzs kerülete mentén mérőelektródákat helyezünk el, melyek segítségével elektromos áramot vezetünk a faanyagba, meghatározott erőter jön létre az adott keresztmetszetben. Ez az erőter a faanyag egészségi állapotának a függvénye. Ha a vizsgált faanyag jól vezető fahibát, megnövekedett nedvességtartalmú farészt tartalmaz, akkor az ezt az erőteret módosítja. A megváltozott erőteret a többi elektródán mért feszültségkülönbségek alapján lehet jellemezni. A mérési pontokon álgesztes faanyag esetében megváltozott, kisebb feszültségértékeket mérhetünk, szemben az egészséges faanyaggal (Göncz 2010).

Vizsgálatainkat három lépésben végeztük el, az alábbiak szerint:

- 24 csatornás terepi impedancia tomográfias mérés egészséges és álgesztes, kivágásra kijelölt törzseken, a módszer alkalmazhatóságának igazolására;
- laboratóriumi vizsgálatok egészséges és álgesztes mintákon, 8 érzékelő segítségével, egy egyszerű, terepen is alkalmazható mérés kifejlesztése céljából;
- terepi mérések négy érzékelő alkalmazásával.

Az egyes mérések kivitelezését részletesen az alábbiakban mutatjuk be:

1. Impedancia tomográfias vizsgálatok

Az elektromos vezetőképességen alapuló módszer alkalmazhatóságának igazolására először impedancia tomográfias méréseket végeztünk. A talajvizsgálatoknál és az orvostudományban alkalmazott eljárás alapján fejlesztett műszer (Picus Treetric impedancia tomográf, Argus Electronic GmbH) segítségünkre van a faanyag keresztmetszeti vezetőképesség-eloszlásának vizsgálatában. Megvizsgálhatók vele a faanyag keresztmetszetében lévő elektromos ellenállás-beli különbségek, és keresztmetszeti ellenállástérképet készít a faanyag keresztmetszetéről.

A tomográf 2 fém elektródán keresztül elektromos áramot vezet a faanyagba, 2 elektródán pedig méri a faanyagban létrejövő erőter feszültségváltozásait, illetve ellenállását. Ezt a mérést meghatározott számú kombinációban végzi el. Az általunk használt eszköz maximum 24 érzékelőt támogat, mi is ennyit használtunk méréseink során, mivel így kaptuk a legrészletesebb képet a törzsek ellenállásviszonyairól. Ebben a kombinációban 253 mérést végez a műszer, amelyhez kb. 5 perc szükséges. Impedancia tomográffal végzett mérést mutat a 2. ábra.

A tomográfos vizsgálatokra a téli fakitermelés időszakában került sor. A méréseket a Soproni-hegységben, összesen négy erdőrésztben hajtottuk végre (S203H, S167G, S154D, S152C). Előzetesen kitermelésre ítélt egyedeken végeztük a vizsgálatokat, így közvetlenül és viszonylag gyorsan képet kaphattunk az eredményekről.



1. ábra Egészséges álgesztet tartalmazó bükkfa keresztmetszete döntés után

Figure 1 The cross section of a beech trunk containing sound red heart after felling



2. ábra Impedancia tomográffal végzett mérés élőfán

Figure 2 Impedance tomographic measurement on a live tree

A mérések magassága a talajszinttől számítva 1 m és 1,8 m között volt. A megvizsgált egyedek erőteljesen különböztek egymástól, alacsony növésű kis törzsátmérőjű, magas növésű nagy törzsátmérőjű, villás növésű fa egyaránt előfordult. A vizsgálatokat összesen 30 egyedén végeztük el.

2. Laboratóriumi feszültségméréses vizsgálatok

Ennél a vizsgálatnál fakitermelésekről beszerzett, 40 cm átmérőjű korongokon modelleztük az érzékelők törzsön való elhelyezkedését. Egy egészséges és egy álgesztes korongot használtunk, így optikailag is ellenőrizhetővé váltak eredményeink. A törzs kerülete mentén 8 darab, mérési és gerjesztési pontként is funkcionáló fém érzékelőt helyeztünk el. Érzékelőként egyszerű, kereskedelmi forgalomban kapható, 40x2 mm-es fém szegeket használtunk, kb. 15 mm-es behatolási mélységgel (legalább 5 mm-es behatolás a fatestbe). Elrendezésük a 3. ábrán látható. Áramforrásként egy EMG 1257 Type TR-0473 típusú függvénygenerátort használtunk. Az alkalmazott feszültség 3 V, a frekvencia 4 kHz volt. A feszültséget Maxwell MX 25 501 típusú hagyományos voltmérővel mértük.

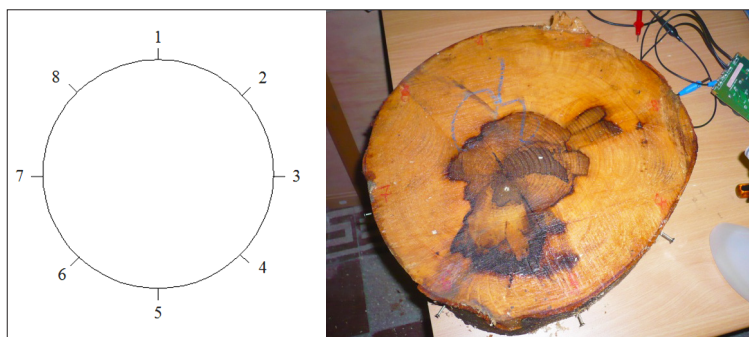
A méréseket az 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7, 1-8 pontpárok gerjesztésével, és mindegyik esetben az összes fennmaradó kombinációnál történő méréssel végeztük el, így összességében 27 mérés történt minden gerjesztési kombináció esetén. A méréssorozat elvégzése után mindegyik kombináció esetében kiszámításra került az egészséges és az álgesztes anyagon mért értékek hányadosa (U_e/U_a). Minél nagyobb ez a hányados, annál megbízhatóbban mutatható ki az álgeszt az adott gerjesztő-érzékelő kombináció használatával. Ez alapján került sor a terepi méréseknél alkalmazott, egyszerűsített mérési eljárás kifejlesztésére.

3. Terepi mérések

A terepi mérésekhez egy kézi műszert készítettünk, az előzőekben ismertetett laboratóriumi mérések alapján, annak mobilizálására. A szerkezet egy 9 V-os tápegységből, egy kétállású kapcsolóból, egy szabványos mono, 3,5 mm-es csatlakozóaljzatból, 4 fém elektródából (60x2 mm-es fém huzalszegek), egy UniVolt DT 890 típusú voltmérőből és egy órakvarcból áll (Göncz 2010). A mérés sematikus rajza a 4. ábrán látható. Az elektródák elhelyezését az előzetes laboratóriumi mérések alapján határoztuk meg. Ez a korábban ismertetetknél könnyebb és gyorsabb mérést tesz lehetővé, így a gyakorlatban jobban alkalmazható. A méréseket kb. 1 m-es magasságban, az 1-2 illetve a 2-3 sz. elektródák gerjesztésével is elvégeztük.

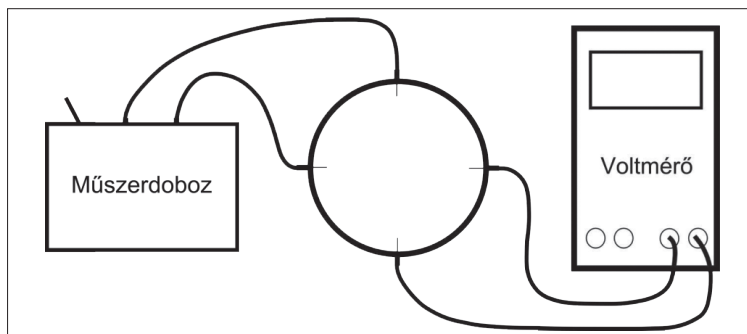
A kézi műszer gyakorlati tesztelése során először a Soproni-hegység S162E erdőrészletének 50 egyedét vizsgáltuk. A vizsgált egyedek átlagéletkora hozzávetőlegesen 100 év volt. Az egyedek törzsátmérője változó volt, 35 cm-től 75 cm-ig terjedt. A vizsgálatra kijelölt egyedek kiválasztása az erdőrészletben található egyedek közül véletlenszerűen történt. A mérés befejezése után a kapott eredmények alapján a valószínűleg fahibát rejtő egyedeket megjelöltük, majd fizikai mintavételezéssel ellenőriztük. A mintavételezést kézi működtetésű Pressler-fúróval hajtottuk végre.

Ezt követően – továbbra is a kézi műszerrel – a Soproni-hegységben, Brennbergbánya közelében található két erdőrészletben (S151B, S150B) folytattuk a méréseket, a minimális előre detektálható álgeszt méretének meghatározása érdekében.



3. ábra A 8 darab, elektródául szolgáló érzékelő elhelyezkedése a bükk korong kerülete mentén

Figure 3 The location of the 8 electrodes along the circumference of the beech tree



4. ábra A terepen alkalmazható kézi műszer sematikus ábrája

Figure 4 Schematic of the handheld instrument used for on-site measurements

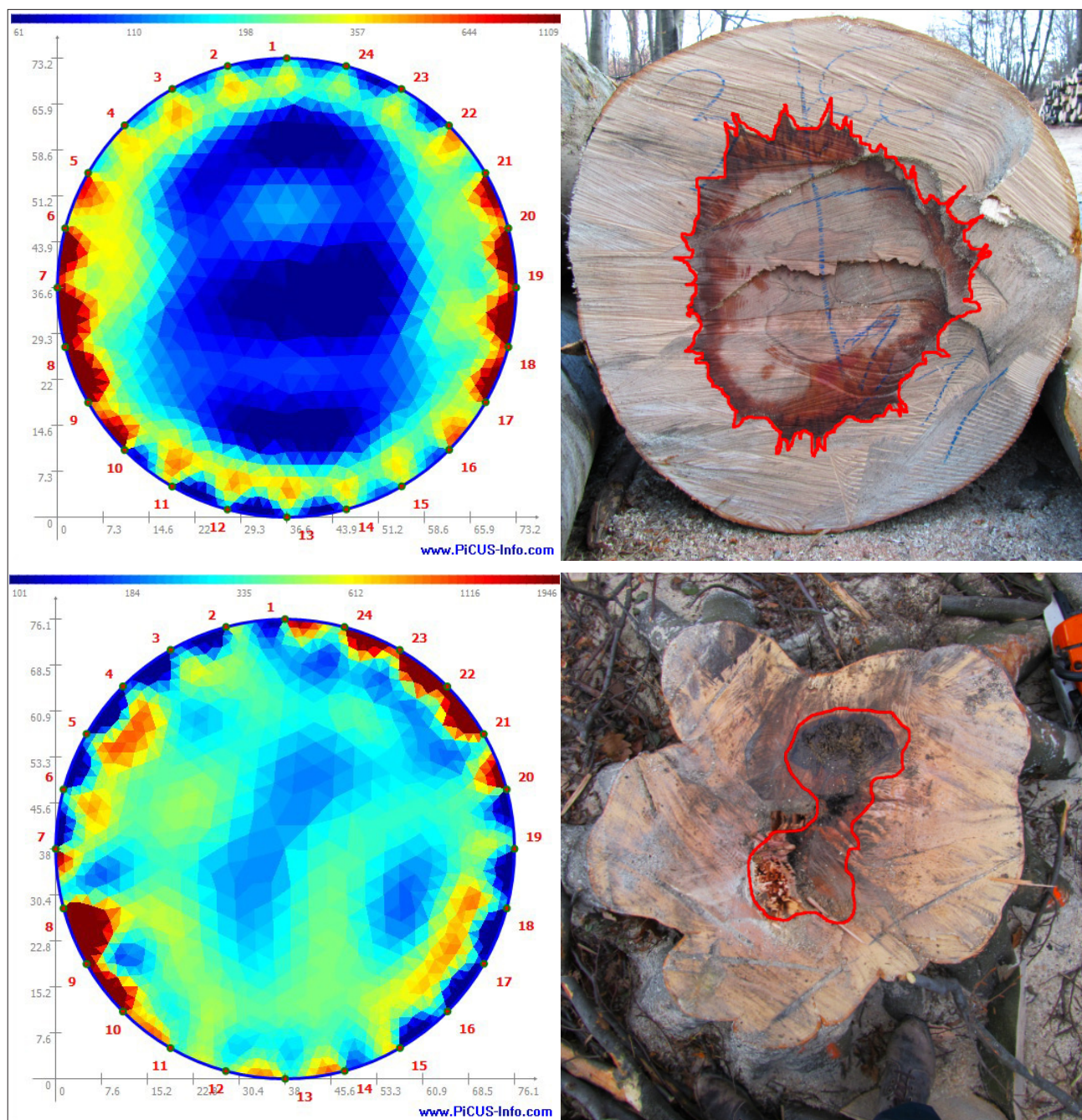
Lehetőségünk nyílt az álgeszt optikai úton történő ellenőrzésére is, mivel a vizsgálatokat fakitermeléseken, és erdei rakodók felkeresésével végeztük. Az erdőterületeken a kitermelt faanyagot látva az álgeszt valamennyi megjelenési formája jelen volt, ugyanakkor néhány esetben álgesztmentes faanyag is előfordult.

Eredmények

1. Impedancia tomográfias vizsgálatok

Az impedancia tomográfia képességeit jól mutatják az 5. ábrán látható ellenállástérképek. Az alacsonyabb nedvességtartalmú egészséges faanyag (geszt) nedvességtartalma, és így az elektromos vezetőképessége is alacsonyabb (az ellenállástérképen piros színnel jelölve). Ezzel szemben az álgesztes anyag vezetőképessége magasabb, ellenállása kisebb, amit a kék szín jelez.

Az 5. ábrán jól látható, hogy a műszer által rajzolt kép jó egyezést mutat a valós állapottal (a fotókon piros szegély mutatja az álgeszt határvonalát). Az ellenállástérképeken található adatokból leolvasható,



5. ábra Álgesztes bükk egyedek törzskeresztmetszetének ellenállástérképe és valós képe

Figure 5 Impedance tomographic images and actual photographs of beech tree cross sections

hogy az álgeszt ellenállása mindössze harmadakkora, mint a nem álgesztes farészé. Látható továbbá a törzsön belüli pontos hely, amit a sötétebb kék szín jelöl. Ennek a jelentős eltérésnek, és a műszer jó felbontásának köszönhetően az impedancia tomográf viszonylag nagy pontossággal képes kimutatni nem csak az álgeszt jelenlétét, de méretét és elhelyezkedését is a törzsön belül. Ugyanakkor azonban a műszer igen költséges, és a mérés beállítása és annak elvégzése is időigényes, emiatt gyakorlati alkalmazása nehézségekbe ütközik.

2. Laboratóriumi feszültségméréses vizsgálatok

A méréssorozat kiértékelése után minden gerjesztett elektródapár esetében megvizsgáltuk, hogy mely mérési pontoknál mutatkozott a legnagyobb eltérés az álgesztes és az egészséges anyagok között. Ezeket a maximális eltérést mutató elrendezéseket, és az eltérés mértékét mutatja be az 1. táblázat.

Mint a táblázatból látható, az összes mérés közül a legnagyobb eltérést az 1–7 gerjesztési pontokon tapasztaltuk, amikor is a 3–5 pontok között az álgesztes anyagon mért feszültség alig több mint az egészséges anyagénak az 1/5-e. Ez alapján tehát ez az elektródaelrendezés mutatkozik a legjobbnak (azaz, ha az anyag kerületét négy egyenlő részre bontjuk, és a gerjesztést, valamint a mérést egymás melletti két-két elektródán végezzük.) Az ezzel analóg 1–3 gerjesztési pontok esetén szintén az azokkal szembeni, 5–7 mérési pontokon tapasztaltuk a legmarkánsabb eltérést – igaz ugyan, hogy ez az eltérés valamivel kisebb, de még mindig igen jelentős volt. Az eredmények alapján tehát ez az elektródaelrendezés bizonyult a legcélszerűbbnek, és ezt alkalmaztuk a későbbi, terepi mérések esetében is.

3. Terepi mérések

Az első terepi mérések eredményei több esetben nagy valószínűséggel utaltak az álgeszt jelenlétére, kettő egyed esetében a laboratóriumi méréshez hasonló feszültségértékeket jeleztek. Az első terepen végrehajtott mérések esetén csak a legjelentősebb eltéréseket mutató kettő egyedekből történt mintavétel kézi működtetésű Pressler-fúró segítségével, valamint egy kontrollmérést hajtottunk végre.

Mindkét kiválasztott fatörzs esetén megbizonyosodtunk a feltételezéseink helyességéről. A fúróval vett minták álgesztes anyagot tartalmaztak. Kontrollként megvizsgáltunk egy, az adatok alapján egészségesnek tűnő egyed is. A mintavétel ebben az esetben is igazolta a vizsgálatot; a fa egészséges volt.

A későbbi terepi mérések során – amikor is a feszültségmérés közvetlenül a döntést megelőzően történt – a döntés után feljegyeztük az álgeszt keresztmetszeti részarányát. Az álgeszt mérete és a mért feszültség értékek közötti összefüggést a 6. ábra szemlélteti. Az erdőterületeken – különösképpen az S150B-ben – a villás növésű bükk nagyon gyakori volt. Ez szinte minden esetben az álgeszt jelenlétét vetítette előre.

A 6. ábrából két fontos következtetés vonható le:

- A vizsgált átmérő tartományban a feszültségértékek nagy megbízhatósággal jelzik előre az álgeszt jelenlétét. 10 mV feszültség fölött mindössze egyetlen esetben volt jelen az álgeszt, míg ezen érték alatt mindig jellemző volt a kisebb-nagyobb mértékű álgeszt jelenléte.
- Az álgesztes törzsek esetében szinte semmilyen összefüggés nem fedezhető fel a mért feszültségértékek nagysága és az álgeszt mérete között, kivéve, hogy 6 mV felett az álgeszt mértéke mindig 30% alatti, 8 mV

1. táblázat Az egészséges és álgesztes bükk korongokon mért feszültségértékek viszonya (a legmarkánsabb eltérést eredményező kombinációk)

Table 1 The ratio of voltage values measured on sound and read heart beech discs (combinations resulting in the most marked differences)

Gerjesztési pontok	A legnagyobb eltérést mutató mérési pontok	U_e/U_a
1–2	4–8	0,321
1–3	5–7	0,308
1–4	3–7	0,292
1–5	2–8	0,523
1–6	2–7	0,267
1–7	3–5	0,204
1–8	2–7	0,303

felett pedig 15% alatti volt. Ugyanakkor sok esetben még igen alacsony feszültségértékek (2–3 mV) esetén is csak csekély mértékű álgesztésedés volt tapasztalható.

A fentiek alapján tehát az általunk kidolgozott egyszerű mérési módszer nagy biztonsággal alkalmas az álgeszt jelenlétének kimutatására, azonban nem ad megbízható információt az álgesztésedés mértékéről.

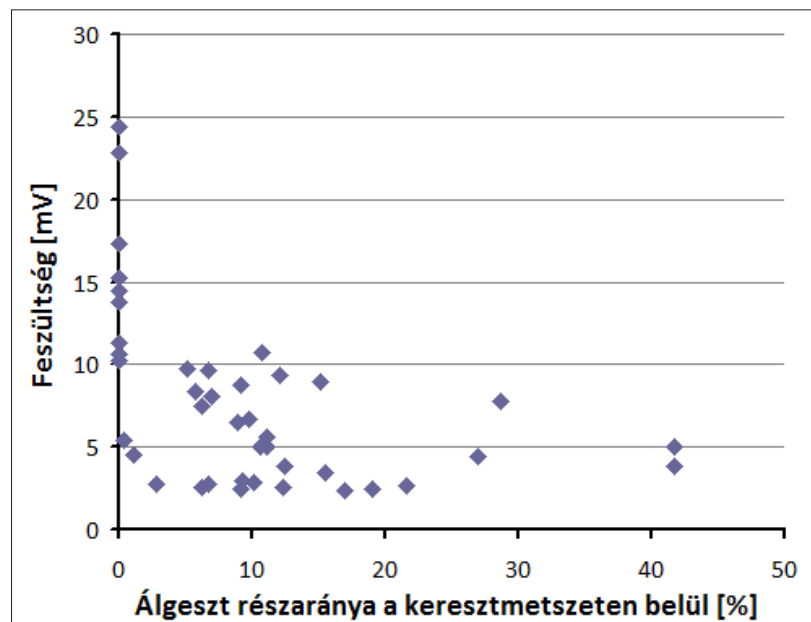
A mérhető feszültségértékek függenek a fa átmérőjétől is. Minél nagyobb az adott átmérő, annál kisebb feszültségértékeket mérhetünk, és fordítva. A mért adatok alapján a 40 cm körüli törzsátmérőnél 15–20 mV, míg a kb. 60 cm-es törzsátmérőnél a 12–17 mV-os értékek a jellemzőek, természetesen egészséges faanyag esetében. Mint a 7. ábra is mutatja, a törzskerület és a feszültségértékek között nagyon gyenge az összefüggés, az adatok szórása igen jelentős.

A 7. ábrán is látható gyenge negatív korreláció azt mutatja, hogy a törzsátmérő befolyásolja ugyan a mérést, de csak igen kis mértékben. Ráadásul a nagyobb átmérőjű egyedek – melyeknél nyilvánvalóan kisebb feszültségértékeket mérhetünk – álgesztet is nagyobb valószínűséggel tartalmaznak. A vizsgált átmérőtartományban (40–60 cm) tehát nem szükséges az átmérőt figyelembe venni, a mérés anélkül is kellően megbízható.

Összefoglalás

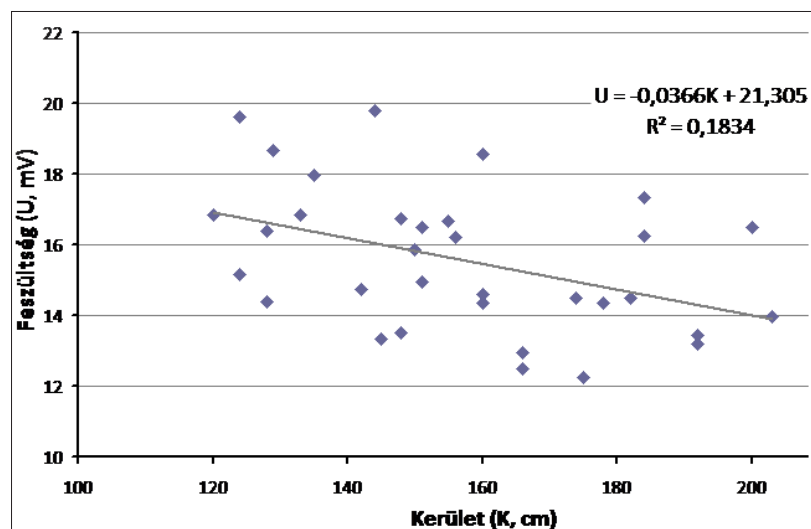
Kísérleteink során az álgeszt roncsolásmentes kimutatásának a lehetőségét vizsgáltuk, annak jelentősen eltérő elektromos vezetőképessége alapján. A vizsgálatok alapján az alábbi következtetésekre jutottunk:

1. Az impedancia tomográfiával történt előzetes mérésekből származó keresztmetszeti ellenállástérképeken látható, alacsonyabb ellenállású területek nagyfokú egyezést mutattak a döntés után a vágásképen látható álgeszt területtel. Az ellenállásbeli különbségek markánsak. Ez arra utal, hogy az ellenállásmérés jó lehetőséget kínál az álgeszt detektálására.
2. A 8 elektródával végzett laboratóriumi mérések segítségével megállapítottuk, hogy a legegényesebb elrendezést a törzskerület 4 részre bontásával, és az egymás melletti két-két elektródán történő gerjesztéssel illetve méréssel lehet elérni. Jelentős mértékű álgeszt esetén a mért feszültség akár az egészséges anyagon mért értékek 1/3–1/5-ére is visszaeshet.
3. Az általunk alkalmazott mérési elrendezés segítségével az álgeszt jelenléte egyértelműen kimutatható volt.



