

Doktori (PhD) értekezés

Soproni Egyetem

Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Németh Róbert egyetemi tanár

Doktori program: Faanyagtudomány

Programvezető: Prof. Dr. Németh Róbert

Tudományág: Anyagtudomány és technológiák

**A természetes faanyag tulajdonságainak módosítása termo-hidromechanikus és vegyi eljárásokkal**

Készítette: Báder Mátyás

Témavezető: Prof. Dr. Németh Róbert

Sopron

2021

**A természetes faanyag tulajdonságainak módosítása termo-hidromechanikus és vegyi eljárásokkal**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében  
a Soproni Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák  
Doktori Iskolája

Faanyagtudomány programja

Írta:  
Báder Mátyás

Készült a Soproni Egyetem Cziráki József Doktori Iskola

Faanyagtudomány programja keretében

Témavezető: Prof. Dr. Németh Róbert  
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton 97,9%-ot ért el,

Sopron, 2019. január 22.

.....  
Prof. Dr. Tolvaj László  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr. Andor Krisztián) igen / nem

.....  
(aláírás)

Második bíráló (Dr. Németh László) igen / nem

.....  
(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr. ....)) igen / nem

.....  
(aláírás))

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Sopron, 2021.

.....  
Prof. Dr. Takáts Péter  
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....  
Az EDHT elnöke

## Nyilatkozat

Alulírott Báder Máttyás jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy az *A természetes faanyag tulajdonságainak módosítása termo-hidromechanikus és vegyi eljárásokkal* című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.<sup>1</sup>

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezető(i)met, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 2021.04.20.

.....

doktorjelölt

---

<sup>1</sup> **1999. évi LXXVI. tv. 34. § (1)** A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.

36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

# Tartalomjegyzék

<b>1.</b>	<b>BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....</b>	<b>3</b>
2.1.	A TÖMÖRFA HAJLÍTÁSA .....	3
2.2.	A ROSTIRÁNYÚ TÖMÖRÍTÉS TÖRTÉNETE.....	6
2.3.	ALAPANYAGOK .....	13
2.3.1.	<i>Fafaj</i> .....	13
2.3.2.	<i>Minőség és méret</i> .....	13
2.3.3.	<i>Nedvességtartalom</i> .....	14
2.4.	MÓDSZEREK .....	15
2.4.1.	<i>Rostlágnyítás</i> .....	15
2.4.2.	<i>Rostirányú tömörítés</i> .....	16
2.4.3.	<i>Utókezelés, szárítás, megmunkálás</i> .....	16
2.5.	MECHANIKAI, EGYÉB FIZIKAI ÉS MORFOLÓGIAI TULAJDONSÁGOK .....	20
2.5.1.	<i>Mechanikai tulajdonságok szárított állapotban (rugalmassági modulus, hajlítószilárdság, húzószilárdság, nyomószilárdság, ütő-hajlító szilárdság)</i> .....	20
2.5.2.	<i>Fizikai tulajdonságok szárított állapotban (hajlítási viszonyszám, sűrűség)</i> .....	23
2.5.3.	<i>Sejtszintű változások: redőződés és hajlítási nyúlás kapcsolata</i> .....	24
<b>3.</b>	<b>ALAPANYAGOK, ELJÁRÁSOK, EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS .....</b>	<b>27</b>
3.1.	MINTATESTEK .....	27
3.2.	GŐZÖLÉS .....	29
3.3.	LABORATÓRIUMI TÖMÖRÍTŐ ESZKÖZ BEMUTATÁSA .....	30
3.4.	TÖMÖRÍTÉS SEBESSÉGE, EGYENLETESSÉGE ÉS AZ ÁLGESZTESSÉG HATÁSA .....	32
3.4.1.	<i>Tömörítési sebesség mértékegysége</i> .....	32
3.4.2.	<i>Tömörítés sebessége</i> .....	32
3.4.3.	<i>Egyenletes tömörödés igazolása</i> .....	37
3.4.4.	<i>Álgesztesség hatása a tömöríthetőségre</i> .....	39
3.5.	A ROSTIRÁNYÚ TÖMÖRÍTÉS ÉS A FIXÁLÁS HATÁSAI A MECHANIKAI TULAJDONSÁGOKRA .....	41
3.5.1.	<i>Rostirányban tömörített faanyagok viselkedése a hajlítóvizsgálat során</i> .....	46
3.5.2.	<i>Fizikai-mechanikai tulajdonságok egymással való kapcsolata</i> .....	47
3.5.3.	<i>Optimális fixálási időtartam</i> .....	49
3.5.4.	<i>Rostirányban tömörített minták hosszú időtartamú fixálása</i> .....	50
3.5.5.	<i>Nyomószilárdság változása a tömörítés következtében</i> .....	54
3.6.	FRISSEN TÖMÖRÍTETT MINTÁK PIHENTETÉSE TOVÁBBI MUNKAFOLYAMATOK ELŐTT .....	56
3.7.	SEJTSZINTŰ ÉS SEJTEN BELÜLI (MIKROSKOPIKUS ÉS SZUBMIKROSKOPIKUS) SZÖVETI TULAJDONSÁGOK.....	57
3.7.1.	<i>Nanotom</i> .....	58
3.7.2.	<i>Atomerő mikroszkóp</i> .....	68
3.8.	SEJTEN BELÜLI MIKROMECHANIKAI VÁLTOZÁSOK .....	70
3.9.	A ROSTIRÁNYÚ TÖMÖRÍTÉS HATÁSA A FA-VÍZ KAPCSOLATOKRA .....	77
3.9.1.	<i>Szorpciós tulajdonságok</i> .....	78
3.9.2.	<i>Visszarugózás, memória-hatás, zsugorodás-dagadás</i> .....	81
3.9.3.	<i>Nedvességtartalom hatása a mechanikai tulajdonságokra</i> .....	91
3.10.	A FAANYAG FUNKCIÓS (KÉMIAI) CSOPORTJAINAK ÁTRENDEZŐDÉSE A TÖMÖRÍTÉS HATÁSÁRA .....	98
3.11.	TÖMÖRÍTETT FAANYAG TOVÁBBI KEZELÉSI LEHETŐSÉGEI .....	112
<b>4.</b>	<b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>117</b>
<b>5.</b>	<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....</b>	<b>121</b>
<b>6.</b>	<b>TÉZISEK.....</b>	<b>122</b>
<b>7.</b>	<b>SZABVÁNYJEGYZÉK.....</b>	<b>124</b>
<b>8.</b>	<b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>	<b>125</b>



## Kivonat

### **A természetes faanyag tulajdonságainak módosítása termo-hidromechanikus és vegyi eljárásokkal**

A természetes faanyagok számos kedvező tulajdonsággal rendelkeznek, melyek történelmi idők óta alkalmassá teszik arra, hogy használati tárgyaink, bútoraink, épületeink, stb. anyagául szolgáljanak. A módosítási eljárások széles skáláján a rostirányú tömörítés egy viszonylag új eljárás, melynek ipari fejlesztése ma is zajlik. Az előállítható (zömében hajlított) termékek körének szélesítése, ill. azok tulajdonságainak javítása anyagtudományi alapokon nyugvó kutatásokat igényel, melyek hiánypótlóak. Kutatásom célkitűzése e hajlítható modifikált faanyagban végbemenő változások molekuláris, szubmikroszkópos szintről induló minél jobb megismerése, a módosítás lehetőségeinek és határainak feltárása, valamint az ipar számára is hasznos technológiai paraméterek meghatározása.

A laboratóriumi célokra fejlesztett berendezés segítségével gőzölés után tömörítettük a bükk és tölgy fafajú mintákat. Rosttelítettség feletti nedvességtartalommal rendelkező, göcsöktől és egyéb hibáktól mentes, egyenes rostlefutású faanyagot használtunk. A tömörítés relatív sebessége 20-25%/min volt, a tömörítési arány 20% a kiindulási mérethez viszonyítva (20×20×200 vagy 20×30×200 mm). Két fő eljárással dolgoztunk: egyiknél az összenyomás befejeztével a modifikáció véget ért, a minták készen álltak a további felhasználásra. A másik módszernél a faanyagot tömörítés után bizonyos ideig összenyomott állapotban tartva fixált minták keletkeztek. A kész mintatesteken a vizsgálatokat lehetőleg a vonatkozó szabványok szerint hajtottuk végre.

A fixálás felerősíti a rostirányú tömörítés által indukált változásokat, jó példa erre a rugalmassági modulus, amely a tömörítés hatására 40%-ra csökken. Legalább 3 óra hosszan tartó fixálással ez az érték a kiindulási érték 25%-a lesz, és a faanyag alakíthatósága további jelentős javulást mutat. A sejtszerkezetben torzulások jelentkeznek, az edények- és rostok sejtfalai főként a gyengén megtámasztott szakaszaikon hullámosodnak. Szubmikroszkopikus szinten vizsgálva az S2 sejtfalréteg benyomódási modulusa és keménysége csökken, továbbá a dimenzió-stabilitás rostirányban jelentősen romlik. Ezt az atomerő-mikroszkópos felvételek magyarázzák, ahol kirajzolódik, hogy a mikrofibrillák elhajolnak és a nedvességváltozás hatására bekövetkező jelentős mértékű keresztirányú méretváltoztatásuk részben a sejt hossz tengelyével párhuzamosan hat. Infravörös spektroszkópiás vizsgálatok bizonyították, hogy a gőzölés, a tömörítés és a fixálás mindegyike változásokat okoz a hidroxil-csoportokban, valamint további C-O és C-H funkciós csoportokban. Ez megmutatkozik a tömörített faanyag szorpciós viselkedésén, mely lassabban reagál a megváltozott klímakörülményekre. A rosttelítettségi nedvességtartalma csökken. A rostirányú tömörítés hatására 1% nedvességtartalom-változás a rugalmassági modulusot 5,0%-kal, a hajlítószilárdságot 4,2%-kal, míg az elérhető legnagyobb alakváltozást 7,6%-kal változtatja meg. A kezeletlen faanyaghoz képest akár tízszeres rostirányú zsugorodás-dagadás azonban főként a sejtszerkezeti változásoknak tudható be. A dimenzió-stabilitási gondok nagymértékben javíthatónak bizonyultak tejsavas impregnálással, megőrizve a rostirányban tömörített faanyagok környezetbarát mivoltát.

## Abstract

### **Modification of the properties of natural wood by thermo-hydro-mechanical and chemical processes**

Natural wood has several beneficial properties that have made it suitable since the historical times to serve as raw material of our objects, furniture, buildings, etc. In the wide range of wood modification processes, compression in the fiber direction (a.k.a. pleating) is a relatively new process that is still undergoing industrial development. Expanding the range of (mostly bent) products that can be produced and improving their properties requires research based on materials science, which has to fill the gap in the present knowledge. The aim of my research is to better understand the changes in this bendable modified wood from the molecular and submicroscopic level, to explore the possibilities and limits of modification, and to determine technological parameters that are also useful for industry.

Beech and oak wood samples were compressed after steaming using a unique equipment developed for laboratory purposes. We used samples with moisture content above their fiber saturation point, with minimal grain slope, free of knots and other defects. The relative rate of compression was 20-25%/min and the compression ratio was 20% compared to the original length of the samples ( $20 \times 20 \times 200$  or  $20 \times 30 \times 200$  mm). We used two main procedures: either, when the compression finished, the modification completed and the samples were ready for further use. In the other method, fixated samples were formed by held the sample for a predetermined time constantly at the applied compression level. The tests on the finished samples were preferably performed according to the relevant standards.

Fixation strengthens the changes induced by pleating, a good example is the modulus of elasticity, which decreases to 40% as a result of compression. Fixation for at least 3 hours after compression results in a decrease of modulus of elasticity to 25% of the initial value, and the pliability of the wood will show a further significant improvement. Distortions occur in the cellular structure, the cell walls of vessels and fibers buckling mainly on their weakly supported sections. Examining pleated wood at the submicroscopic level, the indentation modulus and hardness of the S2 cell wall layer decrease, moreover, the dimensional stability in the direction parallel to the grain deteriorates significantly. This is explained by the atomic force microscopy images, where it is seen that the microfibrils are crinkled with a wavelike shape. Thus, their significant transverse dimensional change due to moisture change acts partly parallel to the longitudinal axis of the cell. Infrared spectroscopic studies have shown that steaming, compression and fixation all cause changes in hydroxyl groups as well as in additional C-O and C-H functional groups. This affects the sorption behavior of pleated wood, which responds more slowly to changed climatic conditions. The fiber saturation point decreases. As a result of pleating, a 1% change in moisture content changes the modulus of elasticity by 5.0%, the modulus of rupture by 4.2%, and the highest available deformation by 7.6%. The shrinkage and swelling in the direction parallel to the grain is up to ten times compared to untreated wood, which is mainly due to changes in cell structure. Dimensional stability problems have been greatly improved by lactic acid impregnation while preserving the environmental friendliness of pleated wood.

## Abstrakt

### **Modifikation der Eigenschaften der natürlichen Holzstoff durch thermo-hydromechanischen- und chemischen Verfahren**

Die natürliche Holzstoffe besitzen zahlreiche vorteilhafte Eigenschaften, dadurch seit langem geeignet sind, als Grundstoff der Gebrauchsgegenstände, Möbel, Gebäude usw. verwendet zu werden. Unter der verschiedensten Modifizierungsverfahren gilt die longitudinale Verdichtung für eine relativ neue Methode, deren industrielle Entwicklung immer noch dauert. Die Erweiterung der Palette der herstellbaren (in meinem gebogenen) Produkten, bzw. die Verbesserung deren Eigenschaften brauchen materialwissenschaftliche Forschungen, die einem Mangel abhelfend sind. Die Zielsetzung meiner Untersuchung ist, diese, in dem biegbaren, modifizierten Holzstoff entstehende Wandlungen von der molekularen, submikroskopischen Stufe ausgehend zu erkennen, die Möglichkeiten und Grenzen der Modifizierung aufzudecken, beziehungsweise für die Industrie nutzbare technologische Parameter zu bestimmen.

Mit Hilfe einer für laboratorische Ziele entwickelten Anlage wurden die aus Eiche und Buche hergestellte Probestücke nach einer Dämpfung verdichtet. Geraden Faserlauf habende, fehlerlose Holzstoff mit einem Feuchtegehalt über Fasersättigungspunkt wurde verwendet. Die relative Geschwindigkeit der Verdichtung betrug 20-25%/min, das Verhältnis von Anfangs- und Endlänge besaßen 20% (20×20×200 oder 20×30×200 mm). Zwei Hauptverfahren wurden angewandt: bei dem Ersten beendete die Modifikation nach dem Zusammendruck, danach bereitstanden die Probekörper für weitere Verwendungen. Bei der anderen Methode wurde der Holzstoff nach der Verdichtung bestimmten Zeit lang zusammengedrückt, infolgedessen entstanden die fixierte Muster. Die Untersuchungen auf den so behandelten Probestücken wurden möglichst nach den bezüglichen Normen durchgeführt.

Die Fixierung verstärkt die durch die longitudinale Verdichtung induzierte Veränderungen, als bildhaftes Beispiel gilt darauf der Elastizitätsmodul, der Nachfolge der Verdichtung sank auf 40%. Durch mindestens 3 Stunden lang dauernden Fixierung wird dieses Wert 25% der Anfangswert und die Formbarkeit des Holzstoffes zeigt weitere bedeutende Verbesserung. In dem Zellensystem treten Deformationen auf, die Zellwänden der Tracheen und Fasern werden hauptsächlich in ihren schwach gestützten Strecken wellenförmig. Submikroskopisch geprüft nimmt der Eindrückenmodulus-, und Härte der Sekundärwand S2 ab, bzw. die Dimensionsstabilität in longitudinaler Richtung verschlechtert sich bedeutend. Das Phänomen wird durch Atomkraft-mikroskopische Aufnahmen erklärt. Die Mikrofibrillen verbiegen sich und infolge ihrer Feuchtegehaltsveränderung entstehende große Dimensionsveränderungen in Querrichtung wirken teilweise parallel mit der Längsachse der Zellen. Infrarotspektroskopie Untersuchungen bewiesen, dass alle der Dämpfung, Verdichtung und Fixierung verursachen Änderungen in den Hydroxylgruppen, und in den C-O und C-H Gruppen. Das zeigt sich auf dem Sorptionsverhalten des verdichteten Holzes, was langsamer auf die veränderten Klimaumstände reagiert. Der Wert der Fasersättigungspunkt versinkt. Nachfolge der longitudinalen Verdichtung ändert 1% der Feuchtegehaltsveränderung den Elastizitätsmodul um 5%, die Biegefestigkeit um 4,2% und die erreichbar größte Formveränderung um 7,6%. Mikroskopische Veränderungen verursachen hauptsächlich, dass im Vergleich mit dem unbehandelten Holzstoff die Schwinden- und Quellenwerten des verdichteten Holzes sogar 10-mal so groß werden können. Bewahrend ihrer umweltfreundlichen Eigenschaften, die Probleme mit der Dimensionsstabilität des longitudinal verdichteten Holzes erwiesen sich als verbesserungsfähig durch Imprägnation mit Milchsäure.

## Аннотация

### Модификация свойств натуральной древесины с помощью термо-гидро-механических и химических процессов

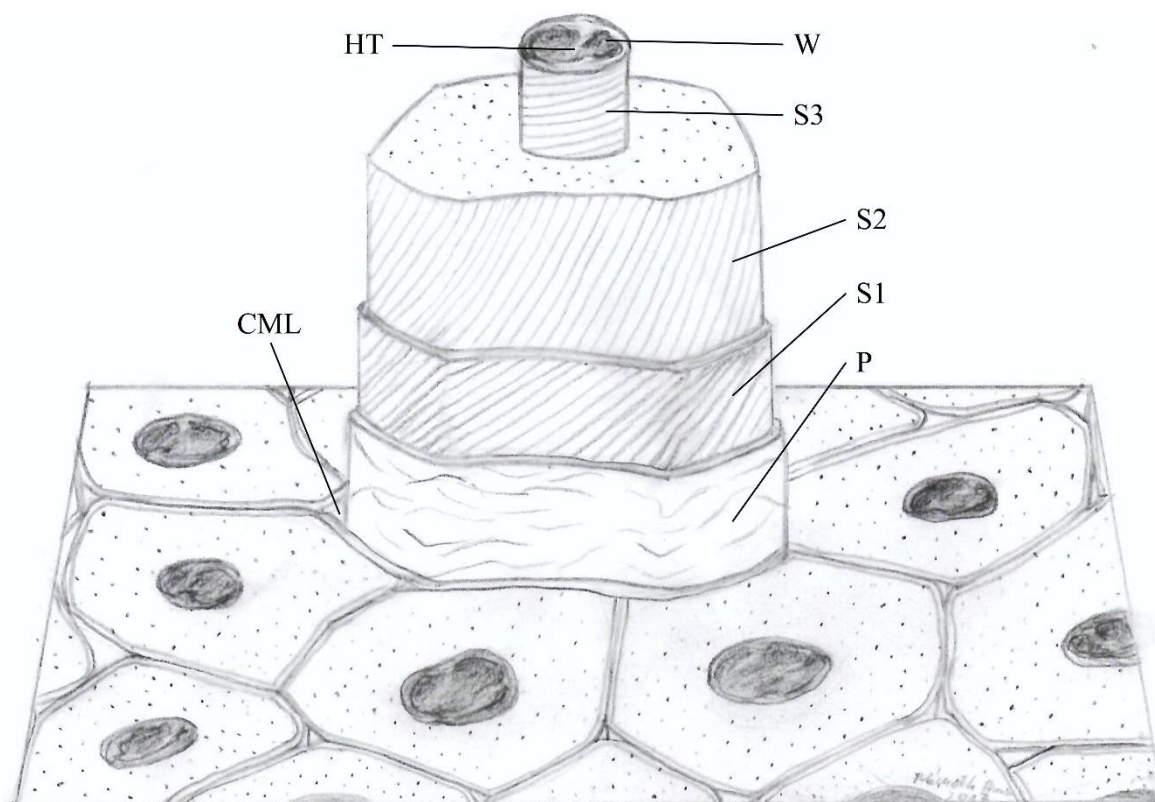
Натуральная древесина обладает рядом полезных свойств, которые с давних времен сделали ее пригодной для использования в качестве сырья для изготовления различных предметов, мебели, зданий и т.д. В широком спектре процессов модификации древесины сжатие в направлении вдоль волокон (также известное как плиссирование) является относительно новым процессом, который все еще находится в стадии промышленного развития. Расширение ассортимента (в основном, гнутых) изделий, которые могут быть изготовлены, и улучшение их свойств требуют исследований, основанных на материаловедении, которые должны заполнить пробелы в современных знаниях. Цель моих исследований – лучше понять изменения в этойгнутой модифицированной древесине на уровнях строения от молекулярного и субмикроскопического, изучить возможности и пределы модификации, определить технологические параметры, которые также полезны для промышленности.

Образцы из древесины бука и дуба были спрессованы после пропаривания с использованием уникального оборудования, разработанного для лабораторных целей. Мы использовали образцы с влажностью выше предела насыщения клеточных стенок, с минимальным углом наклона волокон, без сучков и других пороков. Относительная скорость сжатия составляла 20-25%/мин, степень сжатия – 20% по сравнению с исходной длиной образцов (20 × 20 × 200 или 20 × 30 × 200 мм). Мы использовали две основные процедуры модификации. Одна из процедур предусматривала завершение модификации после окончания сжатия, в этом случае образцы были готовы к дальнейшему использованию. По другой процедуре фиксированные образцы формировались путем поддержания в образце постоянной степени сжатия в течение заданного времени. Испытания готовых образцов проводились согласно действующим стандартам.

Фиксация усиливает изменения, вызванные плиссировкой, хорошим примером является модуль упругости, величина которого снижается до 40% в результате сжатия. Фиксация в течение как минимум 3 часов после сжатия приводит к снижению модуля упругости до 25% от первоначального значения, податливость древесины при этом значительно улучшается. Возникают повреждения на уровне клеточной структуры, клеточные стенки сосудов и волокон изгибаются, в основном, на участках, со слабой механической прочностью и жесткостью. При исследовании плиссированной древесины на субмикроскопическом уровне модуль вдавливания и твердость слоя клеточной стенки S2 уменьшаются, кроме того, значительно ухудшается стабильность размеров в направлении вдоль волокон. Это объясняется изображениями, полученными с помощью атомно-силовой микроскопии, на которых видно, что микрофибриллы волнообразно сморщены. Таким образом, значительное изменение их поперечных размеров из-за изменения влажности действует частично параллельно продольной оси клетки. Исследования методом инфракрасной спектроскопии показали, что пропаривание, сжатие и фиксация вызывают изменения в гидроксильных группах, а также в дополнительных функциональных группах С-О и С-Н. Это влияет на сорбционное поведение плиссированной древесины, которая медленнее реагирует на изменение климатических условий. Предел насыщения клеточных стенок уменьшается. В результате плиссирования изменение влажности на 1% приводит к изменению модуля упругости на 5,0 %, предела прочности на статический изгиб на 4,2 % и максимальной деформации на 7,6 %. Усушка и разбухание в направлении вдоль волокон увеличиваются примерно в десять раз по сравнению с необработанной древесиной, что, в основном, связано с изменением клеточной структуры. Стабильность размеров была значительно улучшена путем пропитки молочной кислотой при сохранении экологичности плиссированной древесины.

## 1. Bevezetés és célkitűzés

A fa egy olyan élőlény, mely hosszú élettartamával jellemzően könnyedén túlél egy emberöltőnyi időszakot, amennyiben a körülmények megfelelőek. Természetesen minden élőlénynek szüksége van az életben maradáshoz egyes alapvető feltételekre, valamint a jó minőségű fejlődéshez és élethez további követelmények teljesülésére. A fák szempontjából a napjainkban leggyakrabban előtérbe kerülő ilyen feltétel a szén-dioxid megléte a levegőben, amit felhasználva építik a fák testüket, válva ezzel az óceánok mellett a levegő egyik fontos tisztítójává és a klímaváltozás sebességének csökkentő tényezőjévé. A fatestből kinyert faanyag egy természetes kompozit anyag, mely főként cellulózból, hemicellulózokból és ligninből épül fel. Ez a három összetevő alkotja a sejtek mikroszerkezetét (Da Silva és Kyriakides 2007). A cellulózláncok karcsúak, hosszúságuk 4-5  $\mu\text{m}$  (Tamer és Fauziah 2013) és kötegekbe rendeződve alkotják a mikrofibrillákat. A mikrofibrillákat a hemicellulózok és a lignin kötik össze egymással a sejtfaalak mátrixanyagaiként, míg a sejteket a magas lignintartalmú középső lamella kapcsolja egymáshoz (Dinwoodie 1971). A kötegekbe rendeződött cellulózsálakat és a sejteket egyaránt úgy veszik körül ezek a komponensek, mint ahogyan a beton körbeveszi a beleágyazott vasbetétet (Kärenlampi és tsai. 2003) (1.1. ábra).



1.1. ábra *Fasejt felépítésének sematikus ábrázolása (Németh Anna grafikája).  
Rövidítések: CML – középső lamella; P – elsődleges sejtfa; S1, S2, S3 – másodlagos sejtfa rétegei; HT – spirális sejtfa vastagodás; W – gödörkék*

Hierarchikusan rendezett sejtes felépítéséből adódóan a fának a többi anyaghoz viszonyított kiváló szilárdság-tömeg aránya jól ismert (Ashby 2005). A kivételes mechanikai tulajdonságok a minden szinten jelen lévő, funkcióközpontú hierarchikus szerkezetnek köszönhetők (Fratzl és Weinkamer 2007). A fa sejtjei általában hosszúkasak. Mechanikai szempontból a szilárdító sejtek (farostok) a legfontosabbak, melyek jellemzően tengelyirányban helyezkednek el a fatörzsben. A szíjácsban az edények vagy edénykék

aktívan szállítják a vizet és a tápanyagokat. A geszt egy fiziológiailag halott szövet megnövelt extraktanyag tartalommal, ami a fafajok legtöbbjénél jelentősen javítja a tulajdonságokat, például a tartósságot. Minden évgyűrűben a tavaszi időszakban keletkezik a korai pászta, míg az év aktív időszakának további részében a késői pászta képződik (Butterfield és tsai. 1997). Utóbbiban a farostok mennyisége magasabb, mint a korai pásztaban, ezért leginkább a késői pászta felelős a faanyag mechanikai tulajdonságaiért (Da Silva és Kyriakides 2007). Az ismertetett bonyolult és természetes, így környezetbarát rendszer eredménye a faanyag sok nagyszerű tulajdonsága, melyet az emberiség évezredek óta kihasznál.

A fa az életciklusa végén lebomlik, az elraktározott szén részben a talajba, részben a levegőbe visszajuttatva. Amennyiben a fát ipari alapanyagként felhasználjuk, ezt a lebomlási folyamatot odázzuk el, egyúttal megújuló nyersanyagot alkalmazva odafigyelünk a klímaváltozás mérséklésére. A különböző fafajok egymáshoz képest eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek és nagyon sokrétűen alkalmazhatók. A faanyagok felhasználhatósági körének bővítésére a fafajválaszték növelésén túl a faanyagmodifikáció is egy kiváló és napjainkban egyre többet alkalmazott lehetőség. Ezeket a metódusokat némely kiválasztott tulajdonság célzott javítására fejlesztették ki, sajnos jellemzően más tulajdonságok rovására. Így felhasználás-specifikus anyagokat lehet létrehozni, jó példa erre a lebontó organizmusoknak jobban ellenálló, időjárásállóbb hőkezelt (termikusan módosított) faanyag, vagy a rendkívül magas keménységű és biológiai-mechanikai hatásoknak egyaránt kiválóan ellenálló Lignostone (Kollmann 1936).

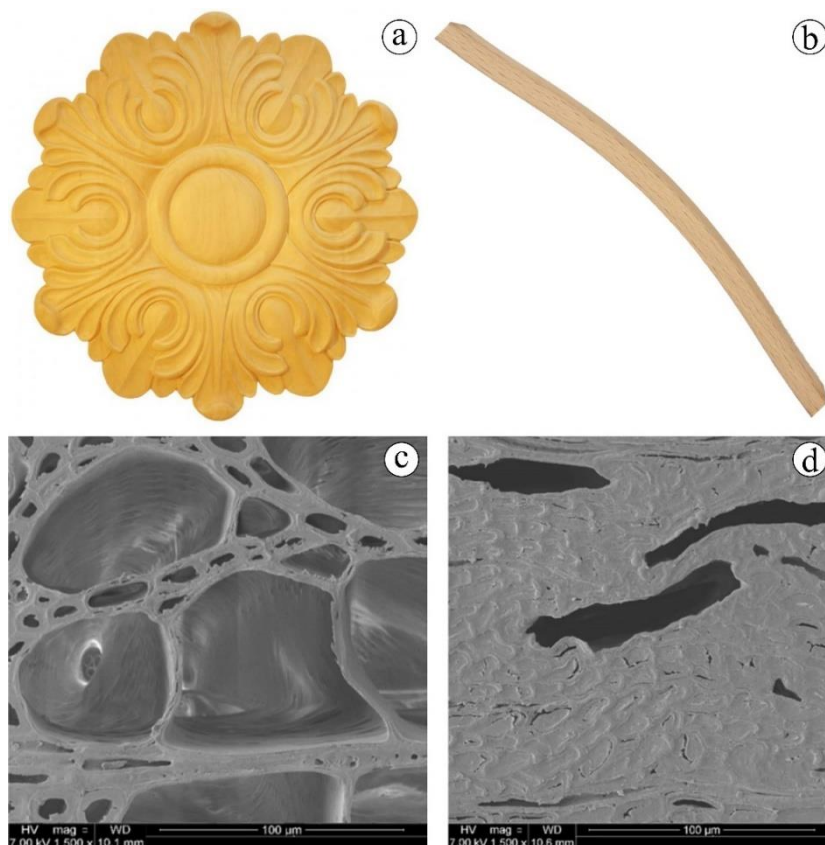
E disszertáció fókuszában a faanyag rostjaival párhuzamos irányú tömörítése áll, ami nagyobb mértékű hajlíthatóságot biztosít a faanyagnak kisebb hajlítóerő alkalmazása mellett. Bár nem új technológiáról, nem új anyagfajtáról van szó, mégis kis túlzással állítható, hogy csupán az alkalmazásához szükséges tulajdonságai ismertek. Ennek megfelelően rengeteg megválaszolatlan kérdés maradt a faanyagtudományok széles skáláján. Ezek mindegyikére természetesen nem adhatok választ, azonban igyekeztem széleskörű új ismeretanyaggal bővíteni a kapcsolódó tudományos ismereteket, azaz alap kutatásokon felül a lehető legjobb és legújyszerűbb kutatások közül többet elvégezni. A részletekbe menő kísérleti leírások is azt a célt szolgálják, hogy a lehető legtöbb ismeretanyag a lehető legpontosabban bemutatva álljon rendelkezésre.

A doktori kutatás célja egyrészt a 2. fejezetben ismertetett szakirodalomban megtalálható, helyenként kétes, vagy az eredeti művekben nem megfelelően kifejtett eredmények újvizsgálása, validálása (pl. a kezelés különböző módozatainak hatására fellépő szilárdsági változások). Kifejlesztésre került egy módszer, amivel a faanyagnak a tömörítés után maradó rövidüléséből becsülhető a tulajdonságváltozása. Másrészt eddig nem ismert, mégis fontos, alap kutatás részét képező adatokkal igyekeztem szolgálni (pl. sűrűségváltozás, egyensúlyi nedvességtartalom és zsugorodás-dagadás). Harmadrészt újabb vizsgálati lehetőségeket kihasználva megpróbáltam más aspektusból is megfigyelni a rostirányú tömörítés hatásait és ezekből következtetéseket levonni (3 dimenziós sejtszerkezeti vizsgálatok és kémiai funkciós csoportok vizsgálata). Továbbá a modifikáció kapcsán a dimenzióstabilitásnak a nedvesség hatására bekövetkező nagymértékű romlása komoly problémát jelent, kiküszöbölése szintén kutatási célként került megfogalmazásra (tejsavas telítés). Az egyedi tervezésű laboratóriumi tömörítő berendezés hatalmas segítséget nyújtott a kísérletek elvégzésében és megbízható eredmények publikálásában, mellyel számos megfigyelést lehetett végezni már a tömörítés közben, amire a régebbi kutatásoknál nem volt példa. A kutatási koncepció tehát a tömörítő berendezés által megszerezhető új információkon alapult a szakirodalomban található bizonytalanságok kiküszöbölésére és a rostirányú tömörítésnek és a tömörítés hatásainak mélyebb, alaposabb megismerésére, valamint a fellépő problémák kiküszöbölésére. Ezen felül amennyire lehetőségeim engedték, igyekeztem újszerű perspektívából is megközelíteni a modifikáció hatásait, jó példa erre a röntgensugaras mikrokomputer-tomográfia.

## 2. Szakirodalmi áttekintés

### 2.1. A tömörfa hajlítása

Az ezredforduló után egyre inkább előtérbe kerül a modifikált faanyagok kérdése. A mechanikai faanyagmodifikációkon belül két nagy csoport foglal helyet: a rostokkal párhuzamos irányú és a rostokra merőleges irányú (keresztirányú) tömörítés. Mindkettőt megelőzően szükséges a faanyag plasztifikálása, viszont a végeredmény nagyban eltérő: a keresztirányú tömörítés célja a sűrűség növelése, ezzel együtt elsősorban a faanyag keménységének javítása. Sablonokat használva alakzatokra is préselhetők a munkadarabok kisebb íves alkatrészekhez, vagy faragások utánzására (2.1.a és b ábra).



2.1. ábra *Préseléssel mintázott faanyag (a), keresztirányú tömörítéssel sablonra hajlított minta (b), kezeletlen bükk faanyag mikroszkópos képe (c), keresztirányban tömörített bükk faanyag mikroszkópos képe (d) (forrás: Candidus 2019, Báder és Rousek 2018, Dömény és tsai. 2018)*

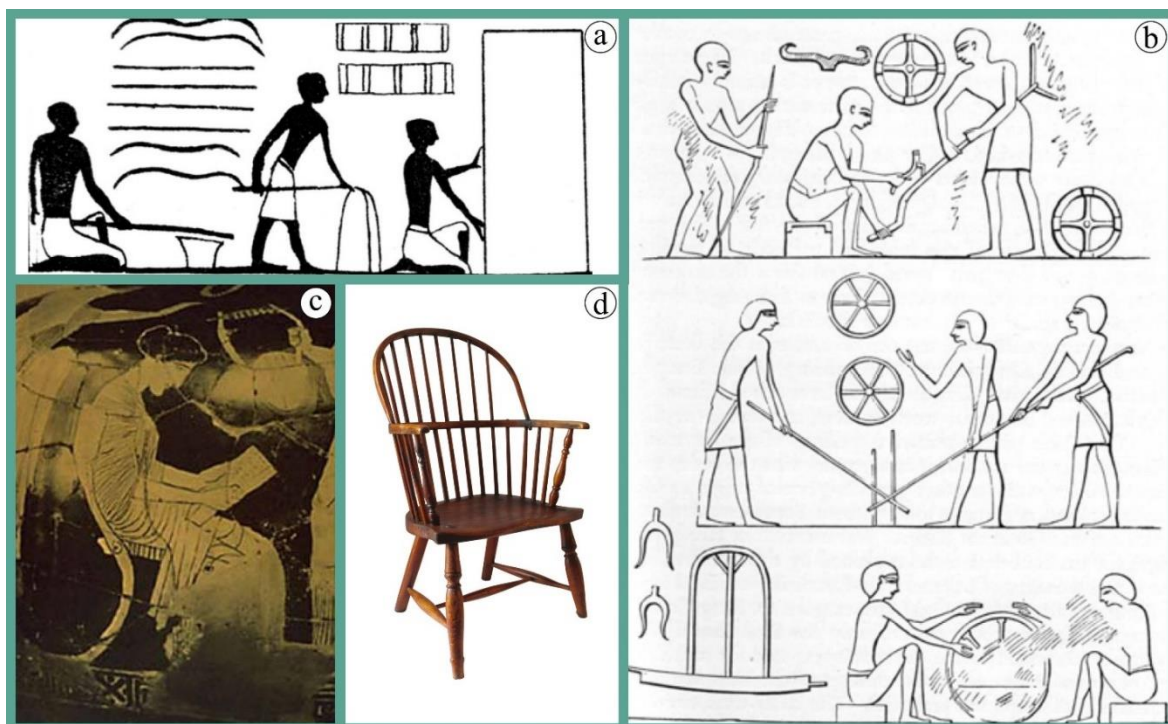
Az eljárást elsőként Stöckhart szabadalmaztatta 1886-ban (Navi és Pizzi 2015), a rostlágylított faanyag magas hőmérsékleten történő keresztirányú összenyomását jelenti. Rostokra merőleges irányban 50%-nál nagyobb mértékben is tömöríthető a faanyag a sejtek összeroppantásával és a sejtüregek közel teljes eltüntetésével. Az ennek kapcsán megalkotott angol nyelvű megnevezés (densification – sűrítés) nagyon leíró. Vagy teljes keresztmetszetben sűrítik a faanyagot, vagy a felületi sűrűségét növelik meg, nagymértékben javítva az alacsony sűrűségű faanyagok tömeg-szilárdság arányát. A sűrítéssel az ipari célokra nem, vagy kevésbé használt alacsony sűrűségű fafajok előtt nyílhatnak új felhasználási lehetőségek, pl. nyomott- vagy kopó felületekhez való felhasználásra (parketta, asztallap, polc, stb). Kiterjedt szakirodalommal rendelkezik a téma, tekintve, hogy egy régóta kutatott és alkalmazott iránya a faanyagmodifikációknak (Hill 2006, Ábrahám és tsai. 2010, Rademacher és tsai. 2017, Dömény és tsai. 2018, Song és tsai. 2018, stb). A faiparban



általánosan ismert eljárások, mint a forgácsolóipar, vagy egyes faanyagmodifikációs eljárások, mint a termikus modifikáció hatalmas tudományos szakirodalommal rendelkeznek, melyet gyakorlatilag lehetetlen volna összegyűjteni és bemutatni.

A fentiekből látható, hogy sorra jelennek meg publikációk a faanyag-modifikációkkal kapcsolatban, de kevés szó esik a mechanikai faanyag-modifikációk körén belül a rostirányú tömörítésről, mely egészen más tulajdonságait változtatja a faanyagoknak (többek között Van Acker és Hill 2003, Hill 2006, Sandberg és Navi 2007, Sandberg és tsai. 2013, Kamke 2014, Sandberg és tsai. 2017). Ennek megfelelően a rostirányú tömörítéssel kapcsolatos teljes ismeretanyag áttekintésre kerül a 2. fejezetben. Az iménti állítás egy alapos kutatás eredménye, mert hozzávetőleg száz év tudományos- és ipari ismeretanyagát sikerült összegyűjteni és feldolgozni a témában, beleértve a szabadalmakat és nem latin betűket használó műveket is. A tanulmány részletes áttekintést ad a rostirányú tömörítés történelméről, alapanyagairól, a tömörítés folyamatáról, az utókezelési lehetőségekről és a bekövetkező változásokról a fizikai- és mechanikai tulajdonságokban és a sejtszerkezetben, ipari- és tudományos ismereteket egyaránt felhasználva.

Az emberiség kultúrájával egyidős a faanyagok felhasználásán felül a tömörfa hajlítása is. A gőzöléses fahajlítás technológiáját az ókori egyiptomiak már ismerték, erről Krisztus előtt közel 2 évezreddel készült sírfestmények tanúskodnak (2.2.a és b ábra). Az igény az íves faanyagra különböző felhasználási célokkal folyamatosan fennállt a történelem során, jó példa erre a görög Klismos szék a Krisztus előtti 5. századból (2.2.c ábra), vagy a brit eredetű Windsor szék a 18. századból (2.2.d ábra) (Hyams 2008).



2.2. ábra Egyiptomi falfestmény Amenemhat sírjából, amin íjakat hajlítanak (i.e. 1928; a), egyiptomi falfestmény részlete Nebamen sírjából hajlított székalkatrészek készítéséről (i.e. 1400; b), egy görög vizesedényen látható Sappho, hajlított faanyagból készült klismos széken ülve (i.e. 440-420; c) és brit Windsor szék (i.sz. 1700-1725; d) (Sandberg és Navi 2007 és Istbids 2019 alapján)



A hordógyártás egy ősi technológia, melyet az ókortól származtathatunk és napjainkban is hasonlóan megy végbe, nem történt változás az eljárás alapelveit tekintve. A megfelelő alakúra kialakított hordódongákat melegítés közben folyamatos nedvesítéssel lágyítják és fokozatosan, lassan hajlítják a kívánt ív eléréséig (Tóth 2009). Vélhetően a 2.2.a és b ábrán látható művelet is hasonló, gőzöléses fahajlítási eljárásról tanúskodnak. Vízrel és faanyaggal töltött zárt edényt forrósítva a fa a körülményektől függően a főzés, vagy a gőzölés hatására meglágyul és hajlíthatóvá válik. A hűtés és szárítás során ismét megszilárdul, a beállított alakját nagyjából megtartva. Ez a módszer már komolyabb felszerelést igényel, tehát fiatalabb technológia. Sőt, a későbbiekben ezt fejlesztették tovább sorozatgyártási célokra (Tóth 2009). A szabványosítás kezdete óta megtalálhatók fahajlítással foglalkozó leírások. Samuel Gragg például 1808-ban szabadalmaztatott hajlított alkatrészeket tartalmazó székeket az USA-ban (Podmaniczky 2016).

Sorozatgyártás céljából a német származású Michael Thonet az Osztrák-Magyar Monarchiában alkalmazta elsőként a gőzöléses fahajlítást a 19. század közepétől. Kezdetben vékony rétegekből készült, ragasztott alapanyagú termékekkel kísérletezett, majd rátalált a faanyag nedves közegben történő hevítésében rejlő lehetőségekre. Néhány elemre redukálta a székek szerkezetét, így lehetővé vált a nagy sorozatban történő gyártás olcsó, szakképzetlen segédmunkásokkal (Vadas 2011). Továbbá az elemek variálásával igény szerinti konstrukciók voltak összeállíthatók, amivel Thonet megreformálta a bútortipárt. Az első szabadalma 1842-ben, míg a hajlított bútor gyártásának szempontjából legfontosabb, ami bútorlábak gőzöléses hajlításával foglalkozik, 1856.07.10-én jelent meg (Kyriazidou és Pesendorfer 1999). A gőzöléses fahajlítási technológia kivitelezése körülményes és alkalmazása csakis nagy tételű gyártás esetében gazdaságos (Kollmann 1955). A felmelegített faanyag kihűlés után ismét nehezen hajlíthatóvá válik (Kollmann 1955, Kuzsella és Szabó 2006), például Thonet Nr. 14 Vienna székének (2.3.a és b ábra) a háttámláját és hátsó lábait alkotó faanyagot fél percen belül kell készre hajlítani, miután kivették azt a gőzölőből (Buchter és tsai. 1993).



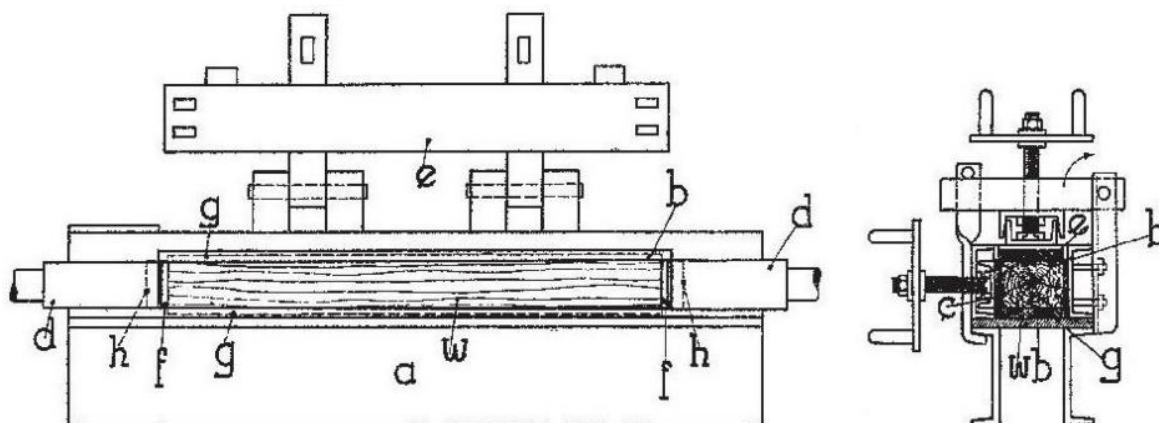
2.3. ábra Thonet Nr. 14 Vienna széke (a) és 36 db szék alkatrészei szállítmányozásra készen 1 m<sup>3</sup>-es térfogatban (b) (Chillida 2016 és von Vegesack 2009 alapján)

További, jellemzően kémiai rostlágyítási módok is léteznek, például a faanyag timsó- vagy ammónia oldatban való főzése (Kollmann 1955). A glicerinnel való telítés szintén javítja a hajlíthatóságot, de minden esetben magas hőmérséklet szükséges a megfelelő eredmény eléréséhez (Kollmann 1955). Példaként az ammóniás kezelést alapul véve, előnye a klasszikus vizes gőzöléssel szemben, hogy plasztifikált állapotban marad a faanyag lehűlés után is, amíg a mérgező ammónia el nem párolog belőle (Paril és tsai. 2014).

## 2.2. A rostirányú tömörítés története

Az ipar további fejlődésével lehetőség nyílt olyan technológia kifejlesztésére, amely már szobahőmérsékletű állapotban hajlítható, környezetbarát faanyagot biztosít. Ez a rostirányú tömörítésen alapuló eljárás, amelyről 1917-ben a Német Birodalomban jelent meg először szabadalom (Hanemann 1917a). A fejlesztés új lehetőségeket mutatott, mert elsősorban nedvesen, de esetenként száraz állapotban is a tömörítetlen faanyagnál lényegesen kisebb erővel, nagymértékben hajlítható alapanyagot eredményez. Továbbá a gőzöléses hajlítással ellentétben, a rostirányban tömörített faanyagot nem szükséges előmelegíteni a hajlítást megelőzően.

Hanemann (1917a) szerint a nagyméretű faanyagot először főzni vagy gőzölni kell, majd forró és nedves állapotban a présbe helyezni, ahol azt a kihajlás megakadályozása érdekében egy burkolat veszi körbe a tömörítés során. A nyomópofákkal a faanyagot rostirányban összepréselve, majd összepréselt állapotában lehűtve és szárítva a faanyag továbbfeldolgozható (deszkákra vágható, megmunkálható) és könnyen hajlítható lesz. Ez alapján egy termo-hidromechanikus (THM) faanyagmodifikációs eljárásról van szó. Azonos tartalommal a dán Pedersen is készített szabadalmat 1918-ban, több országban. Max Hanemann második szabadalma (Hanemann 1917b) a rostirányú tömörítésnek egy termelékenyebb változatát mutatja be. Egy megfelelő eszköz segítségével a faanyagot rögzíteni kell az összepréselt állapotában, kivenni a présgépből, majd hűteni és szárítani. Utóbbi műveletek így gyorsabban elvégezhetőek, miközben a présgép folytatni tudja a termelést. Megfelelő technológiai megoldások hiányában ekkor még nem vált ismertté és nem terjedt el a módszer. Néhány évvel később a Holzveredelung GmbH (1926) elsőként mutatott be Hanemann elvei alapján működő ipari tömörítő berendezést, jellegrajzokkal kiegészítve. Olyan kialakítású, hogy a tömörítés során az egy, vagy több munkadarab a présfalnak bár nekifeszül, ennek ellenére elcsúsztatható annak mentén (2.4. ábra). A rögzítő készülék a munkadarabot nyomó préslap alatt fekszik, tömörítés után a munkadarabra erősíthető és így a présformából kivéve tömörített állapotban tartja a fát, hogy könnyítse a szárítást és a gép felszabadításával gyorsítsa a termelést.

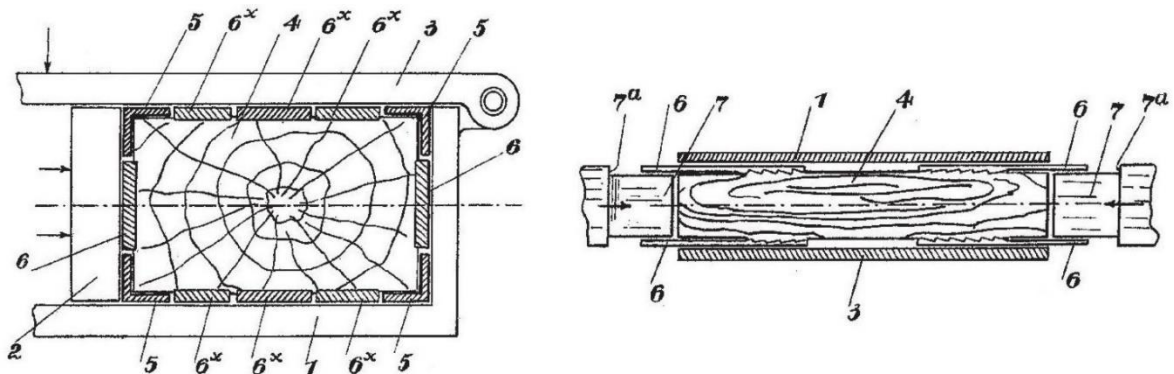


2.4. ábra Az első ipari tömörítő gép metszeti rajzai (forrás: Holzveredelung 1926).

Rövidítések: a – prés; b – horony; c – nyitható oldalfal; d – nyomópofa; e – nyitható oldalfal; f – mobil végfal; g – rögzítőszár; h – horony; w – munkadarab

A Magyar–Amerikai Faipar Rt (1927) a hosszú faanyagok egyenletes tömöríthetőségének irányában fejlesztette tovább a technológiát, a fa és a préshüvely közötti súrlódás csökkentésével. Tömörítés közben a présforma oldalfalain nagy súrlódás keletkezik, ami a tömörítő erőt a faanyag közepe felé haladva hiperbolikusan csökkenti (Kollmann 1955), azaz a bevitt nyomóerő jelentős részét felemészti. Ezt kiküszöbölik a sajtolóforma belsejét burkoló támasztólapok, melyek a formában a fával együtt el tudnak mozdulni (2.5. ábra). A tömörítés folyamán a préselő erő irányában a fogazott felületű támasztólapokat is el lehet

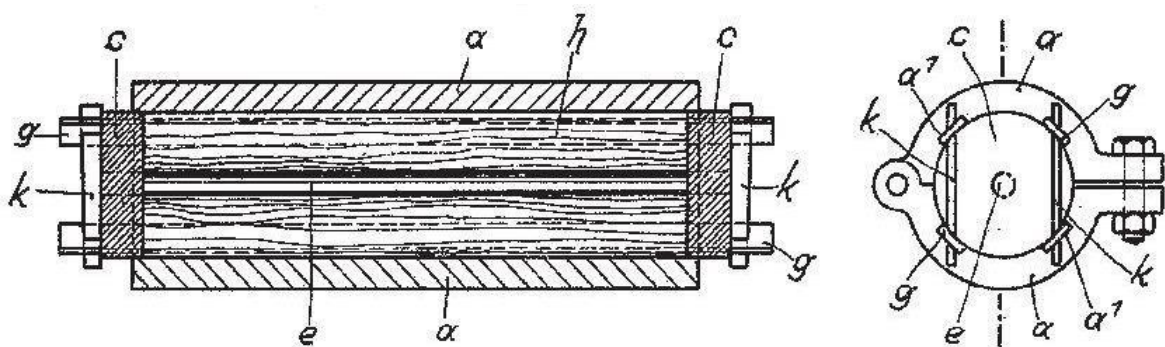
mozgatni, melyek ebben az esetben tömörítő erőt adnak át a fa végeitől távolabb eső szakaszokon. Ennek az a hátránya, hogy kialakításából adódóan a munkadarab felületét roncsolja. Azonban roncsolt felület eltűnik az anyag továbbmunkálásakor. Továbbá a sarkokon található szögvasak és ékek segítségével rögzíthető a faanyag tömörített hossza.



2.5. ábra A tömörítő gép metszetei (forrás: Magyar–Amerikai Faipar Rt 1927).  
 Rövidítések: 1 – présforma oldalfal; 2 – présforma oldalfal; 3 – présforma oldalfal; 4 – munkadarab; 5 – szögvas; 6 – mozgatható támasztólapok; 6\* – fogazott mozgatható támasztólapok; 7 – nyomópofa; 7a – dugattyú

A brit Anglo-European Company Ltd az 1920-as évek második felében számos szabadalmat készített Európa szerte, melyek tartalmilag megegyeznek Pedersen (1918), Holzveledung (1926) és a Magyar–Amerikai Faipar Rt (1927) szabadalmainak szövegezésével és rajzaival, természetesen a megjelenésnek otthont adó ország nyelvére lefordítva.

August Thurn (1932) szerint a kizárólag hibamentes, szögletes keresztmetszetű tömörített faanyag előállítása nagy anyagvesztéssel jelent, mert a rönkből leeső, jó minőségű részek hulladékká válnak. Hengeres faanyag használata esetén a szálszerkezetet zavaró hibák kevésbé befolyásolják a tömörítés minőségét. Az alapanyagot annak kihajlását megakadályozó présfallal rendelkező berendezésbe kell helyezni, melyben akár különböző átmérőjű rönkfák is tömöríthetőek megfelelő vastagságú helykitöltő köpennyel körbevéve (2.6. ábra). A rostlágítás és a későbbi szárítás felgyorsítható a bél eltávolításával. Tömörítéskor ezt helyettesíteni kell egy nyomásálló fém magrésszel. A szárítás gyorsítása érdekében a bél helyén található furaton forró sűrített levegő keringethető. A leírás szerint így a tömörített fa előállítási költsége a negyedére csökken és lehetségessé válik tömörített fából hámozott furnér előállítása is. A szabadalom a technológiai részletek kidolgozására nem tér ki, a módszer ipari alkalmazásáról nem lehet fel információ.



2.6. ábra Ábrák a hengeres faanyagot rostirányban tömörítő gépről (forrás: Thurn 1932). Rövidítések: a – burkolat; a' – horony; c – nyomópofa; e – magfurat; g – rögzítőszár; h – munkadarab; k – retesz

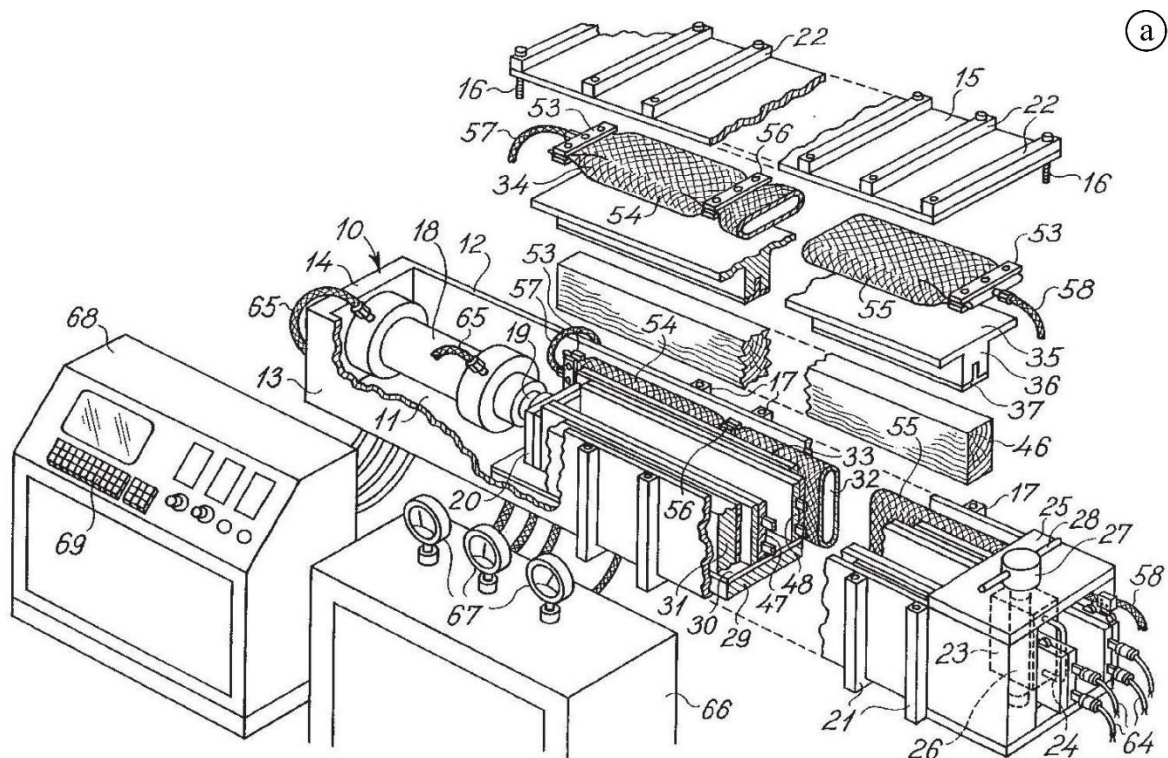
Thurn és Thurn (1943) leírja, hogy az elérhető legnagyobb hajlékonyság nem mindig szükséges, azonban a kisebb mértékű tömörítés nem bizonyult megfelelő megoldásnak. A szerzők valószínűleg a kis tömörítési arány következtében fellépő kevésbé egyenletes tömörödés és hajlíthatóság miatt jutottak erre a következtetésre. Ismert volt, hogy ha tömörítés után a fát összepréselt állapotban hűtik és szárítják, az nagyon hajlékony faanyagot eredményez, míg a tömörítést követően a fát rostirányú visszarugózása után hűtve-szárítva az kevésbé lesz jól hajlítható. A szabadalom szerint a faanyag tömörítés utáni rostirányú visszarugózásának szabályozásával a kívánt hajlékonyságú faanyag állítható elő a mindenkori felhasználási céloknak megfelelően, a hossz mentén egyenletes tömörödés mellett. Ezzel gyorsítható az gyártási folyamat és biztosítható a termékek előállítás költségeinek csökkentése.

Számos írásos emlék – például Graf 1932-ben megjelent könyve – tanúskodik a rostirányban tömörített faanyag ipari előállításáról (Kollmann 1951). Kollmann (1936) fatechnológiával foglalkozó könyvében már megtalálható a rostirányban tömörített faanyag jellemzése. Schneider (1939) leírja, hogy alkalmazzák rostirányban tömörített faanyagot, például mint repülőgép alkatrész. Heisel és Eggert (1990), Batori (2000) és a Material Archiv (2018) a Holzveredelung GmbH céghez köti az ipari előállítást, tehát rostirányban tömörített hajlékony fa ipari előállításának kezdete az 1920-as évek második felére tehető. A II. világháború befejezésétől mintegy fél évszázadon keresztül nem lehetséges új szabadalom, vagy kutatás a rostirányú fatömörítéssel kapcsolatban, csupán hivatkoznak a korábbi ismeretekre többek között Vorreiter (1949), Kollmann (1951), Blankenstein (1956), König (1972), Schietzel (1976), Heisel és Eggert (1990). A brit Stevens és Turner (1948) II. világháború utáni ismeretei szerint bár hajlékony faanyag tömörítéses előállítására léteznek szabadalmak, de mechanikai és gazdasági szempontokból egyaránt korlátozott volt a technológia elterjedése. Ebben vélhetően közrejátszottak a háborút követő tömeges szegénységen felül a 20. század elejétől létrejövő és az évszázad során folyamatosan formálódó divatirányzatok is, amelyek ritkán, vagy egyáltalán nem alkalmazták a korábban kedvelt, íves fabútorformákat (art deco, bauhaus, minimalista, stb).

Időrendben a következő Sparke (1989) dán szabadalma, mely kétszeri rostirányú tömörítéssel foglalkozik. A szerző a különböző folyamatrészek kombinációit írja le (rostlágítás, tömörítés, az anyag gyors- vagy fokozatos elengedése, az anyag összenyomva tartása hűtés és szárítás közben, ezek különböző ismétlései, szakaszos tömörítés, stb). Megjelenik a változtatható oldalnyomás lehetősége a technológiai leírásban. Konkretizálja az általánosan használatos, eredeti hosszhoz viszonyított 20%-os összenyomási arányt. Egyértelműsíti, hogy egyes esetekben az eljárás konstans, száraz állapotban is megmaradó, plasztikus állapothoz közeli tulajdonságot biztosít a faanyagoknak.

Thomassen és tsai. (1990) tömörítő berendezést állítottak össze. A szövegezés jellegrajzokkal kiegészítve került levédésre Dániában 1989-ben, mely a megelőző bejegyzett találmányokat és a kor technológiai újdonságait egyaránt felhasználja. Az oldalfal alkatrészeket egy tömlő nyomja a faanyaghoz és így a faanyag hossza mentén különböző értékű lehet az oldalnyomás (2.7. ábra). A gép vezérlése modern, automatizált. Tudomásunk szerint napjainkban e szabadalom elvén működő, a Compwood Machines Ltd által gyártott, elektronikusan vezérelt tömörítő berendezések üzemelnek Magyarországon a Compwood Products Kft és az USA-ban a Pure Timber Llc cégeknél (Kamke 2014). Ezen felül Olaszországban a Candidus Prugger Sas cégnél a Magyar–Amerikai Faipar Rt (1927) szabadalmát alkalmazó gépeket használnak (Batori 2000).





2.7. ábra Tömörítő gép elvi összeállítása (a) és egy gyakorlati megvalósítása (b) (forrás: Thomassen és tsai. 1990 és Compwood 2019a)

Bakos (1993) munkájában bemutatásra kerül egy Debrecenben gyártott, csavarorsós elven működő, 22 mm átmérőjű esztergált farudakat tömörítő kísérleti berendezés. A leírás alapján szintén a Magyar–Amerikai Faipar Rt (1927) szabadalma alapján üzemelő gépről van szó, azonban nem lelhetők fel a berendezésről további adatok, valószínűleg abbahagyták a fejlesztést. Az időrendben következő szabadalom az előkészítés és a tömörítés szokásos folyamatát 100x120 mm keresztmetszetű faanyag felhasználásával mutatja be, és a rostirányban tömörített faanyag előnyeit, felhasználási lehetőségeit taglalja (Deibl és tsai. 1999). Megjelenik a fémek hajlításához használt gépek alkalmazása a fahajlításnál. Továbbá ragasztva, vagy mechanikusan rögzítve is felhasználható a tömörített faanyag és beépítéskor lehetőség van a hajlítási sugár kismértékű korrekciójára.

Volkmer és tsai. (2001) új irányból közelítik meg a tömörítést: a faanyag két befogás között szabadon maradó rövid szakaszán kb. 5% mértékű előtömörítést kell végezni. A szabad rész mindig egy szakasznyival arrébb kerül, amíg a teljes hossz előtömörítése véget nem ér. A második ciklusban az előtömörített faanyagot a korábbi szabadalmakból megismert módon tömöríteni kell, akár eredeti hosszának a felére. Ha a faanyag végleges hossza van előre meghatározva, akkor tömörítés után a hosszúságát rögzítve (nyomás alatt tartva) kell szárítani. A fát a kívánt végső méretnél kb. 10%-kal rövidebbre préselve, a nyomás alatti szárításhoz szükséges rögzítő eszközök elhagyhatóak. A tömörített és szárított faanyag 5%-os rostirányú nyújtásával a merevség tovább csökken, így a hajlítás még könnyebbé válik. Jelenleg nem állítanak elő e szabadalom szerint modifikált faanyagot.

2015 óta a Soproni Egyetemen is üzemel egy tömörítő gépegység. A nyomóerőt és a kutatásokhoz szükséges folyamatos mérési adatokat egy Instron 4208 (Instron Corporation, USA) típusú univerzális anyagvizsgáló gép biztosítja. A gépegységet csatlakoztatva 20x20x200 vagy 20x30x200 mm méretű mintatesteket lehet rostirányban tömöríteni, az eredeti hosszhoz viszonyítva maximum 33% mértékben. A félig zárt gépegység oldalfalai fűtöttek és a mintával együtt képesek elmozdulni, ha ezt a tömörítési folyamat megkívánja (Karl 2015, Báder és Németh 2017a, Báder és Németh 2019a).

Érdeemes még megemlíteni néhány, a rostirányú tömörítéshez lazábban kapcsolódó szabadalmat. Curtis (1948) a 12% alatti nedvességtartalmú juhar, bükk és nyír alapanyagokat 2 órán keresztül főzte kőolajszármazékokban, majd 2 nap száradás után csonkagúla alakú présformán átnyomva tömörítette. A 100 °C hőmérsékletűre előmelegített faanyag vastagsága 84%-ra tömörödött a fűtött présformában, szélessége változatlan maradt, hossza szintén csökkent. Megállapította, hogy hosszabb főzési idő esetén a faanyag telítődik és az igényelt nyomóerő megnövekszik. A bemutatott művelet a somfa mechanikai tulajdonságának beállítását célozta egyéb fafajokból egy szövőszék-alkatrész előállítására, melyet a lágyítás utáni rostirányú és keresztirányú tömörítés együttes alkalmazásával ért el. Jouko (1997) seeger-gyűrűkhöz hasonló elven működő, formára alakított, bepattintással rögzíthető faléc alkatrészeket mutatott be az 1996-ban megjelent eredeti szabadalomra hivatkozva. Lehetséges alapanyagként többek között a rostirányban tömörített faanyagot is megjelölte. Szabó és tsai. (2005) a tömörítési technológia fő paramétereit írják le (nedvességtartalom, tömörítés mértéke, stb), valamint hogy a tömörített fából készült farugó képes az energiatárolásra- és leadásra. Gépészeti, gyógyászati, bútór- vagy játékszerkezetekbe építve használható fel. Eckardt (2013) térhatároló idomot tervezett tömörített faanyag felhasználásával bútoralkatrészek, belsőépítészeti elemnek és dekorációs célzattal. Itt a tömörített faanyagból készült falemezben a száliránnyal párhuzamosan több átvágás-sor van egymással párhuzamosan kiképezve, melyek egymáshoz képest eltoltan helyezkednek el. Ennek köszönhetően szélességileg széthúzhatóvá és alakilag széles tartományban tetszőleges formára alakíthatóvá válik a faanyag.

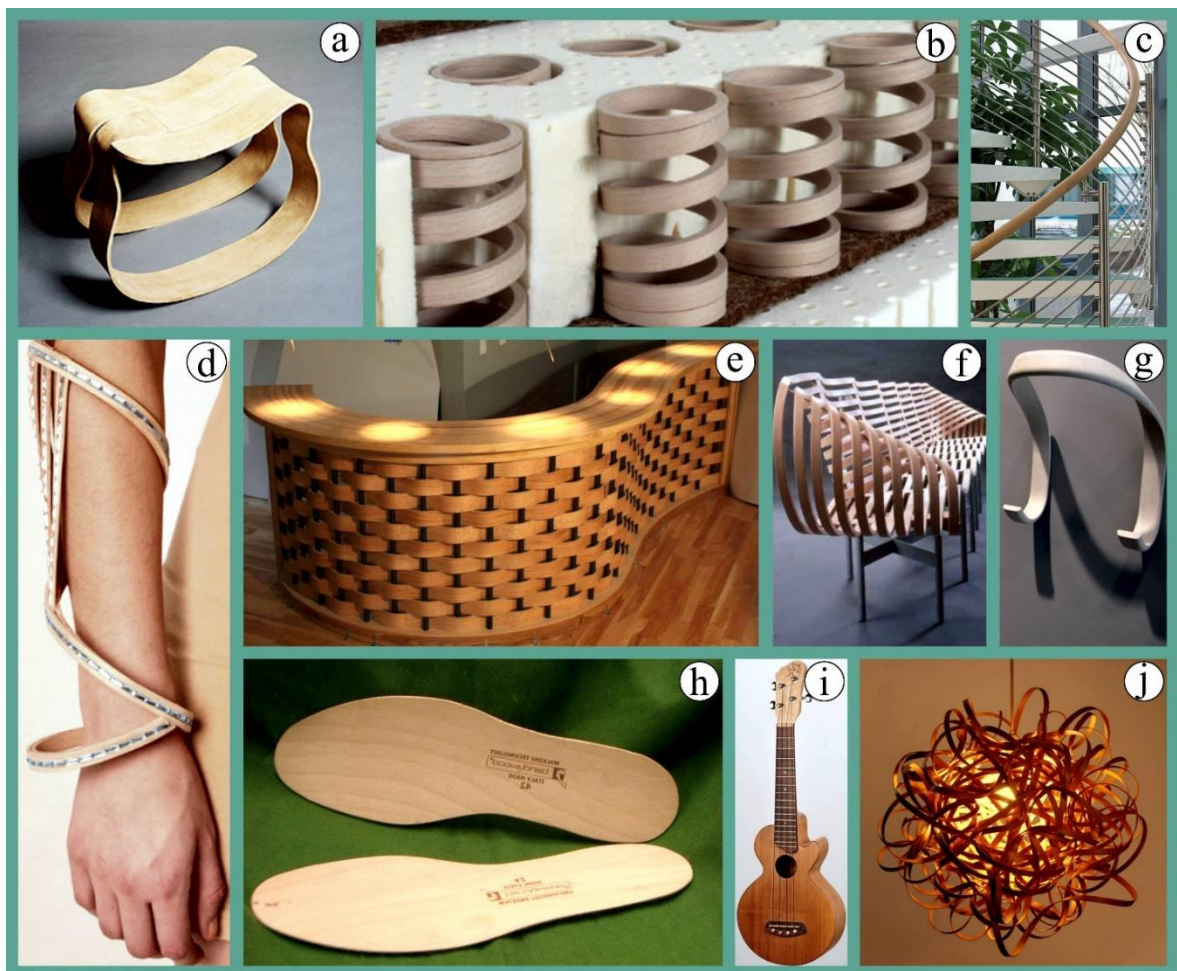
Az íves fa alkatrészek manapság jellemzően ragasztott- vagy rétegelt-ragasztott tömörfa, esetleg faalapú kompozit alapanyagokból készülnek (Svoboda és tsai. 2015). Ezekhez a technológiákhoz sok fa alapanyag, munkaeszköz, ragasztó és pontos munkavégzés szükséges. Ebből következik, hogy a faanyag tulajdonságait úgy kell módosítani, hogy alakítható legyen egyszerű eszközökkel és kis erővel. Erre nyújt megoldást a rostirányban tömörített faanyag, mellyel lehetőségessé vált hajlékony, rugalmas és könnyed fabútort készíteni (Anssary 2006). A kívánt formára hajlított tömörített fa mechanikusan rögzítve pl. korlátként, vagy ragasztva pl. élzáróként repedés vagy törés nélkül alkalmazható (Deibl és tsai. 1999, Sparke 1989). Furnér szintén készíthető belőle, amely jól használható térgörbe felületekhez, ahol a faanyag bizonyos mértékű nyúlására van szükség (Volkmer és tsai. 2001, Anssary 2006). A fából készült spirálrugó esetén a rugóalakok a gépészetben használt formáknak megfelelnek. Azonos méretek esetén a fémrugóhoz képest kisebb a tárolható energia, de kis tömege és mágnesezhetetlen alapanyaga miatt biotermékként alkalmazható

az élet számos területén (Szabó és tsai. 2005). Segesdy (2003) a rostirányban tömörített faanyag konyhabútorhoz való felhasználhatóságát vizsgálta. Megállapította, hogy elsősorban a konyha esztétikai funkcióit segíti, mint szerelvények, dekorációs- és designtartozékok, valamint kiegészítők alapanyaga. A lakás egyéb bútorainál szintén alkalmazható, pl. széklábak, kartámaszok és háttámlák, asztallábak, stb. (Kollmann 1955). Sőregi (2007) hajókabin belsejének tervezéséhez alkalmazta a tömörített faanyagot, mely kiválóan megfelel a hajók és repülőgépek egyedi íves berendezéseinek, burkolatainak készítésére, továbbá Vorreiter (1949) szerint a merevítő bordák előállításához is. Kollmann (1955) a legkülönbözőbb járművek egyes alkatrészeinek alapanyagaként való felhasználását írta le. Az egyedi gyártásnál mutatkozó előnyei a restaurátori munkáknál szintén nagyon jól alkalmazhatók, ahol alkatrész pótlásához nem szükséges a korabeli technológiát újraépíteni, hanem elegendő a tömörített faanyagot hidegen formára hajlítani és megszáritani. Tokodi (2012) szakdolgozatában ruhák tervezéséhez és ruházati kiegészítőkhöz vette igénybe ezt a modifikált faanyagot. A tömörített fa alkalmazható rezgéscsillapított szerszámnyélnek és egyedi formájú szerszámoknak, képkeretnek, modellezéshez, nyeregnek és lószerszámoknak. Továbbá felhasználása a bútorigipari és belsőépítészeti alkalmazások széles palettáján kívül az építőipar, járműgyártás, játék- és sportszergyártás, hangszergyártás és képzőművészet, továbbá az egészségügy területére is kiterjeszhető (Vorreiter 1949, Kollmann 1955, Komáromy 1999, Bátori 2000, Báder és tsai. 2015, Karl 2015).

Az elmúlt évtizedekben számos workshopon és konferencián bemutatkozott ez az alapanyag iparosok, művészek, egyetemi hallgatók és tudósok számára Európában és Amerikában. Korszerű szakkönyvekben szintén megtalálható a technológia (többek között Dósa és tsai. 2002, Brownell 2006, Reinhard és tsai. 2007, Lohmann 2010, Brownell 2012, Smardzewski 2015), tehát napjainkban ipari- és tudományos szempontból ismert eljárásról van szó. Tömerdek alkalmazási területe létezik, melyet a 2.8. *ábra* szemléltet a teljesség igénye nélkül. A tömörített-hajlított fából készült termékek sokféleségének csak a tervezők és felhasználók kreativitása szabhat határt.

A bármely irányban hajlítható tömörített faanyag nagy alakváltozásoknak tehető ki és kis veszteséggel dolgozható fel (Ivánovics 2005, Anssary 2006), mert nem szükségesek nagy gyártási túlméretetek. A fa szerkezete épen marad (Sparke 1989), a szálirány mindig követi az ívet. Megjelenése a kezeletlen faanyagéval megegyező, de az alkalmazott rostlágyítási módszernek- és időtartamnak megfelelő elszíneződéssel számolni kell. Készletezhetőségéből és alakíthatóságából kifolyólag a sorozatgyártott hajlított alkatrészek optimális alapanyaga. Használata nagy előnyt jelent az egyedi munkák elkészítésében is (Ivánovics 2005). A rostirányban tömörített faanyag esztétikai, anyagtakarékossági és megmunkálási szempontból egyaránt kiváló termék.





2.8. ábra A rostirányban tömörített faanyag néhány alkalmazási lehetősége.  
 Hintaszék (forrás: Lehner 2000; a); Fa spirálrugós matrac (forrás: Bio-Textima 2015; b);  
 Korlát (forrás: Q-railing 2015; c); Karékszer (forrás: Bila 2012; d); Íves konyhapult  
 (forrás: Fluted B. 2008; e); Mobius pad (forrás: Waller 2006; f); Fogas (forrás: Harrison  
 2012; g); Talpbetét (forrás: Candidus 2017; h); Rainy Day ukulele (forrás: Dresdner  
 2018; i); Lámpa (forrás: Raffield 2018; j)

Amint a rostirányú tömörítéssel kapcsolatban bemutatott szabadalmakból és kutatásokból kitűnik, fejlesztése során számos felhasználói igényvel és technológiai kihívással kellett megküzdeni az elmúlt száz évben. A problémák kiküszöbölésére több megoldást kidolgoztak, így napjainkban már megoldott a jó minőségű rostirányban tömörített faanyag előállítására. Ezzel alkalom nyílik különleges késztermékek előállítására, elsősorban a bútort- és belsőépítészeti igényeit kiszolgálva és lehetőségeit bővítve. A továbbiakban bemutatásra kerülnek az elmúlt körülbelül száz év kutatási eredményei alapján a rostirányú tömörítéshez alkalmazható alapanyagok, a tömörítési módszerek, továbbá a modifikált faanyagban bekövetkező strukturális- és mechanikai változások.