6. ábra Az álgeszt keresztmetszethez viszonyított területaránya és a mért feszültségértékek közötti kapcsolat

Figure 6 Relationship between the proportion of red heart in the cross section and the measured voltage values



7. ábra Az egészséges bükk egyedeknél mért feszültségértékek átmérő-függése

Figure 7 The dependence of the measured voltage on the diameter in healthy beech trees

Ugyanakkor az álgesztesség mértéke és a mért feszültség között nem sikerült megbízható összefüggést kimutatni. Ez alapján tehát a mérés csak az álgeszt jelenlétének kimutatására alkalmas, annak mértékét nem tudja megállapítani.

4. A mért feszültség és a törzsátmérő között fennálló csekély mértékű negatív korreláció nem befolyásolja a mérést jelentős mértékben. Az általunk vizsgált átmérőtartományban (40–60 cm) a mérés megbízhatósága nem függ az átmérőtől, és nincs szükség átmérő szerinti korrekcióra.

A fenti eredményekből látható, hogy a kifejlesztett módszer alkalmas az álgeszt megbízható detektálására. A mérési eredmények tovább finomíthatók tőközeli mérések kivitelezésével, valamint a fahiba törzsön belüli 3D-s feltérképezésével, melyből következtethetünk az álgeszt hosszirányú lefutására is.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Talentum Műhely – a tudományért és tehetségekért a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0005 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Bíró B. (2004.) A bükk álgesztesedés vizsgálata a Somogyi Erdészeti és Faipari Részvénytársaság erdőállományában. Doktori értekezés, NymE Róth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola, Sopron
- Divós F., Göncz B. (2010) Detecting red heart in beech (*Fagus sylvatica*) by electric measurement. In: Németh R. ed. Proc. 4th Conf. on Hardwood Research and Utilisation in Europe. Sopron, 2010. május 17–18. 102–105. old.
- Göncz B. (2010) Bükk álgeszt kimutatása impedancia mérés segítségével. Diplomamunka, NymE Faipari Mérnöki Kar, Sopron
- Koch G. (2003) Biologische und chemische Untersuchungen über Inhaltstoffe im Holzgewebe von Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Kirschbaum (*Prunus serotina* Borkh.) und deren Bedeutung für Holzverfärbungen. Forschungsbericht, Fachbereich Biologie der Universität Hamburg, Hamburg
- Molnár S. (2004) Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Budapest. 363–364. old.
- Molnár S. szerk. (2006) Fahibák, fakárosítások. Hillebrand Nyomda Kft., Sopron, 6-7., 44–45., 82–85. old.
- Molnár S., Pauko A., Szoják P., (2000.) Hazai és egzóta haszonfák In: Molnár S. szerk. Faipari Kézikönyv I. Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, 96. old
- Molnár S., Bariska M. (2002.) Magyarország ipari fái. Szaktudás Kiadó Ház Budapest, 70–77. old.
- Tuzson J. (1904) A bükkfa korhadása és konzerválása. A m. kir. földművelődésügyi minister kiadványai, 17. szám. Pallas részvénytársaság nyomdája, Budapest, 90 old.

CLT hazai I-214 olasz nyár faanyagból

MARKÓ Gábor¹, BEJÓ László¹, TAKÁTS Péter¹

¹Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faalapú Termékek és Technológiák Intézet

Kivonat

A többrétegű keresztirányú ragasztott tömörfa szerkezeti panel (CLT) a könnyűszerkezetes építés viszonylag új alapanyaga, mely hazánkban még nem elterjedt. Elterjedését segítené, ha ezt az építőelemet hazai alapanyagokból is gyártani lehetne. Kutatásunk célja a CLT elemek hazai nemesnyár alapanyagból való gyárthatóságának vizsgálata volt. Ennek érdekében egy háromrétegű panel gyártására és hajlítóvizsgálatára került sor, olasz nyár alapanyagból, poliuretán ragasztóanyaggal. A vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy az olasz nyár CLT szilárdsági tulajdonságai megfelelőek az alacsonyabb szilárdsági kategóriájú fenyő faanyagokhoz, azonban a rugalmassági modulus értékei elmaradnak a kívánalmaktól. A nyár alapanyag alkalmas lehet CLT gyártásra, de csak a lamellák előzetes roncsolásmentes minősítésével, és a jobb anyagok kiválogatásával, vagy másodlagos nyersanyagként a fenyő faanyag mellett.

Kulcsszavak: CLT, nemesnyár, I-214 olasz nyár, könnyűszerkezetes építés, roncsolásmentes fűrész-áru osztályozás

The applicability of I-214 hybrid poplar as Cross-Laminated Timber raw material

Abstract

Cross-Laminated Timber (CLT) is a relatively new construction material that has not gained popularity in Hungary yet. Producing such building elements using Hungarian raw materials may help to establish this technique. The purpose of our research was to examine the possibility of producing CLT using Hungarian grown I-214 hybrid poplar. One three-layer panel was produced using Hungarian hybrid poplar and polyurethane resin, and tested in bending. The MOR of the poplar CLT was found to be comparable to low-grade softwood CLT, but the MOE was lower than the requirement. Poplar raw material may be suitable for CLT production by selecting higher grade raw material using nondestructive testing, or as a secondary raw material mixed in with softwood.

Keywords: CLT, hybrid poplar, lightweight construction, nondestructive timber grading

Bevezetés

A könnyűszerkezetes lakóépületek Európa-szerte egyre népszerűbbek, köszönhetően elsősorban az egyre szigorúbb energetikai szabályozásnak, amely a közel zéró kibocsátású épületek építését szorgalmazza. A bordavázás épületek különösen alkalmasak erre a célra, kitűnő hőszigetelő képességük, és alacsony beépülő energiata-
lalmuk miatt. Ugyanakkor többen kritizálják ezeket az épületeket alacsony hőtároló kapacitásuk miatt (Hacker és tsai. 2008), illetve a potenciálisan egészségtelen lakókörnyezet miatt, amely az alkalmazott szellőztetőrendszertől függően kialakulhat (Hens 2012). A tömörfa falszerkezetek (pl. a gerenda- és rönkházak) egészségesebb és jobb hőtároló képességű alternatívát kínálnak, azonban építésük időigényesebb és komoly szakértelmet kíván.

A többrétegű keresztirányú ragasztott tömörfa szerkezeti paneleket (CLT¹) a '90-es években fejlesztették ki Ausztriában, a grazi egyetemen (Technische Universität Graz, Kramer 2014).

¹ A terméket angol nyelvterületen Cross-Laminated Timber néven ismerik (rövidítése CLT, esetenként XLT vagy X-lam), Németországban korábban a KreuzlagenholzTM (KLHTM, jelenleg egy konkrét gyártó tulajdonában álló árujelző), újabban a Brettspertholz (BSH) elnevezés terjedt el. Jól használható magyar neve nincsen, várhatóan hazánkban is a CLT rövidítés fog elterjedni, ezért cikkünkben is ezt használjuk.

A fejlesztés célja egy erős, méretstabil tömörfa anyag kialakítása volt, amelynek szerkezete a rétegelt lemezhez hasonlít (egymásra merőleges rétegekből felépülő lemeztermék), azonban furnér helyett fűrészáruból készül. Az így elkészített (tipikusan 3–9, de akár 17 rétegű) panelek nagy szilárdságúak, mérettartók, sokrétűen felhasználhatók, és bármilyen fal, földem vagy tetőfelület könnyen kialakítható belőlük. Viszonylag nagy felület-tömegüknek köszönhetően jó hőtároló képességűek, amennyiben nem burkolják, egészséges lakókörnyezetet biztosítanak (a fa kitűnő nedvességszabályozó képességének köszönhetően), és kellemes megjelenésűek.

Közép-Európában számos cég gyárt CLT-t. Az alapanyag tipikusan C16-os, vagy magasabb szilárdsági kategóriájú fenyő fűrészáru (az EN 14081-1:2005 szabvány szerint). Újabban az USA-ban (Gangon és Pirvu 2011) és Kanadában (Karacabeyli és Douglas 2013) is kezd egyre népszerűbbé válni. Sajnos azonban a fenyő alapanyagban szegény területeken (és így Magyarországon is) a CLT gyártása és felhasználása korlátozott, vagy egyáltalán nem jellemző.

Bár a CLT-t eredetileg Európában fejlesztették ki, egyelőre nem vezettek be a CLT gyártását, vagy a termékkel kapcsolatos követelményeket szabályozó európai szabványt. 2011-ben ugyan kiadtak egy előszabványt (prEN 16351:2011), de ezt máig nem vezették be. Észak-Amerikában, az APA – the Engineered Wood Association adott ki szabványt a minősített CLT panelekkel kapcsolatban (ANSI/APA PRG 320-2012), amely megadja a CLT teherbírására vonatkozó követelményeket.

A nyárfa (*Populus* spp.) viszonylag alacsony sűrűségű fafaj. Tipikusan műszaki furnérok és alacsony értékű fatermékek (pl. gyufa, csomagolóanyagok, stb.) gyártására használják. A nyár mechanikai tulajdonságai hasonlóak egyes fenyő fafajokéhoz, emiatt az európai szabványok egyazon fafajcsoportba sorolják őket (EN 14081-1). Léteznek sikeres példák a nyár szerkezeti alkalmazására is, pl. olyan faalapú termékekben, mint az LVL (Molnár és Bariska 2002), sőt még rétegelt-ragasztott anyagként is (Schlosser és tsai. 2012). CLT alapanyagként azonban nem került szóba, egészen a közelmúltig, amikor is a tanulmányunkban leírt kutatási projekt és egy párhuzamos kutatás (Kramer 2014) megvizsgálta a nyár alkalmazását ezen a területen.

A cikkben tárgyalt kutatás célja nyár CLT készítése és vizsgálata volt, annak érdekében, hogy

- a tulajdonságait összehasonlítva a fenyő CLT-vel, valamint a meglévő ipari szabványokkal
- megállapítsuk, alkalmas-e a nyár faanyag ilyen termékek gyártására.

Anyagok és módszerek

A kísérletekhez olasz nyár (*Populus × euramericana* cv. I-214, a továbbiakban olasz nyár) alapanyagot használtunk. A ragasztást Jowapur 686.60 típusú, szerkezeti ragasztáshoz alkalmas poliuretán műgyantával végeztük.

A lamellák több 3 m-es, élőnedves rönk felfűrészelésével készültek. A rönkökből 45 mm-es vastagságú pallókat vágtunk, amelyeket 203 cm-es és 97 cm-es hosszra daraboltunk, és szalagfűrész segítségével változó szélességűre széleztünk. Ezt követően a pallókat szárítókamrában, kémleletes menetrenddel légszáraz állapota ($u = 12 \pm 2\%$) szárítottuk. A szárítást egyhetes beltéri tárolás követte. A szárított alapanyagot ezután 33 mm-es vastagságra gyalultuk.

A panelek elkészítése előtt a lamellákat roncsolásmentes módszerrel, az EN 338-2003 szabványnak megfelelően szilárdságilag osztályoztuk. A mérés a lamellák sűrűségének és hosszirányú rezgési sajátfrekvenciájának mérésén alapul (Bejó 1999). A mérés a hazai fejlesztésű Portable Lumber Grader berendezéssel történt (Fakopp 2010). Minden lamella mérése megtörtént. Az alacsonyabb minőségű hosszú lamellákat két rövidebb darabra vágtuk. Ezek a középrétegbe kerültek, a magasabb osztályba sorolt lamellák alkották a fedőréteget. A lamellák nedvességtartalmát szintén ellenőriztük, ellenállásos nedvességmérő segítségével.

A lamellák előkészítése után 1 db háromrétegű (2 m × 1 m × 0,1 m méretű) CLT panel elkészítésére került sor, az alábbi eljárással:

- Két fedőréteg és egy középréteg teríték összeállítása a lamellákból. A lamellákat oly módon helyeztük el, hogy az esetleges görbületük a középvonaltól kifelé álljon (1. ábra). A keskeny lapfelületekre nem történt ragasztóanyag felhordás.
- A rétegek oldalirányú rögzítése szorítók segítségével, a hézagmentes illeszkedés érdekében.
- A ragasztóanyag felhordása, a gyanta minőségtanúsítványában előírt ragasztómennyiség (200 g/m²) felületre öntésével, majd annak elosztásával spatulák segítségével. A nyitott idő az adott terítéktől függően változott, de a 15 percet nem lépte túl.

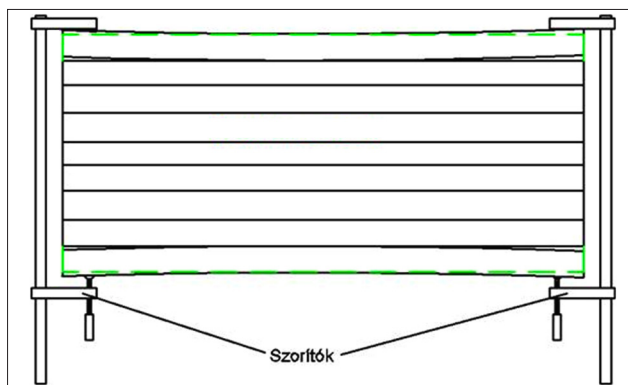
- A rétegek egymásra helyezése, majd a kész teríték behelyezése a présbe (az oldalirányú szorítás fenntartásával (ld. 2. ábra). A terítékek egymásra helyezésétől a prészárásig csupán néhány perc telt el.
- Prészárás és préselés, $0,4 \text{ N/mm}^2$ nyomáson², 12 órán keresztül, csarnoki klímán (a pontos klimatikus viszonyok nem ismertek).
- Présnyitás, és az elkészült panel eltávolítása a présből.

Az elkészült panel felépítése és méretei a 3. ábrán láthatók. A panelből a préselést követően 3 db 300 mm szélességű hajlító próbatest került kialakításra, a fedőréteg lamellákkal párhuzamosan. A próbatesteket a NymE SKK Szerkezeti Vizsgálólaboratóriumának nagy méretű présberendezésén, az MSZ EN 408:2010+A1:2012 szabvány szerint, 4 pontos terheléssel vizsgáltuk. A középpont lehajlását video-extensométerrel mértük (4. ábra). A terhelés- és lehajlásadatokat 10/s-os mintavételi gyakorisággal rögzítettük. A gerendákat tönkrementelig terheltük, és a tönkrementel módját fényképeken rögzítettük.

Eredmények és értékelés

Az 5. ábra mutatja a lamellák roncsolásmentes módon meghatározott szilárdsági osztályait. A szilárdsági kategóriák tipikusan a vártnál magasabbak lettek. Emiatt a fedőrétegekben C18-as, vagy magasabb lamella szilárdsági osztályok használatára volt lehetőség. Ez közel áll ahhoz, hogy teljesítse a Deutsches Institut für Bautechnik (2010) előírásait, amelyek azt mondják ki, hogy az építőelem hossz tengelyével párhuzamos lamellák 90%-a, és a merőleges lamellák 30%-a legalább az MSZ EN 338:2010 szabvány szerinti C24-es, a többi pedig legalább C16-os szilárdsági kategóriájú legyen.

A 6. ábra a három próbatest tönkrementeli formáját mutatja. Tipikusan a hajlítási és nyírási tönkrementeli formák kombinációja volt észlelhető. A nyírási tönkrementel tipikusan a ragasztás közelében történt. Az 1. próbatest esetében megfigyelhető a ragasztóréteg elválása; ez vélhetőleg a kézi ragasztóanyag-felhordás pontatlanságának köszönhető, és felhordógép alkalmazásával kiküszöbölhető. Kramer (2014) párhuzamos tanulmányában szintén hasonló, kombinált tönkrementeli formát tapasztalt.



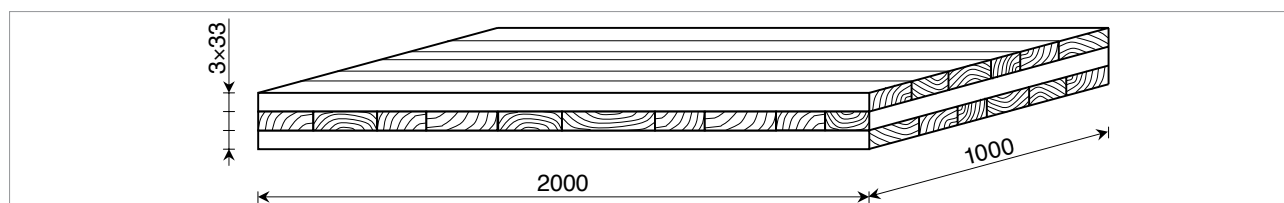
1. ábra A lamellaterítékek kialakítása olyan módon, hogy a lamellák görbülete kifelé fordul

Figure 1 Laying up and clamping the lamellae so that they curve outward



2. ábra A kész teríték présbe helyezése, az oldalirányú szorítás fenntartásával

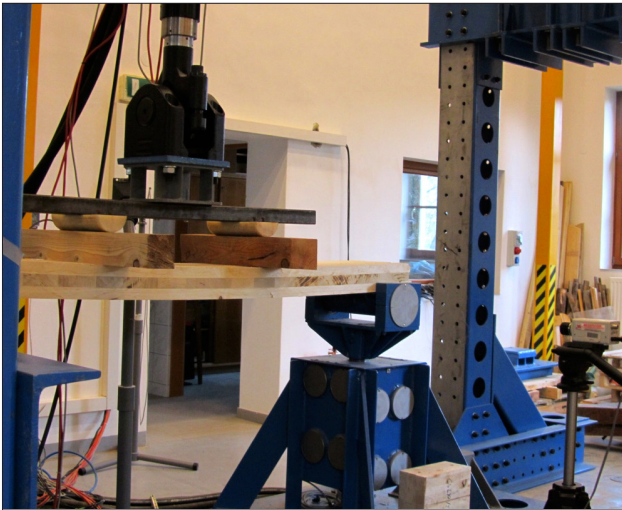
Figure 2 The final layup placed in the press while maintaining lateral pressure



3. ábra A kísérleti CLT panel felépítése és méretei

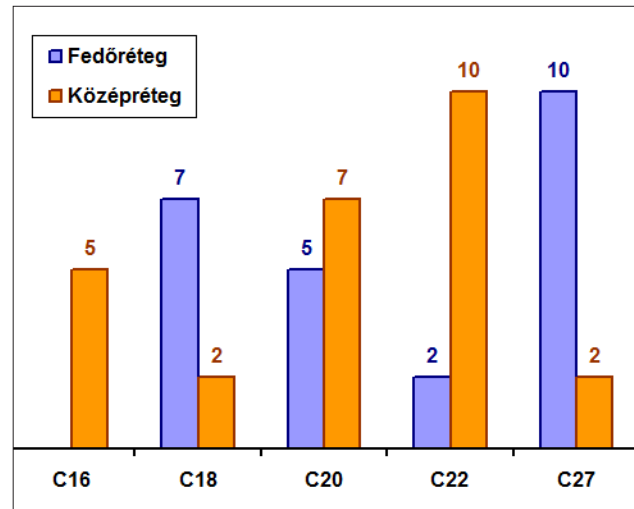
Figure 3 The structure and dimensions of the experimental CLT panels

² Az alkalmazott ragasztóanyag adatlapján szerkezeti felhasználás esetén $0,6\text{--}1,0 \text{ N/mm}^2$ nyomás van előírva. Ezt a nyomást az alkalmazott présberendezés limitációi miatt nem sikerült betartani.



4. ábra A CLT próbatetek 4 pontos hajlítóvizsgálata, video-extenzométeres lehajlás-méréssel

Figure 4 Testing the CLT specimens to failure using a 4-point bending setup. Deflection is measured using a video-extensometer



5. ábra A fedő- és középréteg nyár lamelláinak roncsolásmentesen mért szilárdsági kategóriái

Figure 5 Non-destructively measured strength classes of the face and core layer poplar lamellae



6. ábra A vizsgált próbatetek tönkremeneteli formái

Figure 6 Failure modes of the tested specimens

Az 1. táblázat tartalmazza a három próbatesten mért hajlítószilárdság és rugalmassági modulusz értékeket. A táblázat szintén tartalmazza az amerikai szabványban szereplő, a különböző CLT kategóriákhoz előírt tervezési értékeket. Tanulmányunk nem volt eléggé nagy léptékű határfeszültség-értékek számításához, azonban ha a mért értékek jól jellemzik a nyár CLT szilárdsági értékeit általában, akkor a termék szilárdsága legalábbis az amerikai szabványban szereplő alacsonyabb kategóriájú CLT gyártását lehetővé teszi. Ezzel szemben a rugalmassági modulusz értékei lényegesen alacsonyabbak az amerikai szabvány által elvártnál.

1. ábra A mért hajlító szilárdság és rugalmassági modulusz értékek, valamint az ANSI/APA PRG 320 szabvány szerinti előírás

Figure 1 Measured MOR and MOE values, and design values based on ANSI/APA PRG 320

	Hajlítószilárdság [N/mm ²]	Rug. modulusz [N/mm ²]
1. próbatest	34,0	7 552
2. próbatest	46,9	8 354
3. próbatest	48,8	7 787
Átlag	43,2	7 898
Szabvány előírás	12,7 ... 28,2	8 270 ... 11 720

Ezek az eredmények nagyon hasonlóak az Oregon State University-n elvégzett, nagyobb léptékű kutatásához (Kramer 2014), amelyben szintén megfelelő szilárdságú, de a követelményeknél valamivel alacsonyabb rugalmassági modulusú nyár CLT-t sikerült előállítani.

Összefoglalás és következtetések

A nyár faanyag CLT-gyártásra való alkalmasságát vizsgáló, kisebb léptékű kutatásunk eredményei az alábbiak szerint foglalhatók össze:

1. Az olasz nyár alapanyag valószínűleg alkalmas megfelelően nagy szilárdságú CLT szerkezeti elemek gyártására.
2. A kutatás során elkészített és vizsgált CLT próbatestek hajlítószilárdsága viszonylag jó, azonban a rugalmassági modulusa alacsony lett. Ezek az eredmények megfelelnek a Kramer (2014) tanulmányában leírtaknak.
3. A viszonylag alacsony rugalmassági modulusz értékek ellenére a nyár megfelelő CLT alapanyag lehet, amennyiben csak a magasabb kategóriájú fűrészárut használunk erre a célra, vagy pl. fenyő faanyaggal kombinálva.

A fenti eredmények azt mutatják, hogy míg a nyár alapanyag általánosságban nem alkalmas feltétel nélkül erre a célra, ám felhasználható lehet CLT gyártásra a magas szilárdságú anyagok kiválogatásával, vagy a fenyő faanyag mellett másodlagos alapanyagként.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Talentum Műhely – a tudományért és tehetségekért a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0005 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- ANSI/APA PRG 320-2012. Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. APA – The Engineered Wood Association, Tacoma, WA, USA. 29 pp.
- Deutsches Institut für Bautechnik (2011) European technical approval ETA-06/0009.
- EN 14081-1:2005 Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross-section – Part 1: General requirements. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- Hacker, J. N., T. P. De Saullés, A. J. Minson, M. J. Homes (2008) Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change. *Energy and Buildings* 40:375–384.
- Gagnon, S. and C. Pirvu (eds) (2011) CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. FPInnovations Special Publication SP-528E. Pointe-Claire, QC, Canada
- Hens, H. (2012) Passive Houses: What May Happen When Energy Efficiency Becomes the Only Paradigm? *ASHRAE Transactions* 118 (1):1077–1085.
- Karacabeyli, E. and B. Douglas (eds) (2013) CLT Handbook – US ed. FPInnovations Special Publication SP-529E. Pointe-Claire, QC, Canada
- Kramer, A. (2014) Cross-Laminated Timber Engineering: Improvement and Application. MS Thesis, Oregon State University, OR, USA. 74 pp.
- Bejő L. (1999) A dinamikus rugalmassági modulusz mérése longitudinális rezgésekkel. In: Divós F. szerk. Roncsolásmentes faanyagvizsgálat. Mérési útmutató, Soproni Egyetem, Sopron. 5-11. old.
- MSZ EN 338:2010. Szerkezeti fa. Szilárdsági osztályok. Magyar Szabványügyi Testület, Bp, 11 old.
- MSZ EN 408:2010+A1:2012. Faszervezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása. Magyar Szabványügyi Testület, Bp, 11 old.
- prEN 16351:2011 Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- Molnár S., Bariska M. (2002) Magyarország ipari fái – Wood species of Hungary. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest. 210 old.