## 2.3. Alapanyagok

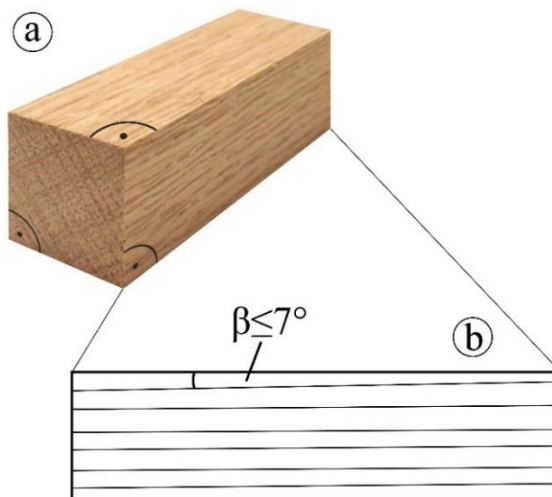
### 2.3.1. Fafaj

Buchter és tsai. (1993), Kovács és tsai. (2006) és a Compwood (2008) a következő rostirányú tömörítésre alkalmas fafajokat adták meg: bükk (*Fagus sylvatica* v. *Fagus ssp.*), ezüst juhar (*Acer saccharinum*), fekete cseresznye (*Prunus serotina*), fekete dió (*Juglans nigra*), kőris (*Fraxinus excelsior*, *Fraxinus americana*), hegyi szil (*Ulmus glabra*), tölgy (*Quercus ssp.*, *Quercus petraea*, *Quercus velutina*). Kollmann (1955) a lombos fafajok megjelölésével az iméntiek felüli példaként a körtefát említette. Szabó (2002) a felsoroltakon kívül az akácot és a nyírfát, míg Kuzsella és tsai. (2011) az akácot és a hársat is a tömöríthetők közé sorolták annak ellenére, hogy Buchter és tsai. (1993) szerint a nyírfa, a teakfa, a mahagóni és a gumifa, míg Kuzsella (2011) szerint a nyárfa nem tömöríthető. A gépgyártó Compwood Machines (2001) szerint a ciprusfa (Észak-Amerika és Európa), az afzélia (Észak-Afrika és Délkelet-Ázsia) és a pau marfim (Dél-Amerika) is tömörítéshez megfelelő, míg Hyams (2008) a vizsgált ausztrál fafajok közül a hegyi kőrist (*Eucalyptus regnans*), a hamis mahagónit (*Eucalyptus marginata*) és a foltos gumifát (*Corymbia maculata*) felhasználhatónak találta. A Pure Timber Llc (2018) Észak-Amerikai fafajokkal dolgozik, választékában az Európában jellemző fafajokon kívül amerikai ámbrafa (*Liquidambar styraciflua*), vörös tölgy (*Quercus rubra*), fehér tölgy (*Quercus alba*) és sasszafra (*Sassafras albidum*) is szerepel. König (1972) és Sparke (1989) csak általánosan a keménylombosokat említette, kiemelve a bükköt és a tölgyet, míg Deibl és tsai. (1999) és a Material Archiv (2018) az európai választék egy részét. Hyams (2008) leírja, hogy a foltos gumifa a származási helyétől függően maximum 12–15% mértékben tömöríthető. A tapasztalatok alapján a tűlevelű fafajok nem tömöríthetőek (Vorreiter 1949, Kuzsella 2011). Kollmann (1955) ezt a korai- és késői pászták jelentős sűrűség- és keménységbeli eltéréseivel magyarázta. Ivánovics (2012) szerint a tönkrementelt a tűlevelűek korai pásztáját alkotó vékonyfalú edénykék (tracheidák) mikro-kihajlásra és szálszakadásra hajlamos szerkezete okozza.

### 2.3.2. Minőség és méret

A rostirányú tömörítés célja a természetes faanyag hajlíthatóvá tétele. A tömörítés és a hajlítás egyaránt kiváló minőségű alapanyagot igényel. Egyenes növéssű fák a legalkalmasabbak, melyek göcsmentes, keskeny évgyűrűs faanyagot adnak (Szabó 2002, Kovács és tsai. 2006, Báder és Németh 2017a) (2.9.a ábra). Hajlításkor legoptimálisabb, ha a belső íven az idősebb, kisebb sugarú évgyűrűk helyezkednek el (Buchter és tsai. 1993) és a szálirány a munkadarab élével párhuzamos; maximálisan  $\beta=7^\circ$ -os ferdeszálúság engedhető meg (2.9.b ábra). A hajlításnál fellépő feszültségek hatására a túlzott ferdeszálúság töréshez vezet (Szabó 2002, Kovács és tsai. 2006, Báder 2015a).

A rönk felfűrészelésének módja a tömörítés szempontjából mellékes, lehet élesvágás, negyedelő vágás, vagy átmeneti a kettő közt (Buchter és tsai. 1993, Compwood 2008). Szabó (2002), Kuzsella és tsai. (2011), Peres és tsai. (2013) és Báder és Németh (2017a) megállapították, hogy a szíjács és a geszt aránya, valamint az évgyűrűk elhelyezkedése a tömörítés minőségét nem befolyásolja (2.9.a ábra). A Compwood (2008) leírása alapján bükknél és kőrisnél az álgeszt nem megengedett, melynek okait, a kérdéskör részleteit kutatásokkal alátámasztva a 3.4.4. fejezetben részletezzük. Tügöcsök és a keresztmetszethez képest kisméretű göcsök a faanyag tömöríthetőségét nem befolyásolják. Hajlításnál azonban az anyag egységét megbontó feszültséggyűjtő pontokként repedéseket okozhatnak, így göcsmentes alapanyag ajánlott (Buchter és tsai. 1993, Báder és Németh 2017a). A repedések, rovarragások helyi anyaggyengítő szerepük miatt a rostirányú tömörítés szempontjából sem megengedhetők (Compwood 2008, Báder és Németh 2016, Báder és Németh 2017a). Egységesen hajlítható alkatrészek sorozatgyártásban történő tömörítéséhez az alapanyag kiválasztásánál célszerű odafigyelni az alapanyag származási helyére.



2.9. ábra Faanyag ideális szálszerkezete hajlításhoz (a) és a megengedhető ferdeszálúság (b)

Az alapanyag lehet körfűrészszel készült, vagy gyalult felületű. Lényeges, hogy merőlegesek legyenek egymásra a faanyag oldallapjai (2.9.a ábra) (Buchter és tsai. 1993). Nagyon fontos figyelembe venni, hogy a faanyag méretei és alakja is változhat a tömörítést megelőző rostlágýtás során létrejövő nedvességtartalom-változás hatására. A rostirányú tömörítés szempontjából az alapanyag bármilyen keresztmetszetű lehet a megfelelő megtámasztást alkalmazva (Thomassen és tsai. 1990). De figyelembe kell venni a tömörítő berendezést, mert a tömörítendő faanyag alakját és méreteit minden esetben ez határozza meg. Napjaink ipari berendezései többféle keresztmetszetű (pl. 80x120 mm, 100x120 mm) és akár 3 méter hosszúságú faanyagokkal dolgoznak (Buchter és tsai. 1993, Bátori 2000). Lehetőség van az alapanyag kötegelt tömörítésére is, de csakis azonos fafajú anyagok kerülhetnek a gépbe, amelyek kitöltik a tömörítő kamrát, mintha egy anyag volna benne. A felosztás keresztmetszeti- és hosszirányban is lehetséges.

### 2.3.3. Nedvességtartalom

Az alapanyag kiindulási nedvességtartalma fontos tényezője a tömörítési folyamatnak, és két fő részre lehet osztani. A szabad víz a sejttöregekben található, míg a kötött víz a sejtfalakhoz kapcsolódik. Az állapotot, amikor a faanyag a lehető legtöbb kötött vizet tartalmazza, de a sejttöregekben nincs szabad víz, rosttelítettségi pontnak nevezzük (fiber saturation point, *FSP*) (Niemz és Sonderegger 2017). A nedvességtartalom (moisture content, *MC*) a minta abszolút száraz tömegéhez képest százalékosan van megadva (Bak 2012). Bár a különböző fafajok *FSP*-je széles skálán mozog, például az akácnak 19,5%, a tölgynek 24,5% és a bükknek 35,6%, a gyakorlatban általánosan 30%-nak szokták venni (Molnár és tsai. 2000). Buchter és tsai. (1993) szerint élőnedves, de minimum 16% nedvességtartalmú faanyag szükséges a rostirányú tömörítéshez, mely a megelőző gőzöléssel kb. 25%-ra módosul. Ha gőzölés során a túl alacsony *MC* megemelkedik, a minta méretei megnövekednek és alakilag torzulhat, ezzel tömörítésre alkalmatlanná válhat (Buchter és tsai. 1993, Báder és Németh 2016). Kuzsella (2011) megállapítása szerint a rosttelítettségi ponttól 2-8%-kal (*MC*%) alacsonyabb nedvességtartalmú faanyag alkalmas rostirányú tömörítésre. Szabó (2002), Szabó és tsai. (2005) és Rasmussen (2014) hasonló megállapításra jutottak, 20-25% közötti nedvességtartalmú faanyagot ajánlanak. Sandberg és Navi (2007) 25% nedvességtartalmat ajánl. Deibl és tsai. (1999) a tömörítéshez nyers, élőnedves állapotú fűrészárut javasolnak, melynek nedvességtartalma gőzölés közben rosttelítettség közeli állapotba áll be. Kuzsella (2011) a 32% nedvességtartalmú akácfát sikertelenül próbálta tömöríteni, viszont 20-25% közötti nedvességtartalommal már a 7,5% és a 15% tömörítési arány is gond nélkül alkalmazható volt.

A rostirányú tömörítéshez magas minőségű, egységes felépítésű és egészséges keménylombos alapanyag szükséges. A kezelés hatására a sugár- és rostirányok síkjában, valamint a húr- és rostirányok síkjában egyaránt jelentősen javul a hajlíthatóság. Az egyenetlen élek, repedések, íves növekedés, csavarodottság, álgesztesség, göcsösség a tömöríthetőséget kizáró fahibák. Tömörítéshez a rosttelítettség körüli nedvességtartalom a legideálisabb.

## 2.4. Módszerek

### 2.4.1. Rostlágvitás

A rostirányú tömöríthetőséget a faszajták üreges felépítése biztosítja, valamint hogy plasztifikált állapotban a közepes- és magas sűrűségű lombos fafajok a szerkezetük megváltozásával, de annak tönkremenetele nélkül a rostokkal párhuzamos irányban összenyomhatók (Ivánovics 2008). A bemutatott kezelés három szakaszból áll: rostlágvitás, rostirányú tömörítés és utókezelés. A fa egy higroszkopikus anyag, mivel a környezeti körülményektől függően képes a vizet leadni és felvenni (Báder és Németh 2017b). Amikor a faanyag szobahőmérsékleten magas a nedvességtartalma, a félig kristályos cellulóz és a hemicellulózok gumyszerű állapotban vannak, de a lignin merev marad, ezért a fa nehezen deformálódik (Sandberg és Navi 2007). A hő- és a nedvesség együttes hatására a hemicellulózok és a lignin sokkal érzékenyebbek, mint a cellulóz, ezért a hőmérséklet és a nedvességtartalom emelése növeli a mechanikai anizotrópiát (Kärenlampi és tsai. 2003). A faanyagot lágyítani kell, így a tönkremenetele elkerülhető a tömörítési folyamat során (Ansary 2006, Ivánovics 2006). A rostokat és sejtfalakat összetartó hemicellulózok és lignin szerkezete fellazul (Rowell és tsai. 2005, Abe és Yamamoto 2006) és a faanyag merevségét adó cellulózzrostok el tudnak mozdulni egymáshoz képest a hajlítás (Kovács és tsai. 2006, Navi és Pizzi 2015) és a rostirányú tömörítés során. Németh (2002) szerint a cellulóz áll leginkább ellen a hidrotermikus kezelésnek.

Hő és nedvesség hatására a fában lévő hemicellulóz-cellulóz és lignin-cellulóz kötések felszakadnak (Winkler 1999, Abe és Yamamoto 2006) már 100 °C alatti hőmérsékleten (Alpár 2011, Hofmann 2013). A növekvő MC csökkenti a lignin és a hemicellulózok lágyulási hőmérsékletét (Lenth és Kamke 2001), amely szobahőmérsékleten körülbelül 70-75% relatív páratartalmat (relative humidity, RH) jelent a hemicellulózok esetében (Olsson és Salmén 2003, Engelund és tsai. 2013). A fa bomlása már 100 °C alatti hőmérsékletű gőzölnél megkezdődik, főként a hemicellulózok degradációjával, ami csökkenti a faanyag nyomással szembeni ellenállását (Kollmann és Coté 1968, Abe és Yamamoto 2006). Tovább pontosítva 70 °C körüli hőmérsékletről van szó, magas páratartalom mellett (Yang és tsai. 2007, Poletto és tsai. 2010). Vorreiter (1958) leírja, hogy 90 °C-os gőzölnél már megtalálhatók a kondenzvízben a hemicellulózok maradékai, és Winkler (1999) és Sandberg és Navi (2007) szerint a lignin víz jelenlétében 85-90 °C hőmérsékleten plasztikussá válik. Sitkei (1994) a hemicellulózok minimális lágyítási hőmérsékletének 50 °C-ot, míg a ligninre 90 °C-ot ad meg. A fa maximális plasztikussága 25-30% MC mellett érhető el (Kovács és tsai. 2006), minimum 80 °C hőmérsékleten bükkfa (Lenth és Kamke 2001) és 70-100 °C hőmérsékleten erdeifenyő esetében (Hillis és Rozsa 1978). Hűtés vagy szárítás után a sejteket összekötő középső lamella ismét megszilárdul (Kovács és tsai. 2006).

A gyakorlatban általában 100 °C hőmérsékletű telített gőzt használnak légköri nyomáson, hogy elkerüljék a faanyag kiszáradását a rostirányú tömörítés előtti melegítés során (Kuzsella és Szabó 2006, Sandberg és Navi 2007, Ivánovics 2008, Rasmussen 2014). A lágyítás idejének elegendőnek kell lennie ahhoz, hogy az anyag teljes keresztmetszete átmelegedjen, ami kb. 2 perc időt vesz igénybe anyagvastagsági milliméterenként (Stevens és Turner 1948, Peres és tsai. 2013). A Holzveredelung (1926b) javaslatokat tesz a tömörítés előtti plasztifikálás gyorsítására, melyet minden esetben vákuum segítségével tart

megvalósíthatónak. Megállapítja továbbá, hogy vákuumot alkalmazva a faanyag különböző szerkezeti egyenetlenségeiből származó eltérő lágyítása lényegesen csökkenni fog, következésképpen tömörítést követően egyenletesebben hajlítható lesz. Thomassen és tsai. (1990) szerint a fa részleges tömörítése szakaszos rostlágyítással, vagy az összenyomás során a melegítés szakaszonkénti változtatásával is elérhető. Összegezve, **a fát általában teljes hosszában egyenletes gőzölésnek vetik alá és minimálisan 80 °C hőmérséklet megtartása szükséges az anyag teljes hosszában és keresztmetszetében a rostlágyítás és a tömörítés folyamán.**

#### **2.4.2. Rostirányú tömörítés**

A rostirányú tömörítés lényege, hogy az a keresztmetszet változása és a faanyag görbülése és kettétörése nélkül, a hossz tengely mentén történjen (Kuzsella és Szabó 2006). A faanyagot tömörítés közben oldalról meg kell támasztani a kihajlás megakadályozására (Blankenstein 1956, Szabó 2002). Tömörítés után fokozatos nyomáscsökkentéssel a rugalmas deformáció kiegyenlítődik az anyagban, végül a tömörítés fokától függő, maradandó hosszcsökkenés figyelhető meg. Ideális tömörítés során a hossz mentén minden szakasz alakváltozása azonos mértékű, nagyobb tömörödéskor kisebb változékonysággal, és a faanyag tönkremenetele nem kezdődik meg a leggyengébb helyen. A nagyobb mértékű tömörítéshez nagyobb nyomófeszültség szükséges, így a kevésbé tömörödött részek, melyeknek adott tömörítési arány eléréséhez nagyobb nyomófeszültségre van szükségük, szintén elszenvedik a többi résznél már korábban létrejött tömörödést (Ivánovics 2012).

Általában 10-30% tömörítési arányt alkalmaznak a minta eredeti hosszához viszonyítva (Buchter és tsai. 1993, Komáromy 1999, Szabó 2002, Szabó és tsai. 2005, Sőregi 2007). Ivánovics (2012) szerint ez az arány 10-25%, Vorreiter (1949) szerint pedig 10-20%. Sparke (1989) és Sandberg és Navi (2007) egyértelműen 20% tömörítési arányt adnak meg. Az elérhető legnagyobb tömörítési arány legfeljebb 25-28% lehet, utána egy vagy több helyen nem kívánt károsodásokat szenved és tönkremegy a faanyag (Ivánovics 2012). A lágyított faanyag tömöríthetőségi aránya legnagyobb részben a fafajtól (sejtszerkezet, sűrűség, stb.) és a végtermékkel szemben támasztott követelményektől függ (Thomassen és tsai. 1990).

A rostirányú tömörítés sebessége a termelékenység és a minőségi kihozatal szempontjából egyaránt fontos. Az iparból származó adatok szerint max. 3 méter hosszúságú alapanyag 20%-kal kisebbre tömörítésénél jellemzően 60-80 mm/min tömörítési sebességet alkalmaznak (Buchter és tsai. 1993, Bátori 2000, Sőregi 2007, Dienes 2013, Rasmussen 2014, Compwood 2019b).

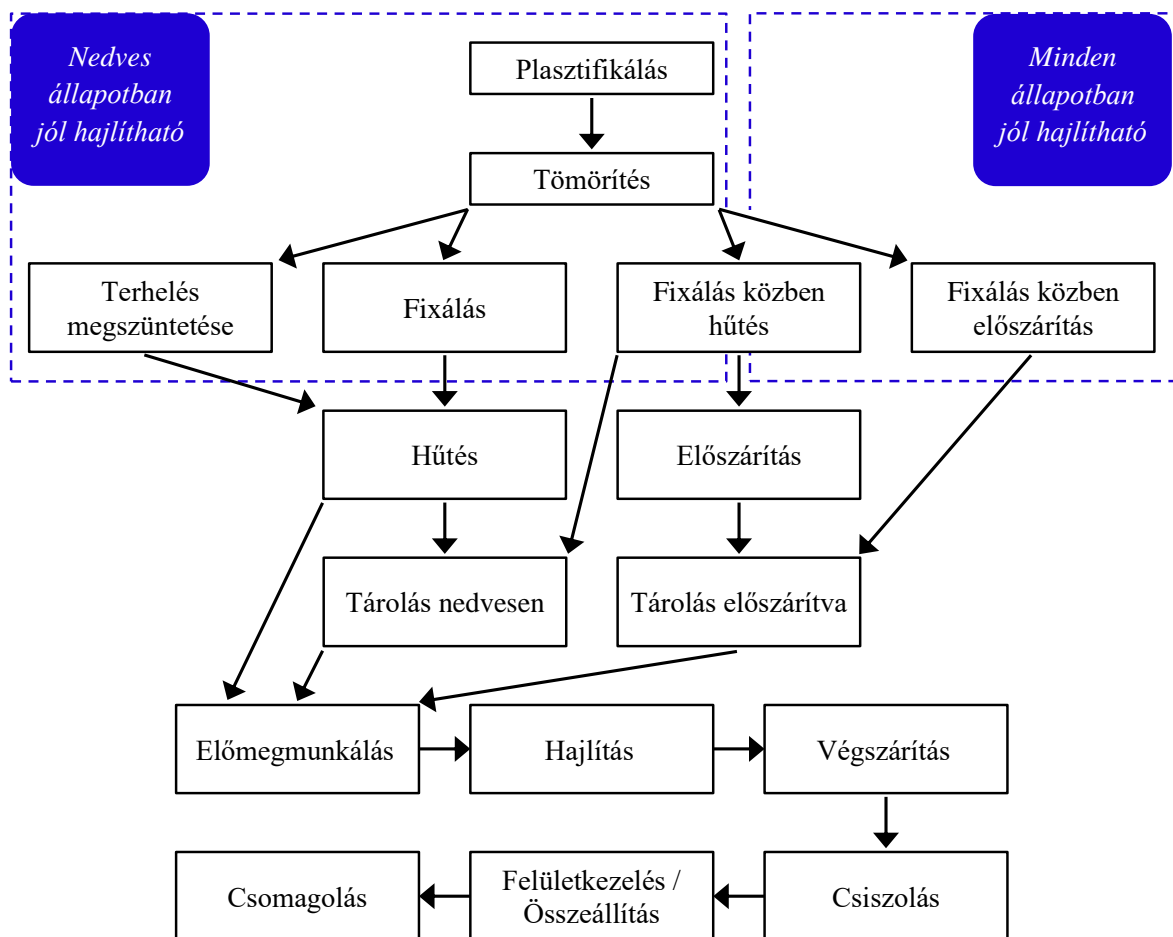
A faanyagok 20% mértékű tömörítéséhez szükséges legnagyobb nyomás Thomassen és tsai. (1990) szerint elérheti a 35 MPa értéket, míg Dienes (2013) munkájában 25 MPa nyomást említ ugyanerre a géptípusra vonatkozóan. Bátori (2000) az Olaszországban működő berendezésnél 42-50 MPa maximális nyomást jegyzett fel, míg a laboratóriumi gépnél 12-20 MPa nyomás jelentkezik, az alkalmazott tömörítési sebességtől és a kezelésnek alávetett fafajtól függően (Báder és Németh 2017c).

#### **2.4.3. Utókezelés, szárítás, megmunkálás**

Az utókezelés a tömörítési folyamat végső szakasza, amely sokféleképpen elvégezhető. A teljes rostirányú tömörítési folyamatnak a vázlatos áttekintése – beleértve az utókezelést is – a 2.10. ábrán látható.

Rostirányú tömörítést követően a tömörítő erőket azonnal megszüntetve (2.10. ábra bal oldal) az anyag visszazugózik és 3-5% – Bátori (2000), Szabó és tsai. (2005), Kuzsella (2011) és Báder és Németh (2017a) szerint 3-10% – maradandó rövidülést szenved. Ez a tömörödési fok, ami az összenyomás nagyságától függ (Szabó és tsai. 2005, Sandberg és Navi 2007, Sandberg és tsai. 2013). Tömörítés után a faanyag rögtön alkalmas a hajlításra, de szükség szerint tárolható is (Sparke 1989). Amíg 20% felett van a nedvességtartalma, megtartja alakíthatóságát (Komáromy 1999, Szabó és tsai 2005, Compwood 2008, Ivánovics

2012). Ugyanerre Vorreiter (1949), Kollmann (1955), König (1972), Heisel és Eggert (1990), Ivánovics (2005) 15%-ot adnak meg, míg Vorreiter (1958), Buchter és tsai. (1993), Bátori (2000), Szabó (2002), Conradsson (2007), Kamke (2014) 25%-ot. Graf 1932-ben megjelent könyve szerint a gyártó a rostirányban tömörített faanyagot 39% nedvességtartalommal szállítja a megrendelőinek (Kollmann 1951). Vorreiter (1949) továbbá leírja, hogy a tömörített faanyag 15% feletti nedvességtartalommal közel plasztikus tulajdonságokkal rendelkezik. Ez alatt a nedvesség csökkenésével együtt rohamosan romlik a hajlíthatósága és 0-5% nedvességtartalom között ridegebbé válik a kezeletlen faanyagnál, gyakorlatilag nem hajlítható. Báder és Németh (2019a) vizsgálatai kimutatták, hogy a tömörített faanyag hajlíthatósága rosttelítettséghez közeli állapotban a legjobb, tehát fafajtól függően körülbelül 20-35% nedvességtartalom javasolt. A tömörített faanyag száradása fagypontra tárolva akár 12 hónapon át megelőzhető, vagy sötét helyiségben műanyag fóliába csomagolva 6 hónapig raktározható (Buchter 1993, Szabó 2002, Compwood 2008). A faanyagot védeni kell penésztől és gombáktól, melyek színeltérést és egyéb károsodásokat okozhatnak (Buchter 1993, Kuzsella és Szabó 2006). A nedvesen tárolt tömörített faanyag rosszul viseli a közvetlen napsugárzást (Kuzsella és Szabó 2006, Compwood 2008).



2.10. ábra Napjainkban a rostirányú tömörítési eljárásnál alkalmazott folyamatok a száraz és nedves állapotban is jól hajlítható, ill. a csak nedves állapotban jól hajlítható faanyagokra

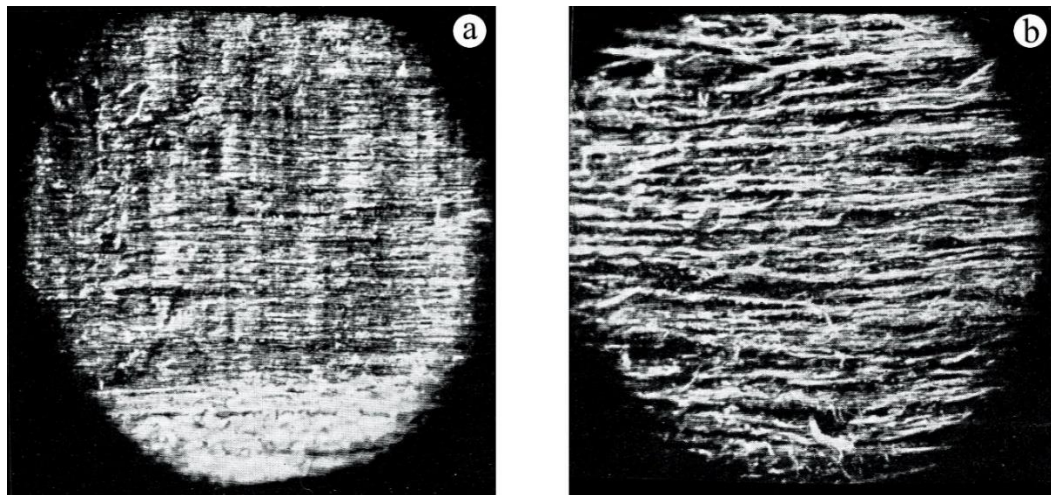
A tömörített faanyag a kívánt formára hajlítást követő rögzítés és szárítás során megszilárdul, alaktartóvá válik (Thomassen és tsai. 1990, Szabó 2002, Kuzsella és Szabó 2006). A nagyon kis sugarú hajlításokat közvetlenül a préselés után, melegen célszerű elvégezni (Ivánovics 2005). Beépítéskor lehetőség van kis korrekciókra, a hajlítási sugár kismértékű változtatására (Deibl és tsai. 1999). A faanyag már gőzölés és szárítás után is jól

megtartja a beállított alakot, azonban a készre hajlított faanyagot újranedvesítve az jelentős részben visszanyeri eredeti alakját, melyet memória-hatásnak nevezünk (Gorbacheva és tsai. 2016). A faanyag rostirányú tömörítése után rövidüléscsökkenés, visszarugózás tapasztalható: a tömörítés befejeztével a tömörítő erőket azonnal megszüntetve a még forró és nedves faanyag csupán kismértékű maradandó rövidülést szenved. Azonban a fát tömörítést követően tömörített állapotában tartva – amit fixálásnak nevezünk – a maradandó rövidülés sokkal nagyobb lesz. **Ha a nyomvatartási idő alatt a faanyag lehül, akkor a faanyag a rugalmassági modulusából jelentős mértékben veszít, még hajlékonyabb lesz a kezelés befejeztével.** A fát a fixálás során hűtve és esetleg szárítva akár a teljes rövidülését megőrzi (2.10. ábra jobb oldala) és az így kezelt faanyag mindig hajlékony lesz (Thomassen és tsai. 1990, Deibl és tsai. 1999, Compwood 2001, Kovács és tsai. 2006). Az ilyen módon előállított alapanyag Sparke (1989) szerint 6-8%, Bátori (2000) szerint 15% nedvességtartalommal tárolható, ebben az állapotban a biotikus károsítók többsége már nem aktív.

A viszonylag időigényes tömörítési folyamat kiválóan beilleszthető az ipari termelési sorba, természetesen a metódus és a termék tulajdonságainak figyelembevételével. A 2.10. ábrán feltüntetett nedves állapotban jól hajlítható rostirányban tömörített faanyag és a minden állapotban jól hajlítható rostirányban tömörített faanyag között lényeges különbségek vannak, de átmeneti megoldások is léteznek, melyek kisebb idő- és energiabefektetés mellett jelentősen módosítják a tömörítés eredményét. Bátori (2000) és Sőregi (2007) szerint a napjainkban használatos ipari technológiával a 3 m hosszúságú faanyagot 2,4 méterre nyomják össze, majd engedik visszarugózni 2,8 méteres méretig, így javítva a félkész termék szilárdsági értékeit. A másik, jelenleg is alkalmazott ipari módszer szerint a faanyagot összenyomott állapotában rögzítik és szárítják, hűtik, majd pihentetik (Bátori 2000). Ezt követően lesz felhasználásra alkalmas a szárazon hajlítható rostirányban tömörített faanyag. A kétszeri tömörítés és minden egyéb tömörítési változat az előzőekben bemutatott két módszer kombinációból rakható össze, azonban ismereteink szerint ilyen jellegű ipari előállítás nem történik. Jó példa erre a Sandberg és Navi (2007) által leírt eljárás, amely a faanyag 20% mértékű tömörítése és 12% nedvességtartalomra szárítása után annak újbóli 20% mértékű tömörítését javasolja, hideg állapotban. A kezelés után a maradandó hosszcsökkenés körülbelül 15%, ami a fa hajlíthatóságának további növekedését eredményezi.

A rostirányú tömörítés és utókezelés után a faanyag megmunkálható és hideg állapotban a kívánt alakúra hajlítható, kezeletlen faanyagokhoz hasonlóan a végső nedvességre szárítható és felületkezelhető (Sandberg és Navi 2007). Ha a kezelés sikeres, a mintán nem látható sérülés (például repedések, megrogyás). A hajlítás egyszerű eszközökkel és sablonokkal megoldható, melyek használatát könnyű megtanulni (Szabó 2002, Anssary 2006). A tömörített faanyag hajlítása kis keresztmetszetek esetén kézzel sem okoz gondot, nagyobb méretű alkatrészek készítésekor a Thonet-technológiából régóta ismert szerszámok és sablonok alkalmazása szükséges. Nedves állapotában a tömörített faanyag esztergálással és csiszolással kitűnően megmunkálható, azonban a rostok felszakadásának veszélye miatt gyalulni rostirányra merőlegesen érdemes (Buchter és tsai. 1993, Conradsson 2007). Továbbá szoros megvezetés szükséges az anyag hajlékonysága miatt (Komáromy 1999, Sőregi 2007). A tömörített faanyag hasításakor a rostok összekuszálódott állapota figyelhető meg (Vorreiter 1949) (2.11. ábra).





2.11. ábra *Bükkfa hasított felületéről készült felvételek kezeletlen faanyag (a) és rostirányban tömörített faanyag (b) esetében (forrás: Kollmann 1955)*

**A tömörített faanyagot a megfelelő formára hajlítva rögzíteni kell (szegeléssel, csavarozással, szorítópofákkal, stb), majd valamely szárítási technológiával nedvességtartalmát 16% alá csökkenteni** (Kollmann 1955, Ivánovics 2005). Vorreiter (1958) 5-8%, König (1972) 4-5% szárítás utáni nedvességtartalmat ad meg, amelyet később a felhasználási helynek megfelelően kondicionálni szükséges. A szárítás a Compwood (2008) szerint általában 60 °C körüli hőmérsékleten történik, Heisel és Eggert (1990) 60-70 °C-ot ad meg néhány órás időtartamra, míg Kollmann (1951), Blankenstein (1956) és Sandberg és tsai. (2013) 80 °C-ot. Kollmann (1955) és König (1972) 70-80 °C hőmérsékletű szárításról ír, aminek következtében a faanyag megőrzi a beállított alakját mindaddig, amíg a nedvességtartalma 15-18% alatt marad. 80 °C feletti hőmérsékletű szárítás esetén a faanyag könnyen vetemedhet (Kollmann 1955). A tömörített faanyag a kezeletlenhez képest intenzívebben végrehajtott és magasabb hőmérsékletű szárítást képes elviselni repedések megjelenése nélkül (Komáromy 1999), mely részben a rostlágításnak is betudható. Deibl és tsai. (1999) szerint a szárítási idő 5%-kal csökken a kezeletlen faanyagéhoz képest. **Száritást és lehűtést követően bármilyen tömörített faanyag kezeletlenként megmunkálható lesz.** Utóbbi megállapítás fűrészelésre, marásra, csiszolásra és felületkezelésre egyaránt értendő (Hanemann 1917b, Sparke 1989, Ivánovics 2005). Heisel és Eggert (1990), valamint Buchter és tsai. (1993) ugyanezt írták le a ragasztásról és a felületkezelésről.

A plasztifikálás és szárítás hatására a technológiából kifolyólag bizonyos fokú hőkezelésen esik át a faanyag, így a jelenleg érvényben lévő ISPM 15 követelményrendszernek eleget tesz, biztosítva a nemzetközi szállítványozáshoz szükséges normát (Báder és tsai. 2015). A termékek nedvességtartalmának emelkedése során alaktartóssági problémák lépnek fel, ezért a rostirányban tömörített faanyag kültéri felhasználásra nem alkalmas. Előállításához és felhasználásához nincs szükség környezetre káros anyagokra (Deibl és tsai. 1999, Szabó 2002), a termék kémiai adalékanyagoktól mentes környezetbarát (Báder és Németh 2019b). Azonban ha a szükséges alkatrész a mérete vagy geometriája miatt nem állítható elő egy anyagból, akkor toldható pl. csapozással. Ekkor ragasztóanyag kerül a végtermékbe, de lényegesen kisebb mennyiségben, mint a hagyományos tömbösített vagy rétegragasztott íves termékeknel. Hasznos információkat nyújthat a tervezők és gyártók számára Conradsson (2007) könyve, melyben a rostirányú tömörítéses eljárással modifikált faanyag felhasználási lehetőségeit és a megmunkálásához használható szerszámokat, gépeket foglalja össze.

## 2.5. Mechanikai, egyéb fizikai és morfológiai tulajdonságok

A mechanikai tulajdonságokat rengeteg körülmény befolyásolja, az eredmények értékeléséhez és összehasonlításához ezekkel tisztában kell lenni. A reklámokban, termékismertetőkből, technológiai leírásokban található ilyen jellegű adatok jellemzően nem tartalmaznak elegendő kiegészítő információt a vizsgálatok körülményeiről, tudományos szempontból nem megbízhatók, ezért az ipari szereplőktől származó adatokat nem vesszük figyelembe ebben az alfejezetben. Egyes publikációk különböző mértékű tömörítések mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgálják. Az egységesség és átláthatóság érdekében a 20% mértékben tömörített faanyagok tulajdonságait mutatjuk be. A nedvességtartalom nagyban befolyásolja a faanyag tulajdonságait, ezért feltüntetjük ahol lehetséges. Ezen kívül legfőbbképpen a faj, faminőség, méretek és a felhasznált eszközök határozzák meg, hogy a tömörített fa felhasználási szempontból nézve milyen alakra és milyen mértékben hajlítható, vagyis milyen tulajdonságokkal rendelkezik (Anssary 2006).

### 2.5.1. Mechanikai tulajdonságok szárított állapotban (rugalmassági modulus, hajlítoszilárdság, húzószilárdság, nyomószilárdság, ütő-hajlító szilárdság)

A rostirányban tömörített faanyag legfontosabb mechanikai tulajdonsága a rugalmassági modulus (modulus of elasticity; *MoE*), amely jól korrelál az anyag hajlíthatóságával (Báder és Németh 2017d). Thomassen és tsai. (1990) és Szabó és tsai. (2005) leírják, hogy a tömörítés csökkenti a fa rugalmassági modulusát. A merevségi tenzor komponensei kismértékben redukálódnak (Szabó és tsai. 2005). További szerzők számszerűsített adatokkal szolgálnak, melyek a 2.1. táblázatban láthatók.

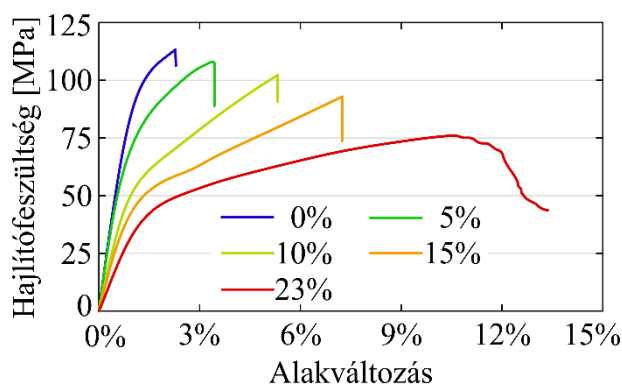
*2.1. táblázat Bükk és tölgy fafajok rugalmassági modulusának (MoE) és hajlítoszilárdságának (MoR) változása a rostirányú tömörítés következtében, a vizsgálati nedvességtartalmak figyelembevételével (MC). Rövidítések: n/a – nincs adat*

<b>Bükk</b>	MoE	MoR	MC
Vorreiter (1949)	-75%	-45%	n/a
Kollmann (1951)	-86%	n/a	18%
Blankenstein (1956)	-86%	-55%	n/a
Buchter és tsai. (1993)	-15%	-10%	5%
Ivánovics (2006)	-68%	-46%	n/a
Kuzsella és Szabó (2006)	-70%	-47%	n/a
Báder és Németh (2017c)	-66%	-47%	n/a
Somogyi (2018)	-55%	-24%	9%
Báder és Németh (2019a)	-46%	-19%	12%
<b>Átlagosan</b>	<b>-63%</b>	<b>-37%</b>	<b>11%</b>
<b>Tölgy</b>			
Kollmann (1951)	-86%	n/a	18%
Blankenstein (1956)	-85%	-55%	n/a
Ivánovics (2006)	-60%	-42%	n/a
Kuzsella és Szabó (2006)	-45%	-17%	n/a
Báder és Németh (2017c)	-59%	-3%	12%
Báder és tsai. (2019)	-63%	-5%	12%
<b>Átlagosan</b>	<b>-66%</b>	<b>-24%</b>	<b>14%</b>



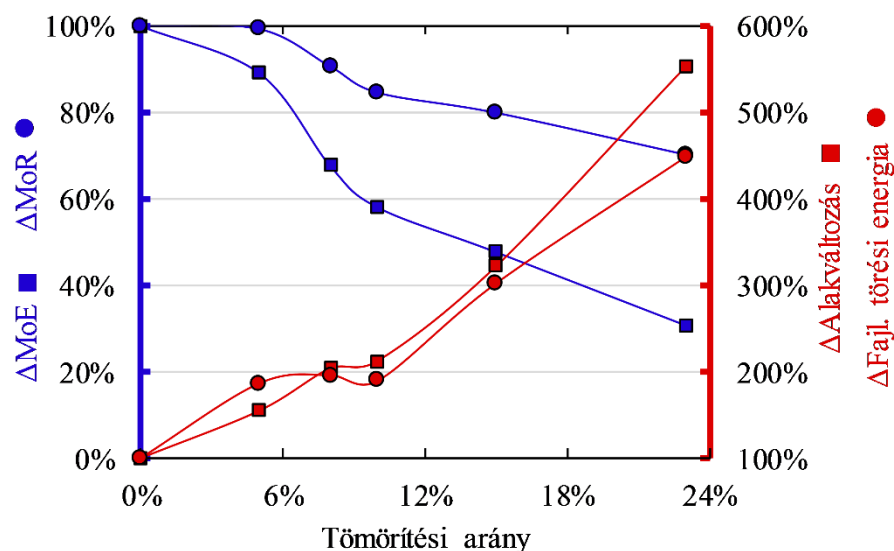
**A  $MoE$  20%-os tömörítés esetén büknél és tölgnél is átlagosan harmadára csökken.**

A juhar tömörítésekor csekélyebb a változás (Blankenstein 1956). A bükk faanyagban az ultrahang terjedési sebességéből megállapított rugalmassági moduluszt sem sugár-, sem pedig húr irányban nem befolyásolja a rostirányú tömörítés (Kuzsella 2011). Azonban a rostirányú statikus és dinamikus rugalmassági modulusok harmadukra, míg a torziós sajátrezgésekből meghatározott rugalmassági modulus harmadával csökkennek (Kuzsella 2011). A bükk hajlítoszilárdsága (modulus of rupture;  $MoR$ ) 20% tömörítetségnél a kezeletlen bükkfához képest több mint harmadával redukálódik, míg tölgy esetén kisebb a változás. A hajítóvizsgálattal mért törésig elviselt alakváltozás a tömörítetlen faanyaghoz képest hozzávetőleg három-négyszeresére nő bükk és tölgy fafajoknál egyaránt, de nem minden esetben törik el a mintadarab (Kuzsella és Szabó 2006, Somogyi 2018, Báder és Németh 2019a). A fixálás az időtartamától függően akár duplázni is tudja a faanyag lehajlási képességét (Báder és Németh 2018a). A feszültség-alakváltozás görbék alatti területek négyszeresükre növekednek, ami a szívós jelleg erősödését mutatja (Kuzsella és Szabó 2006, Kuzsella és tsai. 2011). Szabó és tsai. (2005) vizsgálatai alapján a rostirányban tömörített bükkfa törési munkaigénye háromszorosára növekszik. A tömörített faanyagnál még nagy lehajlás esetén is van szilárdsági tartalék (Kollmann 1951, Szabó és tsai. 2005). Ezt bizonyítják a 2.12. ábra grafikonjai, amelyek különböző mértékben tömörített bükk faanyag hajlítási eredményeit mutatják be.