Schlosser, M., N. Horváth, L. Bejő (2012) Glulam beams made of Hungarian raw materials. In: R. Nemeth, A. Teischinger (eds.) Proc. 5th Conference on Hardwood Research and Utilisation in Europe. Sopron, Hungary, 2011.09.10-11. pp. 383-392.

FAKOPP Enterprise (2012) PORTABLE LUMBER GRADER. Software and Hardware Guide, Version 2.0. <www.fakopp.com/site/download/PLG_Guide.pdf> Accessed: 25.11.2014

Papírrács betétes bútorlapok mechanikai tulajdonságainak modellezése végelelemes módszerrel

UTASSY Viktor¹, DÉNES Levente¹

¹Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faalapú Termékek és Technológiák Intézet

Kivonat

Az üzemanyagárak és szállítási költségek emelkedése a szállított termékek tömegének csökkentési igényét vonja maga után. Következésképpen a bútortiparban is növekszik a kereslet a fa alapanyagú könnyített lemeztermékek iránt. A már jól ismert termékek mellett az utóbbi években számos kísérlet történt új könnyűszerkezetű bútorlapok fejlesztésére, melyek közül néhány már kereskedelmi forgalomban is megtalálható. Az új termékek általános mechanikai tulajdonságait egyszerű vizsgálatokkal tudjuk meghatározni, azonban az ilyen komplex, szendvics-típusú termékek mérnöki felhasználásához viselkedésük alaposabb megértésére van szükség. Jelen kutatásban a papír méhsejtrács középrétegű lemeztermékek legfontosabb mechanikai tulajdonságait mutatjuk be, melyeket szabványos módszerekkel vizsgáltunk, illetve a deformációk és az egyes komponensekben ébredő feszültségek szimulációját végelelemes modellezéssel. A modellnél alkalmazott anyagjellemzők meghatározása célirányos vizsgálatokkal történt, az ortotrop anyagmodellek igényeinek megfelelően. A modellek igazolásához a szimulációs eredményeket az azonos fizikai modelleken végzett vizsgálatok eredményeivel hasonlítottuk össze. A feszültség-alakváltozás görbék lineáris szakaszán a feszültségek és alakváltozások szimulált és mért értékeinél jó egyezést találtunk, a modellek adekvát módon becsülik a vizsgált tulajdonságokat.

Kulcsszavak: papírrács, szendvicsszerkezet, végelelem, szimuláció, bútorlap

Modelling the mechanical properties of paper honeycomb panels using the finite element method

Abstract

Increasing fuel prices and transportation costs entail the need to reduce the weight of transported goods. Consequently, the demand for lightweight wood panels is growing in the furniture industry. In recent years, many attempts have been made to develop lightweight furniture boards, some of which can be already found on the market. The overall mechanical properties of these new products can be determined by simple tests. However, for engineering and structural applications, a thorough understanding of the behavior of such complex sandwich type panels is required. In the present study, the most important mechanical properties of paper honeycomb core panels are determined by standard methods. The deformation and the stresses are simulated thereafter, using the finite element method. The defining characteristics of the materials used in the model were determined by targeted studies, in accordance with the orthotropic material model needs. To validate the models, simulation results were compared with the results of standard destructive tests. The simulated and measured stress and deformation values show a good agreement in the linear region of the stress-strain curves. The models estimate the investigated properties adequately.

Keywords: paper honeycomb, sandwich structure, finite element, simulation, wood-based panels

Bevezetés

Az elmúlt évek termékfejlesztési irányzatait a nagyfokú változatosság, az egyediségre való törekvés, az új fejlesztésű anyagok alkalmazása (kompozitok, műanyagok, strukturált felületek, funkcionális anyagok, stb.), a különböző anyagtipusok kombinációja jellemzi. A szerkezettervezésnél, méretezésnél különös gondot kell fordítani arra, hogy az eltérő tulajdonságú, két vagy több anyagból álló szerkezeteknél mind a geometriai kialakítás, mind a teherviselés a meghatározott és elvárt esztétikai, stabilitási, szilárdsági, tartóssági követelményeknek megfeleljen. Tekintve, hogy a piaci és gazdasági elvárások a termékfejlesztési idő folyamatos csökkentése irányába mutatnak, az új és/vagy hibrid szerkezeti kapcsolatoknál a mechanikai tulajdonságok, tartósság, megbízhatóság gyors meghatározása rendkívüli fontossággal bír. Ezeknek az elvárásoknak a teljesítését leggyorsabban a különböző szimulációs és modellezési módszerek alkalmazásával tudjuk biztosítani. Ha a szimulációval meghatározott és empirikus úton ellenőrzött modellek becslési pontossága megfelelő, akkor azok a tervezési folyamatokba beépíthetők, lerövidítve a méretezési tevékenységeket és összességében a fejlesztési időt. Az adekvát modellek továbbá kiválthatják a költséges roncsolásos vizsgálatokat.

A mérnöki szerkezetek viselkedésének szimulációját sok esetben végeselemes módszerrel végzik, ami egy olyan numerikus technika, amely parciális differenciálegyenletekkel leírható problémák közelítő megoldását adja. Ilyen mérnöki szerkezetnek minősülnek a különböző réteg-felépítésű szendvicsszerkezetek is, ahol a különböző rétegek úgy vannak elrendezve, hogy egy szerkezeti egységet alkotva, a legelőnyösebb mechanikai tulajdonsággal rendelkezzenek. A szendvicsszerkezet előnye a hagyományos szerkezetekkel szemben az igen kedvező tömeg/szilárdság arány, kiváló merevség, alacsony előállítási költség, jó hő- és hangszigetelés. A borítólapok általában nagy szilárdságú, vékony lemezekből készülnek, hiszen ezek adják a szerkezet fő teherviselő részét. A középső réteg vagy maganyag általában alacsony szilárdságú és tömegű. Feladata, hogy elválassza, és meghatározott távolságban tartsa a borító rétegeket, illetve felvegye a felmerülő nyíróerőket (Kovács 1975).

Szendvicsszerkezetű lapokat sok iparág alkalmaz. Találkozhatunk velük a járműgyártásban, fém- és műanyagiparban, építőiparban, valamint megtalálhatók a faiparban is. Az utóbbi területen számos kísérlet történt könnyűszerkezetű bútorlapok fejlesztésére, melyek közül néhány már kereskedelmi forgalomban is fellelhető (EuroLight, Kaurit, DendroLight, SingCore, EconCore, SuperPan Star, PlyCorr, stb.). A hazai fejlesztések közül a furnérforgácslapok gyártástechnológiai jellemzőinek laptulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata (Szabadhegyi 1983) vagy a furnér-poliuretán hab (PUR) kompozitok fejlesztése és vizsgálata (Dénes 2008) említendő meg. Utóbbi esetben a szendvicsszerkezet középrétegét az összeforgatott szinus hullámú furnérok adják PUR hab kitöltéssel, a borítórétegeket pedig műszaki furnérok képezik egy vagy több rétegben. Az új fejlesztések eredményeként megjelenő szendvicslapok fizikai, mechanikai tulajdonságainak meghatározását, modellezését több tudományos publikációban ismertették. Különösen a fém és műanyag alapú méhsejtrács középrétegű lapok elemzésére találunk sok példát; a hasonló szerkezetű fa alapú lapok vizsgálatát kevesebb kutatás jellemzi.

Alumínium és Nomex méhsejtrács középrétegű szendvicslapok tönkremenetelét függőleges nyomásra vizsgálták Aktay és társai (Aktay 2007). Az alkalmazott mikro-mechanikai és homogenizált anyagmodellek közül az első jó egyezést mutatott a kísérleti eredményekkel, a középréteg homogén anyagként történő modellezése a számításokat felgyorsítja, de a maganyag tönkremenetelét nem képes elég pontosan becsülni.

Üvegszál erősítésű méhsejtrács szerkezetek torziós tulajdonságait kombinált analitikus és numerikus modellel vizsgálták Davalos és társai (2009). A különböző felépítésű és orientációjú minták töréscsúszójával ellenőrzött modellek becslési pontossága kielégítő.

A papír méhsejtrács mag és MDF fedőrétegű szendvicspanelnél azt találták, hogy a magvastagság/borító réteg vastagság arányának csökkenése a késztermék hajlító- és nyírórugalmassági modulusának növekedését eredményezi (Chen 2012). A növekedés jelentős, ha a vastagsági arány kisebb, mint hat.

Méhsejtrács lapok hajlító terhelés hatására létrejövő kúszását vizsgálták Chen és társai (2011). Eredményeik azt mutatják, hogy a szendvicspanel méhsejtszerkezetű mag alakja és vastagsága, valamint a borítólapok vastagsága és anyaga a kúszási viselkedést szignifikánsan befolyásolja.

Wang (2009) csomagolóanyagként használt papír méhsejtrács és karton borítólapú szendvicslapok energiaelnyelését vizsgálta. Az ejtő vizsgálatok során azt tapasztalták, hogy a szendvicslapok dinamikus becsapódási görbéje homorú és emelkedő alakú; a méhsejt cellák vastagsága és hossza jelentős hatással van a lapok csillapítási tulajdonságaira; az alkalmazott papír magasabb sűrűsége javíthatja a lapok energiaelnyelő képességét;

a rugalmas barázdált karton bordák javíthatják a papírrács kompressziós ellenállását és csillapítási tulajdonságait.

Petras és Sutcliffe (1999) méhsejtrács maggal készített szendvicsszerkezetek tönkremeneteli módjait vizsgálta 3 pontos hajlításnál. A tanulmányban egy tönkremeneteli térképet állítottak össze, melyből kiderül, hogy a mag sűrűsége, alátámasztási hossza és az alátámasztási hossz–borítólap vastagsági arány változásai milyen tönkremeneteli módokhoz vezetnek.

A tanulmányban ismertetett vizsgálat célja a papír méhsejtrács maggal és forgácslap héjakkal készített szendvicslapok szilárdságtani viselkedésének végeselemes módszerrel történő szimulálására alkalmas modell megalkotása, mely az ilyen laptermékekből készített bútorok tervezését segítheti. A megfelelő modellel kapcsolatos elvárás, hogy a bútorelemekben a használati erőhatások során fellépő alakváltozási és feszültségi állapotot a méretezéshez elegendő pontossággal jelezze. Ez végső soron a laptermék és a rétegek látszólagos rugalmassági jellemzőinek modellezéssel való meghatározását jelenti.

Anyagok és módszerek

A kísérlet során papír méhsejtrács középrétegű szendvicslapokból készült próbatesteken végeztünk merevségi és szilárdsági vizsgálatokat (hajlító, nyomó és nyíró vizsgálatot), illetve ezzel párhuzamosan a szendvicslapok mechanikai tulajdonságait becsülő végeselemes modelleket készítettünk. A kísérletekhez a FRITZ EGGER GmbH & Co. OG vállalatcsoport által gyártott, a kereskedelmi forgalomban EUROLIGHT® néven beszerezhető, 60 mm vastag könnyített bútorlapját használtuk fel. A középrétegben 0,2 mm vastag papírból készült méhsejtráccsal kikönnyített szendvicslapok 8 mm-es forgácslap fedőréteggel, és 44 mm vastag papírrács középréteggel rendelkeznek. A méhsejtrács hatszög alakú és teljes mértékben újrahasznosított papírból készül, a papír mechanikai tulajdonságait, illetve a készlapok merevségét és hajlítoszilárdságát a termék műszaki adatlapja nem tartalmazza, a szakirodalomban kimondottan erre a méhsejtrács típusra vonatkozó adatokat nem találtunk.

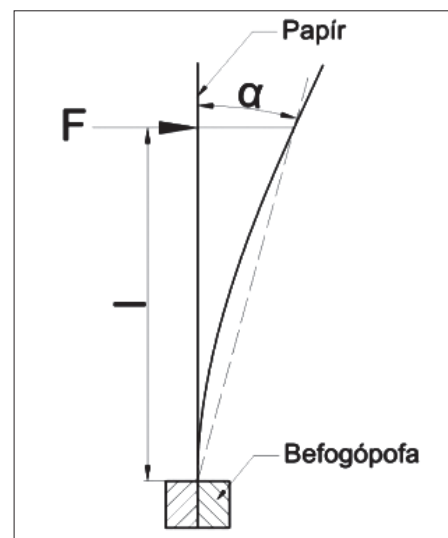
Ahhoz, hogy a lap modellezését el tudjuk végezni, ismernünk kell a középréteg és a borítólapok anyagának rugalmassági jellemzőit (rugalmassági modulusz, Poisson-állandó).

A szimulációs modellek nagyobb megbízhatósága érdekében a forgácslapok és a teljes szendvicsszerkezet mechanikai tulajdonságait törésteszték segítségével határoztuk meg, amit az is indokolt, hogy a merevségi és hajlítoszilárdsági adatok nem álltak rendelkezésre. A végeselemes modellezéshez szükséges értékek hiányában a komponensek merevségi jellemzőit empirikus úton határoztuk meg.

Jóllehet, mind a forgácslap, mind a papír síkban is anizotróp, a hajlítómerevség és szilárdság esetében a forgácslap hosszirányában ébredő normálfeszültségekhez tartozó E-modulusz a mérvadó, tehát ennek az értékét kell elsősorban ismernünk. A papírrács anyagának modellezésekor azzal a feltételezéssel éltünk, hogy ez az anizotrópia figyelmen kívül hagyható, mivel itt leginkább nyomófeszültségek jelentkeznek. Első megközelítésben lineáris anyagmodelleket tételeztünk fel, melyekben a hajlító-, húzó- és nyomórugalmassági moduluszok értékei közel azonosak.

A 8 mm-es forgácslap rugalmassági moduluszának meghatározását az MSZ EN 310 szabvány szerint végeztük. A szabvány hárompontos hajlítás alapján határozza meg a faalapú lemezek hajlítoszilárdságát és rugalmassági moduluszát. A papír leválasztása után a forgácslap belső oldaláról az epoxi gyanút nem lehetett a lap sérülése nélkül eltávolítani, ezért az esetleges ragasztó hatás kiküszöbölésére a forgácslap mintákat mindkét oldalról terheltük. Így a ragasztópermet 10 mintánál a húzott, míg 10 mintánál a nyomott oldalon volt. A próbatestek szélessége 50 ± 1 mm, alátámasztási hossza 160 mm, teljes hossza 210 mm volt, a szabvány előírásainak megfelelően. A ragasztómaradványok miatt az anyag vastagsági méreteit furnér vastagságmérővel határoztuk meg. A törővizsgálatokat minden esetben Instron 5566 típusú anyagvizsgáló berendezéssel végeztük.

A papír szabványos rugalmassági moduluszának meghatározásához 38 mm széles papírcsíkokat készítettünk. A vizsgálatokat az MSZ ISO 5628 alapján a Papíripari Kutatóintézet kétpontos papírhajlító berendezésén végeztük. A mérési elvet az 1. ábra szemlélteti. A papír rugalmassági moduluszának meghatározása:



1. ábra A papír kétpontos hajlítása
Figure 1 Two point bending of paper strips

$$E = \frac{60 \cdot F \cdot l^2}{\pi \cdot \alpha \cdot I} \quad [\text{MPa}] \quad [1]$$

ahol:

F – a hajlításhoz szükséges erő [N],

l – a vizsgálati hossz [mm],

α – a lehajlási szög [°],

I – a keresztmetszet másodrendű nyomatéka, [mm⁴]

A méréseket $\alpha=15^\circ$ -os lehajlási szöggel és $l=10$ mm vizsgálati hosszal végeztük. A papír vastagsága $v=0,2$ mm volt.

A papír eltávolítása és a méréshez való előkészítése (simítás) a papír hajlító rugalmasságát negatívan befolyásolhatja. Ezért a kapott eredményeket összehasonlítottuk a papírrács nyomásra mért merevségével. A forgácsolapok közül eltávolított papírrácsot két merev fémlemez között terheltek nyomásra (2. ábra). Mindezt a következő megfontolások alapján tettük: ha a méhsejtrács papírt a képen látható módon lapsíkra merőlegesen, teljes felületen terheljük, az alakváltozás jelentős részét a papír veszi fel, hiszen a papír merevsége nagyságrendekkel kisebb a fémlemezénél, a kisebb rugalmassági tényezője és kisebb keresztmetszeti felülete miatt. A ragasztópermet merevítő hatása megszűnik, mivel az a forgácsolap felületén marad a papír eltávolítása után, az eredményeket csupán a papírcsíkok egymáshoz ragasztásához használt ragasztó hatása torzíthatja. A csekély deformációnál elért maximális erő és a méhsejt merevítő hatása miatt a kihajlást elhanyagolhatónak tekintettük.

A papírcsíkok vastagságát mikrométerrel, a hosszát vonalzóval mértük. Az ebből számolt felülettel határoztuk meg a rugalmassági moduluszt. A vizsgálatokat ebben az esetben is Instron 5566 típusú anyagvizsgáló géppel végeztük. A papír rugalmassági tényezőjét a következő [2] összefüggéssel számoltuk:

$$E = \frac{\Delta F \cdot b}{A_p \cdot \Delta a} \quad [\text{MPa}] \quad [2]$$

ahol:

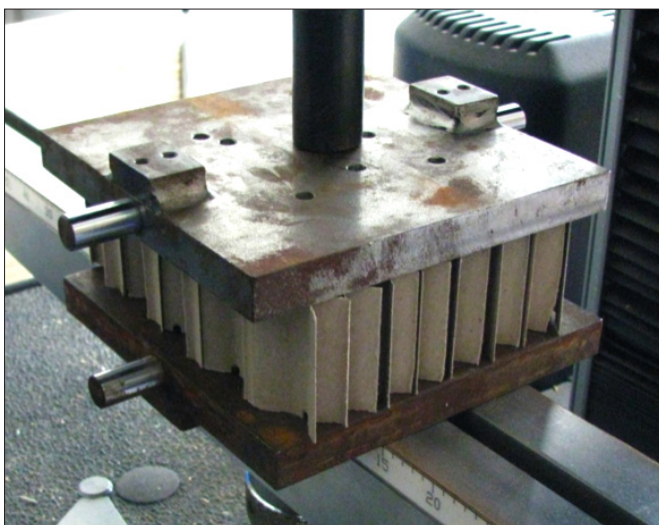
ΔF – a terhelőerő növekedése [N], a terhelőerő-alakváltozás görbe egyenes szakaszán,

b – a papírszalag szélessége [mm],

Δa – a ΔF erőhöz tartozó alakváltozás [mm],

A_p – a terhelt papírfelület [mm²].

A késztermék nyomó vizsgálatához 10 db 140x140 mm-es próbatestet készítettünk. A próbatesteket lapsíkra merőlegesen terheltek teljes felületen (3. ábra). Az ábra felső felén a papírrács tönkremenetele utáni állapotot láthatjuk, míg az alsó szimulációs ábra a lineáris szakasz végén, a tönkremenetel előtti állapotot mutatja.



2. ábra A papírrács merőleges nyomás vizsgálata
Figure 2 Perpendicular compression of paper honeycomb

A méhsejtrácsos lap nyomószilárdságának meghatározásához a fent bemutatott próbatesteken elvégzett vizsgálatokat használtuk fel. A késztermék látszólagos rugalmassági tényezőjét az [5] képlettel határoztuk meg, annyi változtatással, hogy A_p helyett a teljes terhelt lapfelülettel (A_t) számoltunk. A nyomószilárdságot a következő [3] összefüggéssel számoltuk:

$$\sigma_{nyomó} = \frac{F_{max}}{A_t} \quad [\text{MPa}] \quad [3]$$

ahol:

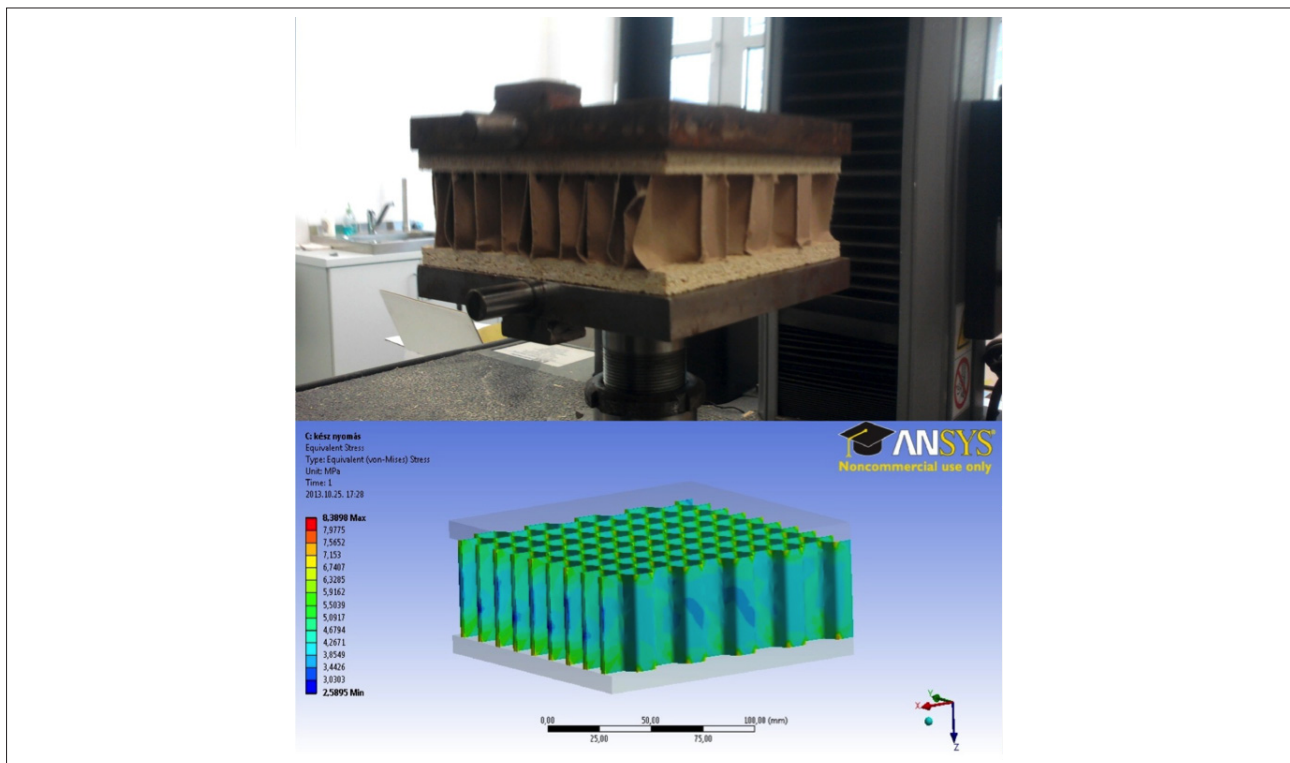
F_{max} – a maximális nyomóerő [N],

A_t – a terhelt teljes lapfelület [mm²]

A termék 3 pontos hajlító vizsgálatát szintén az MSZ EN 310-es szabvány alapján végeztük. A próbatest méretei a szabvány alapján: szélesség

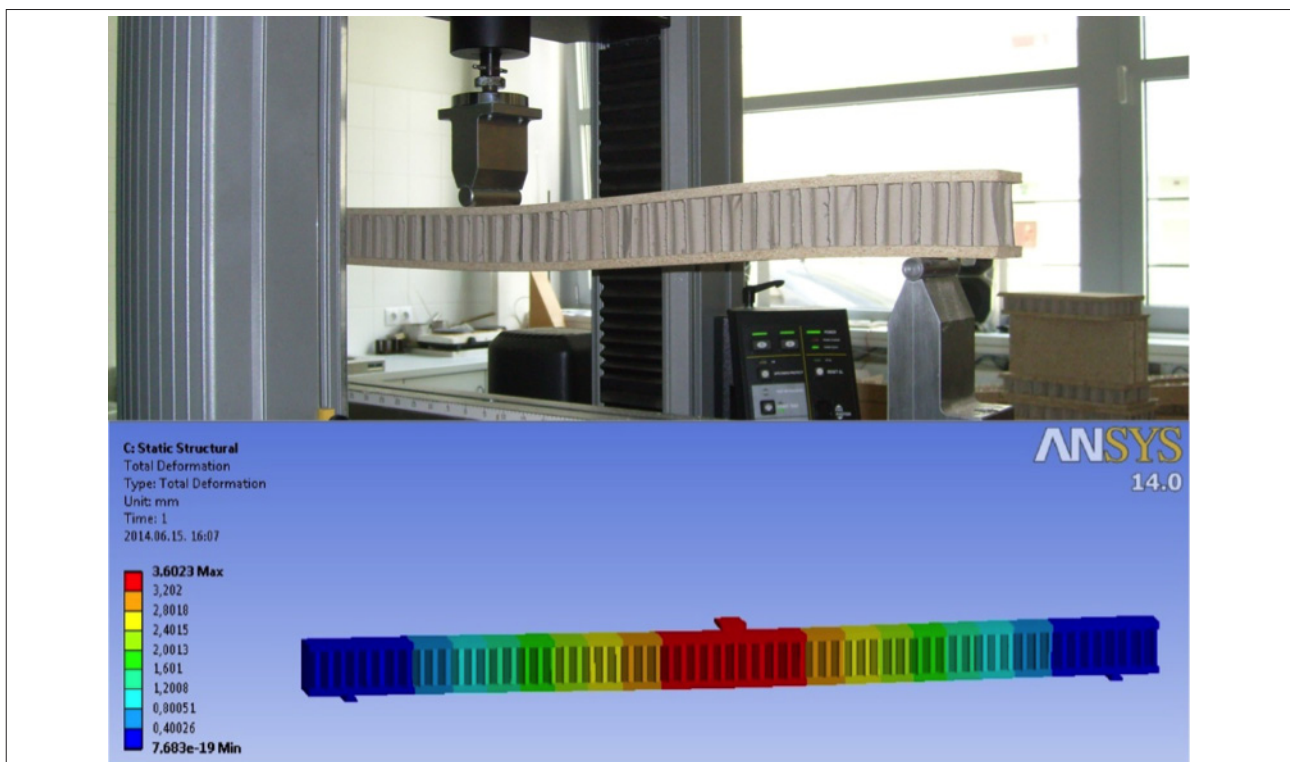
50±1 mm, alátámasztási köz 900 mm, teljes hossz 1000 mm. A vizsgálatot a 4. ábra mutatja be. A képen jól látható a szendvicsszerkezetekre jellemző, a magréteg jelentős nyírási alakváltozásával járó deformáció.

A nyíró vizsgálatokhoz a próbatesteket az 5. ábrán látható módon készítettük el. A próbatest teljes hossza 50 mm, szélessége 100 mm. A minták nyírószilárdsági értékeit szintén az EN 789-es szabvány alapján határoztuk meg.



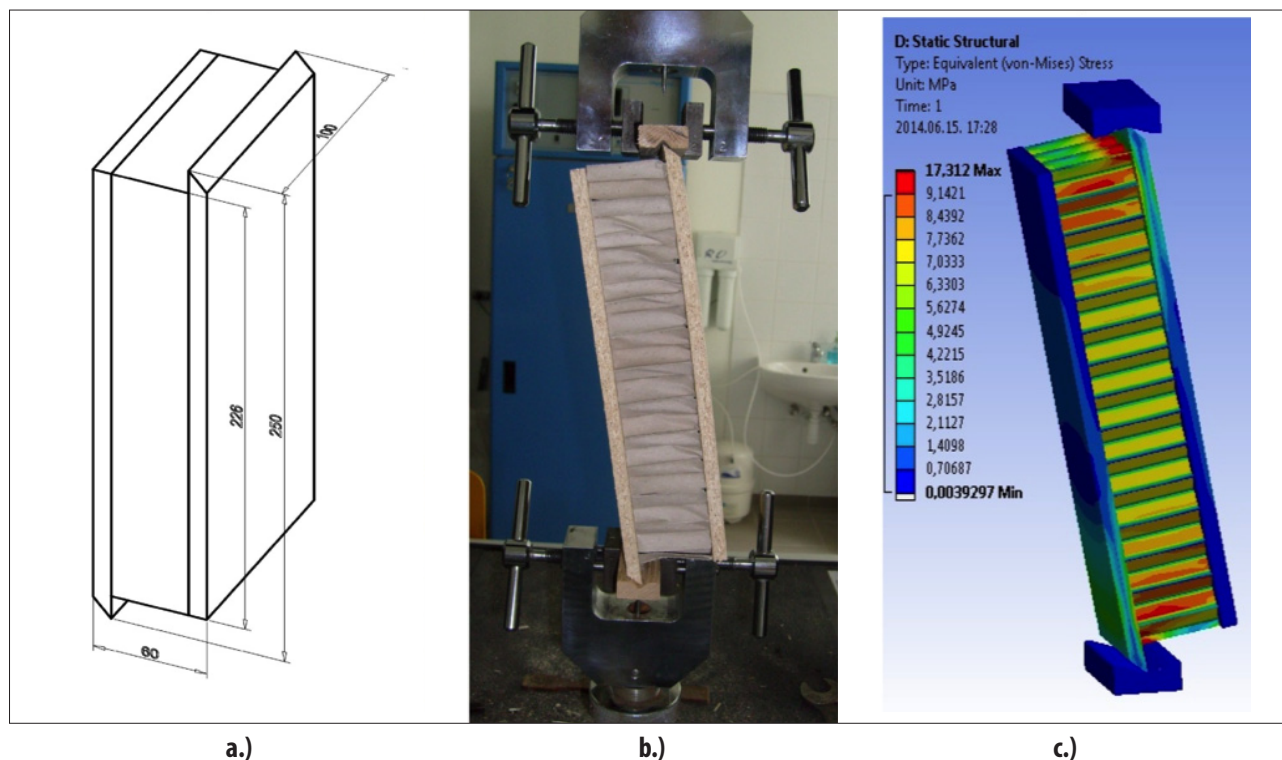
3. ábra Lapsíkra merőleges nyomás vizsgálata (fent) és a szimulált nyomószilárdság (lent)

Figure 3 Perpendicular compression of sandwich panels (up) and finite element modeling of compression strength (down)



4. ábra A hajlítás vizsgálata (fent) és a deformáció szimulációja (lent)

Figure 4 Three-point bending (up) and the simulated deformations (down)



5. ábra Nyírásra készített próbatest mérete (a), nyírás vizsgálat (b) és feszültség eloszlása (c)

Figure 5 Shear specimens (a), shear tests (b) and the stress distribution

A méhsejtrács lapon elvégzett, fent említett három vizsgálatot végelelemes szimulációval is modelleztük. Anyagmodellként – a fentebb említetteknek megfelelően – mindkét alkotóelemre (forgácslap és papírrács) izotróp, lineáris anyagmodellt alkalmaztunk. A rugalmassági modulusokat a mért átlagokkal adtuk meg, papírrácsnál a lapsíkra merőleges mérésrel kapott értéket használtuk fel. Az anyagjellemzők megadásánál szükség volt a Poisson-tényezőkre is, melyeket a forgácslapnál és a papírnál is egyaránt $\nu=0,3$ -nak feltételeztük (Bodig és Jayne 1982). A modellben a papírrácsot rögzítő ragasztórétegeket kis vastagságuk, nem folytonos, foltszerű megjelenésük miatt elhanyagoltuk. Hatásukat a papírrács élei és a borítólapok belső felületei közti kapcsolat valamint a rácspapír hullámai érintkezési felületein kialakult kapcsolat merev jellegével vettük figyelembe, tekintettel arra, hogy a megszilárdult ragasztó rugalmassági modulusa mind a papír, mind a forgácslap rugalmassági tényezőjénél lényegesen nagyobb. A modellezett próbatestek peremfeltételeit a vizsgálati szabványokban előírt megtámasztási és erő bevezetési feltételeknek megfelelően vettük fel, azaz a vizsgáló berendezés támaszainak és terhelő blokkjának a próbatesttel érintkező környezete a geometriai modellünk részét képezte. A felfekvések kontakt feltételei súrlódásmentes érintkezésre voltak beállítva.

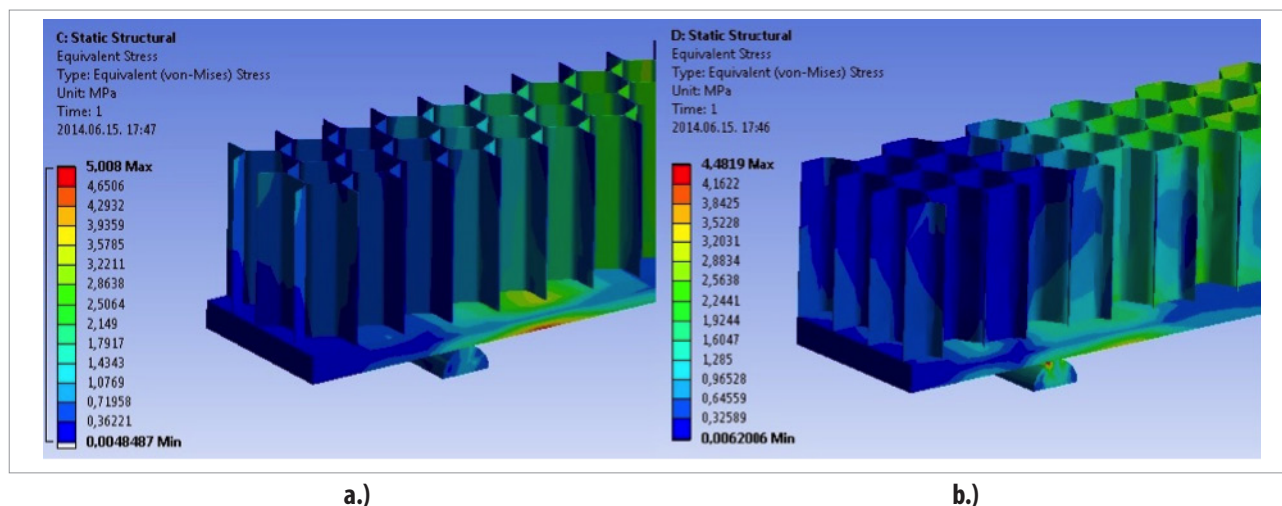
A vizsgálatot ANSYS szoftverrel végeztük. Mint a méréseknél kiderült, a lap viselkedését a sejtrács orientációja is befolyásolja. Ezért a szimulációkhoz is kétféle kialakítású modellt készítettünk. A szimulációs vizsgálat is igazolta, hogy hajlításnál és nyírásnál a méhsejtrács kialakításához alkalmazott papírszalagok főirányának és a próbatest hosszúságának viszonya nem közömbös, a hosszal párhuzamos vagy hosszra merőleges irányok eltérő eredményeket adnak (6. ábra). Ennek ismerete azért is fontos, hogy táblafelosztáskor az egyes alkatrészek főirányát ki tudjuk jelölni.

Eredmények, értékelés

A forgácslap próbatesteken meghatározott rugalmassági tényező és hajlító szilárdság átlagokat és azok statisztikai jellemzőit az 1. táblázat ismerteti.

A két minta átlagértékét kétmintás t-próbával hasonlítottuk össze, melynek eredményeként megállapítható, hogy a két vizsgált változó szignifikánsan nem különbözik. Ezért a végelelemes szimulációhoz a két mérési sorozat átlagát használtuk fel.

A papír MSZ ISO 5628 szabvány szerinti, illetve a méhsejtrács lapok lapsíkra merőleges nyomása alapján számolt adatokat a 2. táblázat tartalmazza.



6. ábra A szimulált feszültségállapot hajlító vizsgálat esetén: (a) keresztirányú (b) hosszirányú sejtrács elrendezés

Figure 6 The simulated stress state in bending: cross orientation (a) and parallel orientation (b) of the honeycomb

1. táblázat A 8 mm-es forgácslap rugalmassági tényezője

Table 1 Modulus of elasticity of the 8 mm thick particle boards

	Minta	E [Mpa]			σ [Mpa]		
		átlag	szórás		átlag	szórás	
	[db]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
Ragasztóval nyomott oldalon	10	6898	469,5	6,8	19,12	1,991	10,41
Ragasztóval a húzott oldalon	10	7179	530,7	7,4	18,90	1,543	8,16

2. táblázat A papír rugalmassági modulusza

Table 2 Modulus of elasticity of the paper

	Minta	E [Mpa]		
		átlag	szórás	
	db	[Mpa]	[Mpa]	[%]
60 mm	6	587,4	20,5	3,49
60 mm, MSZ ISO 5628	32	661,4	91,3	13,80

A papír rugalmassági tényezőjét a gyártási iránnyal megegyező irányban szabványos hajlító vizsgálattal határoztuk meg, míg az arra merőleges irányban nem szabványos nyomó vizsgálattal. Az elvégzett t-próba eredménye alapján a két minta a vizsgált konfidencia szinten megegyezik. Modellünkhöz a nyomás alapján meghatározott alacsonyabb modulus értéket használtuk, így konzervatívabb becsléshez jutunk.

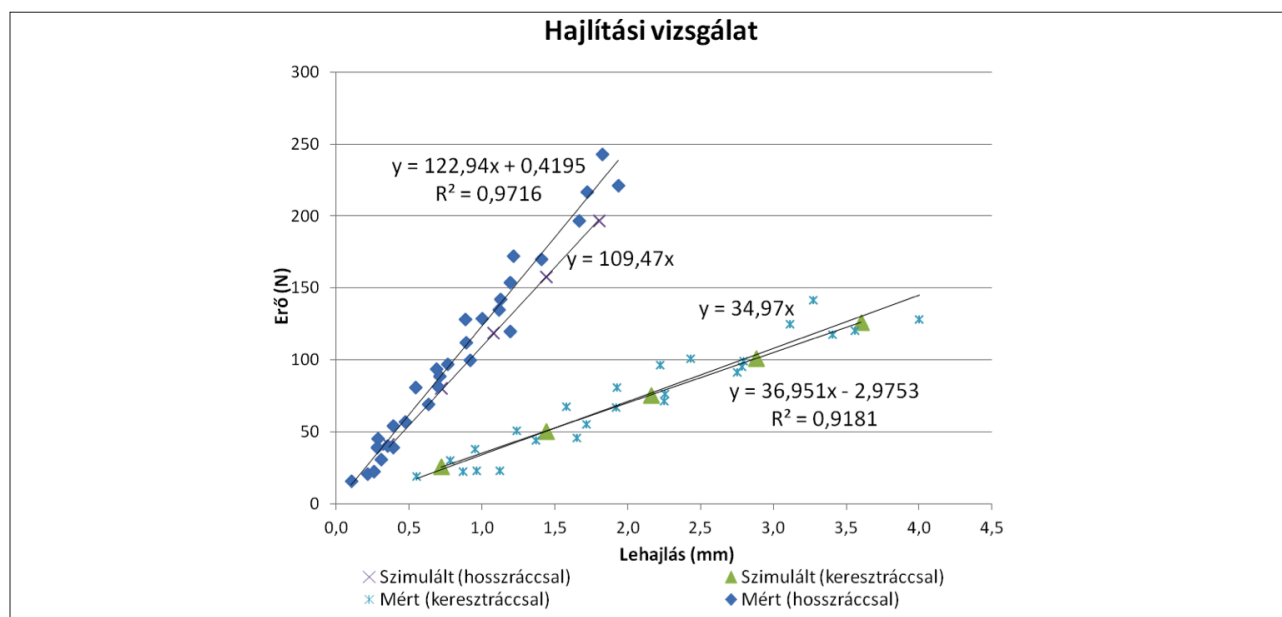
A késztermék hajlító-, nyomó- és nyírószilárdságát, valamint látszólagos rugalmassági modulusát mutatja be a 3. és 4. táblázat.

Az 7. ábra a 3-pontos hajlítás mért és a szimulált eredményeinek összehasonlítását mutatja be. Az ábrán a papírrács mindkét orientációjával készült méréseket, illetve a szimulációs modellek eredményeit is feltüntettük. A diagram a minták véletlenszerűen kiválasztott, de a törőerő 80%-át nem meghaladó terhelési pontjait és a végeselemes szimulációs görbéket mutatja a lineáris szakaszban. A kezdeti és végső referencia pontokat utóbbi esetben is véletlenszerűen választottuk, a köztes pontok közötti távolságok megegyeznek. A mért és szimulált értékeket az erő-elmozdulás diagramon összehasonlítva, jó egyezés tapasztalható. A hossz tengellyel párhuzamos rácselrendezésű minták közel háromszor merevebbnek mutatkoztak, míg hajlítószilárdságuk a 3. táblázat értékei alapján csupán 18%-kal nagyobb.

A lehajlási eredményekből a termék látszólagos hajlító rugalmassági modulusza a papírrács kétféle orientációjára, illetve mind a valóságos próbatestekre, mind a modelljükre kiszámítható. Értékeiket összehasonlítás céljából a 4. táblázatban adjuk meg.

A nyomóvizsgálat erő-elmozdulás értékeit mutatja a 8. ábra. Ebben az esetben a papírszalagok irányának nincs jelentősége. A szimulációval előállított egyenes y-metszékét tetszőlegesen, a mért értékek y metszékével közel megegyező mértékével toltuk el. A végelem szimulációs eredmények összehasonlíthatók a mért értékekkel, a elvégzett u próba alapján a szimulált átlagérték az elfogadási tartományba esik. Mindez a mért értékek jelentős szórásának tudható be. A szabványos papírvizsgálatok magasabb rugalmassági tényezőjét alkalmazva (2. táblázat) a szimulációs modell még jobban közelíti a mért értékeket. egyezések elfogadhatóak.

A nyírás erő-elmozdulás értékeit mutatja a 9. ábra. A végeelemes szimulációt keresztrácsos és hosszrácsos elrendezéssel is elvégeztük. A szimulált és a mért eredmények jó egyezést mutatnak. A hosszrácsos elrendezésű próbatestek nyírószilárdsága 18%-kal nagyobb, mint a keresztrácsos mintáké.



7. ábra Erő-elmozdulás diagramok a mért és szimulált eredményekkel, hajlító igénybevétel esetén

Figure 7 Force-displacement diagrams of the measured and simulated values in case of bending

3. táblázat A szendvicslap hajlító-, nyomó- és nyírószilárdsága

Table 3 The bending, compression and shear strength of sandwich panels

	$\sigma_{h,keresztrács}$	$\sigma_{h,hosszrács}$	$\tau_{keresztrács}$	$\tau_{hosszrács}$	$\sigma_{nyomó}$
Mintaszám [db]	6	6	6	6	10
Átlag [Mpa]	1,262	1,491	0,0535	0,0632	0,2055
Variációs együttható [%]	23,16	26,21	2,42	2,18	5,47

4. táblázat A szendvicslap látszólagos modulusz értékei

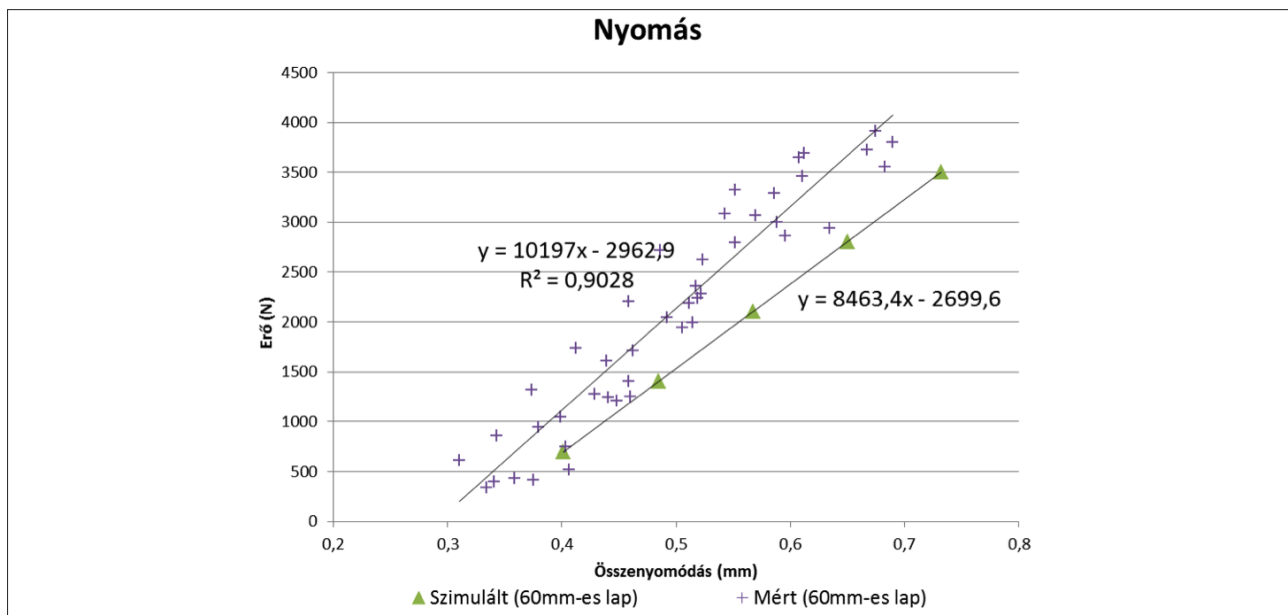
Table 4 The apparent modulus of elasticity of sandwich panels.

	$E_{h,keresztrács}$	$E_{h,hosszrács}$	$G_{keresztrács}$	$G_{hosszrács}$	$E_{nyomó}$
Mintaszám [db]	6	6	6	6	10
Átlag [Mpa]	666,7	2034,5	1,567	3,689	33,70
Variációs együttható [%]	8,74	7,40	0,13	5,27	16,97
Szimulált értékek [Mpa]	585,8	1813,2	1,661	4,153	25,89

A mért és szimulált adatokból számíthatók a papírrácsra (nem papírra) azok a nyírórugalmassági modulusok, melyek a kétféle rácsorientációval végzett hajlítópróbáknál érvényesülnek (G_{xz} és G_{yz} , ahol z a szendvicslemez síkjára merőleges koordinátairány). Ezen modulusok ismerete lehetővé teszi a bonyolult geometriájú papírrács folytonos térkitöltésű anyaggal való modellezését. Az eredményeket a 3. táblázat mutatja be.

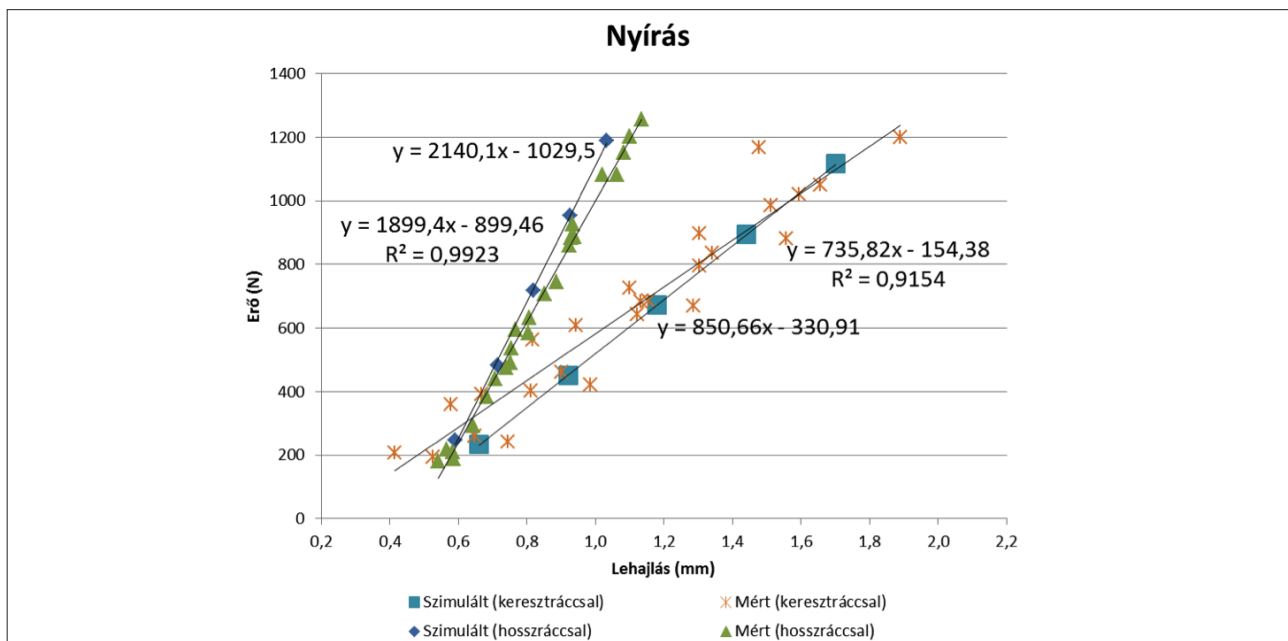
Következtetések

A vizsgálati és szimulációs eredmények alapján elmondhatjuk, hogy az erő-elmozdulás diagramok, valamint a rugalmassági tényező értékek jó egyezést mutatnak a lineáris tartományban. A mért eredmények azt mutatják, hogy a papírrács orientációja jelentős befolyással bír a lapok mechanikai tulajdonságaira. A papírmaggal rendelkező minták szimulált és mért értékei alapján a hossziránnyal párhuzamos papírelrendezésnél a hajlító merevség jelentősen magasabb a merőlegesen irányított lapokhoz képest. A magyarázatot a papírrács geometriájában kell keresni, azaz a hullámos papírcsíkok hossziránnyal párhuzamos elhelyezése nagyobb merevséget biztosít.