2.12. ábra Hárompontos hajlítás adataiból készített feszültség-alakváltozás grafikonok, melyek jól reprezentálják a vizsgált tömörítési szinteket (Kuzsella 2011 alapján)

A rostirányú tömörítés mértékének növelésével a rugalmassági modulus csökken, azaz nagyobb alakváltozást képes elviselni az anyag a tönkremenetel előtt, könnyebb alakíthatóság mellett (Kuzsella és tsai. 2011). A növekvő tömörítési aránnyal a grafikonok lineáris szakaszának csökkenő meredeksége vizuálisan jelzi a  $MoE$  csökkenését (2.12. ábra). A  $MoR$ , a  $MoE$ , az alakváltozás a legnagyobb hajlítófeszültség pillanatában és a fajlagos törési energia átlagos változásai az 2.13. ábrán láthatók.



2.13. ábra Kezeletlen faanyaghoz viszonyított különböző tömörítettségi fokú bükk minták átlagos eredményei a hárompontos hajlítóvizsgálatból (Kuzsella 2011 alapján). Rövidítések:  $\Delta$ Alakváltozás – alakváltozás a legnagyobb hajlítófeszültség pillanatában;  $\Delta$ Fajl. törési energia – fajlagos törési energiának a változása

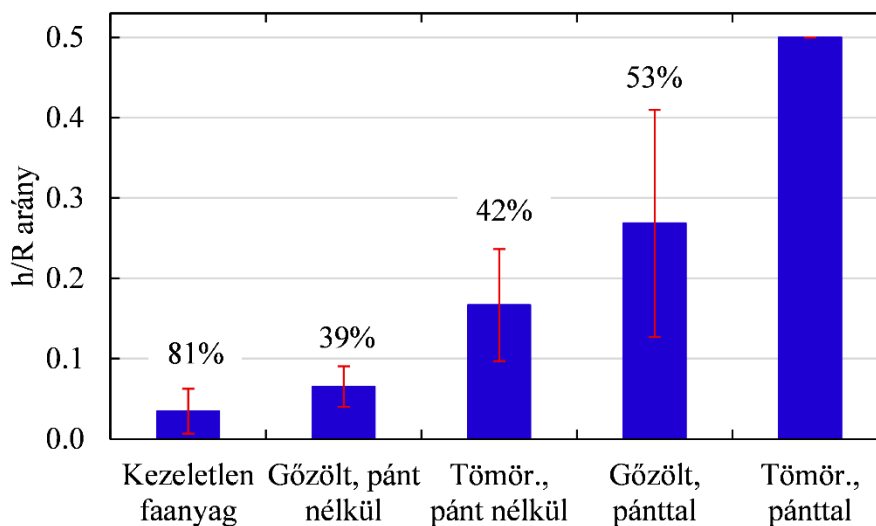
Segesdy (2003) a nedvesen hajlítható tömörített bükkfa sugár- illetve húr irányú mechanikai eredményeinek különbségeit vizsgálta, mely alapján a rugalmassági modulus anatómiai irányok közti különbsége száraz állapotban 7,5%, a hajlítószilárdságé 5,8% lett az LR síkban történő hajlítás javára.

A húzószilárdság bükk fafaj 15% mértékű tömörítése esetén 36%-kal csökken, valamint a húzórugalmassági modulus a felére csökken, míg a szakadási nyúlás 96%-kal növekszik (Sadatnejad és tsai. 2008). Ebből is látszik, hogy amint Báder és tsai. (2015) leírták, a tömörített faanyag lényegesen nagyobb alakváltozást képes elviselni a húzott oldalon. Heisel és Eggert (1990) szerint hajlítás során a külső ív megnyúlása olyan mértékben lehetséges, amekkora mértékben rövidült a faanyag a tömörítés hatására. Ennek és a tömörített bükk faanyag 5-10%-kal nagyobb hasítóerő igényének (Vorreiter 1949) magyarázatára a későbbiekben térünk vissza (2.5.3. fejezet). A rostirányú nyomószilárdság átlagosan 7%-kal csökken a kezeletlen faanyagéhoz képest (Vorreiter 1949, Buchter és tsai. 1993, Báder és Németh 2019a), a törés helyén azonban mindig a nyomás irányára merőleges erős gyűrődések jelennek meg (Kollmann 1951). Sajnos e témában a szakirodalomban nem sikerült további információkat fellelni.

Kuzsella (2011) megállapította, hogy a bükk 23%-os rostirányú tömörítésének hatására a fajlagos ütőmunka (karman critical velocity; *KCV*) kétszeresére növekszik. A *KCV* Szabó és tsai. (2005) szerint 68%-kal, Ivánovics (2006) szerint 191%-kal növekedett bükk faanyag esetében, míg 73%-kal tölgy faanyag esetében. Az elviselt alakváltozás, az üto-hajlító szilárdság és a *KCV* – azaz a faanyag szívóssága – a rostirányú tömörítésnek köszönhetően jelentősen javul (Kuzsella és tsai. 2011). Az akusztikusan vizsgált logaritmusos dekrementum értéke akár négyszeresére növekszik, ami bizonyítja, hogy a rostirányú tömörítés hatására a bükk faanyag viszkoeasztikusabb viselkedést mutat (Kuzsella 2011). Két távolabbi mutató megállapítás Kuzsella (2011) tollából, hogy az ultrahang terjedési sebességének meghatározása, vagy a logaritmusos hullám sajátfrekvenciájából megállapított rugalmassági modulus meghatározása alkalmas lehet a tömörítési szint megállapítására. A módszerek nagy segítséget jelenthetnek az egyenletes tömörödöttség ellenőrzésében. Továbbá általánosságban elmondható, hogy a mérési eredmények relatív szórása a tömörítés hatására növekszik (Ivánovics 2006, Kuzsella 2011, Báder és Németh 2018a).

### 2.5.2. Fizikai tulajdonságok szárított állapotban (hajlítási viszonyszám, sűrűség)

Az elérhető legnagyobb alakváltozás legegyszerűbben a belső íven mért legkisebb hajlítási sugárral határozható meg, mely nagyon sok tényezőtől függ. Főként az alkatrész keresztmetszete, fafaj, anyagminőség, tömörítési fok, a hajlításnál alkalmazott sablon és szerszám befolyásolják. Mindegyik, a témával foglalkozó publikáció egyetért abban, hogy a tömörítés lényegesen csökkenti a minimális hajlíthatósági sugarat és a hajlítási végerőt. Azonban nagy keresztmetszetek hajlításához tömörített faanyag esetében is jelentős erők szükségesek (Szabó 2002). A tömöríthetőség és a hajlíthatóság a sejtszerkezettől függ, ezért fafajonként változó (Szabó 2002). A hajlítási viszonyszám, melyet szokás hajlíthatósági együtthatónak nevezni ( $h/R$  arány, vagy  $k_{bend}$ ) egy méretektől független jellemzője az anyagnak, ami alapján adott vastagsághoz ( $h$ ) a technológiailag biztonságosan alkalmazható legkisebb hajlítási sugár ( $R$ ) számolható és a minták tönkremeneteli aránya nem több, mint 5% (Stevens és Turner 1970). A  $k_{bend}$  egyszerre jellemzi az alakíthatóságot és az energiaelnyelési képességet, valamint fordított kapcsolatban van a rugalmassággal. A tömörítés mértékének növelésével javítható a  $k_{bend}$  (Kuzsella 2011). A 2.14. ábra bemutatja a bükknél elérhető hajlíthatósági együtthatókat szobahőmérsékleten, nedves állapotban.



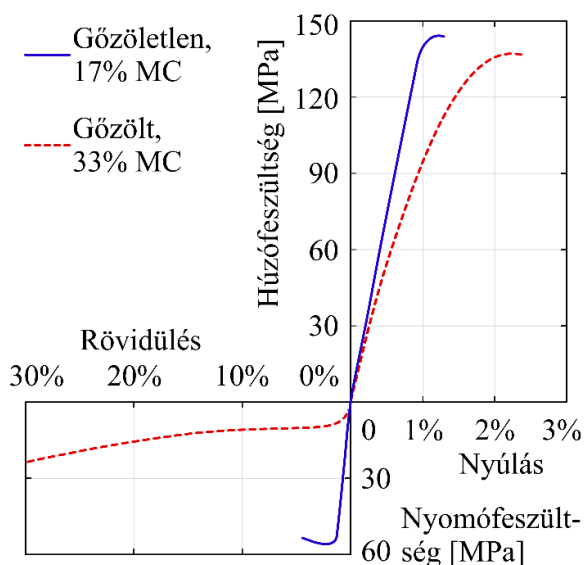
2.14. ábra 25 mm vastagságú bükkfa hajlítási viszonyszámai különböző eljárásokkal. A vonatkozó relatív szórások a diagramoszlopok felett láthatók (forrás: Kollmann 1955, Bennett 1956, Vorreiter 1958, Stevens és Turner 1970, Heisel és Eggert 1990, Bakos 1993, Deibl és tsai. 1999, Ivánovics 2005, Szabó és tsai. 2005, Sandberg és Navi 2007, Kuzsella 2011, Dienes 2013, Sandberg és tsai. 2013). Rövidítések: pánt – hajlítószalag; Tömör. – rostirányban tömörített

A 2.14. ábrán bemutatott  $k_{bend}$  átlagok alapadatai közötti eltérések a különböző szerkezetű bükk faanyagokon különböző beállításokkal, segédeszközökkel elvégzett kísérleteknek tudhatók be. Abban azonban egységesek, hogy a tömörítés hatására lényegesen javul a hajlíthatóság. Tömörítés után a klasszikus gőzöléses eljárásnál jobb hajlítási viszonyszámokat lehet elérni, valamint a rostirányban tömörített faanyag már nem csak plasztifikált állapotában alakítható. **A korábban csak hajlítószalag alkalmazásával, forró állapotban előállítható ívek tömörített faanyag felhasználásával szobahőmérsékleten, akár hajlítószalag használata nélkül is elérhetővé válnak.** A lényegesen nagyobb  $k_{bend}$  bővíti a felhasználási lehetőségeket. Érdemes továbbá megjegyezni, hogy Dienes (2013) a téglalap és kör keresztmetszetű anyagok hajlíthatósága között jelentős eltéréseket talált. Vorreiter (1958) tanulmánya szerint a  $k_{bend}$  a vastagság növekedésével kissé csökken. A gyűrűlikacsú fajok könnyebben alakíthatók, mint a szórtlikacsú fajok.

Egy napjainkban kihasználatlan módszer a faanyag korábban már bemutatott kétszeri rostirányú tömörítése (Sandberg és Navi 2007). Ezen kezelést követően a leírtak szerint például a 25 mm vastagságú bükk faanyagot hideg állapotban 100 mm-es sugárra lehet hajlítani pántszalag használata nélkül, tehát lényegesen jobb eredmény érhető el vele. Kuzsella (2011) szerint a különböző fokú tömörítések után visszarugózott hasábok hosszának és keresztmetszetének módosulása megközelítőleg kiegyenlíti egymást, minek következtében a sűrűség változása nem nevezhető szignifikánsnak.

### 2.5.3. Sejtszintű változások: redőződés és hajlítási nyúlás kapcsolata

A hajlítás során keletkező feszültségeket két fő részre lehet bontani: nyomó igénybevétel lép fel a konkáv oldalon és húzó igénybevétel a konvex oldalon (Peck 1957, Vorreiter 1958, Bakos 1993, Gaff és tsai. 2016). A kettő közti határvonal a semleges szál (Vorreiter 1958). Húzó igénybevétel esetén nagyobb ellenállást képes kifejteni, de kisebb alakváltozást tűr el a faanyag (Hanemann 1917b, Vorreiter 1958, Gaff és tsai. 2016) (2.15. ábra).

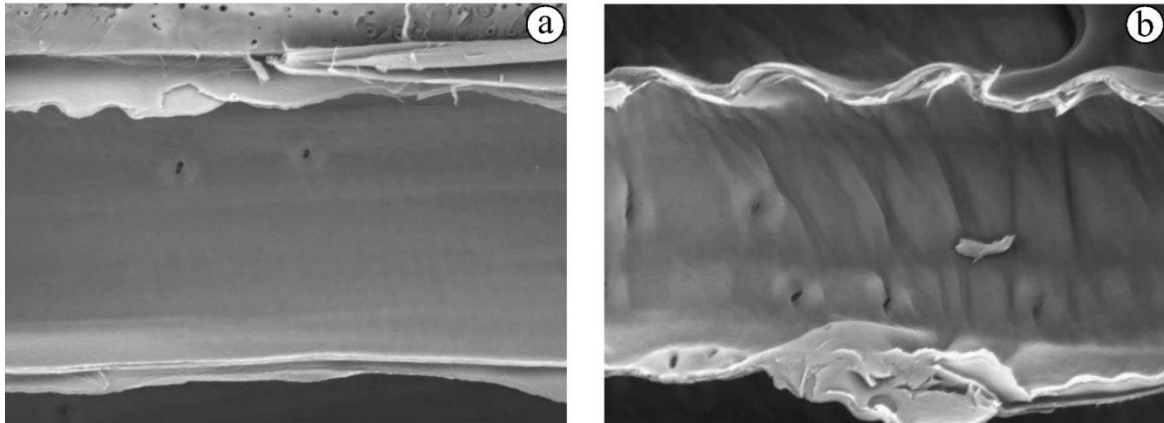


2.15. ábra Bükk fafaj feszültség-alakváltozás grafikonja (Kollmann 1955 alapján)

Repedés- és törésmentes hajlításhoz a semleges szálát minél közelebb kell vinni a húzott oldalhoz, például acél hajlítószalag alkalmazásával, amely hajlítás közben nem engedi nyúlni a faanyagot (Peck 1957, Vorreiter 1958). Ha a teljes keresztmetszet mentesül a húzó igénybevétel alól, nem fog a húzófeszültség miatt tönkremenni a faanyag a hajlítás során. A rostirányú tömörítés hatására a faanyag szerkezete módosul, mely a mechanikai és az egyéb fizikai tulajdonságok megváltozását okozza (Ivánovics 2012). A fa rostirányú merevségét biztosító rostok és egyéb alkotók helyzete és alakja megváltozik, de felépítésük változatlan marad (Vorreiter 1949, Ivánovics 2012). Deibl és tsai (1999), Compwood (2001) és Kovács és tsai (2006) leírása szerint rostlágnyítás után a fa rostirányban összenyomhatóvá válik és az eljárás a fa sejtfalainak kihajlását okozza. A különböző mértékű tömörítések által okozott mikroszkopikus elváltozások vizsgálatai kimutatták, hogy a bükkfában már a 15%-os tömörítési arány eléréséig az edények 98%-nak a sejtfala meggyűrődik (Kuzsella 2011). Az edény gyűrődéséről készült pásztázó elektronmikroszkópos (scanning electron microscope; SEM) felvételek mutatják legjobban a fa szerkezetének változását tömörítés hatására (2.16.a és b ábra).

Számos szerző szerint a sejtfalak a tömörítés után (2.16.b ábra) egy tangóharmonika félig zárt légszekrényének redőire, vagy egy félig leengedett pliszé árnyékolóra hasonlítanak (Hanemann 1920, Stevens és Turner 1948, Sandberg és Navi 2007, Szabó és tsai. 2005, Kuzsella 2011, Báder és Németh 2018a). A rostirányú tömörítési folyamatnak Navi és Pizzi

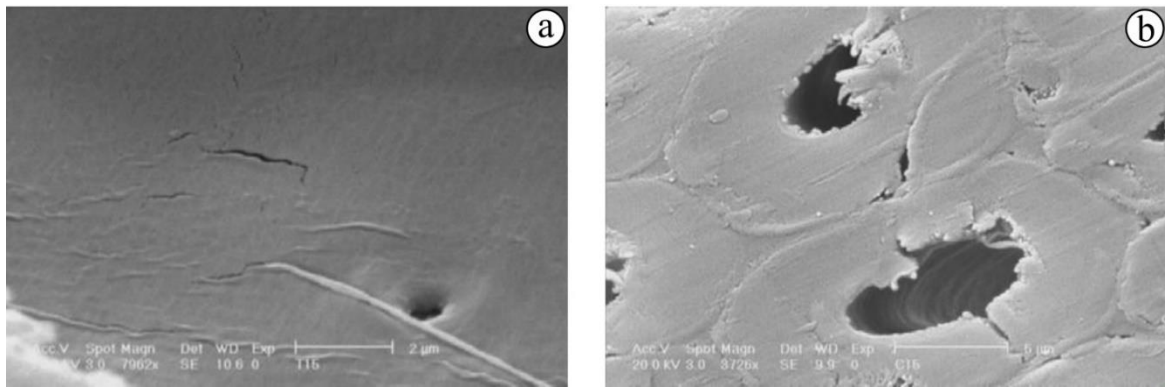
(2015) angolul a „crushing”, azaz „összezúzás” nevet adta, de a fa rostjai és az edények valójában nem törnek össze olyan mértékben, ahogyan a „zúzás” szó jelzi. Ha a szerkezet és a tulajdonságok a modifikációs folyamat elvárásainak megfelelően változnak, a faanyag felhasználható marad. Emiatt egy sokkal precízebb és a jelenséget jobban leíró név az angol „pleating”, azaz „redőzés, fodrozás” (Báder és Németh 2018a). A megnevezés szempontjából elengedhetetlen, hogy a faanyag rostirányú tömörítése ne legyen összekeverhető a 2.1. fejezetben ismertetett angol „densification”, azaz „sűrítés” fogalommal.



2.16. ábra Páasztázó elektronmikroszkóppal készült képek bükkfa kezeletlen (a) és rostirányban 23% mértékben tömörített edényéről (b) (Kuzsella 2011 alapján)

**Hajlításkor a gyűrött sejtfaalak egyenesedni tudnak, azaz tartalékkal rendelkezik a kezelt faanyag** a kezeletlenhez képest, még jóval nagyobb mértékű alakváltozást is elvisel (Ivánovics 2006). Hanemann (1920) szabadalmában már megjelent ez a tény, valamint Sadatnejad és tsai. (2008) adatai is bizonyítják, hogy kisebb húzófeszültség alkalmazása mellett lényegesen nagyobb nyúlást lehet elérni a kezeletlen faanyaghoz képest. Vorreiter (1949) eredményeit a tömörített faanyag magasabb hasítóerő igényével kapcsolatban a hosszanti sejtek gyűrődései és helyzetük megváltozása magyarázza. A nem csupán párhuzamosan futó, hanem keresztbe is menő rostokat nehezebb elválasztani egymástól (2.11. ábra).

A sejtfaalak tehát megváltozik, de nem megy tönkre, ezzel biztosítva a faanyag állandó tulajdonságait (Vorreiter 1949, Sparke 1989). Ivánovics (2012) arra a következtetésre jutott, hogy a rostkötegek a plasztifikált mátrixban elmozdulnak, esetleg sejtek közti repedések is megjelenhetnek. A sejtek elcsúsznak a szomszédos sejtfaalak mentén és a sejtfaalak megvastagodnak. Mindkét változás a keresztmetszet növekedését eredményezi, továbbá az anyag sejtüregebe való benyomódása is megtörténik. Hasonló következtetésre jutott korábban Stevens és Turner (1948) is, miszerint számos csúszási sík vagy kezdeti nyomó meghibásodás megfigyelhető, de az anyag egészét nézve nem fordul elő törés, szakadás vagy szétbomlás. Sadatnejad és tsai. (2008) SEM képei a sejtfaalak szakadását mutatják (2.17. ábra). **A tömörítés a sejtfaalakban és a sejtfaalközi térben repedéseket hoz létre**, a folytonosság megszakad, ami gyengíti a sejtek egymáshoz kötődését és ellenállását a fellépő erőhatásokkal szemben, egy flexibilis és instabil állapotot hozva létre. A mikroszkopikus repedések a szárítás során kiterjednek, ami lehetővé teszi a sejtek könnyebb és szabadabb mozgását. A húzóvizsgálatoknál tapasztalt változások (kiseb húzófeszültség mellett lényegesen nagyobb alakváltozás) bizonyítják a cellulózláncok törését és a mátrix összefüggésének megszűnését (Sadatnejad és tsai. 2008).



2.17. ábra Pásztázó elektronmikroszkóppal készült képek a rostirányban 15% mértékben tömörített bükkfa sejtfalának belső felületéről (20 kV x7962; a) és a sejtek keresztmetszetéről (20 kV x3726; b) (forrás: Sadatnejad és tsai. 2008)

Ivánovics (2012) szerint **a nagymértékű tömörítés hatására végbemenő változások a sejszintű, és utána szabad szemmel is láthatóvá váló tönkremenetel, amely mikroszkopikus méretű repedésekkel, elcsúszásokkal kezdődik.** Kánnár (2014) nyomóvizsgálatoknál figyelt meg hasonló roncsolódásokat: a hosszanti sejtek rövid szakaszon kihajlanak, esetleg nyírási alakváltozást szenvednek. A terhelés növekedésével ezek kiterjednek az egész keresztmetszetre, melyet a sejtfa tönkremenetele (szakadása, felrepedése, réteg-elválása) kísér. Az alakváltozást tovább növelve egyre több keresztmetszet megy tönkre állandó rostirányú feszültségérték mellett. Végül a rostok és bélsugarak határfelületein is megkezdődik a szemmel látható elválás.



### 3. Alapanyagok, eljárások, eredmények és értékelés

#### 3.1. Mintatestek

A Soproni Egyetemen használt tömörítő berendezés laboratóriumi eszköz, a kutatásokhoz megfelelő, de korlátozott befogadó-kapacitással. **Az alkalmazható kiindulási mintaméretetek 20×20×200 vagy 20×30×200 mm.** A berendezés a kialakításából adódóan kisebb méretbeli eltéréseket képes tolerálni, ami keresztirányban lehet elsősorban érdekes a faanyagok zsugorodása-dagadása miatt. A 20×20, vagy 20×30 mm faanyag keresztmetszeteknél legalább ±0,5 mm eltérés lehetséges, e túrően belül a minták tömörítése nem ütközik méretbeli akadályba (Karl 2015, Báder és Németh 2017d, Báder és Németh 2019b). Hosszirányban lényegesen nagyobb mérethibák sem okoznak gondot, bár a 200 mm hosszról való jelentős eltérés esetén a gép vezérlőprogramját módosítani szükséges. A manapság alkalmazott alapvető asztalosipari eljárásokat használva a minták gyártása során a megadott hosszról való max. 1 mm (0,5%) eltérés könnyedén megvalósítható.

Az alapanyag kiindulási nedvességtartalma rendkívüli jelentőséggel bír. A kisebb vízmennyiséget tartalmazó próbatesteknél sok esetben rostsztérválások jelentek meg a tömörítések során (3.1.a ábra). Továbbá a túl alacsony nedvességtartalom a gőzölés folyamán emelkedik, növelve a faanyag méreteit, a vetemedésen túl újabb hibalehetőségeket generálva. A minták oldalirányú méretei a laboratóriumi berendezés esetében kiemelt fontosságúak. A tömörítés közbeni alacsony méret esetén az oldaltartás hiánya miatt károsodhat a próbatest. Túlméret esetén a minta végei lelógnek a nyomófelületekről, sok esetben a 3.1.b ábrán is látható rostirányú repedéseket elindítva a bütüfelületekről. A tömörítési folyamat alatt bekövetkező kihajlások és a laboratóriumi berendezés keresztmetszeti tűréshatára folytán a sík- és térgörbe minták nem tömöríthetőek rostirányban. A rosttelítettséghez közeli nedvességtartalom közvetlenül nem befolyásolta a tömörítések sikerességét. Ez igazolja a szakirodalmi megállapítást, mely szerint a rosttelítettségi állapotnál alacsonyabb nedvességtartalmú faanyag is felhasználható tömörítési célra (Báder 2015a). A plasztifikálásnál elszenvedett vetemedés és keresztmetszeti méretváltozás azonban sokszor volt nehézségek forrása, ami az alacsony kiindulási nedvességtartalomra vezethető vissza. Esetenként nem fért bele a tömörítő gépbe a minta, holott a kiindulási keresztmetszeti méreteik 1 mm-en belüli ingadozással megfelelőek voltak. Utóbbi változékonyságot a tömörítő berendezés képes tolerálni, azonban a nedvességfelvétel okozta jelentős alak- és méretváltozásokat már nem minden esetben (Báder és Németh 2017e).



3.1. ábra Hibajelenségek: minta rostsztérválása és megrogyása tömörítés közben az alacsony nedvességtartalom miatt (a) és túlméretes minta széle lelógott az alátámasztásról a bekarikázott részeken és nem került tömörítésre, ami hasadáshoz vezetett (b) (forrás: Báder és Németh 2017e)

A tömörítési nedvességtartalmat a rostlágyítás határozza meg, melynek során a fanedvesség a kiindulási nedvességtartalom függvényében módosult, csökkent vagy emelkedett (Báder és Németh 2017e). Míg a műszárított, szobaszáraz faanyag megfelelő rostlágyítást követően is csupán minimális kihozattal tömöríthető, azaz gyakorlatilag nem tömöríthető (Buchter és tsai. 1993, Báder és Németh 2018b), addig a légszáraz faanyag rostlágyítás után tömöríthető, bár a rosttelítettség feletti nedvességtartalmú mintákhoz képest gyengébb kihozattal. Ebben szerepe lehet az adott mintán belüli egyenetlen nedvességeloszlásnak is. Például a kutatások során a már a tömörítés előtt megjelenő bütürepedések, vagy akár csak hajszálrepedések a tömörítés hatására minden esetben nagyméretű, hosszanti repedésekké növekedtek (3.2. ábra).



3.2. ábra Kezdeti hajszálrepedésből a tömörítés során keletkező nagyméretű bütürepedés (forrás: Báder és Németh 2017e)

Az első kutatási eredmények tanulságainak levonása után a későbbiekben **a laboratóriumi vizsgálatokhoz élőnedves rönk alapanyagokat dolgoztunk fel, a megfelelő méretű minták kialakítása után azokat fagyasztva tárolva a felhasználásig.** Így biztosítható a nedves faanyag hosszú távon történő, biotikus kórokozók károsítása nélküli tárolása. Egy előzetes összehasonlító vizsgálatunk bizonyította, hogy a fagyasztás a rostirányú tömöríthetőség szempontjából nem okoz változást a mintákban. Azonos tömörítettségi szinten a kihozatalok azonosak voltak, és a hajlítóvizsgálatok sem mutattak ki szignifikáns eltérést. Mivel ennek a vizsgálatnak mindössze az volt a célja, hogy igazolja, hogy a fagyasztva tárolt minták megfelelően használhatók és nem képezi lényegi részét a faanyagmodifikációs eljárásnak, a továbbiakban nem kerül részletezésre. Másrészt élőnedves faanyagot alkalmazva a különböző szárítási módszerek, menetrendek és végnedvességek által okozott eltérések nem befolyásolhatják a vizsgálatok menetét és eredményeit, mert a rosttelítettségi nedvességtartalom feletti tartományban a faanyagok tulajdonságai jellemzően nem változnak (Molnár 2004). A másik lényeges oka a rosttelítettség feletti nedvességtartalmú faanyagok használatának, hogy a szárazabb faanyagok gőzöléssel történő visszanedvesítése során a fára jellemző zsugorodás-dagadási jelenség hatására a méreteik növekednek és az anizotrópia miatt az alakjuk is jelentősen megváltozhat. A tömörítő berendezés befogadóképessége bizonyos határok között mozog, ezért a minták nagyobb mértékű alakváltozásait nem tudja tolerálni (Báder és Németh 2016).

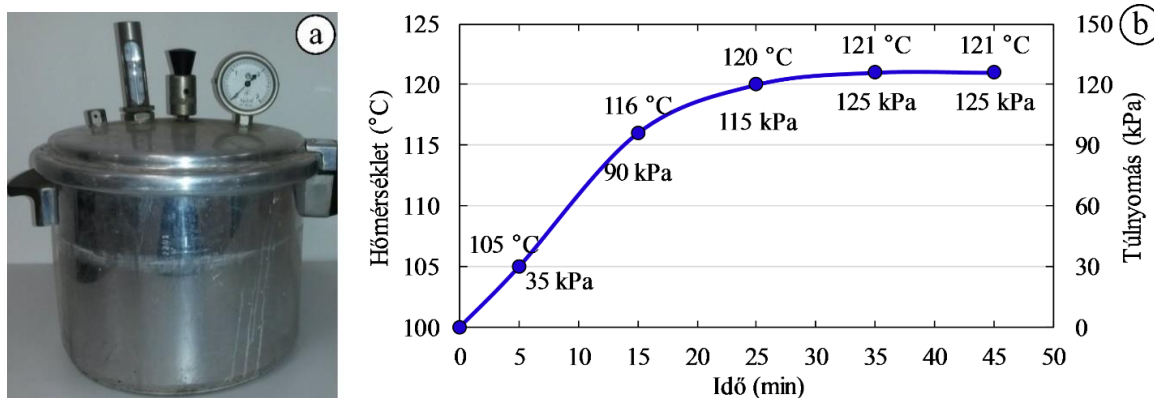
Az elvégzett irodalomkutatás alapján a **közepes- vagy magas sűrűségű lombos fafajok tömöríthetők rostirányban.** A lombos fafajoknak két nagy csoportját szokás elkülöníteni: a szórlikacsúakat és a gyűrűslikacsúakat. Az elvégzett kutatásoknál ennek megfelelően általában két fafaj állt a vizsgálatok középpontjában: a szórlikacsú bükk (*Fagus sylvatica* L.) és a gyűrűslikacsú kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), mindkettő a Sopron környéki erdőkből származott. A természetes faanyag hajlítása és rostirányú tömörítése egyaránt **jó minőségű alapanyagot igényel: egyenes növéssű, göcsmentes, keskeny évgyűrűs** mintákat használtunk fel. Így a gyakorlatban is gyakran alkalmazott, valamint könnyen hozzáférhető és jól ismert fafajok tulajdonságai és ezek változásai kerülnek ismertetésre.



### 3.2. Gőzölés

Mikroszkopikus szinten a fa sejtjeinek szerkezete középső lamellából, primer falból és másodlagos falból épül fel (1.1. ábra). Nanoszinten a szekunder sejtfa S1, S2 és S3 rétegei egyirányú szálerősítésű kompozitoknak tekinthetők, míg a középső lamella és az elsődleges sejtfa véletlenszerűen elhelyezkedő rövid szálakkal és részecskékkel erősített kompozitoknak felelnek meg. A sejtek szekunder sejtfalában a cellulóz mikrofibrillák megerősítésként szolgálnak, a hemicellulózok bevonják a cellulózt és kapcsolatteremtő anyagként működnek, a lignin pedig a mindezt beágyazó mátrixanyag. Az elsődleges sejtfa nagyrészt ligninből, véletlenszerűen elosztott, rövid szálú cellulóz mikrofibrillákból és hemicellulózokból épített hálózat, míg a középső lamella kizárólag hemicellulózokból és ligninből felépítve kötőanyagként működik a sejtek között (Qing és Mishnaevsky 2011). **A mechanikai faanyagmodifikációs eljárások nem hajthatók végre rostlágyítás, azaz plasztifikálás nélkül** (Anssary 2006), ami a legtöbb esetben a faanyag gőzölését jelenti. **Hő és nedvesség együttes hatására a fa hemicellulóz-cellulóz és lignin-cellulóz kötése meggyengülnek, felbomlanak;** a sejtek közti kötőszövet meglágyul éppúgy, mint a sejtalkotók közti kötőanyagok, és a rostirányú összenyomáskor ezek az összetevők el tudnak mozdulni egymáshoz képest (Báder és Németh 2018b).

A gyakorlatban általában 100 °C hőmérsékletű telített gőzölést alkalmaznak légköri nyomáson a rostirányú tömörítést megelőzően, hogy elkerüljék a melegítés során a faanyag kiszáradását (Sandberg és Navi 2007). A rostlágyítás időtartamának elegendőnek kell lennie az anyag teljes keresztmetszetének felmelegítéséhez, amelyet vastagsági milliméterenként kb. 2 percnyi idővel számolhatunk (Stevens és Turner 1948). A minták lágyítása kisméretű gőzölő edényben történt (3.3.a ábra). Az edénybe helyezés után - folyamatos emelkedéssel - legkésőbb 30 perccel állandósultak a hőmérsékleti- és nyomásértékek (3.3.b ábra).

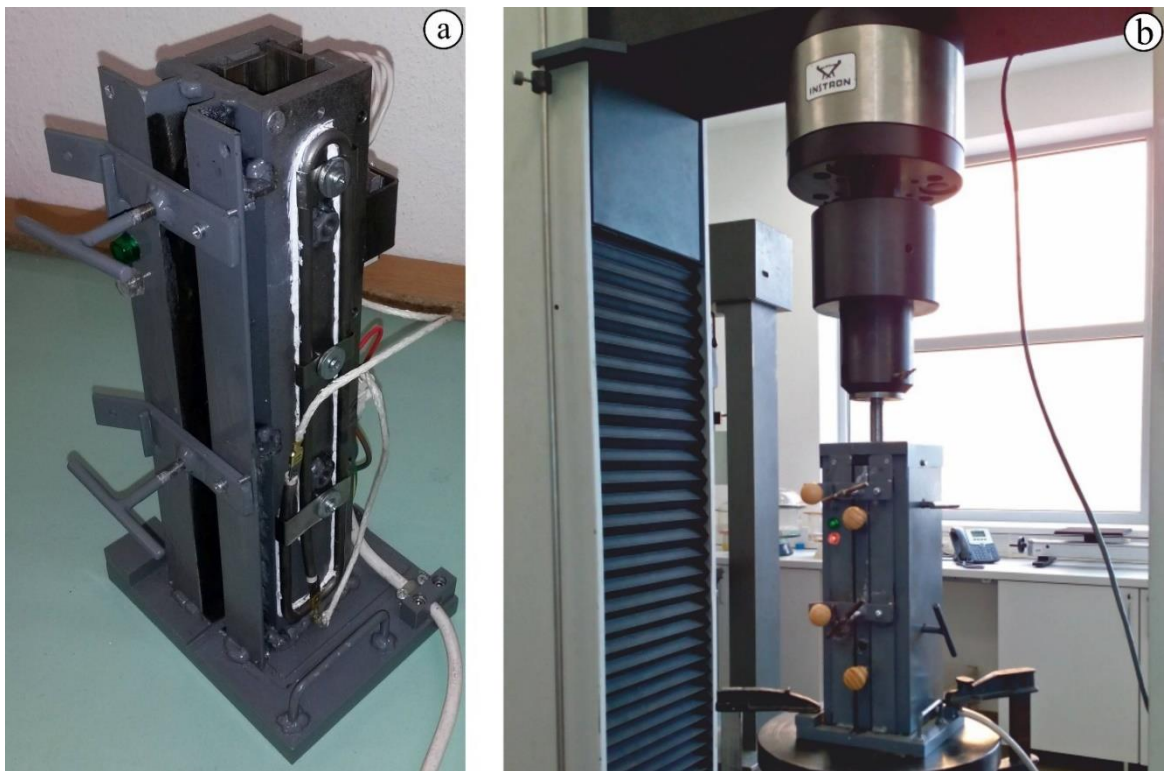


3.3. ábra Gőzölő edény nyomásmérő órával (a) és a gőzölés során felvett idő-hőmérséklet-nyomás görbe (b) (forrás: Báder és Németh 2016, Báder és Németh 2017e)

**Légköri nyomáson 101 °C hőmérsékleten, valamint 125 kPa nyomáson 121 °C hőmérsékleten folyt a plasztifikálás. A különböző lágyítási módok eredményei között nem mutatkozott szignifikáns különbség,** minden esetben azonosan jó kihozattal voltak tömöríthetők a minták (Báder és Németh 2017e). Emiatt **a tömörítéseket megelőző gőzölést a későbbiekben kizárólag légköri nyomáson végeztük, a szakirodalmi adatok és a tapasztalatok alapján a minták felmelegítésével együtt minimum 45 percen keresztül.**

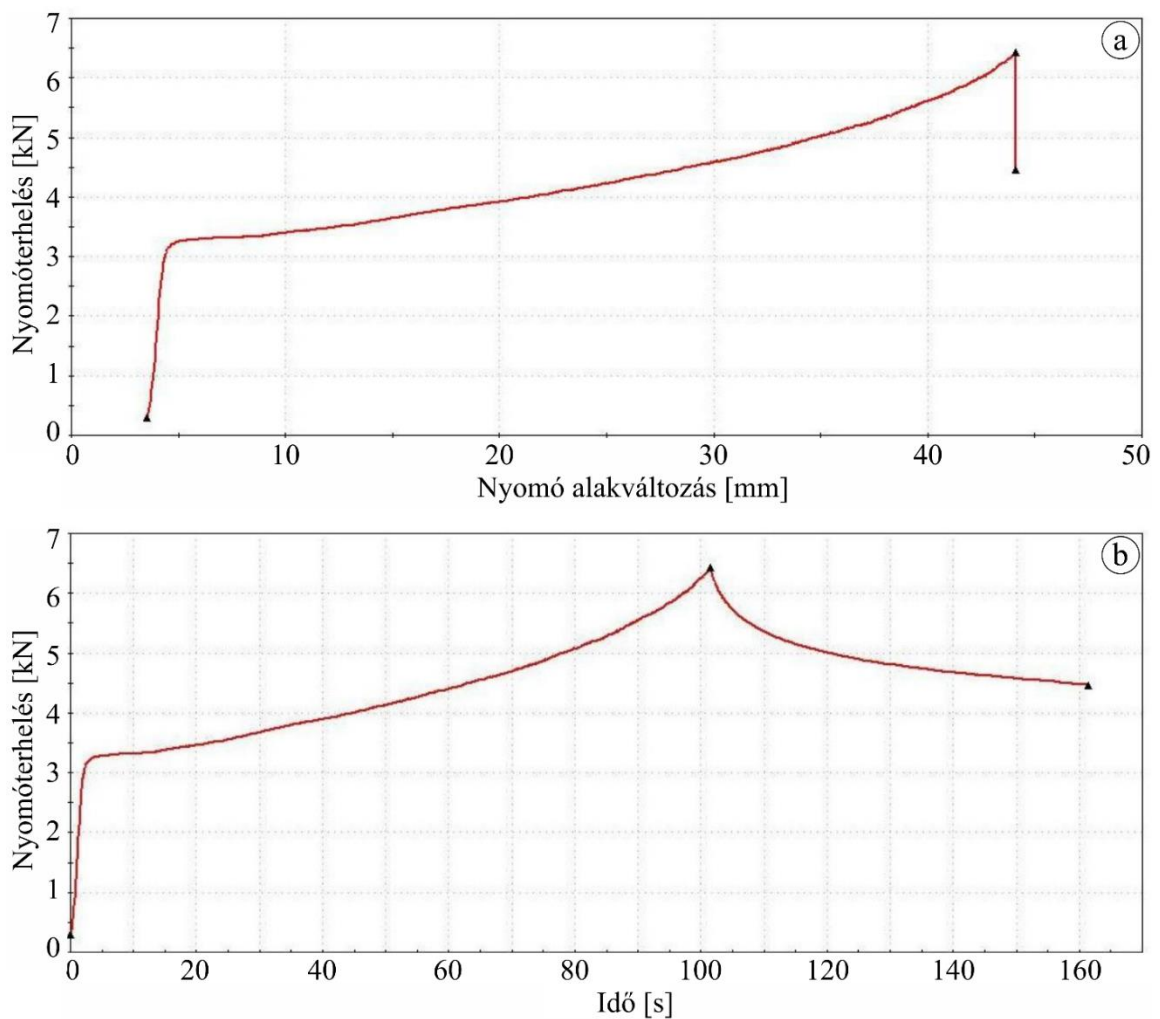
### 3.3. Laboratóriumi tömörítő eszköz bemutatása

A gőzölőből kivéve a tömörítő berendezésben a termosztát által tartott 90 - 110 °C belső géphőmérséklet megfelelő a próbatest plasztifikált állapotban tartásához a tömörítés során. A berendezés stabilitását egy körbefutó hegesztett, ráerősített fűtőszálakkal melegített oldalfal adja. Az elektromos biztonságért olvadóvezetékes biztosíték, földelés és visszajelző lámpák; a tűzbiztonságért hőbiztosíték és az alkalmazott hőálló alkatrészek; személyi sérülések elkerüléséért és a kisebb energiafogyasztásért körbefutó szigetelés és külső burkolat felel. **A minták oldalirányú beszorítása szintén lényeges. A szemben álló melegített fém csúszkák egymástól vett távolsága és a szorítóerejük egyedileg beállítható (3.4. ábra).** Ugyanazt az oldalirányú szorítóerőt alkalmazva minden oldalról a minta teljes hosszában biztosítható a keresztmetszeti méretnövekedés elkerülése és a minta egyenes állapotban tartása. Ennek köszönhetően a préselés folyamán a mintadarab nem szenved kihajlás miatti törést (Blankenstein 1956). **A tömörítéshez szükséges nyomóerőt egy Instron 4208 (Instron Corporation, USA) típusú univerzális anyagvizsgáló gép biztosítja** egy 300 kN maximális kapacitású mérőcellával felszerelve az idő - nyomófej elmozdulás - nyomóerő értékek folyamatos mérésével és rögzítésével együtt (Báder és Németh 2017a; Báder és Németh 2019b).