8. ábra A mért nyomási erő és elmozdulás értékek összehasonlítása a végeleemes szimulációval előállított eredményekkel

Figure 8 Force-displacement diagrams of the measured and simulated values in case of compression



9. ábra A mért nyírási erő és deformáció értékek összehasonlítása a végeleemes szimulációval előállított eredményekkel

Figure 9 Force-displacement diagrams of the measured and simulated values in case of shear

Ezért a lapok alkalmazása során különös figyelmet kell fordítani a papír orientációjára, hogy elkerülhető legyen a papír méhsejtrács lapokból készült bútoralkatrészek túlzott deformációja.

A továbbiakban a papír méhsejtrácsot a modellezés egyszerűsítése érdekében folytonos, ortogonálisan anizotróp anyaggal kívánjuk helyettesíteni, mely a szendvicslemez ugyanolyan deformációját eredményezi, mint a papírrács középrész. Modellezéshez a törő vizsgálatok eredményeiből a középrészre meghatározott rugalmassági modulusz értékeket, illetve a borítórétegeknél mért merevségi jellemzőket kívánjuk felhasználni.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalomjegyzék

- Aktay L., Alastair F., Johnson AF, Kröplin B-H. (2008) Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. Elsevier Engineering Fracture Mechanics. 75: 2616–2630
- Bodig J., Jayne BA (1982) Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Chen Z., Yan N. (2012) Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels. Elsevier Composites: Part B. 43: 2107–2114
- Chen Z., Yan N., Deng J., Smith G. (2011) Flexural creep behavior of sandwich panels containing Kraft paper honeycomb core and wood composite skins. Elsevier Materials Science and Engineering A. 528:5621–5626
- Davalos JF, Qiao P., Ramayanam V., Shan L., Robinson J. (2009) Torsion of honeycomb FRP sandwich beams with a sinusoidal core configuration. Elsevier Composite Structures. 88: 97–111
- Dénes L., Kovács Zs., Láng EM, McGraw B. (2008) Investigation of the Compression and Bending Strength of Veneer-Polyurethane Foam Composites. Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology, November 10-12, 2008 Concepción, Chile.
- Kovács Zs. (1975) Szendvicslapok szilárdsági jellemzőinek kísérleti meghatározása. Egyetemi Doktori értekezés, Erdészeti és Faipari Egyetem Sopron
- Molnár S. (2004) Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
- Szabadhegyi Gy. (1983) Furnérforgácslapok gyártástechnológiai jellemzőinek laptulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata. Doktori értekezés, Erdészeti és Faipari Egyetem
- Petras A., Sutcliffe MPF (1999) Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. Elsevier Composite Structures. 44: 237–252
- Wang D. (2009) Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels. Elsevier International Journal of Impact Engineering. 36: 110–114
- EN 789: 1995. Timber structures – Test methods – Determination of mechanical properties of wood based panel.
- MSZ EN 310: 1999. Faalapú lemezek. A hajlítószilárdság és a hajlítási rugalmassági tényező meghatározása.
- MSZ ISO 5628: 1992. A papír és karton hajlítási merevsége, statikus meghatározásának általános előírásai.

Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése

III. rész: A tömörített fa mechanikai tulajdonságai, felhasználási lehetőségei

BÁDER Mátyás¹

¹Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faanyagtudományi Intézet

Kivonat

A cikksorozat áttekintést ad a természetes faanyag hosszirányú tömörítéséről, melynek célja annak hajlékonyabbá, alakíthatóvá tétele. A jelen rész bemutatja a fizikai-mechanikai tulajdonságokat, a modifikált faanyag feldolgozását és a felhasználási lehetőségeket.

20% mértékű rostirányú tömörítés esetén a rugalmassági modulus a harmadára csökken a normál faanyaghoz képest. Bükk és tölgy esetén körülbelül 4 GPa lesz, míg a hárompontos hajlító vizsgálat során elviselt behajlás többszörösére növekszik. A hajlítási viszonyszám akár 1/4 fölötti értékű lehet. Bár a nedvesen hajlítható tömörített faanyagnál a hajlítószilárdság akár felére redukálódik, a törésig elnyelt energia többszörösére emelkedik. A ridegsége csökken, a dinamikus törési munkaigény, a fajlagos ütőmunka és az ütő-hajlító szilárdság másfél-kétszeresére javul. A rostirányú tömörítés hatására a fa sűrűsége növekszik, a rezgéscillapítás keresztirányban nem változik, míg longitudinális irányban többszörösére emelkedik. A húzószilárdság, nyomószilárdság, nyírószilárdság, keménység, csavarállóság csökken. A felsorolt értékek legtöbb esetben a tömörítés mértékével arányosan változnak saját tartományaikban, míg a nedvesség hatására bekövetkező méretváltozás az eredeti anyagével megegyező marad.

A longitudinálisan tömörített fa szárított állapotban az alacsony rugalmasságának köszönhetően megtartja a beállított alakját. A fakárosítókkal szemben a normál faanyaghoz hasonlóan viselkedik. Hajlításához a hagyományos eszközök felhasználhatóak, nagy előnye, hogy hidegen is alakítható állapotban tartható, ezért készletezhető. Elsősorban a belsőépítészeti és a bútortervezés területén felhasznált anyag, kültérben kevésbé. A termék és tulajdonságai ismertebbé válásával az igények további növekedése várható.

Kulcsszavak: rostirányú tömörítés, mechanikai tulajdonságok, famodifikáció, hajlítás

Practical Issues of Longitudinally Compressed Wood

Part 3: Mechanical properties and areas of application of compressed wood

Abstract

This series of articles presents an overview of the longitudinal compression of the natural wood, whose purpose is to make it bendable. This study presents an overview of the physical and mechanical properties, the processing of the modified wood and its use of applications.

Compressing wood longitudinally by 20% causes its modulus of elasticity decrease to one third, reaching approx. 4 GPa for oak and beech, while using a 3 point bending method, the possible bending rate increases severalfold. Bending rate could be even above ¼. Although, for the above wood species, bending strength decreases to as little as half of its original value, absorbed energy increases multiple times. The rigidity of wood decreases, while the dynamic fracture impact, specific impact energy, and impact strength increases by 150-200%. The density of the longitudinal

compressed wood increases, there is no change in vibration damping across the wood, however, it increases multiple times longitudinally. Tensile strength, compression strength, shear strength, hardness and screw withdrawal resistance decreases. Most of the features above are proportional to the compression, while there is no impact on dimension changes due to changes in humidity.

After drying, longitudinally compressed wood preserves its new shape, due to the low elasticity. Resistance to wood-destroying organisms is similar to traditional wood products. Conventional tools can be used for bending. An additional advantage is that the wood can be held in stock. It is primarily used for interior design and in the furniture industry, outdoor use is less frequent. With increasing public awareness of the product and its properties, demand is expected to grow further.

Keywords: compression in the fibre direction, longitudinal compression, mechanical properties, wood modification, bending

Bevezetés

A fa rostirányú tömörítéséhez és a következő kényes művelethez, a sugárirányban és húrirányban egyaránt elvégezhető hajlításhoz magas minőségű, egységes felépítésű és egészséges alapanyag szükséges. A hosszirányú tömörítés akkor valósítható meg, ha a munkadarab egyenes állapotban marad a teljes folyamat alatt és nem tud kihajolni. Minimálisan 20% nedvességtartalmú faanyag alkalmas a rostirányú tömörítés alapanyagaként való felhasználásra, mely legalább 80 °C hőmérsékleten történő hidrotermikus kezeléssel lágyítható. Ezt a hőmérsékletet tartani kell az anyag teljes keresztmetszetében a préselés során. A fa plasztifikálódását a ligninnek és a hemicellulózoknak, mint a sejtek közti kötőszövet fő alkotóinak változása okozza, minek következtében a nagyrészt cellulózból felépülő, szilárdítást biztosító farostok elcsúsznak egymáshoz képest, roncsolódnak és ennek köszönhetően válik plasztikusabbá a végtermék. 15% tömörítési arány eléréséig már szinte az összes nedvességszállító edény sejtfa meggyűrődik, melyekkel összhangban a szilárdítást biztosító farostok is hasonlóan módosulnak (Báder 2015).

Kezdetben nehézséget jelentett a hosszirányú préselés miatt a kihajlást megakadályozó oldalfalnak neki-nyomódó faanyag sűrűlődája, mely gyengítette a tömörítési erőt az anyag hossza mentén. Mára ezt a problémát elfogadható módon sikerült kiküszöbölni, így 2,5 méteres hosszúság felett is hozzá lehet jutni longitudinálisan tömörített faanyaghoz. A plasztifikált fa a napjainkban alkalmazott technológiával legnagyobb részben a fafajtól és a végtermékkel szemben támasztott követelményektől függően akár 30%-ban tömöríthető, de általában 20% mértékű tömörítési arányt alkalmaznak. A nedvesen hajlítható tömörített fa préselés után nyúlik, és végül 3–10%-os maradandó rövidülést szenved. Segesdy (2003) megfogalmazását alapul véve a maradandó rövidülés azt mutatja, hogy a faanyag mennyire ellenálló a rostirányú összenyomással szemben, és a maradandó rövidülés mértékével arányosan mekkora erőhatás lesz szükséges a faanyag meghajlításához.

Amíg 20% felett van a tömörített faanyag nedvességtartalma, megtartja alakíthatóságát és szárítás-hűtés után rögzül a forma. Az összepréselt állapotában szárított-hűtött anyag hossza a beállított tömörítési aránynak megfelelő, ennek következtében a szárazon hajlítható tömörített fa mindig hajlékonyabb marad. Tanulmányok szerint a kétlépcsős longitudinális irányú préseléssel a korábban említett 10–30%-os tömörítési arány tovább növelhető, megközelíthetőek a plasztikus állapotú faanyag tulajdonságai normál körülmények között is (Sparke 1989, Volkmer és tsai. 2001). A repedés bekövetkeztéig a tömörített fa lényegesen kisebb sugárba, alaktartó módon hajlítható, egyúttal a többirányú hajlítást és csavarást is jobban tűri, mint a normál plasztifikált faanyag, különleges körülményeket nem igénylő módon, és az ismert, hagyományosnak tekinthető famegmunkálási műveletek alkalmazhatóak esetében. Mára a fa tömörítésével és tömörítés utáni hajlításával kapcsolatosan tudományos publikációk, szabadalmak és élő szaktudás is rendelkezésre állnak, azonban utóbbiakat a versenyszférában tevékenykedő cégek által ismertett adatok pontosságára és valóságtartalmára való tekintettel fenn tartásokkal kell kezelni.

A cikksorozatban a faanyag hosszirányú tömörítésével kapcsolatos tudnivalók, eddigi fontos kutatási eredmények és alkalmazott módszerek, ipari tapasztalatok, valamint a termékek mechanikai tulajdonságai kerülnek bemutatásra, azok kritikai értékelésével. A sorozat előző részei ismertették a rostirányú tömörítési eljárásához alkalmas alapanyagokat, ezek előkészítési módjait és a tömörítés sejt szintű elméletét és folyamatát (Báder 2015),

valamint a folyamat tulajdonságait, a témával kapcsolatban megjelent szabadalmakat és a faanyag tömörítést követő kezelési lehetőségeit (Báder és tsai. 2015). Jelen cikk áttekintést ad a tömörítés hatására bekövetkező mechanikai változásokról és tulajdonságokról, a termékek megmunkálási és felhasználási lehetőségeiről.

Mechanikai tulajdonságok

Rugalmassági modulus, alakíthatóság

A rostirányban tömörített fa egyik legfontosabb jellemzője a rugalmassági modulus (E), mely az anyagot minősíti annak méreteitől és a terheléstől függetlenül. Az anyagjellemző a rugalmassági tartományban állandó értékű, a terhelés hatására fellépő húzó- vagy nyomófeszültség és az okozott alakváltozás hányadosa (érvényes rá a Hooke-törvény). Ivánovics (2006), Szabó és tsai. (2005) és Thomassen és tsai. (1990) szerint a tömörítés csökkenti a fa rugalmassági modulusát. A rugalmassági modulus 20%-os tömörítés esetén büknél mindegy harmadára, tölgnél felére csökken a tömörítetlen anyaghoz képest a faanyag merevségével együtt, ami szintén harmadára-felére mérséklődik (Kuzsella és Szabó 2006). A bükk faanyag hangterjedési sebességéből megállapított rugalmassági modulusát sem sugár-, sem pedig húrirányban nem befolyásolja a rostirányú tömörítés. A longitudinális statikus és dinamikus rostirányú rugalmassági modulusok 23% tömörítési aránynál 70%-kal, míg a torziós sajátrezgésekből meghatározott rugalmassági modulus közel 27%-kal csökken (Kuzsella 2011a). Az 1–4. táblázatok az előzőekkel nagyságrendileg azonos adatokat közölnek a bükk rugalmassági modulusáról, miszerint a nedvesen hajlítható, rostirányban 20%-ban tömörített fa és a szárazon hajlítható tömörített fa E értéke egyaránt 3,6–4,0 GPa között mozog. Ivánovics (2006) adatai kis mintaszámú előkísérleti mérésekből álltak össze. A hajlító vizsgálatok során a bükk (1. táblázat) és a tölgy (2. táblázat) fafajú, szárított állapotú, nedvesen hajlítható tömörített próbatesteknek három kiemelt jellemzőjét vizsgálta. A kapott eredmények szórása a tömörítettséggel együtt növekedett.

Kuzsella és Szabó (2006) munkájukban pontosan és egyértelműen mutatnak be a tömörítés mechanikai tulajdonságaival kapcsolatos tudnivalókat a tömörítés mértékének függvényében (3. táblázat).

1. táblázat Bükk hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 1 Results of the beech wood's bending tests (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
E [GPa]	11,80	8,58	7,11	4,38	3,76
F_{max} [N]	803	606	574	483	425
σ_h [MPa]	144	125	110	91	78

2. táblázat Tölgy hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 2 Results of the oak wood's bending tests (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
E [GPa]	9,86	6,67	4,11	4,11	3,94
F_{max} [N]	858	609	411	409	393
σ_h [MPa]	126	106	78	77	73

3. táblázat A hárompontos hajlító vizsgálat eredményei a tömörítés mértékének függvényében, bükk és tölgy fafajok esetében (forrás: Kuzsella és Szabó 2006)

Table 3 Results of the 3-point bend test as a function of the compression ratio in case of beech and oak wood species (source: Kuzsella and Szabó 2006)

Fafaj	Bükk			Tölgy		
	0%	15%	20%	0%	10%	20%
Tömörítés mértéke						
E [GPa]	12,01	4,45	3,66	7,20	4,18	3,93
F_{max} [N]	802,79	495,49	415,63	524,04	402,84	412,60
σ_h [MPa]	144,38	91,91	76,23	94,52	75,57	78,67
y [mm]	11,83	33,22	36,18	9,61	25,81	35,11
W_s [J]	3 068,03	11 511,90	12 367,00	1 908,29	6 144,26	10180,42

Az értékek az 1. táblázat megfelelő adataival összhangban vannak, így bár nem található konkrét leírás róla, de valószínűsíthetően nedvesen hajlítható tömörített faanyagot vizsgáltak, szárított állapotban. A tölgy és a bükk esetében itt is azonos tendencia figyelhető meg a tömörítés fokának megfelelően.

A tömörített fából félkész termékeket előállító Candidus (2014b) szintén publikált mechanikai tulajdonságokat is tartalmazó táblázatot (4. táblázat). A végleges sűrűségéből következően a szárazon hajlítható, 20% mértékben tömörített anyagról van szó, melyet 10–12% nedvességtartalmú állapotában vizsgáltak.

Tölgy fafaj esetében a mérések közti szignifikáns eltérések valószínűleg a különböző alfajokon végzett mérések miatt jelenhettek meg, de a 20%-ban tömörített tölgyfa E értéke minden alkalommal 4 GPa körüli érték, vagyis a tömörítés az eredetileg nagymértékben eltérő rugalmassági modulus értékeket kiegyenlíti. Tömörítés hatására a merevségi tenzor komponensei kismértékben redukálódnak, tehát a tömörített faanyagok kevésbé lesznek rugalmasak és merevek (Szabó és tsai. 2005). Buchter és tsai. (1993), Szabó (2002) és a tömörítő berendezések gyártójaként ismertté vált Compwood (2008) egyaránt közöltek adatokat, melyek százalékos arányban hasonlítják össze a 20%-ban tömörített, majd 60 °C-on szárított fát a normál szárított faanyag tulajdonságaival (5. táblázat).

4. táblázat A normál és a szárazon hajlítható tömörített bükk faanyag műszaki tulajdonságainak összehasonlítása szárított állapotban (forrás: Candidus 2014b adatai alapján)

Table 4 Comparison of the mechanical properties of uncompressed and dry bendable compressed beech species in dry state (source: on the grounds of Candidus 2014b)

Műszaki jellemzők	Normál bükk*	Bendywood® bükk	Átlagos eltérés (%)
Sűrűség [kg/m ³]	730	890	+ 21,9
Tömörítés mértéke [%]	0	20	+ 20,0
Rugalmassági modulus [GPa]	11	3,9	- 64,5
Folyáshatár [MPa]	59	31	- 47,5
Hajlítoszilárdság [MPa]	74	102	+ 37,8
Hajlítási viszonzyszám	1/45	1/10	+ 350,0

*Az adatok irodalmi forrása nem ismert.

Kuzsella és tsai. (2011) a bükköt vizsgálták különböző tömörítési szinteken. A tömörítés során a kezdeti rugalmas tartományban a rugalmassági modulus egyre kisebbé válik, míg a tönkrementelhez tartozó alakváltozás egyre nagyobb lesz, azaz a tömörítés mértékének növelésével együtt egyre nagyobb alakváltozást képes elviselni az anyag a tönkrementel előtt, könnyebb alakíthatóság mellett. Szabó és tsai. (2005) szintén hasonló következtetésre jutottak, miszerint a tönkrementel jóval nagyobb behajlásnál (y) következik be, és a tömörített fánál még nagy lehajlás esetén is van szilárdsági tartalék. A 3. táblázatban látható szám adatok alapján a hajító vizsgálatnál mért törésig elviselt alakváltozás a tömörítetlen faanyaghoz képest 20%-os tömörítési fok mellett három-négyszeresére nő bükk és tölgy fafajok esetében, ami jelentősen megkönnyíti a faanyag feldolgozhatóságát (Kuzsella és Szabó 2006), míg az elviselt alakváltozás 23%-os rostirányú tömörítés hatására közel ötszörösére, ütő-hajlító vizsgálatnál közel kétszörösére növekszik (Kuzsella 2011a).

5. táblázat A tömörített, nedvesen hajlítható és a nem tömörített bükk és kőris faanyagok száraz állapotú tulajdonságainak összehasonlítása (forrás: Buchter és tsai. 1993)

Table 5 Comparison of the compressed, moist bendable and the uncompressed beech and ash wood's properties in dry state (source: Buchter et al. 1993)

Műszaki jellemzők	Átlagos eltérés (a tömörített és a tömörítetlen faanyag között) [%]
Fajlagos sűrűség	+5
Nedvességtartalom	0
Hajlítoszilárdság	-10
Húzószilárdság	-10
Nyomószilárdság	-10
Nyírószilárdság	-10
Keményesség	-15
Ütő-hajlító szilárdság	+20
Csavarállóság	-10
Hajlító rugalmassági modulus*	-15
Húzó rugalmassági modulus*	-15
Nyomó rugalmassági modulus*	-15
Méretváltoztatás különböző fánedvességi értékek esetén	0

*Az eredeti cikkben *stiffnes/Steife* néven szerepeltetett mennyiségek, feltehetőleg rugalmassági moduluszt kell alatta érteni.

A bemutatott behajlási adatokat a törés pillanatáig mérték, azonban a nagyobb tömörítések esetében olyan nagy alakváltozásokat képes elviselni az anyag, hogy az alkalmazott alátámasztások magasságának megfelelő behajlásnál sem minden esetben törik el a mintadarab. Kuzsella (2011a) emiatt olyan megoldást választott, hogy amint a 20% fölötti tömörítési fok mellett is körülbelül 400 N értékig emelkedő hajlítási erő 100 N alá csökkent a vizsgálat során, a hajlító vizsgálatot befejezte és ezt tekintette végső állapotnak. A későbbiekben bemutatásra kerülő 8. táblázat adatai alapján a behajlás radiális és tangenciális anatómiai irányok közti eltérése nem számottevő. A különböző kísérleti körülmények következtében (keresztmetszet, alátámasztási köz) a 3. és a 8. táblázat y értékei nem hasonlíthatók össze, azonban ismertetésük fontos az adott kísérleteken belül a hajlíthatóság javulásának, tendenciáinak és az anatómiai irányok különbségeinek szemléletes ismertetéséhez. Kétszeri tömörítést írnak le Volkmer és tsai. (2001), akik szerint a fa nagyobb mértékű tömörítésével (20–30%) az alakíthatóság tovább javul. Ha a tömörített faanyagot 5% hosszirányú nyújtásnak tesszük ki, a hajlítása még könnyebbé válik.

A bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy az alakíthatósággal foglalkozó publikációk mind hasonló eredményre jutottak. Tömörítés hatására a rugalmassági modulus a tömörítés mértékének megfelelően csökken, tehát a rostirányú tömörítési eljárás céljának megfelelően valóban könnyebbé válik a faanyag.

Hajlítási sugár, hajlítószilárdság, hajlítási viszonzszám

A maximális alakváltozás legegyszerűbben a belső íven elérhető legkisebb hajlítási sugár (R) meghatározásával mérhető, mely természetesen nagyon sok összetevőtől függ (fafaj, anyagminőség, alkatrész mérete és keresztmetszete, tömörítési fok, a hajlításhoz alkalmazott sablon és számszám). A tömörített fa a kezeletlen fánál kisebb sugárba hajlítható a kezelés után anélkül, hogy repedne vagy törne (Deibl és tsai. 1999). A faanyag tömörítés során plasztikussá válik, nagyobb keresztmetszetek hajlításához mégis jelentős erők szükségesek (Szabó 2002). Mindegyik, a témával foglalkozó publikáció egyetért abban, hogy a tömörítés fafajtól függetlenül csökkenti a hajlíthatósági sugarat, a hajlítási végerőt és a rugalmassági modulusot is.

A tömörített tölgyfa hajlítási diagramja a bükkéhez hasonló jelleget mutat, de az azonos vizsgálati körülmények mellett szintén törésig, vagy maximális lehajlásig mutatott hajlítási végereje (F_{max}) valamivel kisebb. Utóbbi a tömörítetlen fához képest körülbelül a felére redukálódik 20% tömörítési fok mellett (Szabó és tsai. 2005). Az 1–3. táblázatokból kiolvasható értékek is ezt mutatják, rostirányú préselés hatására a hajlítási végerő a bükk esetében felére csökkent, a tölgnél szintén nagymértékű visszaesés mutatkozott. Dinamikus vizsgálatoknál ennél is nagyobb mértékű csökkenés látható. A 6. és 7. táblázatban rendre a bükk és tölgy fafajok ütő-hajlító vizsgálatának eredményei szerepelnek, Ivánovics (2006) tanulmányából. Az 1. és 2. táblázatokra vonatkozó, mérésekkel kapcsolatos megállapítások itt is helytállóak. A hajlítási végerő függ a mérési körülményektől, ezért a különböző táblázatok erre vonatkozó adatai nem minden esetben összehasonlíthatóak.