3.4. ábra Tömörítő berendezés összeszerelés közben (a) és a berendezés az Instron anyagvizsgáló gépbe helyezve (b) (Báder és Németh 2017a alapján)

A tömörítési eljáráshoz és annak különböző változataihoz külön vezérlés lett kifejlesztve az anyagvizsgáló gép Bluehill 2 (Instron Corporation, USA) 2.8-as verziószámú szoftverében. Megadható a minta keresztmetszete az alkalmazott nyomófeszültség automatikus számításához, továbbá meg kell adni a tömörítési sebességet, a tömörítési arányt és a fixálás időtartamát. A grafikonok (3.5.a és b ábra) és a mérési eredmények egy dokumentumba kerülnek exportálásra, valamint az részadatok kinyerhetők egy egyedi forrástáblázatból. **A bemutatott félig zárt, saját tervezésű és egyedi gyártású laboratóriumi berendezés segítségével garantálni lehet a rostirányú tömörítés megfelelő feltételeit, valamint a minta levegővel való érintkezésének minimalizálását (Báder és Németh 2018a).**



3.5. ábra Az Instron anyagvizsgáló gép vezérlőprogramjából kinyert grafikonok, egy tökéletesen tömörödött  $20 \times 20$  mm keresztmetszetű bükk minta esetében. A legnagyobb nyomóterhelést, azaz a 20% mértékű tömörödöttséget elérve a minta fixálása következett, mely során a nyomóterhelés fokozatosan csökken (forrás: Báder és Németh 2017c)

Rostirányú tömörítést követően a tömörítő erőket azonnal megszüntetve az anyag visszarugózik és csak 3-5% maradandó rövidülést szenved. Amíg legalább légszáraz nedvességtartalmát megőrzi, könnyen és nagymértékben hajlítható marad. Azonban a faanyagot tömörítést követően összenyomott állapotában tartva a maradandó rövidülés sokkal nagyobb lesz. A 3.5. ábrán bemutatott tömörítésnél 102 másodperc alatt elérve 20%-os tömörödöttséget és a legnagyobb nyomóterhelést véget ért a tömörítési szakasz, amit a nyomvatartási (fixálási) szakasz követett. Ha a nyomvatartási idő alatt a faanyag lehül, jelentősen csökken a rugalmassága és **az így kezelt faanyag mindig hajlékony marad** (Báder és Németh 2018c). A tömörítő berendezés alkalmas mindkét kezelési módszer kivitelezésére, továbbá az iparban alkalmazott, jellemzően 20% körüli tömörítési aránynál jóval magasabb, maximum 33% tömörítési arány is kivitelezhető vele.

### 3.4. Tömörítés sebessége, egyenletessége és az álgesztesség hatása

#### 3.4.1. Tömörítési sebesség mértékegysége

A rostirányú összenyomás sebessége a termelékenység és a minőségi kihozatal szempontjából egyaránt rendkívül fontos. A laboratóriumi berendezésnél pontosan és egyértelműen megadható mm/min mértékegységben a műveleti sebesség a 200 mm hosszúságú próbatestek tömörítésekor. Az iparban alkalmazott tömörítő gépek azonban lényegesen nagyobb anyaghosszokkal dolgoznak, ráadásul sokféle lehetőség áll rendelkezésre. Könnyen belátható, hogy ha ugyanazzal a mm/min műveleti sebességgel tömörítünk például egy 200 mm és egy 2000 mm hosszúságú faanyagot, utóbbinak ez tizedakkora relatív alakváltozást jelent. Következésképpen **egy relatív tömörítési sebesség bevezetésére van szükség, hogy a különböző hosszúságú minták tömörítési sebessége összehasonlítható legyen.** A tömörítés relatív sebessége ( $v$ ) azt fejezi ki alapvető mértékegységek alkalmazásával, hogy a próbatest egy méterére vetítve mennyit tömörödik óránként, vagyis egységnyi idő alatt egységnyi hosszban mekkora rövidülést szenved el a faanyag. Tehát ha a minta hosszváltozását ( $\Delta l$ ) elosztjuk a minta kiindulási hosszúságával ( $l$ ) és a tömörítéshez szükséges idővel ( $\Delta t$ ), megkapjuk a relatív tömörítési sebességet (1).

$$v = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta t}; \left[ \frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{h}} = \frac{1}{\text{h}} \right] \quad (1)$$

A tömörítésre kerülő különböző alapanyag hosszok és alkalmazott műveleti idők objektív összehasonlításához a bemutatott [1/h] mértékegység megfelelő, mert egységesen tudja kezelni a lényegesen eltérő alapadatokat (Báder és Németh 2017e; Báder és Németh 2018c). A laboratóriumi vizsgálatoknál a 200 mm hosszúságú mintatestek 20% arányú tömörítése jellemzően 15 1/h sebességgel történt. E számítási mód jól kezelhető számértékeket ad eredményül, de még kifejezőbbé válhat és még könnyebben érthető lesz az eredmény, ha százalékosan adjuk azt meg. Ez esetben azonban 15 1/h helyett 1500 %/h lenne az eredményünk, ami feleslegesen nagy számértékek használatát vetíti előre. Az óránkénti változást percenkénti változással helyettesítve újfent **egy könnyen kezelhető mértékegységet kapunk [%/min], mely könnyen értelmezhető:** az előző példával élve pontosan 25%/min lesz (2).

$$v = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta t}; \left[ \frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{min}} = \frac{\%}{\text{min}} \right] \quad (2)$$

A relatív tömörítési sebesség a tömörítés arányát ( $\Delta l/l$ ) figyelembe veszi, mégsem teszi láthatóvá. Mivel a tömörítés aránya szintén lényeges tényező a végtermék tulajdonságai szempontjából, célszerű külön megadni az eredeti hosszhoz viszonyított rövidülés százalékában (3).

$$\text{Tömörítési arány} = \frac{\Delta l}{l} = v \cdot \Delta t; [\%] \quad (3)$$

#### 3.4.2. Tömörítés sebessége

A rostirányú tömörítés sebessége a termelékenység és a minőségi kihozatal szempontjából egyaránt fontos. A laboratóriumban és az iparban tömörítésre kerülő különböző alapanyag hosszok és alkalmazott műveleti idők objektív összehasonlításához a [%/min] mértékegység bevezetése volt szükséges a korábban leírtak szerint (3.4. fejezet). Az iparból származó adatok legszélsőségesebb eseteit figyelembe véve 0,7-4,0%/min relatív tömörítési sebességet alkalmaznak, míg a kutatásokhoz használt laboratóriumi berendezésnél jellemzően 17-25%/min a relatív tömörítési sebesség. A nagyságrendi különbség az eltérő tömörítési technológiáknak és a lényegesen különböző alapanyag keresztmetszeteknek tudható be.



A laboratóriumi vizsgálatok első, 1,5%/min sebességű rostirányú tömörítéseinél a légköri nyomáson lágyított próbatestek jelentős része (9-ből 7 db minta) rostelválással, esetleg ebből kiinduló megrogyással ment tönkre (3.6.a ábra). A plasztifikált faanyag teljes hosszúsághoz viszonyított 20% mértékű összepréselésekor a minta rostjai oldalirányban kihajoltak és a próbatest akár több helyen nagy erővel az oldalfalhoz nyomódhatott. Emiatt nem tudta teljes hosszban a tömörítő erőt továbbadni, és már csak a nyomófej felőli résznek volt lehetősége tömörödni, valamint tovább degradálódott a károsodott keresztmetszetben. A felső, kisebb szakasz viselte a teljes mintahosszra szánt rövidülést.



3.6. ábra Tömörítési hibák: rostelválások a bélsugarak mentén, majd ebből kiindulva az anyag megrogyása (a) és ferdeszalúság miatt ékként széthasadt minta (b) (forrás: Báder és Németh 2017a)

A második lassú tömörítéssel foglalkozó kísérlet kihozatala szintén nagyon alacsony, 50% lett annak ellenére, hogy az első kísérletsorozatban meghatározott ideális anyagminőséggel és gépbeállításokkal történtek a műveletek (1,5%/min sebesség; 10 db bükk minta). **Nem célszerű tehát alacsony tömörítési sebességét választani, mert még jó minőségű alapanyag esetében is gyakran fordul elő hiba – például a nagymértékű rostelválás – és oldalirányban torzul a minta.** Utóbbi tönkremenetelt jelent, és a hosszanti egyenletes tömörödést is megakadályozza. A bemutatott hibák miatt a harmadik kísérletben kizárólag magasabb tömörítési sebességeket alkalmaztunk. A laboratóriumi berendezés a mintaként használt 20×20×200 mm méretű, az első két kísérlet és a 3.1. fejezetben leírtak alapján meghatározott minőségi követelményeknek eleget tevő bükk és tölgy faanyagokat 20-50%/min sebességgel 98,6%-os kihozattal préselte (összesen 75 db minta, légköri nyomáson vízgőzben lágyítva). A bemutatott kísérletek célja a megfelelő tömörítési körülmények megállapítása volt és a végkövetkeztetés levonása elegendő a további vizsgálatok végrehajtásához, felesleges a fafajonkénti és sebességenkénti mintaszámok, kihozatalok, hibák részletezése.

A túl nagy tömörítési sebesség nagy veszélyt hordoz magában, ugyanis hiba esetén a sebesség növekedésével arányosan rövidebb ideje van a gépkezelőnek beavatkozni. Jó példa erre a rostkifutás okozta hasadás miatt tönkrement anyag, mely ékként feszítve károsíthatja a berendezést (3.6.b ábra). Ezért a vizsgálatokhoz általában a jó termelékenységet és kihozattal biztosító 15-30%/min relatív tömörítési sebességet alkalmazzuk.

Az előállított mintákon alkalmazott vizsgálatokat a vonatkozó magyar és nemzetközi szabványok figyelembevételével hajtottuk végre, melyek listája a 7. fejezetben található. A szabványos kísérleteket 20 °C hőmérsékleten és 65% relatív légnedvességen (normál klímán) kondicionált próbatesteken kell elvégezni. A klimatizálás akkor tekinthető befejezettnek, ha a minták tömege állandósult, ami hozzávetőleg 12% nedvességtartalmat (*MC*) jelent a természetes faanyagoknál. Ez a művelet vagy a laboratóriumi klímaszobában, vagy Binder KBF-115 klímaszekrényben (Binder GmbH., Németország) lett végrehajtva. A minták tömegének meghatározása egy 0,001 gramm pontosságú Precisa XT 1220M-FR mérleggel történt (Precisa Instruments AG., Svájc). A minták mechanikai vizsgálatok idején tartalmazott nedvességét a vizsgálatok elvégzése után meghatároztuk az MSZ 6786-2 (1988) és ISO 13061-1 (2014) szabványok alapján. A mintáknak, vagy egy-egy azokból kisebb résznek a tömegét lemértük és egy Memmert 100-800 kemencében (Mettler GmbH., Németország) abszolút száraz állapotig szárítottuk 103 ± 2 °C hőmérsékleten, végül újra tömegmérés következett a szabványok előírásainak megfelelően. A *MC* kiszámítható a minta nedves ( $m_n$  [g]) és abszolút száraz tömegéből ( $m_0$  [g]) (4).

$$MC = \frac{m_n - m_0}{m_0} \cdot 100; [\%] \quad (4)$$

Ha a vizsgált klimatizált próbatestek nedvességtartalma 12%-tól eltérő, akkor a mechanikai vizsgálatok eredményeire természetes faanyagok esetében az (5) átszámító képlet alkalmazandó.

$$\sigma_{12} = \sigma_u [1 + \alpha(u - 12)] \quad (5)$$

ahol:

$\sigma_{12}$  – a vizsgált próbatest átszámított szilárdsági értéke 12% nedvességtartalomra

$u$  – a próbatest nedvességtartalma

$\sigma_u$  – a vizsgált próbatest szilárdsági értéke  $u$  nedvességtartalomnál

$\alpha$  – az 1,0% nedvességtartalom-változásra jutó szilárdságváltozási állandó. Hajlítószilárdság mérésénél  $\alpha_{\sigma h} = 0,04$ ; hajlítórugalmasági modulus mérésénél  $\alpha_E = 0,02$ ; nyomószilárdság mérésénél:  $\alpha_{\sigma ny} = 0,04$ .

Az MSZ 6786-5 (2004) és ISO 13061-3 (2014) szabványok előírásai alapján a laboratóriumi hajlítóvizsgálatokhoz jellemzően 20×20×300 mm (H × S × R) befoglaló méretű mintákat használnak, melyek 240 mm alátámasztási távolsággal kerülnek az anyagvizsgáló gépre. A rostirányban tömörített minták esetében a fenténél már a tömörítés előtti nyers minták hosszúsága is kisebb a tömörítő berendezés korlátozott befogadóképessége miatt. A vizsgálandó minták hossza 160 és 200 mm közötti a kezeléstől függően, keresztmetszetük hozzávetőleg 19×19 mm. A jelenleg érvényben lévő EN 408 (2010) + A1 (2012) európai szabvány meghatározza az alátámasztási köz ( $L$ ) és a mintavastagság ( $h$ ) arányát ( $L/h$  arány):  $L = 18 \pm 3h$ . Mivel a rostirányú tömörítés célja a hajlíthatóság javítása, kisebb  $L/h$  arányt kellett használni a minták meghibásodási pontjának eléréséhez, hogy meghatározhassuk a szilárdsági és egyéb értékeket. Az MSZ 6786-5 (2004) kimondottan 12-es  $L/h$  arányt határoz meg, az ISO 13061-3 (2014) pedig  $L/h=12-16$  értéket. A nagyfokú hajlékonyság miatt az alacsony értékeket volt célszerű preferálni, ezért az alátámasztások távolsága 140, vagy 150 mm lett, míg az eredetileg négyzetes keresztmetszetű mintákat téglalap alakúra kellett cserélni. A hajlítóvizsgálathoz klimatizált minták vastagsága 12±0,5 mm méretűre lett visszafűrészelve úgy, hogy két szembenálló lapja frissen fűrészelt legyen, míg a másik két lapja (szélesség;  $b$ ) érintetlen (3.7. ábra). A hajlítóvizsgálatokhoz álló évgyűrűs mintákat használtunk, méreteik 12×19×160-200 mm (H × S × R) voltak.



3.7. ábra Hajlítóvizsgálatra előkészített minta az anyagvizsgáló gépbe helyezve

Az újrakondicionálás után a 4-pontos hajlítási teszthez tehát megfelelő, 12 körüli  $L/h$  arányt tudtunk biztosítani. A 4 pontos hajlítási metódus választásának oka, hogy jobban kiküszöböli a nyírási alakváltozás hatásait a hajlítás során és egyúttal a terhelte térfogat nagyobb, mint a 3 pontos hajlításnál. Ezért pontosabb is, mert a minta egy hosszabb szakaszán ad átlageredményt a fa hajlítási tulajdonságairól (Hein és Brancheriau 2018). A tesztekhez ugyanazt az Instron 4208 univerzális anyagvizsgáló gépet használtuk (Instron Corporation, USA), mint a tömörítések elvégzéséhez. A mérőcella maximális kapacitása 300 kN, a nyomófej görgőinek távolsága 50 mm és minden görgő átmérője 30 mm volt. A terhelési sebességet 8 mm/min-ra állítottuk a kezeletlen minták esetében és 14-20 mm/min között volt a kezelt minták hajlításánál, mert a sokkal nagyobb hajlékonyság miatt csak így lehetett biztosítani az előírt vizsgálati időtartam betartását. A tesztek a minták törésekor lettek leállítva, amikor a maximális terhelőerő ( $F$ ) a csökkenését követően már nem áll helyre. Egyes esetekben, pl. a hosszú ideig fixált mintáknál nem következett be a hajlítóvizsgálatok során a törés, ilyenkor a tesztet addig folytattuk, amíg az anyagvizsgáló gép lehetővé tette. Ez jellemzően a minta beesését okozta az alátétek közé. A négyponos hajlítószilárdság ekkor is a teszt közben mért legnagyobb hajlítóerő alapján került kiszámításra a négyponos hajlítószilárdság ( $MoR$ ) az EN 408 (2010) + A1 (2012) szabványban foglalt képlet szerint (6):

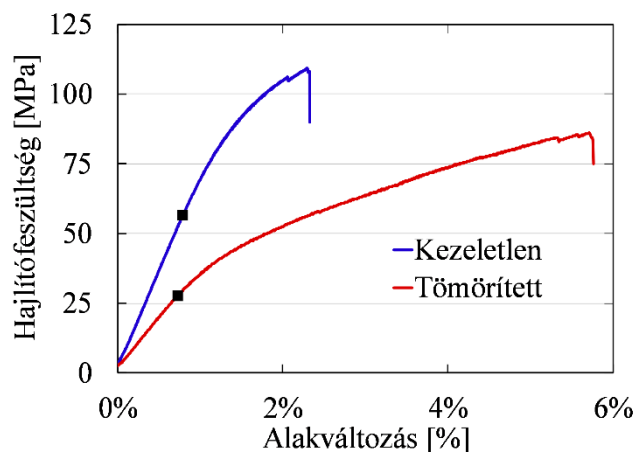
$$MoR = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2}; \text{ [MPa]} \quad (6)$$

ahol:

$a$  – egyik nyomófej görgő és a közelebbi alátámasztó görgő tengelytávolsága.

A hajlítórugalmassági modulus ( $MoE$ ) meghatározható a hajlítóvizsgálatok erő-alakváltozás adataiból. Természetes faanyagoknál az erő-alakváltozás grafikon rugalmas része az általánosan alkalmazott ISO 13061-4 (2014) szabvány szerint a maximális terhelőerő 10-40%-hoz tartozik, de a tömörített faanyagok esetén a rugalmas szakasz rövidebb, mint azt a 3.8. ábra bizonyítja.





3.8. ábra Kezeletlen, valamint rostirányban tömörített és egy percet fixált minták négyponthas hajlítóvizsgálatának tipikus feszültség-alakváltozás grafikonjai. A fekete négyeszőgek az arányossági határokat jelölik (Báder és Németh 2019a alapján)

A  $MoE$ -t a négyponthas hajlítás adataiból az MSZ6786-15 (1984) szabvány alapján is kiszámíthatunk volna, azonban a szabvány csakis határozott nyomófej-beállítással rendelkező összeállításnál alkalmazható, amire a rendelkezésre álló mintaméreteink miatt nem volt lehetőségünk. Olyan megoldást sikerült találnunk, amely figyelembe veszi az egyedi mintaméreteken felül a nyomógörgők- és az alátámasztó görgők távolságát. A  $MoE$ -t a maximális terhelőerő 10%-a és 25%-a közötti különbségéhez ( $\Delta F$ ) tartozó keresztfej elmozdulás ( $\Delta w$ ) és a másodrendű nyomaték ( $I_x$ ) felhasználásával számítottuk annak érdekében, hogy a lineáris tartományban maradjunk. A képlet Kossa (2013) szerint (7):

$$MoE = \frac{\Delta F \cdot a^2 \cdot (3 \cdot L - 4 \cdot a)}{12 \cdot I_x \cdot \Delta w}; \text{ [GPa]} \quad (7)$$

A 4-ponthas hajlítóvizsgálat során a tönkremenetel pillanatában mért legnagyobb lehajlás ( $y_{max}$ ) a 3 ponthas hajlítóvizsgálatokkal ellentétben nem egyezik meg az anyagvizsgáló gép által mért legnagyobb nyomófej elmozdulással ( $w$ ). A legnagyobb lehajlás ( $y_{max}$  számított) Kossa (2013) alapján 4-ponthas hajlítóvizsgálat esetén (8):

$$y_{max \text{ számított}} = \frac{w \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2)}{4 \cdot a \cdot (3 \cdot L - 4 \cdot a)}; \text{ [mm]} \quad (8)$$

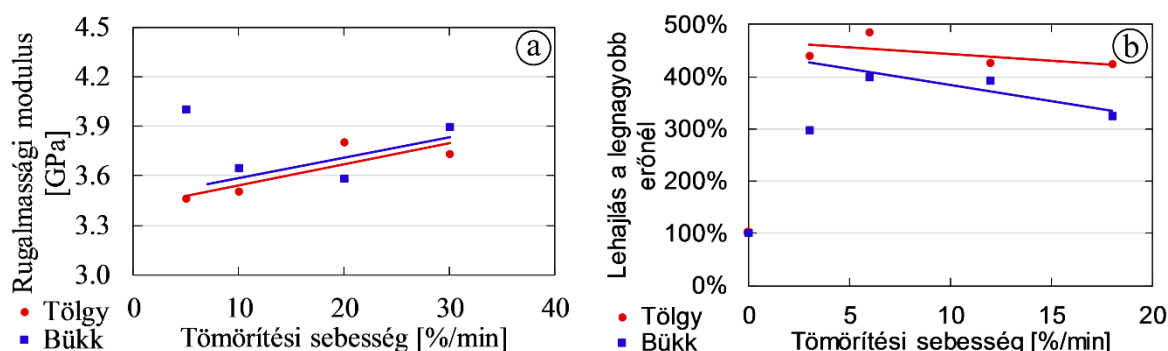
A (8) képlet meghatározza a klasszikusan kis alakváltozásokra képes minták lehajlását statikus 4-ponthas hajlítóvizsgálat esetén. Mivel a rostirányban tömörített faminták nagy alakváltozási képességgel rendelkeznek, szükséges volt a (8) képlet módosítása. Az erre vonatkozó vizsgálat eredményeiből a valós maximális lehajlás ( $y_{max}$ ) számításához egy lineáris kiegészítő képletet készítettünk (Báder és Németh 2018a) (9).

$$y_{max} = 1,1563 \cdot y_{max \text{ számított}} - 0,7345; \text{ [mm]} \quad (9)$$

A valódi lehajlások és a számított eredmények között a korrelációs együttható nagyon jó egyezést mutat ( $R^2=0,9995$ ). Ily módon az eredeti Kossa képlet (8) alkalmazhatóvá vált a jelentős hajlékonysággal rendelkező faanyagokra is.

Továbbá a tönkremenetel pillanatában mért legnagyobb lehajlás ( $y_{max}$ ) mellett a (6) és (9) képleteket alkalmazva kiszámítottuk a minták pillanatnyi lehajlását ( $y_F$ ) a legnagyobb hajlítóerőnél. Használatás az indokolta, hogy bár a rideg anyagokhoz hasonlóan a faanyagok is jellemzően az elviselt legnagyobb terhelés pillanatában törnek el, a rostirányban tömörített mintáknál ez sok esetben nem így van. Jó példák erre a hosszú ideig fixált minták, melyek a hajlítóvizsgálatok során nem szenvedtek törést (3.5. fejezet), tehát az  $y_{max}$  esetükben nem határozható meg.

Nagyobb keresztmetszetű anyag tömörítése nyilvánvalóan magasabb nyomóerőt igényel, valamint a kísérletek alapján a nagyobb rostirányú tömörítési sebesség szintén magasabb nyomást igényel a tömörítés kivitelezéséhez. **A tölgy és bükk rostirányú összenyomása közben fellépő nyomófeszültség a tömörítés sebességével arányosan növekszik**, a vizsgálat a legkisebb és legnagyobb sebességnél fellépő maximális nyomófeszültségek között 12% eltérést mutatott. A 4 sebességi csoportban (5; 10; 20; 30%/min), vizsgálati csoportonként 20-20 db normál klímán kondicionált mintán **elvégzett hajlítóvizsgálatok eredményei alapján a *MoR* és a hajlítófeszültség változása a növekvő tömörítési sebesség mellett jelentéktelen**. A *MoE* valamivel kevésbé csökken, egyúttal a minta lehajlása maximális terhelésnél tölgy esetében 9%-kal, bükk esetében 22%-kal csökken, miközben a tömörítés sebessége 5-ről 30%/min-ra növekszik (3.9. ábra). **Bár a kezeletlen mintákhoz viszonyított lehajlásnövekmény akár 22%-os csökkenése soknak tűnik, valójában a hajlékonyság továbbra is nagyon jelentős, többszörös marad a kezeletlen faanyagéhoz viszonyítva. Így a kezelés hatékonyságát figyelembe véve a magasabb tömörítési sebességek javasolhatók.**



3.9. ábra Különböző tömörítési sebességek hatása a tömörített faanyag rugalmassági modulusára (a) és lehajlási képességére (b) (Báder és Németh 2018c alapján)

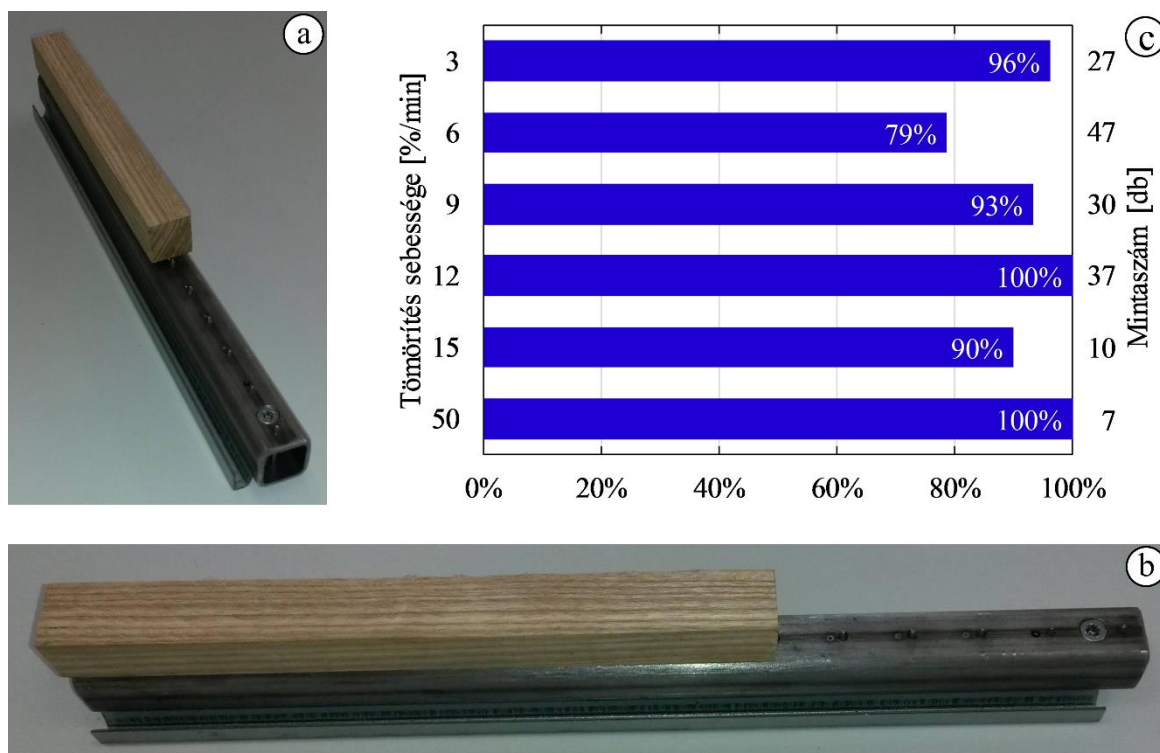
A préselési nyomás redukálható több paraméter, praktikusán a sebesség csökkentésével, amely jelentős költségmértékű tényező lehet egy tömörítő gép összeállításakor. Másrészt a faanyag a rostirányú préseléskor fellépő súrlódások következtében összetett igénybevételnek van kitéve, amit a mérethatás miatt nagyobb keresztmetszetek esetén jobban tud tolerálni. Nagyobb méretekben a lassú tömörítés kevésbé torzítja a próbatestet oldalirányban, kevésbé jelenik meg rostelválás, ami részben az adott sebességre fejlesztett ipari technológia hatása is.

### 3.4.3. Egyenletes tömörödés igazolása

Ideális rostirányú tömörítésnél a minta egyes szakaszai ugyanolyan mértékben deformálódnak a hossz mentén, nagyobb összenyomási arány mellett kisebb változatossággal, és nem indul meg a faanyag szerkezeti tönkremenetele a leggyengébb szakaszon (Ivánovics 2012). A mintatest hossza mentén a kezelést megelőzően egymástól azonos távolságra elhelyezett jelölések tömörítés utáni, vagy szárítást követő mérésével meghatározható a tömörödés egyenletessége. Egyenetlen tömörödés túl alacsony nedvességtartalmú alapanyag használata, vagy elégtelen rostlágnyítás miatt fordulhat elő. A vizsgálat bizonytalanságát növeli továbbá, hogy a rövid rész hosszokat nehéz pontosan mérni. A 3.10.a és b ábrákon a jelölő eszköz látható egy mintával. Az egymástól 20 mm távolságra elhelyezett, kissé tompított fémhegyek ütés hatására belenyomódnak a mintába olyan mélységben, hogy ne okozzanak jelentős szöveti hibát, de gőzölés és tömörítés után is megmaradjon a nyomuk a faanyagban. A mintákon így 20 milliméterenként elhelyezett jelölések a szokásos 20% mértékű tömörítés befejeztével kevesebb, mint 1 mm-rel kerülnek közelebb egymáshoz. Ilyen kis különbségek vizsgálatokor a faiparban jelentéktelennek tűnő

0,05 mm mérési pontatlanság is 5-10% hibát okozhat. Ennek kivédésére 0,01 mm pontossággal dolgoztunk a vizsgálat során, melynek hibahatára 2% alatt van (Báder és Németh 2017c).

**A minta teljes hosszváltozásából kiszámítható, hogy a részhosszoknak mennyivel kell változniuk egyenletes tömörítés esetén.** A részhosszokat mérve ezt a viszonyított eltérést vizsgáltuk 5% hibahatárral, amely a 3.10.c ábrán látható eredményeket adta. A megadott hibahatár azt jelenti, hogy a rövid részhosszok egymáshoz képesti változása mekkora legnagyobb eltéréssel fogadható el. A 158 db, 20% arányban tömörített mintát figyelembe véve egy mintán belül a legnagyobb eltérés az ideális tömörítési mérethez képest 9,57% volt. A tömörítés során látható károsodást nem szenvedett minták egyenletes tömörödöttségét vizsgálva a kihozatal 91,1% lett. Kizárólag a 9%/min és magasabb sebességgel tömörített próbatetek csoportját figyelembe véve ugyanez az érték 96,4%-ra emelkedett.



3.10. ábra Jelölő eszköz mintával (a és b) és a tömörítés egyenletessége alapján a minták kihozatala (c) (forrás: Báder és Németh 2017c)

A fent bemutatott megfelelő alapanyagokkal, előkezeléssel és gépbeállításokkal végzett tömörítést követően a továbbfejlesztett mérési módszerek köszönhetően az eredmények elemzése még szigorúbb, 3% hosszmenti megengedett tömörödöttség-eltéréssel történt. 99 darab próbatetből mindössze 1 db nem tömörödött megfelelő egyenletességgel, és az említett minta is mindössze 1,0 százalékponttal lépte túl a 3%-os hibahatárt. Így **az előkísérletek tanulságait felhasználva megfelelő minőségű alapanyagokkal, jól működő gőzöléssel és a tömörítő berendezés ideális beállításával (a mintára kifejtett megfelelő oldalnyomás és elegendően magas tömörítési sebesség) a kihozatal 99,0% lett** (Báder és Németh 2017c).

### 3.4.4. Álgesztesség hatása a tömöríthetőségre

Az álgeszt néhány fafajra – pl. a bükk, kőris, csertölgy, juhar – jellemző jelenség, általában szabálytalan alakú elszíneződésként figyelhető meg. Az elváltozásokat különböző, ún. extraktanyagok lerakódása okozza a fatestben. Amint az a Compwood (2008) ismertetőjében olvasható, ipari tömörítésnél bükk és kőris fafajoknál az álgeszt nem megengedett. Leggyakrabban bükk faanyagban figyelhető meg és okoz problémát az álgesztesség. A bükk álgesztessége nem csak színbeli eltérést okoz, hanem a nedvességfelvételben és minimálisan a mechanikai tulajdonságokban is változásokat eredményez (Divós és Göncz 2015), ezáltal hatást gyakorol a rostirányú tömöríthetőségre.

Rosttelítettségi nedvességtartalom alatti, álgesztet tartalmazó bükk minták is belekerültek a tömörítő gép megismerését, használatának módját célzó előkísérletekbe. A sokféle kipróbált tesztkörülmeny miatt nem vonhatók le az eredményekből az álgesztesség faanyagra vonatkozó számszerűsíthető következtetések, azonban egy megfigyelés határozottan kialakult. A korábban a 3.6.a ábrán látottakhoz hasonló, kizárólag az álgesztben megjelenő rostelválások és megrogyások az alacsony nedvességtartalom- és/vagy az álgeszt jelenlétének tudhatók be. A Biró (2004) által javasolt álgeszt-minősítés szerint, a felhasznált famintákban kizárólag egészséges álgeszt volt jelen. Ha álgesztesség miatti hiba fordul elő, akkor a legtöbb esetben rostelválás figyelhető meg. Mindig az álgesztesség rész károsodik előbb (3.11.a ábra), és esetenként a lokális anyaggyengülés miatt továbbterjed a repedés az egészséges területre. Sokszor kiindulópontja az álgesztesség rostelválás az egész keresztmetszetre kiterjedő nagymértékű károsodásnak, rostelcsúszásoknak, megrogyásnak.



3.11. ábra Megrogyások az álgesztben, míg a felette látható álgesztmentes rész sértetlen (a) és repedések kizárólag az álgeszt erősen elszíneződött részében (b) (Báder és Németh 2017e)

**Az álgeszttel kapcsolatban feltárt nehézségek, a faanyagban a rostirányú tömörítés közben megfigyelhető hibák a nem megfelelő kiinduló nedvességtartalmú faanyagban megjelenő hibákkal analógiát mutatnak (3.1.a. ábra). Ebből kifolyólag az álgesztesség részeken tönkremenetelük összefüggésben lehet az álgesztesség által okozott nedvességfelvételi képességromlással. A rostlágítási módja (lágítási idő; légköri- vagy túlnyomás) nem volt hatással az álgesztesség rész tönkremenetelére.**



A kutatások eredményeiből megállapítható, hogy sok esetben befolyásolja a faanyag viselkedését, a rostszétválások megjelenésének esélyét a tömörítési művelet közben az álgesztesség súlyossága. Kiváló példa a *3.11.b ábra*, melyen egyértelműen elkülönül az egészséges „fehér” bükk faanyag, az enyhén elszíneződött álgesztes rész és a sötét álgeszt. Az álgesztes rész határvonalát a sötét álgeszt alkotja, csak ebben a zónában láthatók rostszétválások. Az egészséges rész éppúgy, mint az enyhén elszíneződött álgesztes rész teljes mértékben sértetlen, ezeknél a rostirányú tömörítés sikeresen végbement és nem okozta a faanyag nagymértékű roncsolódását, tönkremenetelét.

A kimondottan az álgesztes bükk tömöríthetőségének megismerésére kialakított kísérletünkhöz három, Lengyelországból származó bükkfa anyagából használtunk fel mintatesteket, melyek tulajdonságaikban nagy valószínűséggel nem térnek el a Magyarországon megtalálható, szintén európai bükköktől (*Fagus sylvatica* L.). Összesen 36 db álgesztmentes kontroll mintát és 68 db álgeszteset alkalmaztunk a kísérleteknél, melyek közül 56 darabnál az álgesztes rész legalább 50% arányt tett ki. 20% mértékű tömörítést alkalmaztunk 25%/min tömörítési sebességgel és 1 perces fixálással. A nedvességtartalom a minták egy részénél a rosttelítettség közelében volt, a többinél bőven felette, tehát ez nem okozhatott problémát. Az összes mintatest az álgesztmentes mintáknál általánosan alkalmazott, bevált gőzölést kapta, ami ez esetben légköri nyomáson átlagosan 57 perc gőzölési időt jelentett 16%-os relatív szórással. **A tömörítés során tönkrement, legalább 50% álgesztet tartalmazó minták aránya alig lett magasabb, mint a tönkrement egészségeseké** (rendre 3,6% és 2,8%). Itt azonban meg kell jegyezni, hogy sok álgesztes mintánál olyan kezdeti elváltozások (apró rostszétválások, kis bütürepedések) jelentek meg a tömörítés hatására, amelyek még nem befolyásolták szignifikánsan a hajlítóvizsgálat eredményeit, ezért nem zártuk ki őket a tesztekben és a statisztikai elemzésből. Ezek **az optikai elváltozások azonban nehézséget jelenthetnek a tömörített faanyag későbbi felhasználásakor**; a formára hajlításakor nagyobb repedések, törések kiindulópontjai lehetnek. Amennyiben ezeket is figyelembe vesszük, akkor a hibás álgesztes minták aránya 12,5%-ra növekszik.

Az eredmények azt mutatják, hogy az iparban elterjedt autoklávus gőzöléses rostlágyítás is megfelelő az álgesztesedett anyagrészek tömörítés előtti plasztifikálására, amennyiben azok nedvességtartalma a rosttelítettségi pont közelében, vagy felette van. Ez nem lehet akadálya az álgesztes faanyagok tömörítésének. Azonban ellene szól a valamivel gyengébb kihozatal, és hogy e magas költségű technológiát egy alacsonyabb áron értékesíthető faanyagon alkalmazva kétségesse teszi a megtérülést – lévén, hogy az álgeszt értékcsökkentő tényező. Ezen felül az álgesztes faanyag mintegy 29%-kal ridegebb az álgesztmentes faanyagnál (Biró 2004). Biró (2004) az álgesztes faanyag minimálisan gyengébb hajlítószilárdságáról is beszámolt és a hajlítórugalmassági modulusnál sem talált lényeges eltérést. A normál körülmények közti kondicionálást követő 14 mm/min sebességű hajlítóvizsgálatok során a tömörített-kondicionált álgesztmentes és erősen álgesztes mintacsoportok hajlítószilárdságának és hajlítórugalmassági modulusának átlagai megegyeztek. **Az elérhető legnagyobb lehajlás az álgesztes faanyagcsoport esetén azonban 10,6%-kal rosszabb volt**, ami a Biró (2004) által jelzett ridegebb anyagi jellemzővel is összefüggésben lehet. A magasabb *MoE* gyengébb hajlíthatóságot jelentene, esetükben azonban a *MoE* megegyezik. Az eltérés magyarázatát az álgesztes faanyag tömörítés során mutatott nagyobb rostszétválási hajlamában kell keresni. Az apróbb hibák meggyengítik a faanyag szerkezetét, a kis bélsugármenti rostszétválások az igénybevétel hatására egyre növekvő repedésekké alakulnak, ez pedig gyengébb hajlíthatósághoz vezet. Amennyiben tehát a tömörítéseket gyengébb kihozatal mellett sikerülne gazdaságossá tenni, a további munkafolyamatok (tömörített faanyag sablonra hajlítása) ugyancsak nehézségekbe ütközhetnének, még tovább rontva a kihozatalt. A felsorolt okok miatt **az álgesztes faanyag rostirányú tömörítése lehetséges, de nem ajánlott**.

### 3.5. A rostirányú tömörítés és a fixálás hatásai a mechanikai tulajdonságokra

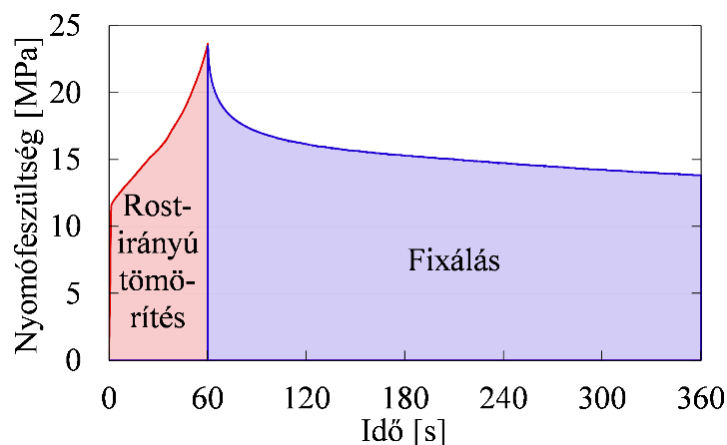
A 2.5.1. és a 3.4.2. fejezetben leírtak szerint a faanyag tömörítést követő összenyomva tartásának (fixálásának) komoly hatása van a mechanikai tulajdonságokra. Tölgy faanyag 20% mértékű, 20%/min sebességű rostirányú tömörítése okán bekövetkező egyes fizikai és mechanikai tulajdonságainak változását vizsgáltuk (nyomófeszültség, maradandó rövidülés, *MoR*, *MoE*, stb), kiemelt figyelemmel a tömörítést követő fixálás időtartamának hatásaira. Ezek alapján meghatároztuk a minta összenyomott állapotban tartásának optimális időtartamát, valamint feltártuk e modifikált faanyag fizikai és mechanikai változásai közötti néhány összefüggést is. A 3.1. táblázatban látható mintacsoportok és mintamennyiségek kerültek kialakításra tölgy fafajból. Az O5m csoport alacsony mintaszámát az indokolja, hogy nem számítottunk az O1m és O3m minták eredményeihez képest lényeges eltérésre, inkább a vizsgálatok alapján szolgáltatott trendek megerősítésére szolgáltak. Az O1m csoport szintén alacsony mintaszámú, melynek oka a rendkívül lassú, nehézkes előállítás. Míg a 20 db O1m minta elkészítése összesen mintegy 3 órába telt, addig az O1m minták minden darabja egy napot vesz igénybe. Ennek ellenére fontosnak tartottuk a vizsgálatukat, hiszen a többi mintához képest lényegesen eltérő eredményekre számítottunk, amint az később be is bizonyosodott.

3.1. táblázat *Kezelési változatok, darabszámok és a minták jelölése (forrás: Báder és Németh 2018a)*

Jelölés	Darabszám	Jelölés magyarázata
OC	20	Kezeletlen
OSC	20	Gőzölt
O0m	20	Tömörített fixálás nélkül
O1m	20	Tömörített 1 perc fixálással
O3m	18	Tömörített 3 perc fixálással
O5m	4	Tömörített 5 perc fixálással
OLm	3	Tömörített hosszú idejű fixálással (átlagosan 900 perc)

A faanyagok rostirányú tömörítése jelentős energiabefektetéssel jár. Ez a 100 °C körüli hőmérsékletű minták folyamatos melegen tartásán kívül a tömörítéshez és fixáláshoz szükséges nyomóerő biztosítását is jelenti. **A tömörítés kezdetén a minták által az első másodpercekben felvett terhelés 7,5 - 12,5 MPa, amely folyamatos emelkedéssel 12,5 - 20,0 MPa-ra növekszik a minta 20%-os tömörödöttségének eléréséig (3.12. ábra).** **A fixálási fázisban a préselési erő kezdetben gyorsan csökken, majd fokozatosan lelassul,** de még sok óra múltán is megmarad a nyomóerő csökkenő tendenciája, amikor a minta már lehűlt. A 3.12. ábrán látható az 5 perces fixálás hatása a nyomófeszültségre, mely részben már a 3.5.b ábrán is megfigyelhető volt. A tömörítés kivitelezéséhez szükséges nyomófeszültség leginkább a fafajtól, a minta tulajdonságaitól, a tömörítési aránytól és a tömörítési sebességtől függ.

A hosszú ideig fixált minták készítésekor a tömörítést követően a fűtést lekapcsoltuk, így a szobahőmérsékletűre visszahűlt berendezésben a minták nedvességvesztése jelentéktelen mértékűre csökkent, azaz nem száradtak ki a kezelés közben. Az összes mintát szemrevételezéssel vizsgáltuk a tömörítés során bekövetkezett repedéseket és egyéb hibákat keresve. Az elkészített 65 db mintából kettő repedt meg, melyeket eltávolítottuk a további vizsgálatokból. A továbbiakban a mintákat szárítószekrényben 40 °C hőmérsékleten 48 órán át szárítottuk, majd normál klímán kondicionáltuk, amíg beállt a tömegállandóság.



3.12. ábra Tipikus Idő-Nyomófeszültség grafikon rostirányú tömörítés és az azt követő 5 perces fixálás során (Báder és Németh 2018a alapján)

A hajlítási viszonyszám ( $k_{bend}$ ) célszerűbb megnevezése a hajlíthatósági együttható, mert az elérhető legnagyobb hajlíthatósági érték meghatározhatósága a fontos (lásd 2.5.2. fejezet). A  $k_{bend}$  az  $y_{max}$  mellett egy másik összehasonlító jellemző a rostirányú tömörítés és a különböző nedvességtartalmak következtében megváltozó hajlékonyság végső, méretfüggetlen értékeléséhez, amelynek számítása Gaff és tsai. (2015) alapján (10):

$$k_{bend} = (8 \cdot h \cdot y_{max}) / (L^2 + 4 \cdot y_{max}) \quad (10)$$

A hajlítóvizsgálat feszültség-alakváltozás grafikonjához a relatív deformáció ( $\epsilon$ ) kiszámítása szükséges. Ez esetünkben a minta hajlítás során bekövetkező hosszváltozását jelenti. A megnyúlás ezen mértékegység nélküli arányszámát Vorreiter (1949) definíciója alapján határoztuk meg (11).

$$\epsilon = \frac{y \cdot 6 \cdot h}{L^2}; [\%] \quad (11)$$

ahol:

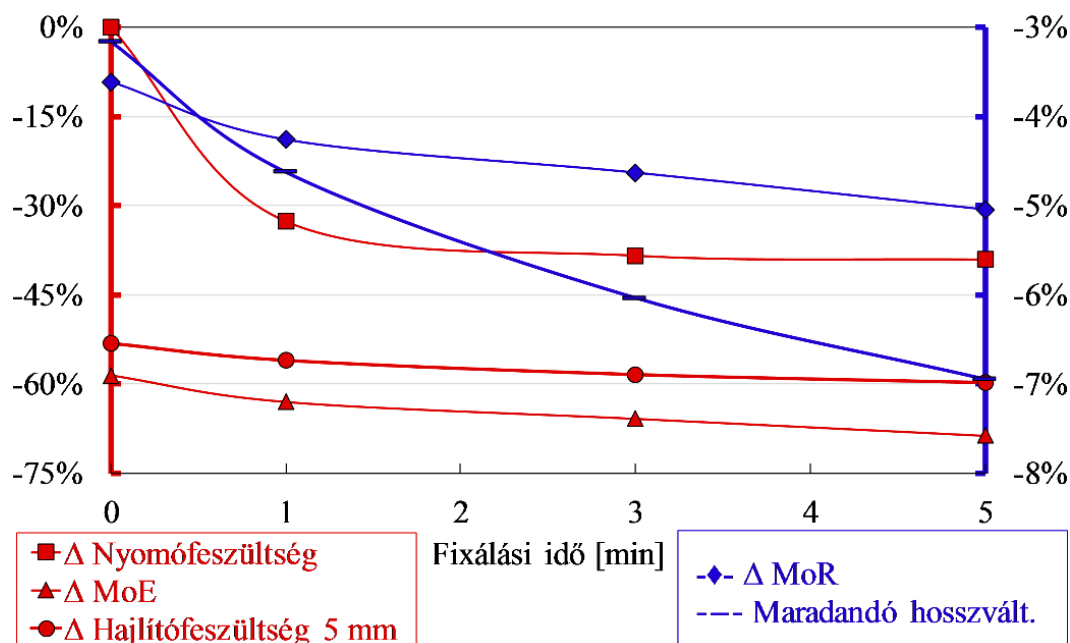
$y$  – a minta pillanatnyi lehajlása. Szobaszáraz minták terhelése közben a keresztmetszeti méretváltozások elhanyagolhatók.

Korábbi tapasztalatok alapján az anyagvizsgáló gép 4 mm keresztfej-elmozdulása esetén a hajlítómintáknak csak kis része megy tönkre, de ebben a helyzetben a hajlítófeszültség már nem elhanyagolható a hajlítószilárdságoz képest. Kezdetben a keresztfej-elmozdulást 5 mm-nek vettük, később finomítottuk 4 mm-re. Ily módon a kezeletlen és kezelt minták hajlítófeszültségi értékei azonos körülmények között összehasonlíthatók annak vizsgálatára, hogy a rostirányban tömörített faanyag mennyivel könnyebben hajlítható, mint a kezeletlen faanyag, a 8. képletet alkalmazva. Ez esetben a 4 m nyomófej elmozdulásnál mért terhelőerő értékét kell a képletbe helyettesíteni.

A kezeletlen minták átlagos  $MoR$  értéke 110,4 MPa volt. Az irodalom szerint 78-110-117 MPa (Wagenführ 1996), 105,0 MPa (Kretschmann 2010) és 97,1 MPa (Meier 2019) szokott lenni. Jelentőségüket figyelembe véve a különbségek a faanyagok természetes változékonyságával, a különböző  $L/h$  arányokkal és mintaméretekkel, valamint a 3 és 4 pontos hajlítási tesztek közötti különbségekkel magyarázhatók. A kezeletlen minták  $MoE$  értéke átlagosan 10,0 GPa, míg az irodalom 9,2-13,0-13,5 GPa (Wagenführ 1996), 12,3 GPa (Kretschmann 2010) és 10,47 GPa (Meier 2019) értéket ad meg. Ezen eltérések oka a vizsgálati eljárások közötti különbségekben keresendő és szintén közrejátszik a faanyagok

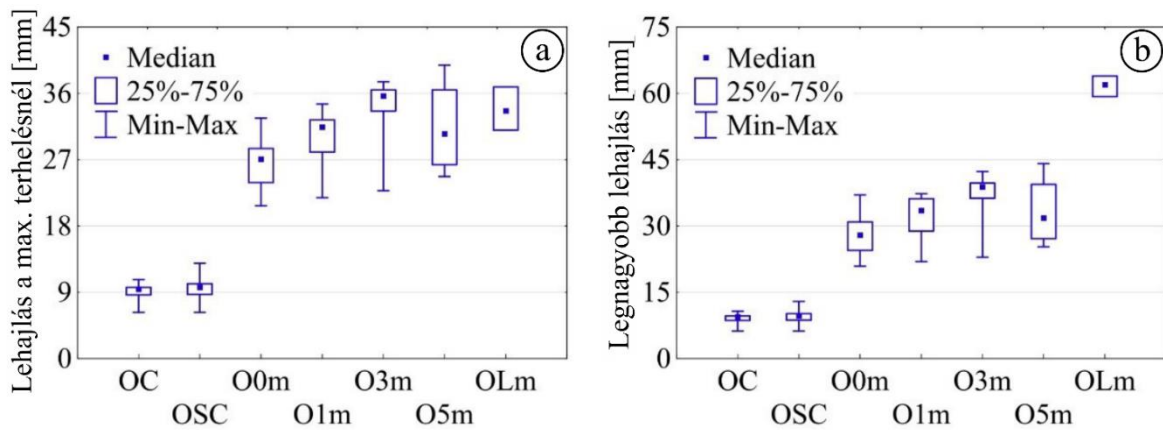


variabilitása. A kezeletlen és a gőzölt minták közötti különbség minden vizsgált mechanikai tulajdonságnál elhanyagolhatónak bizonyult, ezért felesleges külön ismertetni őket. Ugyanezen okból elegendő a tömörített minták kezeletlenekkel való összehasonlítását elvégezni. A rostirányban tömörített és fixált mintacsoportok vizsgált mechanikai tulajdonságainak kezeletlen mintacsoporthoz viszonyított átlagos változásait a 3.13. ábra mutatja.



3.13. ábra Fizikai-mechanikai tulajdonságok változása a tömörítés és az azt követő különböző fixálási időtartamok hatására; jelmagyarázatok a vonatkozó tengelyekhez igazítva (Báder és Németh 2018a alapján). Rövidítések:  $\Delta$ Nyomófeszültség – nyomófeszültség változása;  $\Delta$ MoE – rugalmassági modulus változása;  $\Delta$ Hajlítófeszültség 5 mm – hajlítófeszültség változása 5 mm nyomófej-elmozdulásnál;  $\Delta$ MoR – hajlítószilárdság változása; Maradandó hosszvált. – maradandó hosszváltozás

A hajlítófeszültség változása 5 mm nyomófej-elmozdulásnál mutatja elsőként a rostirányban tömörített faanyag előnyeit. A hajlítófeszültség 5 mm nyomófej-elmozdulásnál átlagosan 100,0 MPa volt a kezeletlen mintáknál, és a kezelés hatására felére vagy annál kevesebbre csökkent (3.13. ábra). Azaz **a hajlításhoz szükséges erőszükséglet jelentősen csökken a kezelés hatására. A rostirányú tömörítés eredményeként a MoR 3,2%-kal, a MoE 59,0%-kal csökkent. Míg a kezeletlen minták lehajlása átlagosan 9,3 mm volt a törésig, addig mind a tömörített, mind a rövid ideig fixált minták legalább háromszor nagyobb lehajlással rendelkeztek (3.14.a ábra), közel ugyanakkora hajlítófeszültség alkalmazása mellett. Ezenkívül a fixálási idő jelentős növekedésével (OLm minták) az alakváltozási képesség annyira megnőtt, hogy a minták nem törtek el a hajlítóvizsgálatok során. A nagy lehajlások jelentős hajlíthatóságot, alakíthatóságot jelentenek, amely a rostirányban tömörített faanyag tulajdonságai közül a legfontosabb. Az OLM minták esetén a maximális lehajlás legalább hatszor nagyobb, mint a kezeletlen mintáknál (3.14.b ábra). A hajlíthatósági együttható ( $k_{bend}$ ) számításánál az előbbi lehajlási arányokhoz képest természetesen nagyon hasonló eredmények születtek, továbbá összhangban vannak a 2.5.2 fejezetben ismertetett irodalmi átlagértékkel. A számszerűsített eredményeket a 3.2. táblázat mutatja be.**



3.14. ábra Lehajlás a legnagyobb hajlítóerőnél (a) és a törésig elviselt legnagyobb lehajlás (b) a négyponos hajlítóvizsgálat során (Báder és Németh 2018a alapján).

Rövidítések: OC – kezeletlen minta; OSC – gőzölt minta; O0m, O1m, O3m, O5m – rostirányban tömörített minták 0, 1, 3 és 5 perc fixálási idővel; OLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta

3.2. táblázat Hajlíthatósági együtthatók a legnagyobb hajlítóerőnél és a törés pillanatában, valamint ezek arányai

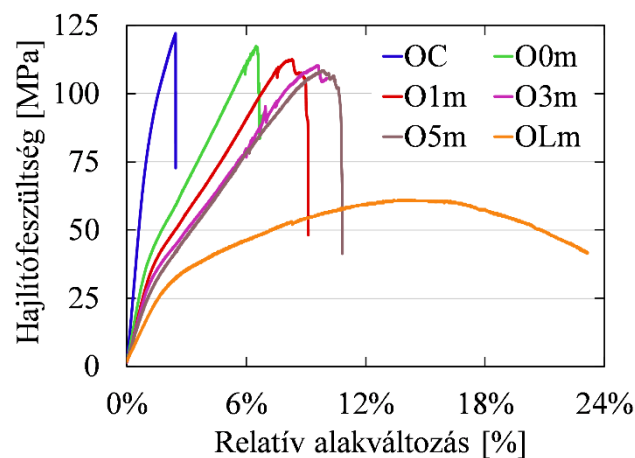
Minta-csoport	$k_{bend}$ a legnagyobb hajlítóerőnél (relatív szórás)	$k_{bend}$ a legnagyobb lehajlásnál (relatív szórás)	Eltérés a $k_{bend}$ értékek között
OC	0.036 (11.0%)	0.036 (11.0%)	0.0%
OSC	0.038 (14.8%)	0.038 (14.8%)	0.0%
O0m	0.109 (12.9%)	0.117 (16.2%)	6.9%
O1m	0.121 (10.9%)	0.130 (13.7%)	6.9%
O3m	0.132 (16.0%)	0.144 (17.9%)	8.7%
O5m	0.123 (17.7%)	0.130 (20.8%)	5.9%
OLm	0.172 (8.2%)	0.313 (3.4%)	81.4%

A 3.14.a és a 3.14.b ábrát összehasonlítva látható, hogy a minták hajlítóvizsgálata során a legnagyobb terhelés pillanata és a minta tönkremenetelének pillanata a növekvő fixálási idővel távolodnak egymástól. Ez a javuló alakíthatóságot jelzi a növekvő fixálási időtartam hatására. Az O5m mintacsoport eredményei a kis mintaszám és a többi csoportéhoz képest gyengébb minőségű minták miatt lettek a sorból kissé kiugrók. Az OLm mintacsoport átlagértékei nem mutatnak a gyakorlati tapasztalatból adódó elvárásokhoz képest eltérést. A többi csoportéhoz és a kezelés intenzitásához viszonyított alacsony szórás értékei a hasonló eredményekkel rendelkező kis mintaszám miatt vannak. A 3.15. ábra fényképei szemléletesen mutatják a 3.14. ábrán és a 3.2. táblázatban látható eredményeket. Fontos megjegyezni, hogy az OLm mintacsoport maximális lehajlási eredményei fenntartásokkal kezelendők, mert a minták megnövekedett plasztikussága miatt a hajlítóvizsgálatok nem a minta tönkremenetelkor, hanem az anyagvizsgáló gépen használt hajlító feltét határainak elérésekor értek véget. A 3.7. ábra bemutatta a hajlítóvizsgálatra előkészített állapotot, a 3.15. ábra fotói pedig kiválóan demonstrálják a különbözőképpen kezelt faanyagok lehajlási képességét.



3.15. ábra Tipikus hajlítóvizsgálati minták az anyagvizsgáló gépben a tönkremenetel pillanatában: kezeletlen (a), rostirányban tömörített és 1 percet fixált (b), valamint tömörített és hosszú ideig fixált minta, mely nem törik el a hajlítóvizsgálat során (c)

A legtöbb anyag alakíthatóságának – köztük a faanyagoknak is – szoros inverz korrelációja van a  $MoE$  értékével (Ashby és Jones 1996). A 3.16. ábra nemcsak a relatív alakváltozás kapcsolatát mutatja a hajlítófeszültséggel, hanem a  $MoE$  változását is. Az egyes grafikonok elejének meredekségéből számítható a  $MoE$  értéke, mely jól láthatóan csökken a növekvő fixálási időtartammal. Elsőként a kezeletlen minták hegyes csúcsa adja a hajlítózilárdságot (3.16. ábra). A rostirányú tömörítéssel, majd a növekvő fixálási idővel a kezeletlen minták hajlításánál megfigyelt feszültségcsúcsok fokozatosan lekerekednek. Végül az OLM minták jelentős plasztikus deformációt szenvednek a törést megelőzően: Hayden és tsai. (1965) definíciója alapján képlékeny tulajdonságokat mutatnak. Meg kell jegyezni, hogy a törés az OLM mintáknál nem következett be. Mindezek a megváltozott tulajdonságok új anyaghoz vezettek, amelynek fő előnye nagymértékű hajlíthatóság viszonylag kis erőhatás befektetése mellett.



3.16. ábra A különböző kezelések tipikus Relatív alakváltozás – Hajlítófeszültség grafikonjai (Báder és Németh 2018a alapján). Rövidítések: OC – kezeletlen minta; O0m, O1m, O3m, O5m – rostirányban tömörített minták 0, 1, 3 és 5 perc fixálási idővel; OLM – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta

### 3.5.1. Rostirányban tömörített faanyagok viselkedése a hajlítóvizsgálat során

A rideg anyagok Feszültség-Alakváltozás görbéje jellemzően lineáris a teljes feszültségtartományban, és a törési pont éles (Roylance 2008). Egy plasztikus anyag grafikonján a törés előtt jelentős plasztikus deformáció lép fel. A kezeletlen faanyagok jellemzően e kettő közti tartományba sorolhatók, mert hosszú a grafikon lineáris szakasza és éles a töréspont, de törés előtt egyértelműen jelentkezik a plasztikus deformáció. A 3.16. ábrán látható grafikonoknál megfigyelhető, hogy a rugalmas szakasz hossza jelentősen csökken a tömörítés és még jobban a fixálás hatására, majd egy rövid íves rész következik, ami a plasztikus deformáció kezdetét jelzi. Ezt újfent egy ridegebb, egyenes szakasz követi, ami a fixálási időtartam növelésével folyamatosan rövidül. Közvetlenül a töréspont előtt újabb íves szakasz jelenik meg, ami a fixálási idővel növekszik, egyértelműen a plasztikus deformációt jelezve. Tehát **a hajlítóvizsgálatok grafikonjai a megnövekedett fixálási időtartammal egyre ívesebbek lesznek és kevésbé éles törésponttal rendelkeznek. Ebből láthatjuk, hogy a törés ridegsége csökken.** A 3.16. ábra egyértelműen mutatja, hogy már rövid fixálást követően az anyagok legnagyobb hajlítási feszültsége egy olyan alakváltozásnál jelentkezik, amely a töréspont előtt van (pl. O5m minta), mert jelentős a maradandó alakváltozása az anyagnak, azaz felerősödött a plasztikus jelleg. A töréspont eltűnt a hosszan fixált mintákban, ami azt jelenti, hogy a tölgyfa eredeti ridegsége teljes mértékben megszűnt. A növekvő tömörítési aránynak nagyon hasonló jellegű hatása figyelhető meg Kuzsella (2011) disszertációjában, melyet a 2.12. ábra szemléltet. **A rostirányban tömörített és a tömörített és hosszan fixált faanyag nagyon eltérő tulajdonságokkal rendelkezik éppúgy, mint a kezeletlen és tömörített minták.** A ridegség csökkenése a hajlítási vizsgálatok után készített képeken is látható (3.17. ábra). Hajlításkor a külső íven húzófeszültség jelentkezik, a faanyagnak ez a gyenge pontja. A törés képe inkább rideg, mint szívós anyagtulajdonságokat mutat a kezeletlen mintákban (3.17.OSC ábra) (Kollmann 1951, Molnár 1999). Ez a töréskép tölgyfa esetében normális. A rostirányú tömörítés (3.17.O0m ábra) és a rövid ideig tartó fixálás (3.17.O5m ábra) következtében a törésképek szívósabbá váltak, a maradandó alakváltozás növekedett, és végül a hosszan fixált minták (3.17.OLm ábra) nem törtek el a hajlítóvizsgálat során.



3.17. ábra A vizsgált famodifikálási eljárások jellemző törésképei (forrás: Báder és Németh 2018a). Rövidítések: OSC – gőzölt minta; O0m, O5m – rostirányban tömörített minták 0 és 5 perc fixálási idővel; OLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta

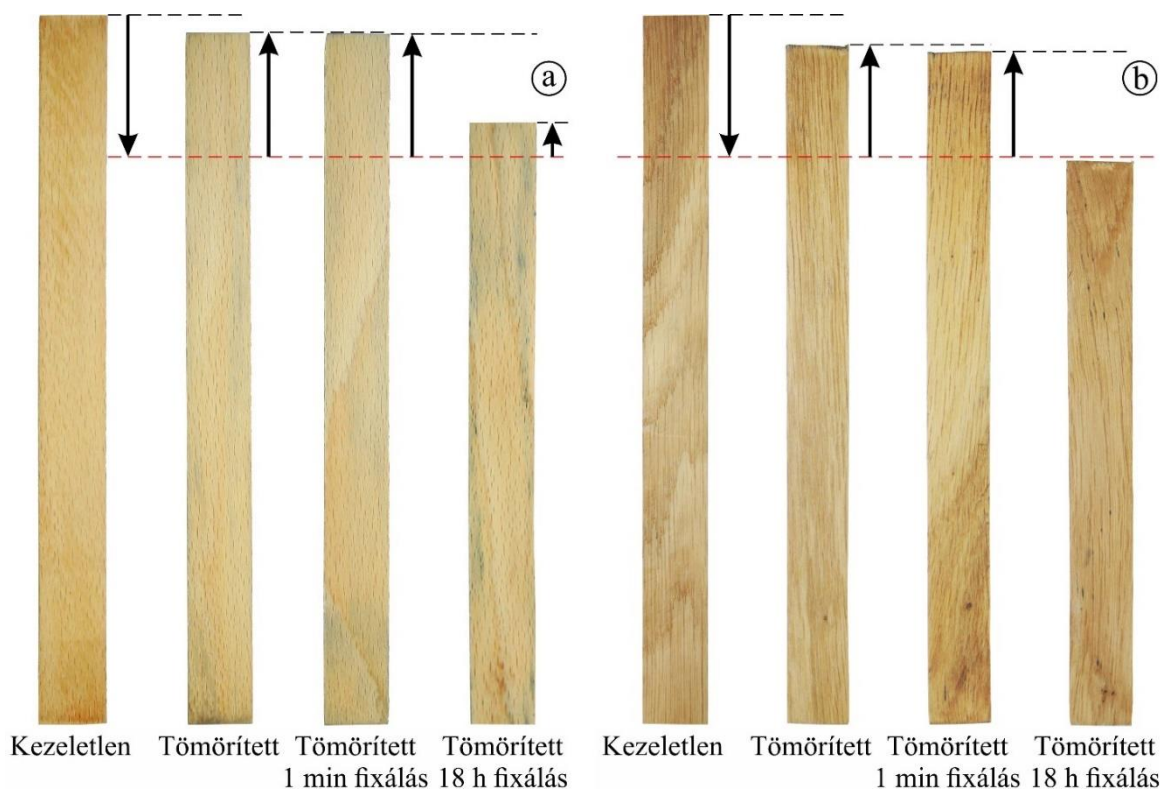
Amikor a feszültség meghaladja a rugalmassági határértéket, az anyag deformációjának egy része visszafordíthatatlanná válik és maradandó alakváltozás lesz az eredmény (Roylance 2008). A rugalmassági határhoz tartozó alakváltozás csökken a rostirányú tömörítéssel és a növekvő fixálási idővel (3.16. ábra). Egyúttal a maradandó alakváltozás növekszik, amint azt a 3.17. ábra mutatja. Az OLm mintáknak a hajlítóvizsgálat hatására elszenvedett maradandó alakváltozása nagyon hasonló az O5m-mintákéhoz (3.17. ábra). Tekintve, hogy az OLm minták legnagyobb lehajlása legalább kétszerese volt az O5m mintákénak (3.14.b ábra), az OLm-minták hajlítóvizsgálat utáni visszarugózása rendkívül nagymértékű.



### 3.5.2. Fizikai-mechanikai tulajdonságok egymással való kapcsolata

A Dell Statistica 13 verziójú (Dell Inc, USA) szoftvert használtuk a statisztikai vizsgálatokhoz. A különböző kezelések összehasonlító elemzéséhez egyirányú varianciaanalízist (ANOVA) Fisher LSD teszttel alkalmaztuk. Céljai a különféle kezelések és a mintatulajdonságok összefüggéseinek megtalálása, valamint összehasonlító elemzések voltak: mechanikai tulajdonságok, keménység, indentációs modulus, deformációs munka, nedvességtartalom. A szignifikancia szint  $p < 0,05$  volt.

A rostirányban tömörített faanyagok tulajdonságait vizsgáló kutatásokból származó szakirodalmi adatok általánosságban bizonytalanok tekintendők, mivel kevés esetben áll rendelkezésre minden körülmény, amelyek a tömörítés eredményét befolyásolhatták, jó példa erre a fixálási idő. Vorreiter (1958) kivételt képez, aki korábbi tapasztalatait alapul véve egy általánosan használt 10-15 perces fixálási időintervallumot ad meg. Többek között e tudományos hiány pótlására végeztünk kísérleteket a fixálás hatásainak vizsgálatára. A nyomóerő fixálás közbeni csökkenésének tipikus példája látható a 3.12. ábrán. A nyomófeszültség kiszámításához az alkalmazott nyomóerőt el kell osztani a minta keresztmetszetével. A nyomófeszültség közvetlenül a tömörítés befejezése után csökkenni kezd (3.12. és 3.13. ábra). A fixálás első percében a nyomófeszültség csökkenése 32,6%, majd a csökkenés üteme jelentősen lassul, azonban nem áll meg. Az OLM minták nyomófeszültsége már 74,6% csökkenést mutatott, ami jelzi a faanyag szabad belső feszültségeinek változását, redukálódását. A fixálási időtartammal együtt a maradandó rövidülés növekszik (3.18. ábra), tehát a faanyag szerkezeti változásokat szenved különösen az első percben, míg néhány mechanikai tulajdonság romlik.



3.18. ábra *Bükk (a) és tölgy (b) fafajú minták méretváltozásai, maradandó rövidülése 20% mértékű rostirányú tömörítés (piros vonal) és különböző fixálási időtartamok hatására (Báder és Németh 2017b; Báder és Németh 2020 alapján)*

Azonos kezelést követően tölgynél nagyobb maradandó rövidülés figyelhető meg a bükkhöz képest. Segesdy (2003) alapján a maradandó rövidülés azt mutatja, hogy a faanyag mennyire ellenálló a rostirányú összenyomással szemben, és a maradandó rövidülés mértékével fordított arányban mekkora erőhatás lesz szükséges a faanyag meghajlításához. A 3.3. táblázatban látható a nyomófeszültség-változás és az összes többi fizikai és mechanikai tulajdonság közötti kapcsolat. Továbbá látható a hosszváltozás (12% nedvességtartalomra történő szárítás után) és a többi tulajdonság kapcsolata is 95%-os megbízhatósági szinten.

3.3. táblázat Regressziós összefoglaló a függő tulajdonságokról (forrás: Báder és Németh 2018a). Rövidítések:  $R$  – korrelációs együttható;  $R^2_{adj.}$  – korrigált determinációs együttható;  $MoR$  – hajlítószilárdság;  $MoE$  – hajlítórugalmassági modulus

1. változó	2. változó	R	$R^2_{adj.}$
Nyomófeszültség változása a fixálás során (minták száma: 45 db)	Maradandó rövidülés 12%-ra szárítást követően	<b>0.9511</b>	0.9024
	Hajlítófeszültség 5 mm nyomófej-elmozdulásnál	0.6564	0.4176
	$MoR$	0.5563	0.2934
	$MoE$	<b>0.7729</b>	0.5880
	Lehajlás a legnagyobb terhelésnél	0.2656	0.0490
	Legnagyobb lehajlás	<b>0.8067</b>	0.6427
	Relatív alakváltozás	<b>0.8793</b>	0.7679
Maradandó rövidülés rosttelítettség feletti nedvességtartalomról 12%-ra szárítva (minták száma: 65 db)	Hajlítófeszültség 5 mm nyomófej-elmozdulásnál	0.6750	0.4469
	$MoR$	0.5528	0.2946
	$MoE$	<b>0.7433</b>	0.5453
	Lehajlás a legnagyobb terhelésnél	0.3535	0.1110
	Legnagyobb lehajlás	<b>0.8210</b>	0.6689
	Relatív alakváltozás	<b>0.9048</b>	0.8159

A 3.3. táblázat az utolsó két oszlopában a korrelációs együttható ( $R$ ) és a korrigált determinációs együttható ( $R^2_{adj.}$ ) látható. Az általánosan használt determinációs együttható ( $R^2$ ) a kapcsolat erősségét jelzi arra vonatkozóan, hogy a független változók milyen mértékben jelzik előre a függő változót. Az  $R^2_{adj.}$  azt mutatja, hogy a független változók összessége a függő változó varianciájának hány százalékát magyarázza. Egytől való eltérése a kísérlet véletlenszerű hibáit jelzi (anyagkülönbségek, mérési hibák, mintakülönbségek, stb), pontosabb kapcsolatot tár fel a vizsgált tulajdonságok között, mint az  $R^2$ . Látható, hogy a faanyag természetes változékonysága és nagymértékű modifikálása ellenére megfelelő mutatószámokat kaptunk egyes tulajdonságok előrejelzésére. A regresszió egységesen gyenge a lehajlás legnagyobb terhelésnél, a  $MoR$  és a hajlítófeszültség 5 mm nyomófej-elmozdulásnál esetén. A másik négy tulajdonság (félkövérrel jelölve a 3.3. táblázatban) sokkal jobban illeszkedik a trendekhez. **A korrelációk alapján, ha ismerjük néhány minta tulajdonságait, nagy biztonsággal megállapíthatjuk az egész populáció hajlíthatóságát a nyomófeszültség változása alapján a fixálási folyamat közben. Ezen kívül, ha nem ismert a fixáláskor végbemenő nyomófeszültség-változás, akkor a maradandó rövidülés szintén jó korrelációval jelzi a minta hajlíthatóságát. Mindkettő felhasználható előrejelzések készítésére az azonos alapanyagból hasonló módon készült minták legnagyobb hajlíthatóságának meghatározására, akár már a gyártás közben.**



### 3.5.3. Optimális fixálási időtartam

A faanyag hajlékonysága és a rostirányú tömörítés közben fellépő nyomófeszültség közötti jó korreláció miatt (3.3. táblázat) utóbbi tulajdonság felhasználható az optimális fixálási időtartam meghatározására. **Az Idő-Nyomófeszültség grafikonnak nincs a fixálási fázisban töréspontja (3.12. ábra).** A fixálás kezdő pillanatától a nyomófeszültség időbeli változását elemezve az első 2 másodpercben 12,1%-os csökkenés látható. A következő 2 másodpercben a nyomófeszültség már csak 4,7%-kal, majd 3,1%-kal és 2,4%-kal esik vissza a kiindulási értékhez képest. Ha egy 2 másodpercenkénti 0,5%-os nyomófeszültség-csökkenési értéket határozunk meg, az a kezdeti csökkenéshez (12,1%) viszonyítva jóval kisebb, mindössze a huszad része. Ennélfogva, ha a nyomófeszültség csökkenése már nem haladja meg a 0,5%-ot 2 másodperc lefolyása alatt, akkor a nyomófeszültség változása lassúnak tekinthető. Ez egy olyan tapasztalati érték, ahol a termelékenység és az elvárt anyagtulajdonságok egyaránt megfelelőek. A vizsgálati elemzések eredményei a 3.4. táblázatban kerülnek bemutatásra.