A 10%-ban tömörített tölgy hajlítószilárdsága (σ_b) alacsonyabb a bükkéhez képest (75,57 MPa), mely jóval kisebb érték, mint a tömörítetlen változatoké (Szabó és tsai. 2005). Ezzel a hajlítószilárdsági értékkel nagyságrendileg az 1., a 2., a 3. és a 8. táblázat adatai is összhangban vannak, nagyobb mértékű tömörítés hatására pedig már alig változik a hajlítószilárdság. Az említett táblázatokban a bükknél is csökkenő tendencia figyelhető meg,

6. táblázat Bükk ütő-hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 6 Results of the beech wood's impact tests (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
F_{max} [N]	2 357	2 311	1 058	895	850
KCV [J/cm ²]	4,85	7,42	9,12	13,05	14,13
W_d [J]	2,94	4,35	5,01	7,28	9,12

7. táblázat Tölgy ütő-hajlító vizsgálatának eredményei (forrás: Ivánovics 2006)

Table 7 Results of the oak wood's impact tests in dry state (source: Ivánovics 2006)

Tömörítés mértéke	0%	5%	10%	15%	20%
F_{max} [N]	3 248	2 267	2 038	1 775	702
KCV [J/cm ²]	7,08	7,88	8,20	12,25	12,28
W_d [J]	3,48	3,73	4,25	5,82	6,31

de a tömörítés arányát sokkal egyenletesebben követik a hajlítoszilárdsági eredmények fordított arányban, melyek 20% tömörítettségnél hozzávetőleg a normál bükkfa szilárdságának felére redukálódnak, míg Kuzsella (2011a) eredményei 30%-os csökkenésről tanúskodnak a normál körülmények közti egyensúlyi nedvességtartalmú mintáknál. A 4. táblázat az előzőekkel ellentétben a hajlítoszilárdság növekedését mutatja. Ebben az esetben szárazon hajlítható tömörített faanyagot készítenek, azaz a préselés után a fa redukált hosszúságát rögzítik, ilyen állapotában szárítják és hűtik, minek következtében a beállított hosszát megtartva lényegesen nagyobb sűrűségű, és a későbbiekben is hajlítható lesz a munkadarab (Báder és tsai. 2015). Tekintettel arra, hogy más technológiai folyamat szerint modifikált faanyagról van szó nagymértékben meggyűrődött rostokkal és nagyobb sűrűséggel, ez lehetséges különbségnek tekinthető. Az 5. táblázat csupán 10%-os hajlítoszilárdság-csökkenésről számol be. Segesdy (2003) munkájában a tömörített fa sugár- illetve húrirányú hajlítási eredményeinek különbségeit vizsgálta, mely alapján a σ_b anatómiai irányok közti különbsége 5,83% (8. táblázat). A 8. táblázat vizsgálataihoz használt, nedvesen hajlítható tömörített próbatestek bükk fafajúak. A hajlítási végerő kissé elmarad a normál faanyag irodalmi szilárdsági adataiból számolhatótól. Az F_{max} azért különbözik jelentősen az 1. és 3. táblázat eredményeitől, mert más volt a vizsgált keresztmetszet és az alátámasztási köz, viszont a mérvadó a körülményektől független anyagjellemző, a szilárdság – ami korrelál velük –, tehát a mérések megfelelő értékeket mutatnak. A kísérleten belüli eredmények összehasonlíthatóak egymással, hosszirányban tömörített bükk faanyagnál a vizsgált két anatómiai irányban az F_{max} értékek közti különbség gyakorlatilag elhanyagolható.

Tölgy esetén a táblázatokban jelentős különbségek láthatók, ami a különböző fajok használata és a fajaj természetes inhomogenitása miatt fordulhat elő, de a tömörítés a rugalmassági modulusához hasonlóan a hajlítoszilárdsági értékeket is kiegyenlíti.

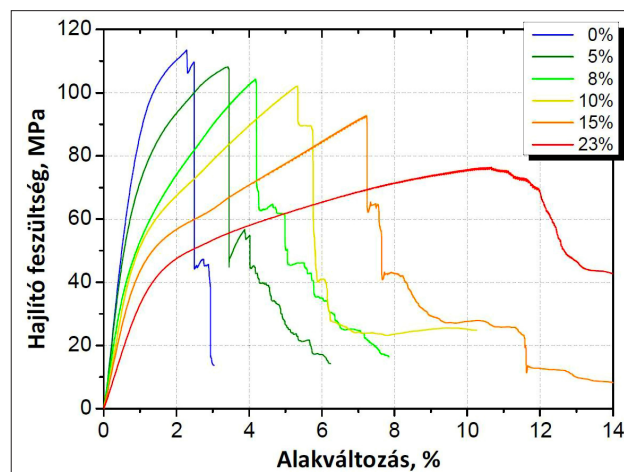
8. táblázat Hárompontos hajlítóvizsgálat eredményei és szórásai nedvesen hajlítható tömörített bükk fafaj esetében, száraz állapotban (forrás: Segesdy 2003)

Table 8 Results and standard deviations of the 3-point bend test in case of moist bendable compressed beech wood species in dry state (source: Segesdy 2003)

	Bükk hajlítása az LR síkban	Bükk hajlítása az LT síkban	Anatómiai irányok	
			átlaga	eltérése
E [GPa]	5,397 (14,11%)	4,994 (31,87%)	5,202	7,47%
F_{max} [N]	2125 (8,34%)	2145 (6,44%)	2135	0,94%
σ_b [MPa]	86,68 (7,07%)	81,63 (29,16%)	84,24	5,83%
y [mm]	21,15 (22,20%)	22,64 (18,76%)	21,87	7,04%

A statikus hajlítóvizsgálat során készült erő-elmozdulás (F - y) diagramokon a görbék alatti terület, azaz a törésig elnyelt energia (W) a tömörítés mértékével együtt növekszik (Kuzsella és tsai. 2011), ez olvasható le a Kuzsella és Szabó (2006) munkájában megjelent diagramokról és a 3. táblázatból is. Az említett diagramok tanulsága szerint a bükk és a tölgy fafajok hasonlóan változnak a tömörítés fokának növelésével. Az 1. ábra a geometriától független hajlítófeszültség-alakváltozás (σ_b - ε) viszonyt ábrázolja, és a görbék alakjai, valamint a görbék alatti területek arányai rendkívül hasonlítanak az F - y diagramokon láthatókhöz.

A hajlítási viszonzszám (h/R arány) egy méretektől független jellemzője az anyagnak, mely alapján adott vastagsághoz a technológiailag biztonságosan alkalmazható legkisebb hajlítási sugár számolható. Egyszerre jellemzi az elnyelt energiát és az alakíthatóságot, valamint fordított kapcsolatban van a rugalmassággal és a hajlítoszilárdsággal.



1. ábra Hárompontos hajlítás adataiból készített σ_b - ε diagramok különböző tömörítettségi fokú bükk mintáknál (forrás: Kuzsella 2011a)

Figure 1 σ_b - ε diagrams about the 3-point bend test data as a function beech specie with different compression rates (source: Kuzsella 2011a)

Kuzsella (2011a) disszertációjában olvasható, hogy a tömörítés mértékének növelésével javítható a h/R viszony. Számos publikációban található kapcsolódó adat: Deibl és tsai (1999) munkájával összhangban Kovács és tsai. (2006) szerint a félkész termék hajlítási viszonzyszáma $1/10$ lesz, mert a hajlíthatóságot az összecsiszított rostok javítják. Szabó és tsai. (2005) szabadalmában a farugókra vonatkozó megállapítások alapján hajlítoszalag használata nélkül a h/R viszony akár $1/3$ értékű is lehet, azaz a tömörített fa kis rádiuszú ívre is könnyen hajlítható. Szintén pánt alkalmazása nélküli adatokat találunk Kuzsella (2011a) disszertációjában, ahol irodalmi adatok alapján a tömörítetlen bükk hajlítási viszonzyszámának $1/15$ van megadva, míg saját mérései szerint a 15%-ban tömörített bükk h/R aránya $1/7$. 23%-os tömörítés esetén ez az érték már $1/5$, mely $80\text{ }^\circ\text{C}$ -ra melegítve a fát $1/4$ -re javítható. Ez megegyezik a munkájában látható adatok közül a normál gőzölt anyag pánttal és bütüszorítóval elérhető legjobb hajlítási viszonzyszámával. Ivánovics (2005) az elérhető legkisebb hajlítási sugarakat foglalta táblázatba, ahol egyértelműen látható azonos méretű, de különböző állapotú anyagok viselkedése adott körülmények között (9. táblázat), kiegészítve Dienes (2013) munkájából származó adatokkal. Utóbbi tanulmány szerint a téglalap és kör keresztmetszetű anyagok hajlíthatósága között jelentős különbségek fordulhatnak elő. A 9. táblázatban szereplő gőzölt anyagok szobahőmérsékleten, nedves állapotban lettek hajlítva, ennek köszönhetően Kuzsella (2011a) adataihoz képest valamelyest gyengébb eredmények láthatóak.

A bemutatott maximális h/R értékek között esetenként eltérés mutatkozik, mely a különböző módokon, faanyagokon és segédeszközökkel elvégzett kísérleteknek tudható be, abban viszont egységesek, hogy a tömörítés hatására mindenhol lényegesen csökken a hajlíthatósági sugár. A tömörítés mértékének növelésével javul a h/R viszony. Tömörítést követően a klasszikus gőzöléses eljárásnál is jobb hajlítási viszonzyszámokat lehet elérni, valamint a rostirányban tömörített fa már nem csak plasztifikált állapotában alakítható, ami kibővíti a felhasználási lehetőségek tárházát. Ez azt is jelenti, hogy a korábban csak hajlítoszalaggal, forró állapotban elérhető hajlítási viszonzyszámok tömörített faanyag alkalmazásával szobahőmérsékleten, akár pánt használata nélkül is elérhetőkké válnak.

Szívósság (ütő-hajlító szilárdság), húzószilárdság

A rostirányú tömörítés folyamatában az eredeti célnak megfelelően a faanyag rostjai meggyűrődnek, így modifikált anyagként könnyebben hajlítható fa keletkezik (Báder 2015). További, általában 25–28%-nál nagyobb arányú rostirányú tömörítés hatására a tönkrementel mikroszkopikus méretű repedésekkel, elcsúszásokkal kezdődik, ami a terhelés növekedésével tovaterjed az egész keresztmetszetre, a rostok elhajlanak és a bélsugaraktól elválnak (2. ábra) (Ivánovics 2012).

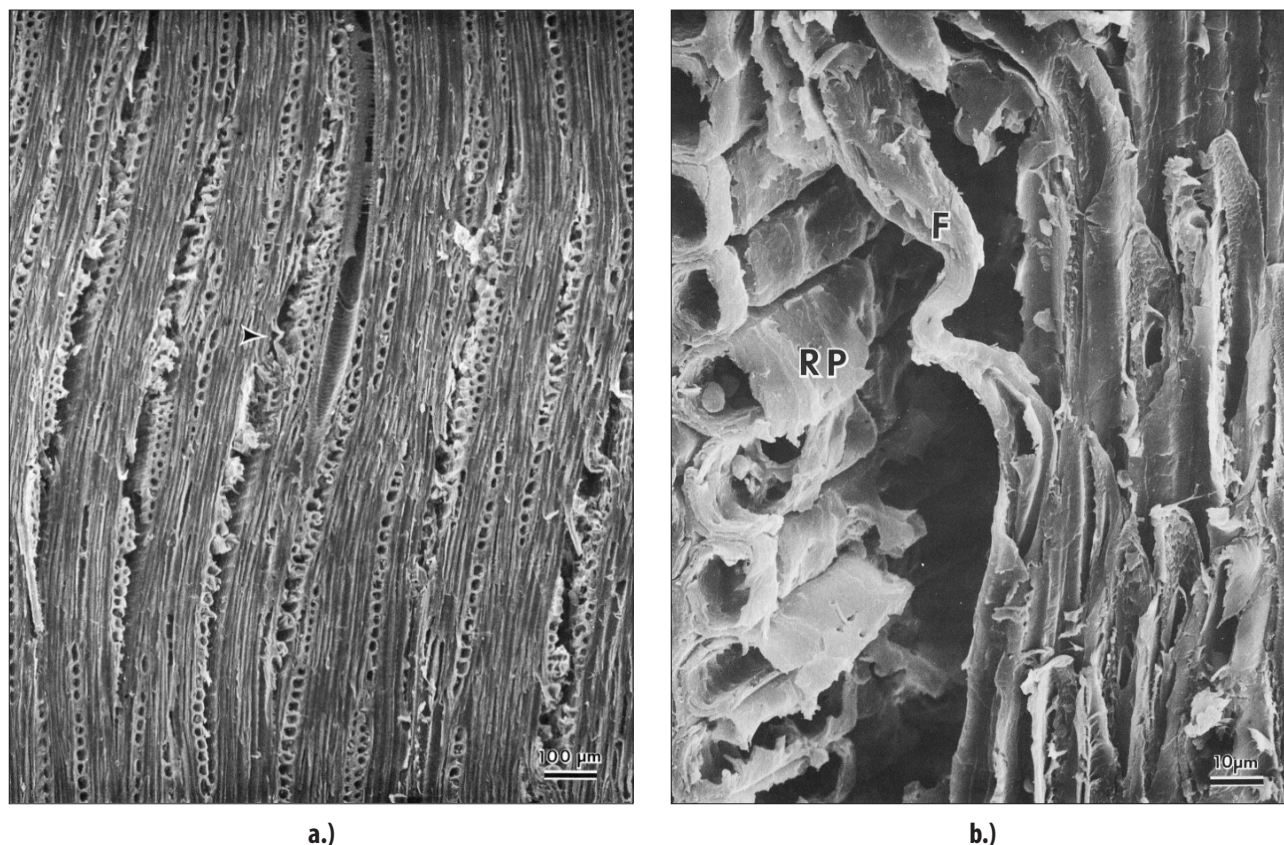
A hárompontos hajlító vizsgálat adataiból kapott görbék alatti területek a tömörítés hatására négyszeresükre növekednek, ami a szívós jelleg erősödését jelzi (Kuzsella és Szabó 2006). Szabó és tsai. (2005) Charpy-féle lengőkalapácsos ütőművel elvégzett vizsgálata alapján a 20%-ban tömörített bükkfa esetén a dinamikus törési munkaigény (W_d) a szívóssággal együtt legalább háromszorosára nőtt a tömörítetlen faanyaghoz képest, a fajlagos ütőmunka (KCV) pedig minimálisan $14,35\text{ J/cm}^2$ lett, mely szintén nagyméretű növekedést jelent a normál bükk faanyag $8,55\text{ J/cm}^2$ értékéhez képest. Ivánovics (2006) mérései szintén az előbbieken említett anyagjellemzők növekedését mutatják (6. és 7. táblázat). Az előzőekkel egyetértésben Kuzsella és tsai. (2011) is azt állapították meg, hogy a faanyag szívóssága a rostirányú tömörítésnek köszönhetően jelentősen javul, és Kuzsella (2011a) megállapította, hogy a bükk 23%-os rostirányú tömörítésének hatására a fajlagos ütőmunka kétszeresére növekszik.

A húzószilárdságról sajnos kevés információ áll rendelkezésre. Az biztosan megállapítható, hogy a hajlítás során fellép húzó igénybevétel is, tehát számolni kell vele. A hajlítható állapotában lévő tömörített fa a kisebb

9. táblázat 25 mm vastagságú bükkfa minta minimális hajlítási sugara és hajlítási viszonzyszámai különböző eljárásokkal (forrás: Ivánovics 2005 és Dienes 2013 munkája nyomán)

Table 9 Minimal bending radius and bending ratio of a 25 mm thick beech wood with different processes (source: on the grounds of Ivánovics 2005 and Dienes 2013)

	R [mm]	h/R
Száritott anyag*, egyszerű hajlítással	1500	1/60
Gőzölt anyag, egyszerű hajlítással	500	1/20
Gőzölt-tömörített anyag, egyszerű hajlítással	200	1/8
Gőzölt anyag, pánttal és bütüszorítóval	120	1/5
Gőzölt-tömörített anyag, pánttal és bütüszorítóval	50	1/2



2. ábra Vörös tölgy tangenciális metszete nyomóvizsgálat után (a) és ennek nagyított részlete, ahol a rostok elhajlása és a bélsugarak elválása látható (b) (forrás: Ivánovics 2012)

Figure 2 Tangential section of red oak after compression test (a) and its enlarged part, where the fibre-deflection and the ray-separation can be seen (b) (source: Ivánovics 2012)

hajlíthatósági sugárból következően nagyobb alakváltozást képes elviselni a gyűrött rostok hatására a húzott oldalon, melyek képesek a kiegyenesedésre alakíthatósági tartalékot képezve (Báder és tsai. 2015). Volkmer és tsai. (2001) szabadalmukban tájékoztatnak, hogy a tömörített faanyagot 5%-kal megnyújtva annak alakíthatósága tovább javul. Ebből levonva a konklúziót legalább 5% mértékben növelhető a rostirányban préselt fa hosszúsága, annak a felhasználási cél szempontjából okozott károsítása nélkül. A Compwood (2008) a tömörítést követő rövid pihentetés után, nedves és meleg állapotban szüntette meg a nyomóerőt, így a fa visszarugózott és lényegesen kisebb lett a maradandó hosszcsökkenése, mely következtében az 5. táblázatban a 12% nedvességtartalmú bükkfa húzószilárdságának kisebb mértékű, 10%-os csökkenéséről számol be.

Megállapítható, hogy a faanyag ridegsége és szárított állapotú húzószilárdsága csökken, a dinamikus töréshez szükséges energia pedig többszörösére növekszik a longitudinális préselés következtében.

Segesdy (2003) késztermékekre vonatkozó, nagyon lényeges következtetése a következő: „A gyakorlati kísérletek bebizonyították, hogy [...] a tömörített faanyag veszít a szilárdságából, de még így is a „természetes” faanyag szilárdsági értékein belül marad”. A táblázatosan és szövegesen bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy a rostirányban tömörített faanyag nedvesen és szárazon hajlítható változatának tulajdonságai eltérnek éppúgy, mint a tömörített és a tömörítetlen faanyag mechanikai tulajdonságai.

Egyéb fizikai és megmunkálási tulajdonságok, felhasználás

Az előzőekben bemutatott mechanikai jellemzőkön túl a rostirányban tömörített faanyag rezgésekkel kapcsolatos viselkedése is figyelemre méltó. A rezgés csillapodásának jellemzésére célszerű a logaritmikus dekrementumot használni, ahol Λ a logaritmikus dekrementum, A_1 és A_2 az egymást követő amplitúdók (Csóka 2003).

$$\Lambda = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad [1]$$

A fenti mérőszám jellemzi a belső súrlódásból eredő veszteségeket, és a viszkoelasztikus viselkedésre is lehet következtetni belőle. A logaritmikus dekrementum értéke a tömörítés mértékének növekedésével együtt akár négyszeresére növekszik, ami bizonyítja, hogy a rostirányú tömörítés hatására a bükk faanyag egyre inkább viszkoelasztikus viselkedést mutat (Kuzsella 2011a és 2011b). A logaritmikus dekrementum növekedése igazolja Szabó és tsai. (2005) munkájában leírtak helyességét, miszerint a tömörített faanyagból készített rugó rezgéscsillapító alkatrésznek is előnyösen használható. Két távolabbra mutató megállapítás Kuzsella (2011a) tollából, hogy az ultrahang terjedési sebességének meghatározása vagy a logaritmikus hullám sajátfrekvenciájából megállapított rugalmassági modulus meghatározása alkalmas lehet a tömörítési szint megállapítására. A módszerek nagy segítséget jelenthetnek az egyenletes tömörödöttség ellenőrzésében és mértékének utólagos megállapításában.

Tömörítés után a faanyag rögtön alkalmas a hajlításra, de szükség szerint tárolható is (Sparke 1989). Nedvesen hajlítható faanyag esetén a tárolást úgy kell megoldani, hogy a nedvességtartalom ne csökkenjen 20% alá. A száradás megelőzhető fagypontra tárolva, így a tömörített fa akár 12 hónapig raktározható felhasználás előtt, vagy sötét helyiségben műanyag fóliába csomagolva, ahol 6 hónapig őrzi meg a hajlékonyságát (Compwood 2007, Szabó 2002). A nedvesen raktározott tömörített faanyagot védeni kell penésztől és gombáktól, melyek színeltérést és egyéb károkat okozhatnak. Tároláskor az egyensúlyi nedvességtartalmat folyamatosan ellenőrizni kell a száradás, és az ebből következő felületi repedések megjelenésének elkerülése érdekében. Szintén fontos, hogy a nedvesen tárolt fa rosszul viseli a közvetlen napsugárzást (Compwood 2007, Kuzsella és Szabó 2006). Szárazon hajlítható tömörített fa esetében a kész alapanyag szárított (6–8%-os nedvességtartalmú) állapotban tárolható, a viszonylag időigényes tömörítési folyamat ebben az esetben szintén beilleszthető az ipari termelési sorba, természetesen a szárazon hajlítható rostirányban tömörített faanyag eltérő tulajdonságainak figyelembe vételével.

A tömörített fa hajlítása kis keresztmetszetek esetén kézzel sem okoz problémát, nagyobb méretű alkatrészek készítésekor azonban a Thonet technológiából régóta ismert kéziszerszámok, sablonok, szorító berendezések alkalmazása elkerülhetetlen. A hajlítás során használt rögzítési módok és az alakítást követő rögzítés szintén megegyezik a korábbi technológiákban felhasználtakkal, ugyanazok a sablonok, bilincsek, esetlegesen húzószalag és bütüszorító stb. és szárítási rendszer alkalmazható a rostirányú tömörítéssel hajlíthatóvá tett faanyagnál is. A termékelőállítás szempontjából lényeges, hogy az alakítás egyszerű eszközökkel végrehajtható és ezek használata könnyen elsajátítható (Szabó 2002). A tömörített faanyag a hagyományosnál magasabb hőmérsékletű szárítást képes elviselni száradási repedések nélkül, így a száradási idő is rövidebb (Komáromy 1999).

Nedves állapotában a tömörített faanyagot a rostok felszakadásának veszélye miatt a jobb minőség elérése érdekében rostirányra merőlegesen érdemes gyalulni, valamint esztergálással és csiszolással is kitűnően megmunkálható. Megmunkálás közben szoros megvezetés szükséges a hajlékonysága miatt (Komáromy 1999, Sőregi 2007). A kívánt forma beállításakor a nedvesen hajlítható tömörített faanyagot a megfelelő formában rögzíteni kell, majd valamely szárítási technológiával nedvességtartalmát 16% alá csökkenteni. A nagyon kis sugarú hajlításokat közvetlenül a préselés után, melegen célszerű elvégezni (Ivánovics 2005). A fa az eredetihez képest kismértékű szilárdsági csökkenéssel nedvesen és szárazon hajlítható tömörített változat esetében is normál faanyagként megmunkálható lesz a szárítást és lehűtést követően, például fűrészelés, gyalulás, marás, stb. (Hanemann 1917, Sparke 1989). A struktúrája épen marad (Sparke 1989), megjelenése a normál fával megegyező, normál faanyagként festhető és ragasztható, de az alkalmazott rostlágnyítási módszernek és időtartamnak megfelelő elszíneződéssel természetesen számolni kell. Attól eltekintve, hogy végtermékként a világos színű natúr fafelületek a normál előkezelési eljárás következtében nem megvalósíthatóak, a tömörített fa esztétikai és a feldolgozás során vett anyagtakarékossági szempontból egyaránt kiváló termék. A szálirány mindig követi az ívet és nem szükségesek nagy gyártási túlméretetek. Míg a hagyományos módszerekkel hajlított fánál tipizált elemekből álló termékcsaládok kialakítására kell törekedni, a tömörített fa előnye, hogy a könnyebb alakíthatóság miatt egyszerűbb és olcsóbb hozzá szerszámokat készíteni. Készletezhetősége és alakíthatósága miatt a sorozatgyártott hajlított alkatrészek kiváló alapanyaga. Használata nagy előnyt jelent az egyedi munkák elkészítésében is, a korábban szinte csak sorozatgyártás szintjén megvalósult hajlított termékek előállításán terén (Ivánovics 2005). Restauráláshoz szintén nagyszerű alapanyag, drága eszköz- és jelentős munkaigénnyel létrehozható hajlított és csavart alkatrészek pótolhatók vele sokkal gyorsabban és egyszerűbben.