3.4. táblázat *Optimális fixálási időtartam, ahol a nyomófeszültség változása már nem lépi túl a másodpercenkénti 0,25%-ot (forrás: Báder és Németh 2018a). Rövidítések: OSC – gőzölt minta; O0m, O5m – rostirányban tömörített minták 0 és 5 perc fixálási idővel; OLM – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta*

Kezelés	Optimális fixálási időtartam (sec)			
	Átlag	Relatív szórás	Minimum	Maximum
O1m	48.9	17.3%	33.5	59.1
O3m	51.6	20.4%	31.7	69.5
O5m	46.6	23.6%	38.9	63.0
OLm	47.1	28.4%	35.5	61.8
<b>Összesítve:</b>	<b>49.8</b>	<b>19.9%</b>	<b>31.7</b>	<b>69.5</b>

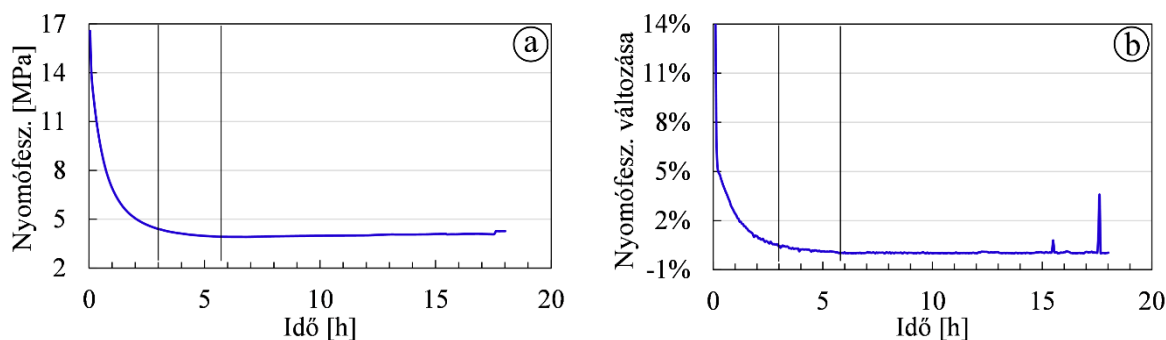
Ha a mechanikai tulajdonságok változásait figyelembe véve az optimális fixálási időtartamot keressük, akkor a 3.4. táblázat alapján 1 perces fixálási időtartam javasolható, ami némi biztonsági tartalékot is tartalmaz. **Az 1 perces fixálási idő eltelte után a maximális alakváltozás 110%-ra növekszik a tömörített és nem fixált faanyaghoz képest, és 353%-ra a kezeletlen mintákhoz képest, a MoE csökkenésével összhangban (rendre 89,3% és 37,0%). A nyomófeszültség 67,4%-ra, a hajlítófeszültség 5 mm nyomófej elmozdulásnál 43,9%-ra csökken a rostirányú tömörítés és 1 perces fixálási idő eredményeképpen, a kezeletlen mintákhoz viszonyítva.** Természetesen a fent 1 percben megállapított fixálási időtartam a laboratóriumi eljárásra vonatkozik, más előállítási módszerek és ipari szokványok miatt a javasolt időtartam eltérhet. Egyéni igények kielégítése érdekében nagyságrendekkel hosszabb fixálási időtartamot is választhatunk. A legnagyobb lehajlás eléréséhez hosszú idejű fixálásra van szükség, de ez mind az ipari, mind a laboratóriumi előállításnál nagyon lassú munkamenetet jelent. Ekkor azonban a legnagyobb lehajlás mértéke valóban óriásit növekszik (3.14.b ábra), főleg a kezeletlen faanyaghoz viszonyítva.

Az előzőek alapján általánosságban kijelenthető, hogy a növekvő fixálási időtartam erősíti a rostirányú tömörítés faanyagra gyakorolt fizikai-mechanikai hatásait. A bemutatott OLM minták annyira hosszú időn keresztül voltak fixálva, hogy ekkora távon már a gyakorlati szempontok szerint felesleges pontos fixálási időtartamról beszélni.

### 3.5.4. Rostirányban tömörített minták hosszú időtartamú fixálása

A 3.5. fejezetben ismertetett tölgy faanyagok és eljárások (rostirányú tömörítés és rövid idejű fixálás) révén a  $MoR$  csökkenése ugyan nem jelentős (3.13. ábra), de a hosszú idejű fixálással 56,9 MPa-lal az eredeti értékének felére redukálódott. Csak a  $MoR$ -t figyelembe véve a hosszú idejű fixálás nem szükséges. Ugyanakkor a hajlítófeszültség 5 mm nyomófej-elmozdulásnál és a  $MoE$  jelentősen mérséklődik már a rostirányú tömörítés esetén is (3.13. ábra). A hosszú idejű fixálás eredményeként a  $MoE$  1,9 GPa lett, ami 81,0%-os csökkenést jelent és a hajlítófeszültség 5 mm nyomófej-elmozdulásnál 70,7%-os csökkenéssel 29,3 MPa-ra változott. A rostirányban tömörített faanyag előállításának ésszerűsítése, gyorsítása és a lehető legjobb hajlíthatóság elérése érdekében további kísérleteket végeztünk. A 3.3. táblázatban bemutatott korrelációkat alapul véve a fixálás közben bekövetkező nyomófeszültség-változásból kiszámítható, hogy milyen mértékben érdemes az OLM minták fixálási időtartamát lerövidíteni úgy, hogy az elvárt kiugró mechanikai tulajdonság-változások továbbra is bekövetkezzenek. A mérések eredményeire illesztett trendvonalak és az ekvivalencia szint számítását a Microsoft Excel szoftver segítségével végeztük. A Microsoft Excelből az ábrák jó minőségű kinyerése a Daniel's XL Toolbox ingyenes program segítségével történt.

Bükk és tölgy hosszan fixált minták adatait vettük alapul. A fixálás során mért nyomófeszültségek értékeit 3 percenként átlagoltuk. A 18 darab tölgy minta átlagánál a fixálási időtartamnak közel az első 6 órájában szigorúan monoton csökken a nyomófeszültség, majd állandósul (3.19.a ábra). A 3.19.a ábrán a grafikont metsző jobb oldali függőleges vonal a nyomófeszültség-csökkenés befejező pillanatát mutatja. A hatodik órában azonban már annyira kicsi a görbének a meredeksége, hogy felesleges az előállításra a gépidőt rászanni, mert elhanyagolható mértékben változnak a faanyag tulajdonságai. Ennek megfelelően hárompercenként vizsgálva a nyomófeszültséget megkerestük azt a pontot, ahol a csökkenés percenként 0,5% alá esik. A rostirányú tömörítés befejezésétől számítva 3 óra elteltével következett be, melyet olyan állapotnak vettük, amikor a változás már nagyon lelassult (3.19.b ábra). A nyomófeszültség a 0,1%-os csökkenést 4,5 óra elteltével éri el.



3.19. ábra Tölgy minták átlagos nyomófeszültsége a fixálás során (a) és a nyomófeszültség változásának mértéke az idő függvényében (b). A jobb oldali függőleges jelölővonal a nyomófeszültség-csökkenés befejező pillanatát jelzi, míg a bal oldali a nyomófeszültség csökkenésének 0,5%/perc alá esését

Bükk mintákból 9 darabnak az átlageredményét vizsgáltuk meg. A fixálási időtartamokra megállapított befejező értékek rendre 5 óra, 1,6 óra és 3 óra lettek. Megfigyelhető volt továbbá, hogy bükköknél a hosszan tartó fixálás alatt a nyomófeszültség csökkenése összesen 7 MPa volt, míg tölgyenél ugyanez közel 13 MPa. Igaz, a tölgynek magasabb volt az elért maximális nyomófeszültsége, aminek fényében a minták nyomófeszültség-csökkenései közt kevésbé drámai az eltérés. A 3.19. ábra grafikonjainak utolsó szakaszán növekedés figyelhető meg. Ez egy mérési hibának a megnyilvánulása: a hosszú időn keresztül kivitelezett fixálásokat a tömörítő berendezés éjszakai üzemidejét is igénybe véve

valósítottuk meg. A tömörítési és 18 órás fixálási műveletek jellemzően kora délelőtt fejeződtek be. A temperált laboratóriumban az Instron univerzális anyagvizsgáló berendezés fémalkatrészeit a reggeli, keleti tájolású ablakokon bejutó napsugárzás valamelyest felmelegítette és a fémek nagymértékű hőtágulásából adódó nyomásnövekedés mutatkozik meg a grafikonokon. Azonban a vizsgálatok sikerességét, eredményeit ez a jelenség nem zavarta, mert addigra határozottan megállt a minták nyomófeszültségének csökkenése, már órákkal korábban.

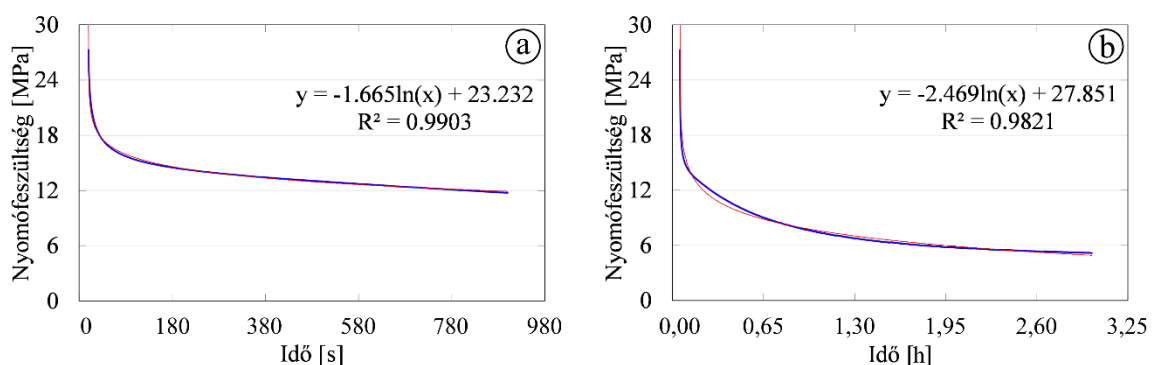
**A grafikonok elemzésével megállapítottuk tehát, hogy a laboratóriumi tömörítő berendezésben hosszan fixált mintáknak a 15-18 órás fixálási időtartamából az utolsó legalább 10 óra felesleges. A számítások igazolására a 20% mértékű rostirányú tömörítéseket 18 órás, 5 órás és 3 órás, valamint 1 perces fixálási időtartammal végeztünk bükk és tölgy fafajokon.** A rostirányú tömörítések a szokásos, korábbiakban bemutatott menetrend szerint történtek, a hajlítóvizsgálatok szintén. Ezen újabb kísérletsorozatnál már 4 mm lehajlásnál határoztuk meg a hajlítófeszültséget. A 140 db bükk és tölgy minta vizsgálatából számos eredmény született: *MoR*, hajlítófeszültség 4 mm lehajlásnál, *MoE*, lehajlás a legnagyobb erőnél és elérhető legnagyobb törés előtti lehajlás. Az átlageredmények ismertetése helyett célszerűbb és informatívabb a kezeletlen faanyagok azonos tulajdonságaihoz viszonyított változásokat bemutatni (3.5. táblázat), mert a modifikációk után kapott eredmények mindig erősen függnak a felhasznált alapanyagoktól. Az adatokból kiderül, hogy az 1 perces fixálási időtartamú minták eredményei fafajtól függetlenül határozottan elkülönülnek a hosszasan fixált minták hajlítóvizsgálati eredményeitől, jellemzően messze alulmúlva azokat. Míg a lehajlási képessége sokkal kisebb és a *MoE* a hajlítófeszültséggel együtt magasabb (ezek mindegyike gyengébb hajlíthatóságot jelent), addig hajlítószilárdságban magasabb értékekkel bír, ami pozitívum. **A 3 órán, 5 órán és 18 órán keresztül fixált minták eredményeit figyelembe véve a hajlítófeszültség 4 mm lehajlásnál és a lehajlás a legnagyobb erőnél eredményei összhangban voltak, nem mutattak lényeges eltérést a különböző fixálási időtartamok között.** A legnagyobb lehajlás a várt eredményeket hozta, így a 3, 5 és 18 órát fixált mintáknál nem következett be a törés a hajlítóvizsgálatok során. Mivel a vizsgáló berendezés kilépett a megbízható mérési tartományából, egyúttal a vizsgálatban biztos, jól meghatározható pontot (pl. a törést) sem lehetett megállapítani, ezért sajnos utóbbi nem releváns összehasonlító adat. A hajlítószilárdság tekintetében a hosszan fixált tölgyeknél nincs eltérés, míg a bükköknél kismértékben magasabb a 18 órát fixált minták átlaga; ez kis eltérés, a fafajon belül jelentkező szerkezeti és fizikai eltérésekkel magyarázható.

3.5. táblázat *Különböző fixálási időtartamok hatása a rostirányban 20% mértékben tömörített faanyag néhány fontos tulajdonságára. A bemutatott értékek az adott tulajdonság kezeletlen mintákhoz viszonyított mértékét jelzik*

	Fixálási időtartam [h]	Hajlító-szilárdság	Hajlító-feszültség 4 mm lehajlásnál	Hajlító-rugalmasági modulus	Lehajlás a legnagyobb erőnél	Leg-nagyobb lehajlás
Bükk	1/60	76%	41%	43%	364%	405%
	3	51%	31%	24%	408%	619%
	5	50%	29%	23%	415%	610%
	18	56%	30%	27%	427%	570%
Tölgy	1/60	72%	42%	35%	244%	272%
	3	65%	38%	31%	400%	638%
	5	62%	36%	29%	422%	682%
	18	63%	34%	22%	366%	570%

A hajlítórugalmassági modulus egy nagyon fontos mutató, mert a szakirodalom szerint fordítottan korrelál a hajlíthatósággal (Ashby és Jones 1996). **A kezeletlen bükk faanyag 18 órás fixálással átlagosan 73%-ot, 5 órás fixálással 77%-ot, 3 órás fixálással pedig 76%-ot veszít a  $MoE$ -ből, tölgyeknél ugyanezek az értékek rendre 78%, 71% és 69%.** Ezen eredmények is hasonló mértéket képviselnek, esetleg a tölgy 3 órás és 18 órás fixálásai közötti eltéréseket lehet kiemelni. Itt a legnagyobb, 9%-os a különbség a  $MoE$  változásában, de figyelembe véve a faanyagok tulajdonságainak változékonyságán túl azt is, hogy hatod annyi idő befektetésével mindössze 9%-ot romlik az elérhető legjobb eredmény, egyértelművé válik, hogy ennyi áldozatot megér az anyag gyorsabb előállításából fakadó nyereség. Az említett nyereség számszerűsíthető a rövidebb fixálási időtartam lényegesen nagyobb termelékenysége, avagy a lényegesen rövidebb modifikációs ciklus és a rövidebb géphasználat minden további előnyeként. Nemcsak a kezeletlen minták, hanem a tömörített és 1 percet fixált minták eredményeit alapul véve is **kijelenthető, hogy a hosszú időtartamú fixálások a maximálisához közeli tulajdonságbéli változásokat okoznak már akkor is, ha csupán a 3 órát fixált mintákat vesszük figyelembe.** Másik, a disszertációban nem bemutatott vizsgálat eredményeiből azonos fafaj máshonnan származó rönkjének eredményeit is összehasonlítottuk az itt bemutatott kutatás adataival. Az összehasonlíthatóság alapelveit szem előtt tartva, azonos vizsgálati körülményeket biztosítva vontuk le a következtetést. A vizsgált tulajdonságok változási tendenciái tökéletesen egybeváltak, de az azonos fafaj másik példányához képest statisztikailag szignifiáns eltérések voltak tapasztalhatók. Ez megerősítette a korábbi következtetést, hogy az e fejezetben bemutatott tulajdonságváltozások a rostirányú tömörítés hatására végbemennek, de a változás mértéke nagyon függ az alapanyagtól egy fafajon belül is.

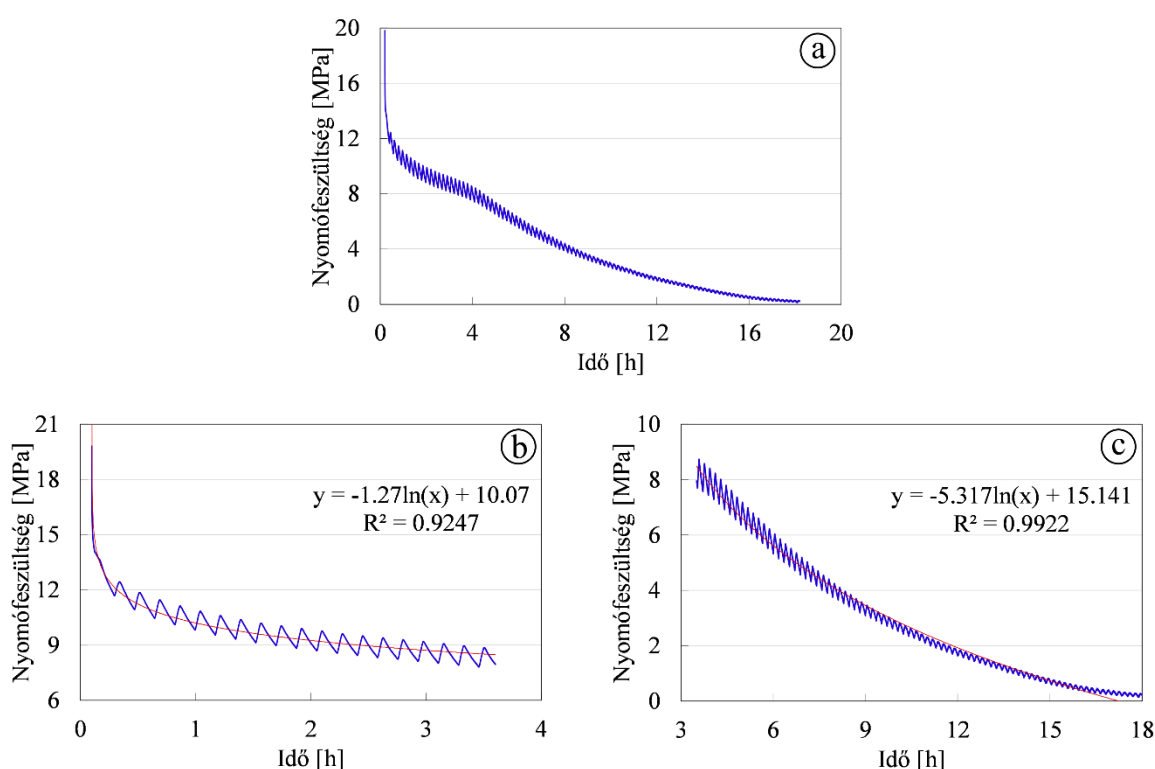
Az előző témakörhöz kapcsolódóan megjegyzendő, hogy a nyomófeszültség változását **a fixálás legintenzívebb, első 15 percében szigorúan monoton csökkenő természetes alapú logaritmus függvénnyel gyakorlatilag tökéletesen lehet modellezni (3.20.a ábra),** amíg megfelelően magas a minta hőmérséklete. Ezt a magas értékű korrelációs együttható ( $R^2$ ) bizonyítja. A magas hőmérsékletet az magyarázza, hogy a tömörítés fűtött berendezésben történik és a mintát körülvevő tömörítő berendezésnek a tömege egy ideig megőrzi a magas hőmérsékletét – még klimatizált laborban is – a hőtehetetlensége miatt. **Ha a fixálás első 3 óráját nézzük, a  $R^2$  még mindig nagyon magas, az LN függvény továbbra is használható a nyomófeszültség változásának leíró modellezésére (3.20.b ábra).**



3.20. ábra Tölgy minta nyomófeszültség-csökkenése a fixálás első 15 percében (a) és az első 3 órájában (b). A kék vonalak a fixálás során kapott adatokból kerültek kirajzolásra, a pirosak az ezekre illesztett trendvonalak. A trendvonalak egyenletei és a determinációs együtthatók is feltüntetésre kerültek

A tömörítő berendezés ugyan a mintával együtt szobahőmérsékletűre hűl, de a minta nedves állapotban marad, mert a berendezésben majdnem teljesen el van szigetelve a külvilágtól, és így még órák múlva is képes valamelyest a folyamatosan rá ható nyomóerőre reagálni. Az ellaposodó görbét, ami legkésőbb hat óra elteltével vízszintes egyenesbe vált át, már nem írja le megfelelően a természetes alapú logaritmus függvény. Ekkorra a minta szerkezeti változásai teljesen befejeződnek, leállnak. A 3.20. ábrán csak a fixálási fázis látható, a teljes tömörítés+fixálásra vonatkozó grafikont a 3.12. ábra mutatja be.

2 db bükk és 4 db tölgy mintánál a tömörítő berendezés fűtése bekapcsolva maradt a fixálás során. A kirajzolódó grafikonok minden esetben a 3.20. ábrán bemutatott normál lefutású grafikontól eltérő alakúak és fűrészfogasak lettek, melyre a 3.21. ábra mutat egy példát. A minta a magas hőmérsékleten sokáig megtartja lágyított állapotát, egyúttal folyamatosan szárad az intenzív gőzképződés következtében. A 3.21.a ábrán látható fűrészfogasság oka az intenzív párolgás lehet, amint a bütükön távozó vízmennyiség kis ideig beszorul a faanyag és a fémlap közé, gőzzé alakul a térfogatát megnövelve, majd távozik onnan; mindez a faanyag belsejében is lejátszódik.



3.21. ábra Bükk minta nyomófeszültség-csökkenése az idő függvényében, amennyiben a tömörítő berendezés fűtése folyamatosan működik és 100 °C feletti hőmérsékleten tartja a mintát (a). A késsel kirajzolt grafikont két részre bontva az jól közelíthető a piros LN függvénnyel a fixálás első 3,5 órájában (a) és a 3,5-15 óra közti időszakban (b)

A grafikon az első periódusban, körülbelül 3,5 órán keresztül addig követi a kezdetben felvett LN görbét, amíg a nedvességtartalma megfelelően magas (3.21.b ábra). Ekkor a folyamatosan lágyított állapotban lévő faanyag feszültségcsökkenése dominál. Utána egy rövid, kb. fél órás átmeneti időszak következik, valószínűleg innentől kezd a faanyag a nedvességvesztés miatt zsugorodni, tehát nedvességtartalma ekkorra eléri a rosttelítettségi pontját. A görbe következő szakaszát szintén kiválóan lehet közelíteni természetes alapú logaritmikussal függvénnyel (3.21.c ábra). Hozzávetőleg újabb 11 órán keresztül tart, míg a faanyag folyamatosan veszít a nedvességtartalmából és a méreteiből is. Ebben a periódusban már a száradási zsugorodás okán létrejött feszültségcsökkenést láthatjuk, mely közben az intenzív nedvességvesztés miatt belső repedések is kialakulnak a faanyagban. A minta végül

teljesen kiszáradva rideggé válik. A rostirányban tömörített faanyag nagymértékű száradási zsugorodásra képes rostirányban. Mivel a fixálás a minta folyamatos összenyomva tartását jelenti egy megadott méreten, a bekövetkező zsugorodás eredményeképpen idővel megszűnik az összezsugorodott faanyag és a nyomófej közötti kapcsolat, azaz a nyomófeszültség nullázódik. Egészen e pontig az LN görbe kiválóan leírja a nyomófeszültség változását. Így két LN görbével jól közelíthető a faanyag rostirányú tömörítése közbeni nyomófeszültségének viselkedése.

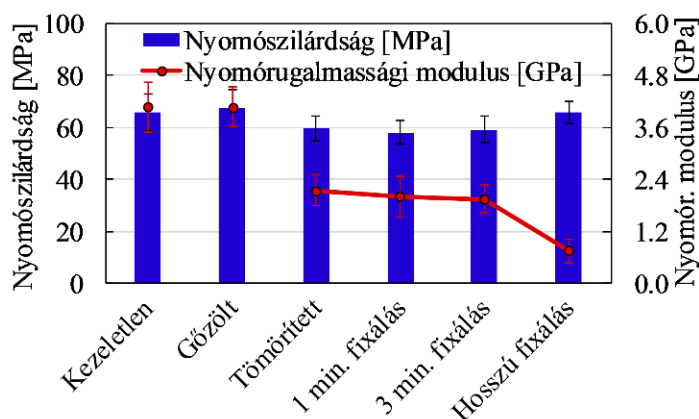
### 3.5.5. Nyomószilárdság változása a tömörítés következtében

Rostiránnyal párhuzamos nyomóvizsgálatoknál első lépésben kezeletlen mintákból a szabványos  $20 \times 20 \times 30 \text{ mm}^3$  ( $H \times S \times R$ ) méretűek mellett az oldalirányok és a hosszirány másfélszeres arányának megtartásával  $12 \times 12 \times 18 \text{ mm}^3$  ( $H \times S \times R$ ) méretűeket is készítettünk. Az ezeken elvégzett nyomóvizsgálatok alapján a különböző méretű mintacsoportok eredményei nem mutattak szignifikáns eltérést, tehát a tömörített mintatestekből kialakítható kisebb,  $12 \times 12 \times 18 \text{ mm}^3$  ( $H \times S \times R$ ) méretű nyomó próbatesteken is megfelelően elvégezhető a kísérlet. A minták száliránya párhuzamos volt a nyomóerővel. Mind a vizsgálatokat, mind a számításokat az MSZ 6786-8 (2004) és az ISO 13061-17 (2017) szabványoknak megfelelően végeztük. A nyomóvizsgálatokhoz szintén az Instron 4208 univerzális anyagvizsgáló gépet vettük igénybe 3 mm/min terhelési sebességgel. A tesztek leállítottuk, amikor a terhelés értéke préselés közben stabilizálódott. A klimatizált minták nyomószilárdsága ( $\sigma_c$ ) az említett szabványok szerint számítható (12).

$$\sigma_c = \frac{F}{b \cdot h}; [\text{MPa}] \quad (12)$$

Az anyagok arányossági határa növekvő terhelés mellett annál a legnagyobb feszültségnél van, amelynél az anyag még nem szenved maradandó alakváltozást (Winandy és Rowell 2005). Grafikailag ez a vizsgálatok közben felvett feszültség-alakváltozás görbe lineárisan emelkedő tartományának végpontja. Ezek alapján a nyomófeszültséget kiszámítottuk az arányossági határon a (12) képlet alkalmazásával.

Amint a 3.9.3. fejezetben ismertetésre került, a kezeletlen bükk minták átlagos nyomószilárdsága ( $\sigma_c$ ) 53,1 MPa lett, összhangban az irodalmi értékekkel. A rostirányban tömörített és 1 percet fixált minták átlagos  $\sigma_c$  értékére 12% MC-nál 49,9 MPa adódott, ami statisztikailag azonosnak tekinthető a kezeletlen minták értékeivel. Hasonló tendencia mutatkozott normál körülmények között klimatizált,  $9 \pm 0.2\%$  MC-ú tölgy minták vizsgálatánál. A  $\sigma_c$  kezeletlen mintáknál 65,7 MPa lett, míg tömörített és 1 percet fixált minták esetében 58,1 MPa. Ez nagyobb mértékű csökkenés, mint a bükknél, de a 11,5% még mindig nem tekinthető jelentősnek az elvégzett nagymértékű mechanikai faanyagmodifikáció tükrében. Többféle modifikáció eredményeit a 3.22. ábra mutatja be.



3.22. ábra Kezeletlen és többféle módon kezelt tölgy faanyag nyomószilárdsága és nyomórugalmassági modulusa



**A gőzölés nem okozott eltérést sem a  $\sigma_c$ , sem a nyomórugalmassági modulus szempontjából.** A tömörítés fixálás nélkül kis csökkenést eredményezett a  $\sigma_c$  értékében, miközben a nyomórugalmassági modulus hozzávetőleg a felére csökkent. Ezen értékek a rövid fixálási időtartam miatt stabilak maradtak. **A hosszú időtartamú, 18 órás fixálás minimálisan növelte a nyomószilárdságot, egyúttal a kezeletlen értéknek körülbelül ötödére csökkentette a nyomórugalmassági modult.** Az arányossági határhoz tartozó nyomófeszültségi értékek a kezeletlen és a gőzölt mintáknál minden esetben meghatározhatók voltak, rendre 54,0 és 55,1 MPa. Ugyanez a mechanikai modifikáción átesett mintákra nem mondható el. Csoportonként elvétele 1-1 mintánál sikerült megállapítani ezt az értéket, ami jelzi, hogy komoly szerkezeti változásokon esett át a kezelés következtében a faanyag. Kezdetben harmadával csökken az arányossági határ, majd a fixálási idő növekedésével végül megfelelődik. Ezek azonban csak tájékoztató jellegű, nem reprezentatív eredmények. A tömörített és 1 percen keresztül fixált bükk faanyag nyomóvizsgálata során mért arányossági határ körülbelül egyharmaddal alacsonyabbnak mutatkozott a kezeletlen minták arányossági határához képest. Sok esetben a rugalmas tartományt itt sem lehet meghatározni, sem a nyomófeszültséget az arányossági határnál, bár nagyobb arányban volt mérhető az érték, mint tölgy fafajnál. Ez a rostirányú tömörítés következménye, mivel a faanyag a tömörítési folyamat során a rugalmassági határán túl lett összenyomva. Az ilyen típusú rostirányú préselés azonban – bár rendelkezésre állnak az alkalmazott nyomóerők a teljes folyamat során – nem tekinthető nyomószilárdsági vizsgálatnak, mivel különleges körülmények között lett végrehajtva, amikor az anyag plasztifikált állapotban volt, ráadásul oldalról megtámasztva.

### 3.6. Frissen tömörített minták pihentetése további munkafolyamatok előtt

A rostirányú tömörítés egy intenzív famodifikációs módszer, amely a szerkezeti átalakításnak köszönhetően feszültségeket indukál a faanyagban. A fixálás számos feszültséget kiküszöböl (Báder és Németh 2017), de **a minták szárítása során fellépő deformációk a fában fennmaradó feszültségeket mutatják, melyeket a tömörítés és a szárítás közötti 24 órás pihentetéssel próbáltunk csökkenteni.** A vizsgálat a következő szakaszokból állt:

- tömörítés és 1 perc fixálás
- 24 órás pihentetés normál klímán (20 °C és 65% relatív páratartalom)
- szárítás:
  - 20 db bükk és 20 db tölgy óvatos szárítása. 25 °C hőmérsékleten indult, amit 7 nappal később 30 °C-ra emeltünk, összesen 30 napig tartott
  - 20 db bükk és 20 db tölgy intenzív szárítása. 45 °C hőmérsékleten indult és 7 nap után 60 °C-ra emeltük, összesen 25 napig tartott.

A szárításokat a Binder KBF-115 klímaszekrényben hajtottuk végre, a relatív páratartalom (relative humidity, *RH*) mindkét szárítási eljárás esetén fokozatosan csökkent 80%-ról 45%-ra. A szárítás végeztével a mintákat normál klímán kondicionáltuk. A tulajdonságokat (*MoR*, *MoE*, lehajlás a legnagyobb erőnél és maximális rostirányú zsugorodás) a szárítás és kondicionálás után vizsgáltuk minden mintánál. A nem pihentetett és pihentetett minták átlageredményei közti eltéréseket a 3.6. táblázat mutatja.

3.6. táblázat A tömörítést és 1 perces fixálást követően nem pihentetett és 24 órát pihentetett faanyagok tulajdonságainak különbsége (forrás: Báder és Németh 2018a).  
Rövidítések: *MoR* – hajlítószilárdság; *MoE* – rugalmasság modulus

	<i>MoR</i>	<i>MoE</i>	Lehajlás a legnagyobb erőnél	Maximális rostirányú zsugorodás
Tölgy tömörített, óvatos szárítás	0.8%	1.7%	0.0%	12.0%
Tölgy tömörített, intenzív szárítás	0.8%	2.7%	-4.4%	-1.1%
Bükk tömörített, óvatos szárítás	0.2%	-0.4%	2.4%	7.9%
Bükk tömörített, intenzív szárítás	0.1%	0.4%	-3.9%	-9.0%

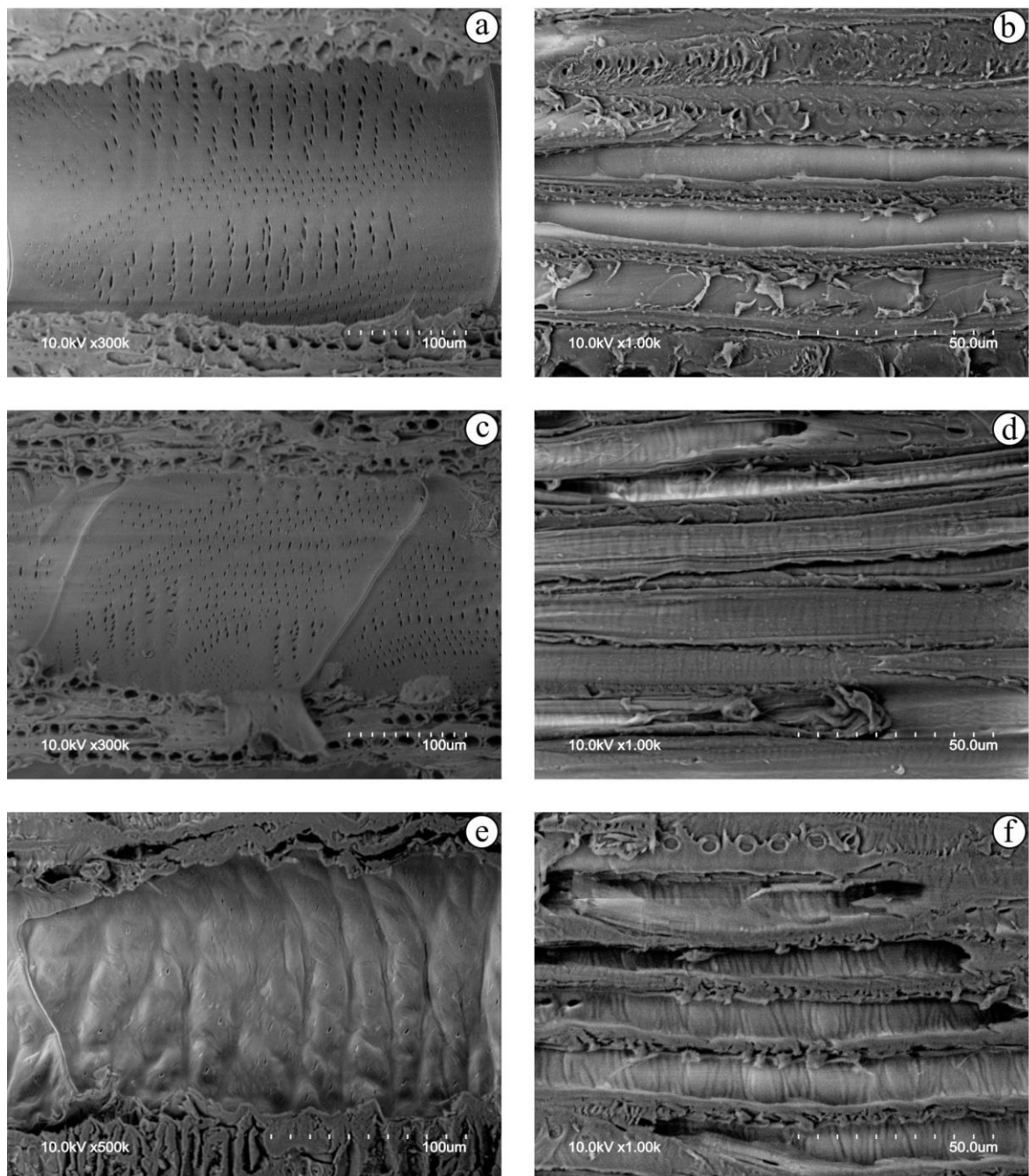
Ebben az elemzésben a minták pihentetési eredményire koncentrálnak csak a nem pihentetett és a pihentetett tömörített faanyagok tulajdonságainak egymáshoz viszonyított eltéréseit vizsgáljuk. Az elvégzett számításokra példaként felhozva a minták átlagos rostirányú zsugorodása a szárítás folyamán bükk tömörített és 1 percet fixált mintáknál 0,98% lett, míg ugyanezen mintatípus pihentetett változatánál 1,06%. A kettő közti eltérés a táblázatban látható 7,9%, ami nem összekeverendő a zsugorodás mértékével. A mérési pontosságot figyelembe véve megállapítható, hogy a 190-200 mm hosszúságú minták hosszának mérésekor még a 0,1 mm-es pontosságot is nehéz volt biztosítani a zsugorodás kiszámításához, és a különböző mintacsoportok között kevesebb, mint 1 mm-es átlagos eltérés volt. Ebből következik, hogy a 3.6. táblázatban bemutatott 12%-os és ennél abszolútértékben alacsonyabb zsugorodások nagyon kismértékű változásokat jelölnek, amelyek a mérési hibahatáron belül vannak. A vizsgált mechanikai tulajdonságok (*MoR* és *MoE*) kevesebb, mint 5%-kal változnak éppúgy, mint lehajlás a legnagyobb erőnél. Az ebben a fejezetben bemutatott pihentetési vizsgálat adatainak elemzése során 95%-os szignifikanciaszinten az ANOVA Fisher-LSD elemzés nem talált különbségeket a pihentetett és a nem pihentetett minták tulajdonságai között, tehát a pihentetés felesleges folyamatnak tekinthető.

### **3.7. Sejtszintű és sejten belüli (mikroszkopikus és szubmikroszkopikus) szöveti tulajdonságok**

A pásztázó elektronmikroszkópos (scanning electron microscopy, SEM) képalkotást Hitachi S-3400N (Tokió, Japán) mikroszkóppal végeztük. A SEM vizsgálatokhoz kb. 5×15 és 5×20 mm méretű mintafelületeket készítettünk elő, anatómiai szempontból húrirányú-rostirányú felülettel, amely a rostiránnyal párhuzamos volt. A megfelelő simaságú felület szánkás mikrotóm segítségével, rostirányban vágva készült. A mintákat további előkészítés nélkül vizsgáltuk a mikroszkóppal, 6 kPa vákuumban. Az elektronnyaláb gyorsítófeszültsége 10 kV (a politejsavas kísérleteknél 20 kV), az emissziós áram körülbelül 100 μA, a detektortávolság 8 és 13 mm között volt. A nagyítás 200, 300, 500 és 1000-szeres volt, melyet a bemutatásra kerülő felvételeknél egyedileg jelzünk. A képalkotás előtt automatikus kontrasztot, fényerőt és fókuszot alkalmaztunk a Hitachi 1.24 (sorozatszám: 340632-01) szoftverben. A készített képek felbontása 2560×1920 képpont, melyeknek később a kontrasztját és gamma-értékét az IrfanView 4.38 ingyenes programmal optimalizáltuk.