A nedvesen alakítható tömörített faanyag esetében a kívánt formájúra hajlított és így rögzített alkatrész a szárítás során megszilárdul, alaktartóvá válik (Szabó 2002, Thomassen és tsai. 1990), alacsony rugalmasságának

köszönhetően megtartja a formáját. Beépítéskor lehetőség van kis korrekciókra, például a hajlítási sugár utánállítására, kismértékű változtatására (Deibl és tsai. 1999).

A fa a tömörítési folyamat során semmilyen vegyszeres kezelést nem kap, ezért a lágyítás-tömörítés közben a szénhidrátok és egyéb fakárosítók szempontjából lényeges alkotórészek zöme épen marad, ebből következően a növényi- és állati károsítókkal szembeni ellenállása megegyezik a tömörítetlen faanyagéval. A plasztifikálás és szárítás hatására viszont a technológiából kifolyólag bizonyos fokú hőkezelésen esik át a fa, így legtöbb esetben a jelenleg érvényben lévő, nemzetközi szabályozás szerinti ISPM 15 követelményeinek automatikusan eleget tesz (minimum 56 °C hőmérséklet teljes keresztmetszetben 30 percen keresztül). Ezzel biztosítja a nemzetközi szállítmányozáshoz szükséges normát, tehát a tömörített fából készült termékek nemzetközi szállítmányozási procedúrája egyszerűbb a normál faanyagéhoz képest. Lágyításkor a fa hőmérséklete meghaladja a minimálisan megkívántat, melyet a tömörítési folyamat során tartani kell. A szárítás általában szintén 60 °C körüli hőmérsékleten történik és néhány napot vesz igénybe, köszönhetően a redukálódott repedéskeletkezési hajlamnak (Compwood 2007).

A rostirányban tömörített fa alkalmazható íves korlátok, ablakok és élzárók, boltívek, stb. alapanyagaként. Az íves fa alkatrészek manapság általában ragasztott vagy rétegelt-ragasztott tömörfa vagy sokszor kompozit alapanyagokból készülnek, ezekhez a technológiákhoz sok alapanyag és alkatrész, munkaeszköz, rögzítő elemek, megfelelő ragasztó, nagyon pontos munkavégzés és gyakran nehéz fizikai munka szükséges. A gyártási idő és a munkát végző ember fizikai igénybevételének csökkentésére a fa tulajdonságait úgy kell módosítani, hogy az alkalmas legyen például acélhajlító gépeken és eszközökkel való alakításra. Sok esetben a jelenleg használt, nem építőipari rétegelt szerkezetek helyettesíthetők vele. A megfelelő formára hajlított tömörített alkatrész mechanikusan rögzítve pl. korlátként vagy ragasztva pl. élzáróként is alkalmazható (Deibl és tsai. 1999). A bútor élzárók, amik a megadott módon kezelt fából készülnek, repedés vagy törés bármilyen kockázata nélkül hajlíthatóak például asztallap éles íve köré (Sparke 1989). Furnér szintén készíthető belőle, amely a speciális belső szerkezetének köszönhetően jól használható térgörbe felületekhez, ahol a faanyag bizonyos mértékű nyúlására van szükség (Volkmer és tsai. 2001). Ez a technológia Anssary (2006) szerint is a hajlítható furnér és a hajlékony tömörfa használatát egyaránt lehetővé teszi. Leírásában ezen felül a bútortervezők számára nem csak a többszörösen hajlított fa bútoralkatrészek készítésének lehetőségét adja meg székekhez, asztalokhoz, ágyakhoz, stb., hanem az eredeti Thonet design újraértelmezésének lehetőségét is. Az új hajlítási folyamattal elérhetővé vált strukturális- és anyagválaszték megszabadította a hajlított fából készült bútorokat a korábbi súlyosságuktól és mozdulatlanságuktól. Lehetségessé vált hajlékony, rugalmas és könnyed bútort készíteni hajlított fából.

A nedvességtartalom változása miatti alaktartóssági problémák okán kültéri használatra nem alkalmas a tömörített fa (Candidus 2014a), viszont kivételes esetekben, ha a kész formára hajlított alkatrész úgy van rögzítve, hogy például a magas páratartalom következtében se mozdulhasson el, díszítési céllal kültéri alkalmazásban is felhasználható.

A rostirányban tömörített fából készülő hajlított elemek előállításához nincs szükség környezetre káros anyagokra, például ragasztókra (Deibl és tsai. 1999, Szabó 2002), a termék teljes mértékben környezetbarát, kémiai adalékanyagoktól mentes (Candidus 2014c). Ha a szükséges alkatrész valamilyen okból – pl. a mérete vagy geometriája miatt – nem állítható elő egy anyagból, akkor toldható pl. csapozással. Így nagy hosszok elérhetőek, igaz, hogy rosszabb hajlíthatóság mellett. Ekkor ragasztóanyag már kerül a rendszerbe, de lényegesen kisebb mennyiségben, mint a hagyományos tömbösített és rétegragasztott termékeknel.

A tömörített fa alkalmazása a bútortervezési és belsőépítészeti alkalmazások széles palettáján kívül az építőipar, hajógyártás, játék- és sportszergyártás, képzőművészet, egészségügy területére is kiterjeszhető. Egy különleges, elsődlegesen bútortervezési példa a századunk elején kifejlesztett, fából készült spirálrugó. Megfelelő rugógeometria mellett a tömörített fából készült rugó éppúgy képes az energiatárolási és leadási, csillapítási feladatok ellátására, mint a hagyományos fém rugók. A tömörített fából készült fa spirálrugó ismétlődő terhelés hatására legalább 1 200 000 terhelési ciklust tesz lehetővé 6 MPa kifáradási határfeszültségen (Szabó és tsai. 2005). A rugóalakok és az üzemvitel a gépészetben használt formáknak megfelelnek, azonos méretek esetén a fémrugóhoz képest kisebb a tárolható energia, de a kis tömeg, a mágneseshetetlen alapanyag és természetes mivolta folytán alkalmazható az élet számos területén. Gyógyászati téren szintén lehet létjogosultsága a rostirányban tömörített fának, ahol különleges geometriák létrehozásával pl. sérült végtagokhoz egyedileg igazítva használható (Szabó és tsai. 2005).

Napjainkban a tömörített fa nedvesen hajlítható változatát használják elsősorban. Az alábbiakban felsorolás látható a felhasználási lehetőségekről, mely korántsem tekinthető teljesnek figyelemmel arra, hogy a tömörített-hajlított fából készült végtermékek sokféleségének csak a felhasználók kreativitása szabhat határt:

Bútoripar:

- szék (3. ábra), pad, kanapé, bútorláb, kávék, oszlopok, stb.
- szekrénydíszítő elem (kávadíszítés, álosztó, párkány)
- szegélyléc, élléc
- fogantyú
- pultburkolat, frontelem (4. ábra)
- farugó (Szabó és tsai. 2005) (matracrugó, felhasználás kárpitozott bútorokhoz) (5. ábra)
- késelt furnér 3 dimenziós felületre
- egyedi berendezési tárgyak (lámpabúra- és test, szobainas, kabátakasztó, stb.).

Belsőépítészet:

- korlát karfa (6. ábra), korlátlécek (csavart megoldások is)
- önálló szobadísz, szobrászat, iparművészet
- növelt hanggátlású falburkolat, térplasztika
- sarokléc/takaróléc íves nyílászárhoz, építészeti elemekhez, íves beltéri ajtóalkatrészek
- egyéb beltéri tárgyak (7. ábra).

Egyéb:

- hangszerkészítés, különleges igényeknek megfelelő hangszeralkatrészek előállítás
- sportszer (ütők, dobantó, stb.)
- logó (faragás helyett térben hajlított fából)
- szerszámnyél, egyéb rezgéscsillapító alkatrész
- használati tárgy (sétabot, teáskanna fogantyú, fejhallgató, nyakék, fülbevaló és egyéb ékszer, kulcstartó, szalvétatartó, stb.)
- járműalkatrészek (autó műszerfal, hajó tölgyfabordák, stb.) (8. ábra)
- játékok
- talpbetét
- egészségügyi segédeszköz.



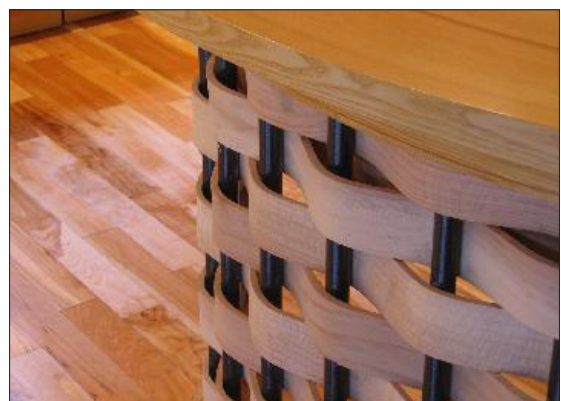
5. ábra Bükk farugós matrac (forrás: Bio-Textima 2015)

Figure 5 Mattress with compressed beech coil springs (source: Bio-Textima 2015)



3. ábra Japán szék tömörített-hajlított faanyagból (forrás: Sandgren Jakobsen H. 2015)

Figure 3 Japanese chair made of compressed-bent wood (source: Sandgren Jakobsen H. 2015)



4. ábra Konyhapult tömörített-hajlított faanyagból (forrás: Fluted B. 2008)

Figure 4 Kitchen counter made of compressed-bent wood (source: Fluted B. 2008)



6. ábra Fa korlát tömörített bükkfából (forrás: Q-railing 2015)

Figure 6 Wooden handrail made of compressed beech wood (source: Q-railing 2015)

Összefoglalás, következtetés

A cikk áttekintést ad a fa rostirányú tömörítésének hatására bekövetkező mechanikai változásokról és tulajdonságokról, valamint a megmunkálási folyamatokról és a felhasználási lehetőségekről.

A longitudinális irányú tömörítés hatására a fa néhány mechanikai tulajdonsága kedvezően változik (Kuzsella és Szabó 2006). A tönkremenetelhez tartozó alakváltozás növekszik, míg a rugalmassági modulus csökken, könnyebb alakíthatóságot biztosítva. A fajlagos ütőmunka növekszik, a faanyag szívósabbá válik (a ridegsége csökken), a tömörítés csökkenti a hajlíthatósági sugarat. A lényegesen alacsonyabb hajlítási végerő mellett is a törésig elnyelt energia a többszörösére növekszik, tehát a tömörített faanyag a normál fához képest viszkoelasztikusabb viselkedést mutat. A hosszirányban tömörített, nedvesen hajlítható fa szilárdsági értékeinek mindegyike gyengébb lesz, a rostirányú nyújthatósága javul, míg a szárazon hajlítható tömörített faanyag hajlítószilárdsága növekszik a kezeletlen faanyaghoz képest. A keménység és a csavarállóság csökken, a sűrűség és az ütő-hajlító szilárdság növekszik. Az eljárást követően a klasszikus Thonet-technológiánál is jobb hajlítási viszonyokat lehet elérni, valamint a rostirányban tömörített fa hideg állapotban alakítható, tehát készletezhető, egyszerűbben kezelhető. A tömörítés célja pontosan a hajlíthatóság javítása és könnyítése, tehát segítségével valóban a kitűzött irányban változtathatók a faanyag tulajdonságai.

Az ultrahang terjedési sebességének vagy a logaritmus hullám sajátfrekvenciájából megállapított rugalmassági modulusnak a meghatározásával a tömörödöttség mértéke ellenőrizhető. Mivel a tömörített anyag készletezhető, ez a kontroll lehetőség nagyon fontos lehet a félkész alapanyagok ellenőrzésénél a sorozatgyártásban.

A longitudinálisan préselt fa kis repedés és törés miatti veszteséggel hajlítható bármely irányban. Ezen felül a hajlítás egyszerű eszközökkel és sablonokkal megoldható, melyek használatát könnyű megtanulni (Anssary 2006). Tömörítés után a faanyag rögtön alkalmas a hajlításra, de szükség esetén tárolható is. Nedvesen hajlítható faanyag esetén a tárolást úgy kell megoldani, hogy a nedvességtartalom ne csökkenjen 20% alá (Báder és tsai. 2015). A beállított alakjában rögzített alkatrész alacsony rugalmasságnak köszönhetően szárítás után megtartja a formáját. Szárítást és lehűtést követően normál faanyagként megmunkálható lesz. Beépítéskor lehetőség van a hajlítási sugár kismértékű változtatására.

A rostirányban tömörített faanyagok az egyensúlyi nedvességtartalom változása miatt fellépő, jelenleg megoldatlan alaktartóssági problémái következtében kültérben nem jellemző az alkalmazása. A fakárosítókkal szembeni ellenállása megegyezik tömörítetlen faanyagéval, a rostlágyítás során viszont előnyösen, a technológiából kifolyólag bizonyos fokú hőkezelésen esik át a fa. Sok esetben a jelenleg felhasznált ragasztott alkatrészek helyettesíthetők tömörített fával, de többszörösen görbített felületekhez illeszthető furnér szintén készíthető belőle. A viszkoelasztikusabb viselkedés következtében rezgécscillapító alkatrésznek is előnyösen használható. A rostirányban préselt fából előállított normál méretű termék kémiai adalékanyagoktól mentes, környezetbarát, ezért alkalmazása a bútorigiparban, belsőépítészetben, építőiparban, hajógyártáson és képzőművészetben kívül a játék- és sportszergyártásban, valamint az egészségügy területére is kiterjeszhető.

A rostirányú tömörítés egyértelmű előnye, hogy hidegen is hajlítható természetes faanyagot eredményez,



7. ábra Fogasok tömörített-hajlított kőris faanyagból (forrás: Harrison 2012)

Figure 7 Coat hooks made of compressed-bent wood (source: Harrison 2012)



8. ábra Kormánykerék tömörített-hajlított faanyagból (forrás: Pure Timber 2015)

Figure 8 Steering wheel made of compressed-bent wood (source: Pure Timber 2015)

melyet más technológiával eddig nem sikerült megvalósítani a hajlíthatóságtól független fizikai tulajdonságok viszonylagos állandósága mellett.

Napjainkban több különleges feladathoz az ipari termelésben főként a belsőépítészet és a bútortipar területén használják fel, sok esetben speciális igényeknek megfelelő egyedi termékek elkészítéséhez és felújításokhoz. A termék és tulajdonságainak ismertebbé válásával növekvő érdeklődés és kereslet várható a tömörített faanyagra a versenyszféra felől. Mindehhez természetesen szükséges, hogy a faiparban dolgozók tudatában legyenek ezen anyag létezésének, tulajdonságainak és ezen keresztül felhasználási lehetőségeinek.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Talentum Műhely - a tudományért és tehetségekért a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0005 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Anssary E. A. (2006) An Approach to Support the Design Process Considering Technological Possibilities. Doktori értekezés. University of Duisburg-Essen, Department of Art and Design, Essen, Németország, 207 o.
- Báder M. (2015) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése 1. rész: Az alapanyagok és előkészítésük, a tömörítés elmélete. *Faipar*, 63. évf. 1. szám - <http://dx.doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.8>
- Báder M., Németh R., Ábrahám J. (2015) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése 2. rész: Történelem és szabadalmak. A tömörítés tulajdonságai és a tömörítést követő eljárások. *Faipar*, 63. évf. 1. szám <http://dx.doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.13>
- Bio-Textima Kft. (2015) Vitalwood Premium Selection. <http://vitalwood.hu/vitalwood-premium-selection_matrac.php> Megtekintve: 2015.09.26.
- Buchter J., J. Adelhoej, J. Ljoerring, O. Hansen (1993) Introducing Compressed Wood. Danish Technological Institute, Department of Wood and Furniture, Taastrup, Dánia, 27-28. o.
- Candidus P. Sas. (2013) Bendywood – 1st Time User Guide. Candidus Prugger Sas, Bressanone, Olaszország, 3. o.
- Candidus P. Sas. (2014a) Bendywood applications. <http://www.bendywood.info/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=4&lang=english> Megtekintve: 2014.01.29.
- Candidus P. Sas. (2014b) Technical Details. <http://www.bendywood.info/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=18&lang=english> Megtekintve: 2014.01.29.
- Candidus P. Sas. (2014c) Benefits Bendywood. <http://www.bendywood.info/index.php?option=com_content&task=view&id=5&Itemid=5&lang=english> Megtekintve: 2014.01.29.
- Compwood M. Ltd. (2008) English Manual. <<http://www.compwood-eng.dana8.dk/data/images/man%20eng.pdf>> Megtekintve: 2008.09.14.
- Compwood P. Kft. (2007) Bendable hardwood manual. Compwood Products Kft., Budapest, 3–15. o.
- Csóka L. (2003) Fa csillapítási tényezője. *Faipar*, 51(2): 4–6.
- Deibl H-J., J. Illhardt, H-J. Walter (1999) Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen aus biegbarem Holz. Deutsches Patent- und Markenamt, DE19913775 A1 sz. szabadalmi leírás, 1–2. o.
- Dienes Zs. (2013) Terméktervezés tömörített faanyag felhasználásával. Szakdolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 58 o.
- Fluted Beams Llc. (2008) Curved Kitchen Island <<http://www.woodweb.com/galleries/project/posts/1298.html>> Megtekintve: 2015.06.12.
- Hanemann M. (1917) Holzaufbereitungsverfahren. Deutsches Reich Reichspatentamt, 318197 sz. szabadalmi leírás, 1. o.
- Harrison D. (2012) The Homelife Blog - Wacky ways with wood <<http://blogs.homelife.com.au/homelife/article/wacky-ways-with-wood/>> Megtekintve: 2015.06.12.
- Ivánovics G. (2005) A fa hajlításának technológiája napjainkban. In: Konferencia kiadvány, Danyi, J. et. al. szerk. AGTEDU 2005, Műszaki és Természettudományi Szekció, Kecskeméti Főiskola, Kecskemét, 2005. november, 189–193. o.

- Ivánovics G. (2006) Rostirányban tömörített faanyagok szilárdsági vizsgálata. In: Konferencia kiadvány, Belina, K. és tsai. szerk. AGTEDU 2006, Műszaki és Természettudományi Szekció, Kecskeméti Főiskola, Kecskemét, 2006. november, 171–176. o.
- Ivánovics G. (2012) Nyomott faanyag alakváltozási folyamata. Kézirat, Kecskeméti Főiskola, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskemét, 2–6. o.
- Komáromy G. (1999) A fa hajlításának elméleti alapjai és néhány gyakorlati kérdése. Szakdolgozat, Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 41 o.
- Kovács Zs., Süveg J., Papp T. (2006) Mechanikai megmunkálás II. – A fa hajlítása. Kézirat, NymE Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 57–68. o.
- Kuzsella L., Szabó I. (2006) A fa tömörítésének hatása a mechanikai tulajdonságokra. In: Konferencia kiadvány, Bitay E. szerk. XI. Fial Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2006.03.24–25., 233–236. o.
- Kuzsella L. (2011a) Rostirányú tömörítés hatása a bükk faanyag szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira. Doktori értekezés, Miskolci Egyetem Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Miskolc, 151 o.
- Kuzsella L. (2011b) Rostirányú tömörítés hatása a bükk logaritmikus dekrementumára. In: konferencia kiadvány, XVI. Fial Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2011.03.24–25., 173–176. o.
- Kuzsella L., Bárczy P., Szabó I. (2011) Ősi anyag új feldolgozása, avagy tömörített fából energiatároló rugó. Bányászati és Kohászati Lapok, 144(2): 40–41.
- Pure Timber Llc. (2015) Steering Wheel <<http://www.puretimber.com/automotive/>> Megtekintve: 2015.06.12.
- Q-railing Europe Holding GmbH (2015) Bandywood korlát. <<https://www.q-railing.com/en-hu/content/service/assembly-maintenance>> Megtekintve: 2015.10.06.
- Sandgren Jakobsen H. (2015) Eri tatami szék <<http://www.scandinaviandesign.com/miniature/400/ERI.jpg>> Megtekintve: 2015.09.26.
- Segesdy F. (2003) Modern konyhabútor tervezése tömörített anyag felhasználásával. Diplomamunka, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 32–83. o.
- Sőregi R. (2007) Vitorláshajó kabinbelső kialakítása tömörített fa alkalmazásával. Diplomamunka, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 55 o.
- Sparke B. (1989) Fremgangsmåde til fremstilling af træ med blivende fleksibilitet, især til anvendelse som kantlister, møbeldele og lignende formål, hvor der stilles s tore krav til træets bøjelighed (Eljárás tartósan rugalmas faanyag előállítására részben élzáró anyagnak, bútoralkatrésznek és ahol igény van a fa hajlíthatóságára). Danmark Patentdirektoratet, 170364 sz. szabadalmi leírás, Dánia, 1–6. o.
- Szabó I. (2002) A fa hajlítása. In: Molnárné Posch P. szerk. Faipari kézikönyv II., Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, 60–61. o.
- Szabó I., Eckhardt L., Czél Gy. (2005) Energiatároló tömörített farugó. Magyar Szabadalmi Hivatal, 226783 sz. szabadalmi leírás, 2–5. o.
- Thomassen T., Ljorring J., Hansen O. (1990) Eljárás és berendezés fatömb összenyomására. Magyar Szabadalmi Hivatal, HUT63087A sz. szabadalmi közzétételi példány, 2–19. o.
- Volkmer T., A. Wagenführ, B. Buchelt (2001) Verfahren zur Herstellung von dauernd weichbiegsamen Holz sowie Einrichtung hierzu. Deutsches Patent- und Markenamt, 10141391 C1 sz. szabadalmi leírás, 1–4. o.

A lézer interferométer felhasználhatóságának vizsgálata 5 szabadságfokú CNC megmunkáló központ pontossági méréséhez

KOVÁCS Péter¹, MAGOSS Endre²

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faipari Gépészeti Intézet

Kivonat

A CNC megmunkáló központ pontossága a faipari üzemekben függ a gép és a munkadarab rezgéseitől, az alapanyag minőségétől és a gép elmozdulásának pontosságától. Három további tényező hatással van a CNC központ pozicionálására: a gépváz merevsége, a vezérlés és hajtáslánc pontossága. A cél az, hogy egy háromdimenziós hibatérkép készüljön, amelyben meghatározásra kerül a munkatérben a gép pontossága és a későbbiekben pedig, ezt kiegészítve egy rezgésszint-meghatározás a gép főbb megmunkálási pozícióiban.

A mérések egy Agilent lézer interferométer segítségével történtek egy 5D-s UniTeam Professional 30 CNC megmunkáló központon, ami a Nyugat-magyarországi Egyetem Faipari Gépészeti Intézetében található meg.

A mérésekkel meghatározásra került a ferde fogazású fogasléc-fogaskerék kapcsolat működési hézaga, amikor a gép az abszolút nullpont felé közeledik az X tengelyen. Ugyanez a viselkedés figyelhető meg az Y tengelyen a golyósorsó esetében. Megállapításra került, hogy a konzolon kifele haladva egyre nagyobb pontatlanságot kapunk. A pozicionálási mérések során az is kiderült, hogy a gép útmérő és vezérlő rendszere megfelelően működik

Kulcsszavak: megmunkálási pontosság, CNC, lézer interferométer

Usability examination of laser interferometer for precision measurement on a 5 degrees of freedom CNC machining center

Abstract

The machine and workpiece vibrations, the quality of raw material and the accuracy of machine movement all affect the accuracy of the CNC working centers in the wood industry. Three additional factors influence the precision of router positioning: the rigidity of the machine; the accuracy of the machine control and the accuracy of driveline. The goal is to define a 3-dimensional error map to determine the machine positioning accuracy in the working space, and, subsequently, to find the vibration levels and spectrums of the machine by measurements.

The measurements were performed by a 5D UniTeam Professional 30 CNC working center at the Institute of Woodworking Machinery, University of West Hungary. To determine the positioning accuracy, an Agilent Laser Interferometer was used.

It has been determined that the operational gap appears by the helical gear rack engagement when the machining unit approaches zero point on the X-axis. The same behavior was investigated on the Y-axis by the ball screw as well. It has been concluded that there is a correlation between the rigidity of machine and accuracy of the displacement. Greater inaccuracy has been observed – both in the X and Y directions – on the console when the machining unit is near the endpoint and the control and linear encoder are working well.

Keywords: accuracy of CNC router, laser interferometry

Bevezetés

A CNC megmunkáló központok esetében időszakosan célszerű ellenőrizni a pozicionálási pontosságot és a rezgésviszonyokat. Az ellenőrzés időpontját célszerű összekötni a gép karbantartási periódusával. Megmunkálási hiba esetén hibafeltáró méréseket kell végezni. Szisztematikus mérések segítségével a gépállapot e jellemzői regisztrálhatóak és a változások nyomon követhetővé válnak. A mérések a gépek állapotfelméréssel módosított tervszerű megelőző karbantartásának is részét képezhetik. Ehhez az állapotfelméréshez, illetve a pozicionálási jellemzők ismeretéhez nyújt megoldást a lézer interferométerrel történő géppontossági vizsgálat (Castro and Burdekin 2003).

Normál esetben a gépkezelő a számára legkényelmesebb pozícióba helyezi fel a gépasztalra a munkasztal méreténél kisebb munkadarabot (ez legtöbb esetben a hozzá legközelebb eső hely), ezáltal a CNC megmunkológép minden esetben ugyanabban a megmunkálási térben fog dolgozni. Ez azt eredményezi, hogy a gépelemek ugyanazon szegmensei fognak folyamatos igénybevételt szenvedni. Magas szériaszám esetében működési hézagok alakulnak ki az egyes gépelemekben, és ez pontatlanságokat fog eredményezni.

A pontosság és a reprodukálhatóság a legfontosabb faktor a gyártás szempontjából, mivel a munkadarab dimenzióinak egy szérián belül, a megfelelő minőség eléréséhez egy bizonyos tőrésen belül kell maradniuk.

A faipari kutatásokkal foglalkozó szakirodalomban még nem lelhető fel a CNC megmunkáló központok pontossági vizsgálata lézer interferométer alkalmazásával. A vizsgálatokkal fel kívánjuk tárni, hogy a lézer interferométer mennyire alkalmas a CNC megmunkológépek pontosságának meghatározására. Egy megmunkálási pontossági térképet kívánunk meghatározni, amely információval szolgál a gépkezelő számára a gép állapotáról és arról, hogy melyik megmunkálási térben kapja a legkisebb pontatlanságot a megmunkálás során. Ezen megállapítások fontos információkat jelentenek a gép állapota, a javítás szükségessége tekintetében. Javítás nélkül a folyamatos igénybevételeknek köszönhetően az adott gépelemek meghibásodnak, melynek következtében a gép leáll, kiesik a gyártásból vagy további gépelemek hibásodnak meg miatta.

A mérőrendszer bemutatása

A pontossági vizsgálatok távolságmérés segítségével történtek. A pontos távolságmérés az interferometria segítségével valósítható meg, lézer interferométer alkalmazásával. A pontossági vizsgálatához egy Agilent heterodyne, He-Ne interferométert alkalmaztunk. A He-Ne lézer a gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott folyamatos üzemi lézer. Az általa előállított fény hullámhossza 632,8 nm.

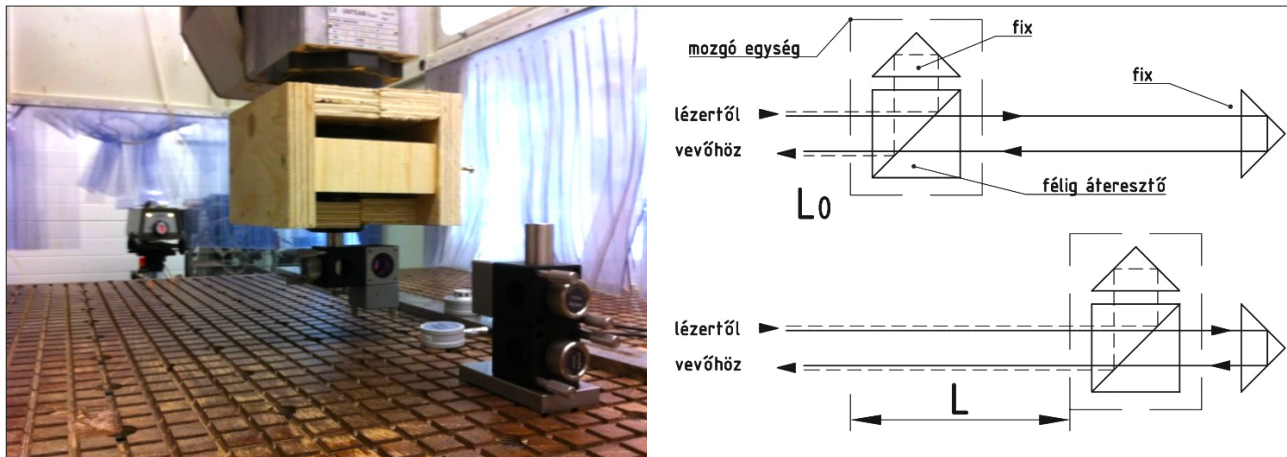
Az interferencia a hullámok találkozásánál fellépő jelenség. Ugyanazon monokromatikus fényforrás fényét osztjuk két részre, és különböző úton ugyanabba a pontba juttatjuk. Ha két fényhullám találkozásánál interferencia lép fel, akkor azt mondjuk, hogy a két hullám koherens. Ezen a módon mind az időbeli, mind a térbeli koherencia vizsgálható. A lézer interferometria alkalmazása esetünkben csupán az időbeni koherenciát követeli meg.

A tökéletes időbeli koherencia követelménye annyit jelent, hogy a kimeneteknek monokromatikusnak kell lennie. Minthogy a gyakorlatban ezt soha nem lehet tökéletesen megvalósítani, ezért az időbeli koherencia mértéke korlátozott. Az időbeni koherencia mértékét gyakran a koherenciahosszal jelölik. Ez az a távolság, amelyen belül a kimeneti intenzitásban mérhető fáziskapcsolat áll fenn. Minthogy, minden lézernek viszonylag keskeny a sávzélessége (eltérően a legtöbb egyéb fényforrástól), ezért néhány mm-től több méterig terjedő távolságra rendszerint fennáll egy bizonyos korlátozott mértékű időbeli koherencia, míg a közönséges termikus fényforrások koherenciahossza rendszerint túl kicsi ahhoz, hogy mérhető legyen (Harry 1979). Az interferenciához szükséges, hogy az útkülönbség a koherencia hosszánál kisebb legyen (Harry 1979, Giber 1999, Berta 2006).

A gyakorlatban az interferometriás mérés elve a következő: az interferométer a megmunkáló fej helyére van befogva (1. ábra). A lézerfény először egy félig áteresztő lemezen halad át. Ez a lemez részben továbbítja a fényt az asztal végén található retroreflektornak, részben pedig 90 fokban irányítja egy referencia, teljesen visszaverő prizma. (Ez a reflektáló prizma közvetlenül a félig áteresztő lemezre van rögzítve). A tükröző prizma a lézerfényt visszairányítja a lézer interferométerbe. A két különböző úton beérkező lézerfény interferenciájából kapjuk meg az elmozdulás mértékét. Mindezt az 1. ábrán látható rajz szemlélteti.

A méréseket kétféleképp lehet elvégezni. Az első esetben a félig áteresztő lemez marad egy helyben, a retroreflektor pedig mozog. A második esetben – amelyet a mérések során alkalmaztunk – a félig áteresztő lemez van mozgásban, a retroreflektor pedig egy fix ponton helyezkedik el.

A lineáris pontosság méréséhez figyelembe vett szabvány az ANSI/ASME B5.54, amely állványos fúró-maróműhöz, karusszal esztergához és megmunkáló központokhoz ad útmutatást.



1. ábra A mérés elrendezése

Figure 1 Arrangement of the measurement

Az ISO-230-2 nemzetközi szabványt is figyelembe vettük a mérések kivitelezése során. A szabvány a következő fő pontokat követeli meg:

- az összes (nem mozgó) szerszám tengelypozícióinak a helyzetét
- a lézerhez tartozó „alapanyag” hőmérsékletét mérő szenzornak a helyzetét
- az ún. Air szenzornak a helyzetét
- a mérés során használt effektív tágulási együtthatónak az értékét
- a környezet és a gép kezdeti és véghőmérsékletét
- annak az útvonalnak az elhelyezkedését, amely mentén a mérés történik
 - » távolság a főorsó felületétől
 - » távolság a főorsó középvonalától
 - » távolság a munkadarab rögzítésére szolgáló felülettől.

A szabvány az átlóban történő mérésekre ad még határértékeket, de az alkalmazott lézer interferométer és kiegészítő berendezései az átlóban való mérésre nem alkalmasak.

A vizsgált UniTeam Professional 30 típusú CNC megmunkáló központoknál az útmérés az ún. közvetett útmérés elvén működik. (A közvetlen útmérésnél a megtett útnak megfelelően létrehozott forgómozgást méri a berendezés.) Növekményes és abszolút rendszerek különíthetők el a közvetett mérésen belül; a vizsgált CNC gépen az előbbi került alkalmazásra (Mátyási és Sági 2009, Boza és Pintér 2011).

A vizsgált CNC megmunkáló központoknál a gépvázhoz vannak csatlakoztatva az X tengely vezetékai, a fogasléc és a munkasík vezetéke, amely a konzol megtartására szolgál. Az X tengely szánjának mozgását egy ferdefogazású fogaskerékkel ellátott speciálisan elhelyezett szervomotor és egy holtjáték kiegyenlítő berendezéssel ellátott lassító áttétel végzi, ami egy ferdefogazású fogaslécen fut. Az Y tengely szánja a konzolra van szerelve, amelynek a mozgását egy golyósorsó és egy szervomotor biztosítja. A Z tengely az Y tengely mozgatott szánjára van rögzítve, amelyen a megmunkáló aggregát és az elszívás helyezkedik el. A Z irányba a mozgatást egy szervomotor, egy golyós orsó és egy holtjáték nélküli csiga végzi el. A gépvázra nagy szilárdságú rétegelt lemez raszter asztal van felhelyezve, amely a munkadarab megfogását vákuum segítségével biztosítja.

A számítógép a megmunkáló szerszámot a meghatározott pozícióba mozgatja, miután a gépkezelő beállítja az útvonalat és a megmunkálási paramétereket (szerszám fordulatszám, előtolási sebesség). A vizsgálatok során meghatároztuk, hogy hogyan képes befolyásolni a gép szerkezete, a mozgó egységek, az útmérő egységek és a megmunkáló fej mozgása az előre meghatározott pozíció pontos elérését. Megállapítottuk, hogy milyen mértékben térnek el az előre meghatározott paraméterektől, azaz a ténylegestől a mért értékek.

Mérési eredmények és értékelésük

Először az X tengely mentén történt mérés. A relatív nulla pont koordinátája az abszolút koordináta rendszerben ($x=450$; $y=-1523$; $z=-402$). Ettől a ponttól a raszter asztal hosszában 50 mm-es lépésekkel kerültek

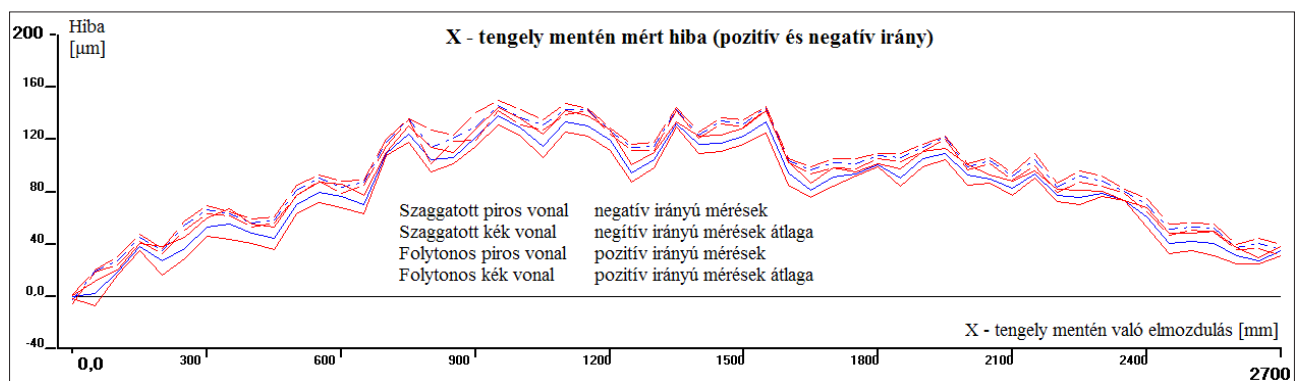
meghatározása a mérési pontok, egészen 2700 mm-ig. Mind a relatív null ponttól távolodva (pozitív irány), mind pedig a null ponthoz közeledve (negatív irány) pontonként 3-3 mérést végeztünk. Ezen mérések adatai és átlaguk látható a 2. ábrán.

Az első mérésnél megfigyelhető a pozitív és negatív irány közt egy hiszterézis, amely ebben az esetben azt jelenti, hogy a kiindulási pontokban a hibaértékek megegyeznek és alacsonyok, viszont a pozitív irányban mért hibák a negatív irányban mért hibák alatt vannak. Ez mutatja, hogy a fogaskerék-fogasléc kapcsolat működési hézaga melyik irányban jelenik meg. Továbbá az látható, hogy a relatív koordináta rendszerben 700 és 2100 mm között a hibaértékek kimagaslóak az előtte és utána mért hibaértékekhez képest. A maximális hiba értéke 147 μm .

A méréseket az Y tengely mentén is elvégeztük. Az Y tengelyen a relatív nullpont a ($x = 718$; $y = -1525$; $z = -402$) volt. A raszter asztalon kereszt irányban 1100 mm hosszan, 3-3 mérés történt 50 mm-es léptékkel. A 3. ábrán a pozitív és negatív irányú méréseket és az átlagokat szemléltetjük.

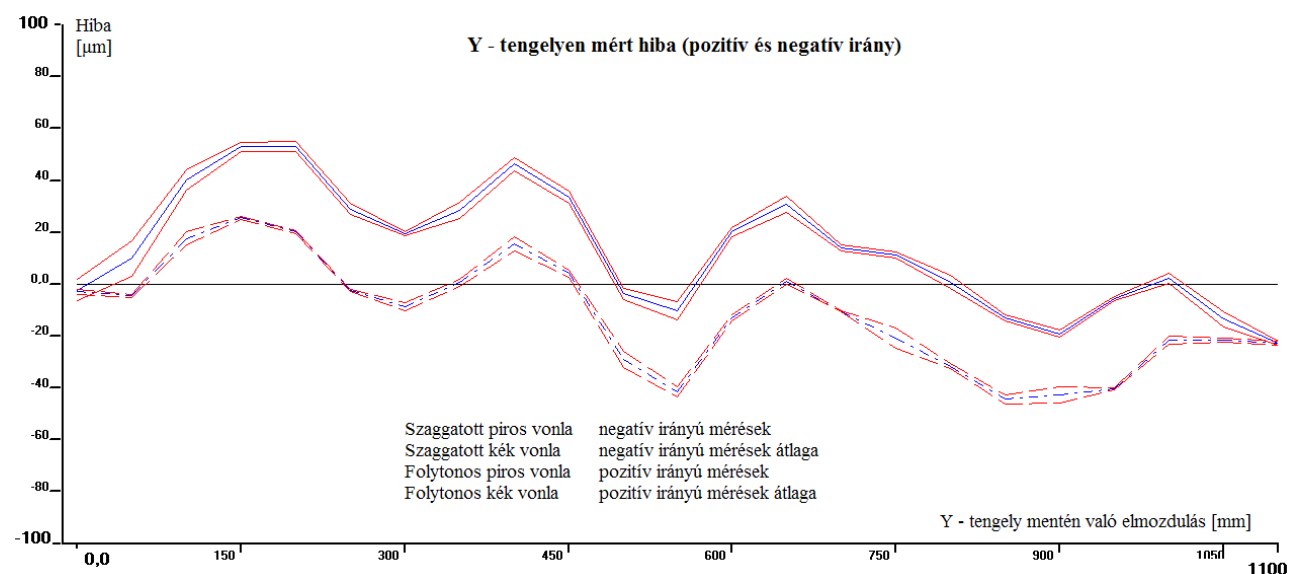
A Y tengely mentén történő mérésnél is látható a hiszterézis, amely a golyós orsó előfeszítését mutatja. A hibaértékek mind pozitív mind negatív irányban jelentkeztek. Ez azt jelenti, hogy egy elmozdulás vagy rövidebb volt vagy hosszabb, mint a beprogramozott 50 mm. A pozitív irányú maximális hiba 56 μm , a negatív irányú maximális hiba 42 μm . A nagyobb hibák akkor láthatóak, amikor a megmunkáló fej a konzolon kifele halad. Ez a konzol lehajlásából, lengéséből adódhat.

A harmadik ún. pozícióra állási mérés szintén az Y tengely mentén folyt. A vizsgálat nullpontja és végpontja megegyeztetett az előzőével, viszont csak egy köztes pont volt és 5-5 ismétlés lett végrehajtva irányonként. A mérések eredménye látható a 4. ábrán.



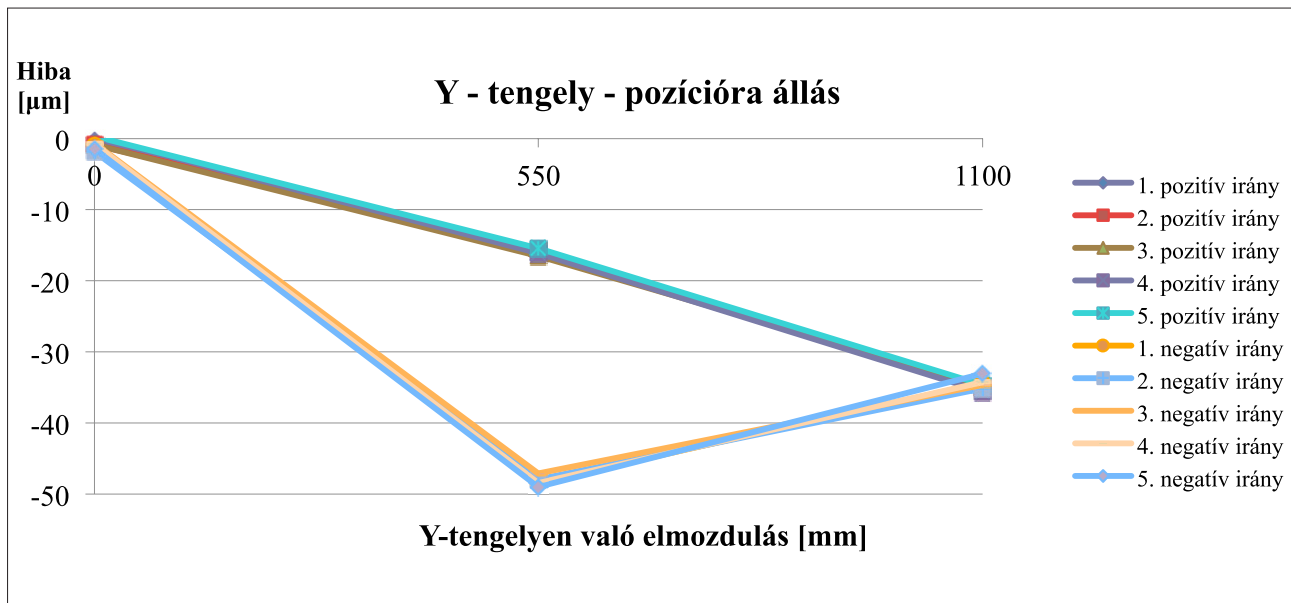
2. ábra Az X tengelyen mért pozitív és negatív irányú elmozdulások hibái

Figure 2 The measured errors on X-axis (positive and negative directions displacements)



3. ábra Az Y tengelyen mért pozitív és negatív irányú elmozdulások hibái

Figure 3 The measured errors on Y-axis (positive and negative directions displacements)



4. ábra Y tengelyen a pozíciótartás mérése

Figure 4 Position measurement on Y axis

A pozícióra állás mérésénél is megjelenik a hiszterézis, tehát a golyós orsó előfeszítése itt is megfigyelhető. Az irányonkénti 5 mérésnél a szórás 550 mm pozitív irányú elmozdulásnál $1,15 \mu\text{m}$, negatív irányba való elmozduláskor $1,89 \mu\text{m}$. A maximális hiba pozitív irányú elmozduláskor $16 \mu\text{m}$, negatív irányú elmozduláskor pedig $49 \mu\text{m}$.

Következtetések

Megállapításra került, hogy a lézer interferometriás mérés alkalmas a faipari CNC megmunkáló központok állapotának felmérésére, viszonylag gyors és egyszerű módon.

A tengelyenkénti – közel a teljes megmunkálási területet magába foglaló – méréseknél elmondható, hogy a fogaskerék-fogasléc kapcsolat a szerkezet abszolút koordináta rendszere szerint $x=1150 - x=2550$ mm-es részén kopott. Közel van ahhoz, hogy a megmunkálási pontosságot már befolyásolja, a kapcsolat karbantartása szükséges.

A golyós orsóval szerelt Y tengelyen a két mérési pont közt mért legnagyobb hiba $38 \mu\text{m}$, amely $y=-1075 \text{ mm}$ és $y=-1025 \text{ mm}$ (relatív koordináta) között volt, feltehetően a golyós orsó ezen a részen van a legtöbbet igénybe véve, itt alakult ki a legnagyobb kopás. A hiba mértéke a megmunkálást csak kis mértékben befolyásolja. Továbbá elmondható, hogy a konzolon kifelé haladva a hibaértékek növekednek, melyet mindenképpen figyelembe kell venni a megmunkálás során.

A golyós orsón mért pozícióra állások azt mutatják, hogy az útmérő rendszer hibája és a tengelyen az adott pontban való kopás alacsony.

A mérési eredmények rávilágítanak arra, hogy fontos figyelni a gép mozgatószerkezeteinek egyenletes igénybevételére, a pozicionálási hibák minimalizálása mellett. A gépkezelő tudatában lesz az egyes vezetékek hibáinak, azaz a munkadarab gépasztalra való felhelyezésekor figyelembe veheti a mért adatokat (természetesen nem a teljes munkatérben való megmunkáláskor).

Az elvégzett és bemutatott mérések a laptermékes megmunkáláshoz adnak kézzel fogható eredményeket. A továbbiakban a Z tengely vizsgálatának elvégzése és bemutatása szükséges a háromdimenziós testek megmunkálási pontosságának feltérképezéséhez. A CNC gépek megmunkálási pontosságának megállapítása érdekében a pozicionálási vizsgálatokat célszerű kiegészíteni dinamikus, ún. túllendülési és rezgésvizsgálatokkal. Az így kapott komplex mérési eredmények nagy segítséget nyújtanak a gép működtetésére, karbantartására és élettartamára nézve.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Talentum Műhely – a tudományért és tehetségekért a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-15/1/KONV-2015-0005 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

H. F. F. Castro, M. Burdekin (2003) Dynamic calibration of the positioning accuracy of machine tools and coordinate measuring machines using a laser interferometer - International Journal of Machine Tools & Manufacture 43; pp. 947–954.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550300083X>

Mátyási Gy., Sági Gy. (2009) Számítógéppel támogatott technológiák (CNC, CAD/CAM). Műszaki Kiadó, Budapest, pp. 26.

Boza P., Pintér J. (2011) Gyártásautomatizálás – Széchenyi István Egyetem, Győr

Berta M. (2006) Mézerek és lézerek – Széchenyi István Egyetem, Győr

Giber J., Sólyom A., Kocsányi L. (1999) Fizika mérnököknek I–II. Egyetemi tankönyv, Műegyetemi Kiadó, Budapest

J. E. Harry (1979) Ipari lézerek és alkalmazásuk. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. pp. 31.

ASME B5.54. (1992) Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers

ISO-230-2:2014(E). Test code for machine tools – Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes. Fourth edition: 2014.05.01.