Stevens és Turner (1948) leírása alapján rostirányú tömörítéskor a faanyag sejtfalai úgy hajlanak, mintha egy félig zárt harmonika redői volnának. Még szemléletesebb a pliszé árnyékolóhoz való hasonlítás, ami angol pleating (redőzés) megnevezéssel hozható összefüggésbe a 2.5.3. fejezetben leírtak szerint; ez a kifejezés jól leírja a rostirányú tömörítés faanyagra gyakorolt hatását, szakszóként való alkalmazása célszerű. A 3.23. *ábra SEM* képeket mutat a tölgyfa edényéről (balra) és rostjairól (jobbra). Az első sorban látható kezeletlen mintákról készült képeken (3.23.a és 3.23.b *ábra*) a sejtfalak simák és az összes rész ép (belső sugarak, parenchimák és gödörkék). A 3.23.c és 3.23.d *ábrák rostirányban tömörített mintákról készült képeket mutatnak. Az edény sértetlennek tűnik, míg a rostfalak határozottan torzultak, faluk enyhén hullámos. A 3.23.e és 3.23.f ábrák rostirányban tömörített és hosszú időn keresztül fixált minták képeit mutatják. Ebben az esetben az edény és a farostok falai egyaránt erősen torzultak. A kisebb rostüregek és a gödörkenyílások (pl. az edények falán) gyakran teljesen eltűnnek.* A hosszú ideig tartó fixálás során a faanyag összenyomott állapotban hül le, és a maradandó deformációk még hangsúlyosabbak, mivel a fa kihült állapotban – a plasztifikált állapotát elveszítve – jobban megtartja az elszenvedett deformációkat. Számos hipotézis szerint a sejtek egymáshoz képest bizonyos mértékben elcsúszhatnak (Sparke 1989, Deibl és tsai. 1999, Kuzsella 2011, Ivánovics 2012), ezáltal enyhítve a sejtek deformációit.

Az eredményeket összehasonlítva a rostirányú tömörítés után a vastag falú farostokban jelentős maradandó változások figyelhetők meg (3.23.d *ábra*), míg a vékony falú sejtek, például az edények a nyomóterhelés megszüntetése után könnyebben, nagyobb mértékben visszanyerik eredeti alakjukat (3.23.c *ábra*). Rostirányú tömörítésnél a faanyag visszarugózása okozza ezt a jelenséget. Hosszú ideig tartó fixálás után azonban minden sejtípus maradandó változásokat szenved (3.23.e és 3.23.f *ábra*). A maradandó hosszváltozás ugyanezt a tendenciát mutatja (3.13. és 3.18. *ábra*). A növekvő fixálási idővel a maradandó rövidülés növekszik, azaz a visszarugózás sokkal kisebb mértékű lesz.



3.23. ábra Pásztázó elektronmikroszkóppal készült képek tölgyfáról: kezeletlen edény (10 kV  $\times$ 300; a), kezeletlen rostok (10 kV  $\times$ 1000; b), tömörített és nem fixált edény (10 kV  $\times$ 300; c), tömörített és nem fixált rostok (10 kV  $\times$ 1000; d), tömörített és hosszan fixált edény (10 kV  $\times$ 500; e), tömörített és hosszan fixált rostok (10 kV  $\times$ 1000; f) (Báder és Németh 2018a alapján)

### 3.7.1. Nanotom

Napjaink különböző elveken működő mikroszkópjainak segítségével nagyon jó minőségű, nagyon nagy felbontású felvételeket lehet készíteni. Komoly hátrányuk azonban, hogy két dimenzióban dolgoznak és a minták előkészítése ronszolhatja a mintákat, esetlegesen megmászva, akaratlanul meghamisítva ezzel az eredményeket. Ezzel szemben a ronszolásmentes vizsgálati eljárások eliminálják az utóbbi hibalehetőséget, bár jellemzően kevésbé jó minőségű felvételek készíthetők velük. A faanyagok kutatásában a röntgensugaras mikro-komputer-tomográfiát (X-ray micro-computed tomography; *X $\mu$ CT*) sikeresen alkalmazzák számos olyan esetben, ahol a fás növényi anyag 3

**dimenziós és roncsolásmentes vizsgálatára van szükség,** egy egyszerű minta-előkészítési eljárással kiegészítve. A faanyagok  $X\mu CT$ -vizsgálata kiterjedhet a faanatómiára (Koddenberg és tsai. 2019; Mayo és tsai. 2010; Trtik és tsai. 2007), a faanyag hidraulikus vezetőképességére (Brodersen 2013; Earles és tsai. 2018; Knipfer és tsai. 2015), a fa és a ragasztóanyag viszonyára (McKinley és tsai. 2018; Paris és tsai. 2014), valamint a modifikált és tervezett fatermékekre (Korte és tsai. 2018; Krause és tsai. 2018; Van den Bulcke és tsai. 2013). A tömörített faanyag  $X\mu CT$  vizsgálatával kapcsolatban úttörő munkát végeztek Zauner és tsai. (2012, 2016). A természetes faanyag mechanikai terhelésre adott szerkezeti reakciójának 3D-ben történő megértéséhez Zauner és tsai. (2012) a norvég lucfenyő (*Picea abies*) *in situ* terhelés-függő szerkezeti meghibásodásait (pl. repedések és kihajlások) vizsgálták, rostirányban egytengelyű préselés után történő szinkrotron besugárzás alkalmazásával. Hasonló vizsgálatot végeztek Zauner és tsai. (2016) az európai ezüstoffenyő (*Abies alba*), norvég lucfenyő (*Picea abies*) és az európai bükk (*Fagus sylvatica*) összenyomása által kiváltott roncsolódások megfigyelésére. A  $X\mu CT$ -technológia a vizsgált anyagon áterjedő röntgennyaláb csillapodásán és a különböző szögekben készített 2D vetületekből származó 3D információ rekonstrukcióján alapul. A rekonstruált képek tehát a röntgensugárzás csillapítási értékeinek térképéből állnak. Ezek az értékek szürkeárnyalatban vannak kódolva: a sötétebbek az alacsony röntgencsillapítás régióit (például a levegőt), míg a világosabbak a nagy röntgensugár-csillapítású régiókat jelzik (például sejtfa anyaga).

**Kezeletlen és rostirányban tömörített, majd hosszan fixált tölgy faanyag gesztrészét vizsgáltunk** Tim Koddenberggel, a Göttingeni Egyetem Erdőtudományi és Erdőökológiai Karának Fabiológia és Fatermékek Tanszékén (Göttingen, Németország). A 20% mértékű tömörítés 25%/min sebességgel történt Sopronban, melyet 18 óra fixálási időtartam és a minták klimatizálása követett. A  $X\mu CT$  vizsgálatokhoz  $1 \times 1 \times 10$  és  $2 \times 2 \times 10$  mm méretű ( $H \times S \times R$ ), 12% nedvességtartalomra klimatizált mintákat használtunk, a késői pásztából kinyerve. A mintákat ezután egy üvegsőre rögzítettük hőre lágyuló ragasztóval (Emil Lux GmbH & Co. KG, Wermelskirchen, Németország). Tim Koddenberg végezte a szkennelési munkálatokat az analízissel együtt (vizualizáció és rostelemzés), míg a minta-előkészítés a szerző feladata volt és az eredmények értékelése – az irodalomkutatást is beleértve – közös munka. A mintákat egy Nanotom<sup>®</sup> (phoenix|x-ray, GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Németország)  $X\mu CT$  rendszerrel, méretüktől függően 40 és 45 kV közötti csúcscsőfeszültség és 260-300  $\mu A$  áramerősség mellett vizsgáltuk. Szintén a minta méretétől függően, összesen 1770 vagy 2800 vetített kép készült a 360°-os forgatás és folyamatos szkennelés közben. Minden vetítéshez 1250, vagy 2000 ms expozíciós időt alkalmaztunk. A fent leírt eltérő méretű minták és eltérő pásztázási paraméterek miatt az izotróp 3 dimenziós képpont (voxel) hozzávetőleges mérete 0,89 és 1,57  $\mu m$  között volt. A 3D képeket a datos|x reconstruction<sup>®</sup> szoftverrel rekonstruáltuk (phoenix|x-ray, GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Wunstorf, Németország). A rekonstrukció során a forgásból és a minta mozgásából származó jelenségeket a datos|x reconstruction<sup>®</sup> szoftver automatikusan korrigálta. A tomográfiai adatkészletek kvantitatív elemzése Avizo<sup>®</sup> 9 szoftverrel történt (FEI, Thermo Fisher Scientific, Hillsboro, Oregon, USA). A 2D és 3D karakterizálást a késői pásztában kijelölt érdekes régiókban végeztük (regions of interest; ROI). A tömörített faanyag szerkezeti jellemzőinek és a tömörített tölgy szerkezeti deformációinak leképezése az Avizo képalkotó eszközeivel történt (pl. ortogonális szeletelés, térfogati renderelés, felületgenerálás).

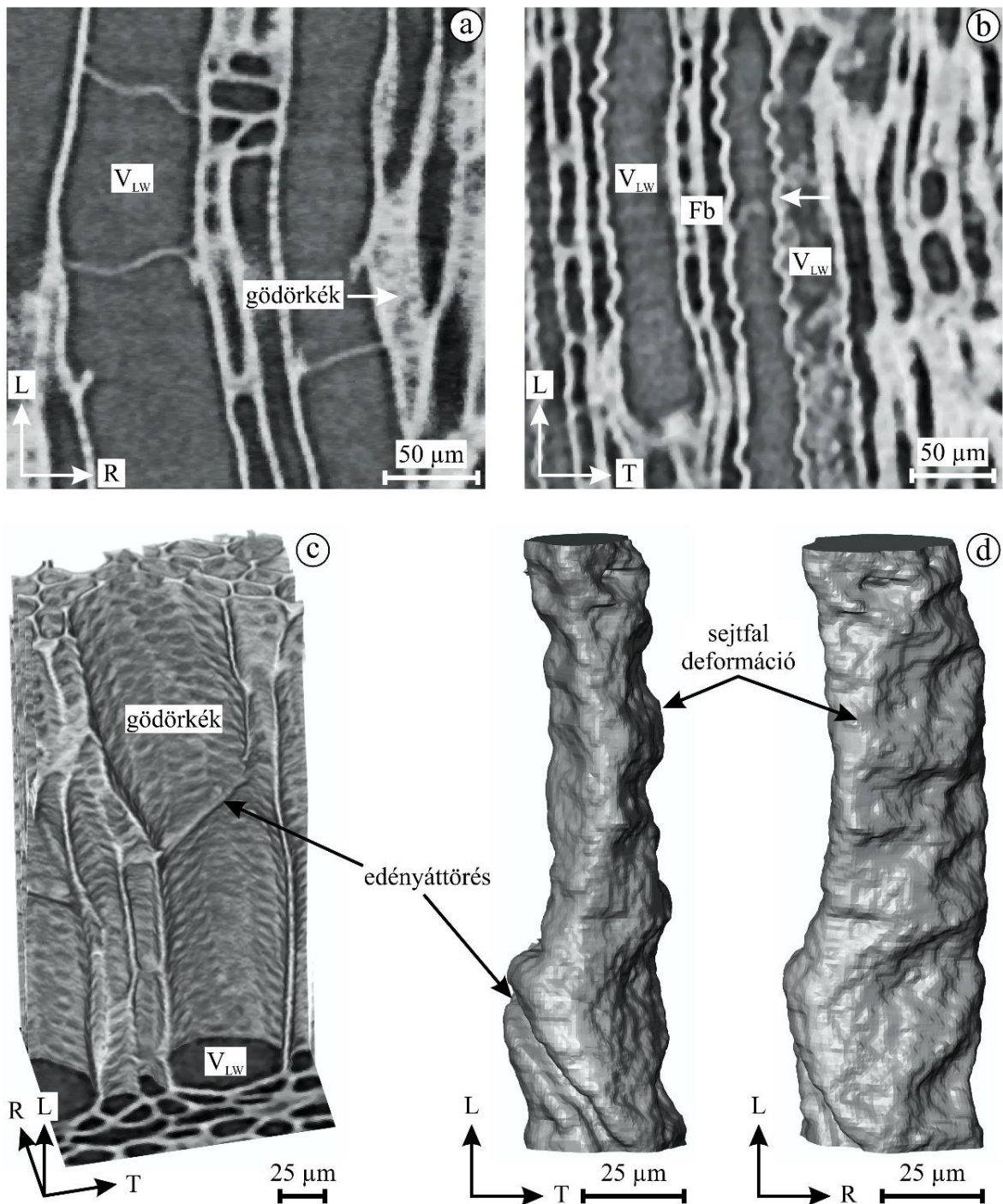
A renderelésen kívül a rostok numerikus elemzését is elvégeztük. A rost olyan sejtípus, amely elsősorban a mechanikai tulajdonságokért felelős és a tölgyfában, és a kései pásztában található a legnagyobb mennyiségben. Mivel a rostirányú tömörítés célja a faanyag mechanikai tulajdonságainak megváltoztatása, a vizsgálat kvantitatív analitikai részének a rostokra kellett összpontosítania. A rostanalízis összehasonlította a rostüregek hosszát a kezeletlen és a tömörített kései pásztában. A rostanalízis minden adatkészletéhez 2-5 ROI-t választottunk; ezek a ROI-k többnyire rostokat tartalmaztak, így sok más sejtípust már előre



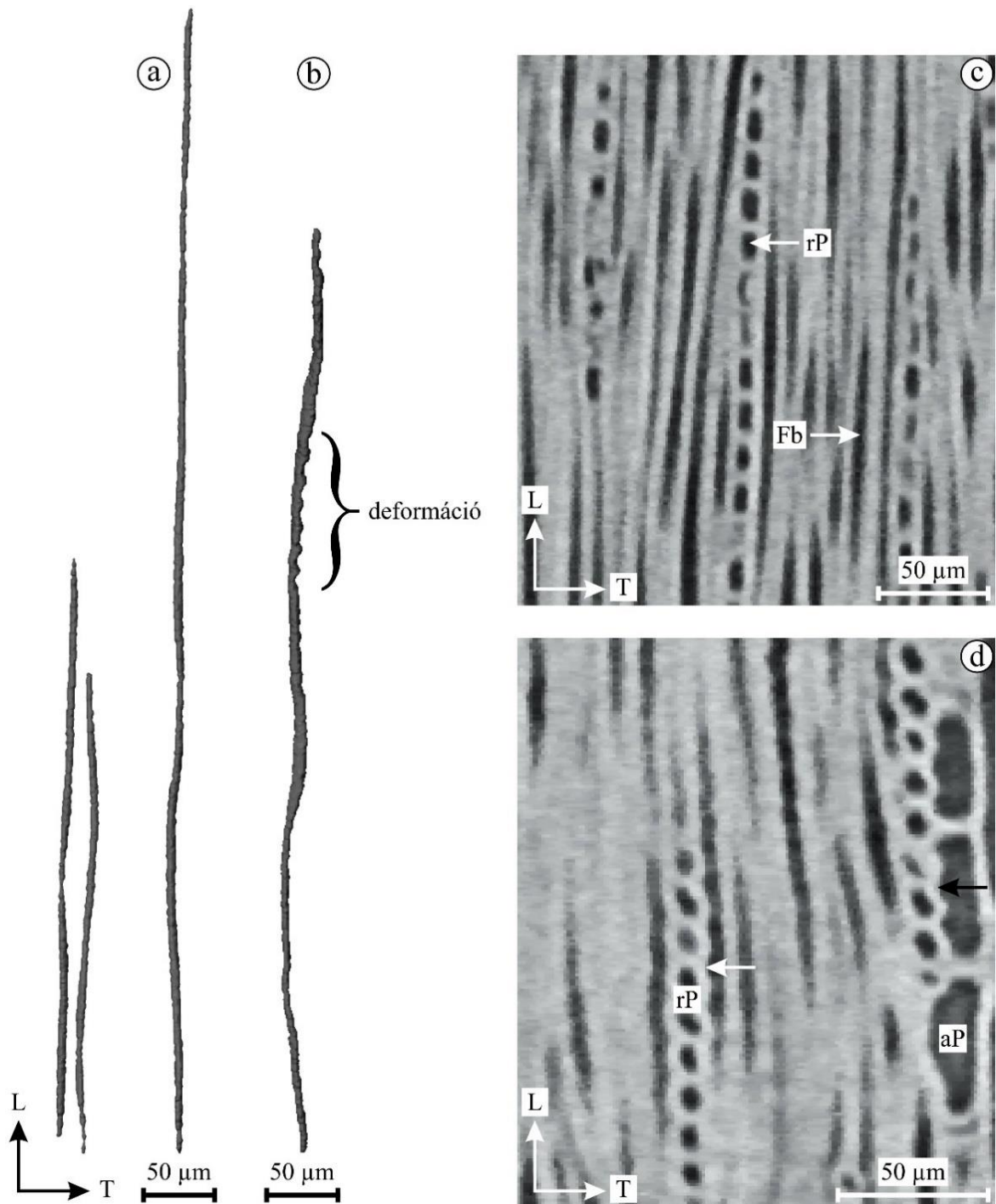
kizártunk. A ROI-k mérete eltérő volt a sugár- és a húrirányban, ám rostirányban a teljes adatkészletet lefedték: úgy határoztuk meg, hogy a ROI-ban a rostok aránya sokkal nagyobb legyen, mint más sejteké. A ROI-k edényektől mentesek voltak. A tomográfiai képeket az elemzéshez szegmentáltuk, mert ezzel a megoldással határozhattuk meg a rostok mennyiségét a kiválasztott ROI-kban. A szegmentálás a szürkeárnyalatos kép felosztása megadott jellemzők alapján, ez esetben a levegő és a sejtfa régióinak szétválasztása. A szürkeárnyalatos átfedések miatt a szegmentálást az Avizo erre fejlesztett moduljával végeztük. A szegmentálás után kiválasztottuk a ROI-n belüli rost-sejteket. A kiválasztási folyamat több előfeldolgozási lépést igényelt. A sejtüregeket háromdimenziós megcímkézése után az összes, a ROI szegélyét érintő jelölt üreget eltávolítottuk. Csak a teljes sejtek, vagy olyan sejtüregek maradtak, amelyeket teljesen körülvesz a sejtfa. Ezután megmértük az ún. Feret átmérőjét a megmaradt sejtüregeknek, ami a legtávolabbi kontúrponthoz távolsága adott irányban. Az eszköz egy mérőórához hasonlóan megkeresi a sejtüreg legnagyobb méretét, tehát az eredmények nem tartalmazzák a rostfalakat.

Mivel az elemzés a tömörítetlen és a tömörített tölgy rostjaira összpontosít, az Avizo Szitaelemzés eszközével távolítottuk el a ROI-kból mind a sugár-, mind a rostirányú parenchima sejteket. A parenchimasejtek sikeres kizárása érdekében először manuálisan megmértük azok sejtüregeit és ebből meghatároztuk az alsó szitaküszöböt (sieve threshold, sT). Mivel a faszövet sejtjei természetes módon változatosak, a ROI-k szitálását különböző szitaküszöbökkel végeztük:  $\geq 150 \mu\text{m}$  (sT<sub>150</sub>),  $\geq 250 \mu\text{m}$  (sT<sub>250</sub>),  $\geq 500 \mu\text{m}$  (sT<sub>500</sub>) és  $\geq 750 \mu\text{m}$  (sT<sub>750</sub>). A szitálás után a vizuális ellenőrzés megerősítette, hogy a parenchima sejteket eltávolítottuk. A szitaelemzést a célsejtek leghosszabb tizedén is elvégeztük, amely lehetővé tette a rostok elemzését a vazicentrikus tracheida sejtek kizárásával. A rostanalízis mellett a tömörítés által indukált deformáció jellemzésekor figyelmet fordítottunk a bélsugarparenchima sejtek üregeinek méretére és tájolására is. A legnagyobb sejtüregmagasság mérését kézi vonalméréssel hajtottuk végre a húrirányú 2D képeken. A mérések pozícióit véletlenszerűen választottuk meg az eredmények legnagyobb egyenletességének és megbízhatóságának elérése és az átlagok összehasonlíthatósága érdekében.

A X $\mu$ CT használata értékes és részletes információkat adott a tömörítetlen és tömörített tölgy faanyag mikroszerkezetéről. A körülbelül 1  $\mu\text{m}$  voxelméret elegendő volt a rostirányú terhelés által kiváltott szerkezeti deformációk vizsgálatára és számszerűsítésére. A nem tömörített és a tömörített faanyag összehasonlítása (3.23. és 3.24. ábra) egyértelművé tette, hogy a szövet mikroszkopikus szintű szerkezeti változásokon ment keresztül az összenyomás során. A szerkezeti változások jobban láthatóak oldalirányban (3.24.a és 3.24.b ábra), mint a keresztirányú síkban. Az edények sejtfalai nyilvánvalóan torzultak, amint a sejtfalak keresztirányban meghajoltak és benyomódtak az edények üregeibe (3.24.b és 3.24.d ábra). A kiálló redők egységes hullámos deformációt mutatnak. Ezt a jellegzetes rostirányú kompressziós folyamatot „redőzésnek” is nevezhetjük a kapott hullámok miatt. A 3.23. és 3.24. ábrákon látható módon nagy lokális deformációkat figyelhetünk meg az edények falán, de többségében kismértékű deformációk voltak a jellemzők. **A 3D-s renderelések azt mutatták, hogy a jelentős sejtfaldeformációk a faanyag bélsugarai közvetlen közelében fordulnak elő. A tömörített edények redőinek legnagyobb kiállása a sejtfalból 6  $\mu\text{m}$  volt.** A 3.23. ábra SEM képei alapján a tömörítetlen edényfalakon jellemző kiterjedt és jól látható gödörkészettség a tömörített szövetekben jórészt eltűnt. A 3.24.d ábra a torzult edényfalak bemutatása mellett a gödörkék eltűnését is megerősítette.



3.24. ábra A tölgy kései pásztajának szerkezeti sejtdformációja rostirányú tömörítés után, X $\mu$ CT-vel rögzítve. Felül: 2D szeletek, méretvonalak: 50  $\mu$ m. Sima sejtfalakat tartalmazó tömörítetlen minta (a) és tömörített minta hullámos sejtfalakkal (b). Nyíllal jelölve az edények sejtfalainak hullámos deformációi. Alul: 3D-s képalkotás, méretvonalak: 25  $\mu$ m. A tömörítetlen faanyag térfogati képe; az edény sejtfalában a gödörkék felismerhetők (c). Egy edény sejtüregének szakasza két különböző oldalirányú nézetből, amin a gödörkék már nem láthatók, de a hullámos deformációs minta jól kivehető (d) (Koddenberg 2019 alapján). Rövidítések: V<sub>LW</sub> – késői pászta edénye; Fb – rost sejtek



3.25. ábra Tömörítetlen és tömörített tölgy rost- és parenchima-sejtjeinek deformációi, méretvonalak: 50  $\mu\text{m}$ . Tömörítetlen faanyagban található rostok sejtüregének renderelése. Hosszuk jelentősen eltér, de egyenes sejtfalúak, deformációk nélkül (a). Egy tömörített rost sejtüregének 3D renderelése, mely deformált falrész (kiemelkedéseket) is tartalmaz egy szakaszon, közel egy bélsugár-parenchimához (b). Tömörítetlen húrirányú sík 2D-képe a késői pásztában. Itt a sejtek közötti fal egyenes (c). A tömörített faanyag húrirányú síkja egyértelműen feltárja a bélsugár-parenchima sejtek falának morfológiai változásait (d). A fehér nyíl a rost- és a bélsugár-parenchima-sejtek közötti deformált sejtfalat jelzi. A fekete nyíl a bélsugár- és az axiális parenchima közötti sejtfaldeformációt mutatja (Koddenberg 2019 alapján). Rövidítések: aP – axiális parenchima sejtek; rP – bélsugár-parenchima sejtek; Fb – rost sejtek

**Az edényekkel ellentétben a rostok sejtjei nem mutattak általánosan erős deformációt** a X $\mu$ CT-s képalkotáshoz használt felbontásnál. A korábbi SEM tanulmányból tudjuk (3.7. fejezet), hogy a rostfalak is deformálódnak, de a X $\mu$ CT felvételein a vastag, rostközi sejtfa többnyire egyenesek és érintetlenek mutatkoztak. **A rostok és a parenchimák közötti sejtfa azonban nagy kiemelkedéssel deformálódik.** A 3.25.b és a 3.25.d ábrák azt mutatják, hogy a rostok fala a parenchima sejtek közelében nagyon erősen deformálódott. A rostirányú nyomófeszültség figyelemre méltó hatással van a vékonyfalú bélsugarparenchima morfológiájára, amely merőlegesen helyezkedik el a fa tengelyére, és így merőleges a rostirányú nyomóerőre. A húrirányú síkon (3.25.c és 3.25.d ábra) **a bélsugarparenchima sejtek alakja kezdetben téglalap alakú volt, és az összenyomás után elliptikusra változott.** Manuális mérésekkel kétféle morfológiai változását figyeltük meg a bélsugarparenchima sejteknek. Először, **a bélsugarparenchima maximális magassága** – amely általában rostirányban van azok téglalapszerű alakja miatt (3.25.c ábra) – a tömörítés után **körülbelül 25%-kal csökkent** (tömörítetlen: 12,2 $\pm$ 2,4  $\mu$ m, N=153; tömörített: 9,1 $\pm$ 2,1  $\mu$ m, N=228). Másodszor, a 3.25.c ábrán egyértelműen látható, hogy **a parenchima sejtek maximális magasságának tengelye oldalirányban elmozdult.** A húrirányú síkon a tömörítetlen bélsugarsejtek legnagyobb magassága nyilvánvalóan rostirányban, a rostokkal párhuzamosan orientált (3.25.c ábra). A tömörítés eredményeként az RH síkban a bélsugarsejtek tengelye körülbelül egy nyolccaddal fordult el. A tömörítés után a húrirányú síkon kör keresztmetszetet felvevő bélsugarparenchima sejteket a mérések során nem vettük figyelembe (3.25.d ábra).

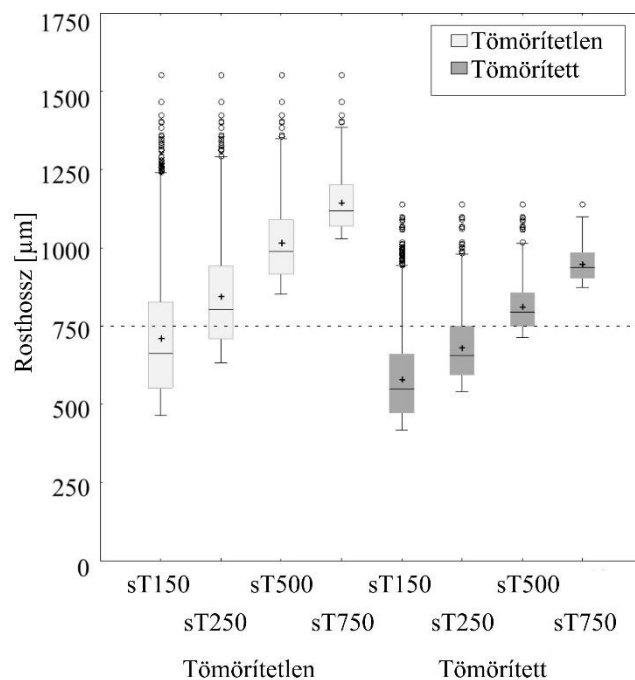
A X $\mu$ CT-technológia tehát vizuális visszaigazolást biztosított a kocsánytalan tölgy tömörítetlen és tömörített szerkezeti karakterisztikájáról 2 dimenzióban és 3 dimenzióban. Az anatómiai tulajdonságokat a *Quercus* nemzetségről 2D képek segítségével megállapított ismeretek alapján azonosítottuk (Helińska-Raczkowska és Fabisiak 1991, Ilvessalo-Pfäffli 1995, Rosenthal és Bäucker 2013, Schweingruber és Baas 2011). Az edényekkel és a parenchima-sejtekkel ellentétben a két rosttípus (azaz a libriform rostok és a rosttracheidák) közötti nem volt lehetséges különbséget tenni X $\mu$ CT-vel. A rosttracheidákat nem lehetett kizárni a rostok számszerűsítéséből, mivel a tomográfiai képeken a morfológiájuk nagyon hasonló a rostokéhoz. Azaz a sejthosszok numerikus elemzése az összes rostos sejtre el lett végezve, beleértve a libriform rostokat, a rosttracheidákat és az edénykéket, amelyek a tölgy késő pásztájában megtalálhatók. Ennek ellenére a tömörítetlen és a rostirányban tömörített tölgy X $\mu$ CT-vel történő szöveti összehasonlítása lehetővé tette a sejt szerkezet rostirányú nyomófeszültség hatására bekövetkező változásainak felismerését.

A sejtfa befelé- és kifelé hajló redőivel kapcsolatos megfigyeléseink egyértelműen összhangban vannak a korábbi mikroszkópos képeken alapuló vizsgálatokkal. Például hasonlókat állapított meg Kučera és Bariska (1982) a *Populus tremula* edényeinek mikroszkópos képalkotó vizsgálata után, a rostirányú összenyomást követően. Kutatásuk szerint az ilyen sejtfa-deformációk elsősorban vékonyfalú és/vagy nagy átmérőjű sejtekben fordulnak elő, például edényekben és parenchima sejtekben. SEM képek felhasználásával Delorme és Verhoff (1975) megvizsgálta a szélkárosított fenyőfa korai pásztájában található edényké sejtfa-deformációit (feltételezhetően *Picea abies*). Kutatásunk kiderítette, hogy az edényekhez hasonlóan a rostok is sejtfa-deformációt mutatnak a vékonyfalú sejtek szomszédságában. Ezek a deformációk azonban erősen a bélsugarparenchimák szomszédságára korlátozódnak. Tabarsa és Chui (2001) tett hasonló észrevételt. Azt is megállapították, hogy a rostok a vékonyfalú edények közelében szintén deformálódnak. A rost-bélsugar kapcsolatról Poulsen és tsai. (1997) kijelentették, hogy a rostoknak a bélsugarak közelében történő szerkezeti változása lehet a rostirányú összenyomás során bekövetkező tönkremenetel kezdete (Gindl és Teischinger 2002). Zauner és tsai. (2016) a szinkrotron-alapú tomográfia segítségével vizsgálták a faanyag meghibásodását rostirányú *in situ* terhelésekor és a *Fagus sylvatica* edényei közötti sejtfaalak gyűrődését figyelték meg.

Továbbá a *Picea abies* nagy méretű és vékony falú gyantacsatornáinak falai az edényekhez hasonlóan teleszkóposan rövidülnek. E tekintetben Zauner és tsai. (2016) azt állapították meg, hogy a vékonyabb sejtfalak alacsonyabb ellenállása okozza ezek erős deformációját. Következésképpen a vékonyfalú sejteket (azaz edények és parenchima sejtek) jobban befolyásolja a nyomófeszültség, mint a vastag falú sejteket (azaz a rostos sejteket). Feltételezzük, hogy a gödörkék gyakorisága befolyásolhatja a sejtfal ellenállóképességét és a deformáció mértékét. Ez a feltevés magyarázza, hogy miért volt látható az edények kifejezett deformációja bélsugarak közelében, ahol jellemzően sűrű a gödörkézettség (Carlquist 1988, IAWA Committee 1989). Tabarsa és Chui (2001) rámutattak, hogy a *Populus tremuloides* edényrendszerének nagyszámú gödörkéje gyengíti a sejtfalat és az a sugárirányú nyomás hatására az edények miatt deformálódik. Báder és Németh (2018a) SEM képek segítségével megerősítették, hogy az edények gödörkéi rostirányban tömörített *Quercus petraea*-ben eltűnnek a hosszú idejű fixálás hatására. Azt is kijelentették, hogy a rostirányú nyomófeszültség által okozott szerkezeti változások tartósan megmaradnak. A fixálás során a faanyag tömörített állapotban lehül, csökkentve a visszarugózási képességet. A rostirányú tömörítés eredményeként a fa sejtszelei megváltoztak, de a hagyományos nyomóvizsgálatokkal ellentétben a megfelelően tömörített mintákban nem volt szabad szemmel látható szöveti károsodás. Feltételezésünk szerint mind a fa összenyomása előtti plasztifikálás, mind a tömörítés és fixálás során használt megtámasztó acéllemezek magyarázhatják, hogy miért nem történik meg az edények és a rostok rétegenkénti szétválása és rostirányú kihajlása. Ezekről a sejtípusokról eltérően a bélsugár-parenchima sejtek egyértelműen mutattak bizonyos mértékű rostirányú kihajlást, mivel a sejtek maximális magassága oldalirányban eltorzult. Megfigyelésünk összhangban áll a Zauner és tsai. (2016) által leírt tendenciákkal. Megállapították, hogy a bélsugársejtek deformációja azt jelzi, hogy ezeknek a sejteknek nincs rostirányú szilárdító hatása.

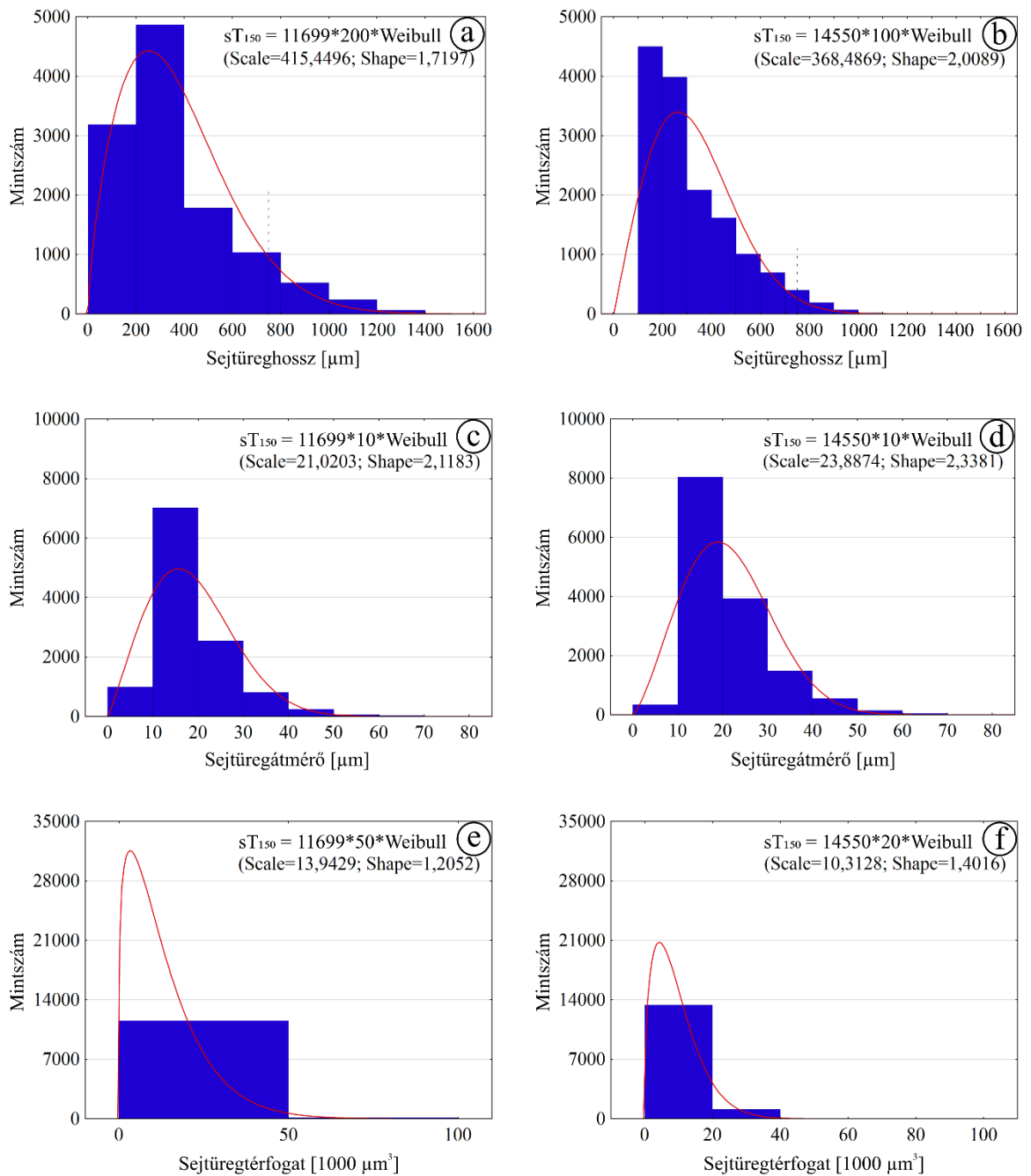
A mennyiségi elemzésnél végrehajtottuk a korábban bemutatott szegmentálást. Ezt követően a parenchima-sejteket is eltávolítottuk a vizsgálatra előkészített halmazból. Az axiális parenchima sejtek átlagosan  $79 \pm 26 \mu\text{m}$  hosszúságúak és  $23 \pm 3 \mu\text{m}$  szélességűek voltak. A bélsugár-parenchimák hossza  $90 \pm 23 \mu\text{m}$ , szélessége  $14 \pm 3 \mu\text{m}$  volt. Megállapítottuk, hogy a parenchima sejtek többsége rövidebb, mint  $100 \mu\text{m}$ , míg az irodalom alapján tudjuk, hogy a rostok nyilvánvalóan hosszabbak (Ilvessalo-Pfäffli 1995, Helińska-Raczkowska és Fabisiak 1991, Taylor 1976, stb). Ezért döntöttünk úgy, hogy a legkisebb **szitaszűrő  $150 \mu\text{m}$  ( $sT_{150}$ )** küszöbértékű legyen, a **sejtüregek hossza alapján kiszűrve a parenchima sejteket**. A szitálás megfelelő módszernek bizonyult, amely megkönnyíti a rostsejtek szelekcióját: ez a feldolgozási lépés sikeresen eltávolította a bélsugár- és axiális parenchima sejteket, amint azt vizuálisan is megerősítést nyert. Az edények egymásra helyezett sejtekből épülnek fel, és ezek jellemzően sokkal hosszabbak, mint a ROI méretei. Mivel az utófeldolgozás során a ROI határát érintő összes sejtüreget eltávolítottuk, az edények nagy része automatikusan eltávolításra került. Az összes véletlenül megmaradt edénytöredéket manuálisan töröltük. A 3.26. ábrán bemutatott dobozdiagramokon a tömörítetlen és a tömörített eredmények összehasonlító elemzése is azt mutatja, hogy mind a szitálás, mind a rosthosszmérés jól működött, mivel az átlagos rosthossz egyenes vonal mentén növekszik a szitaküszöb növekedésével.



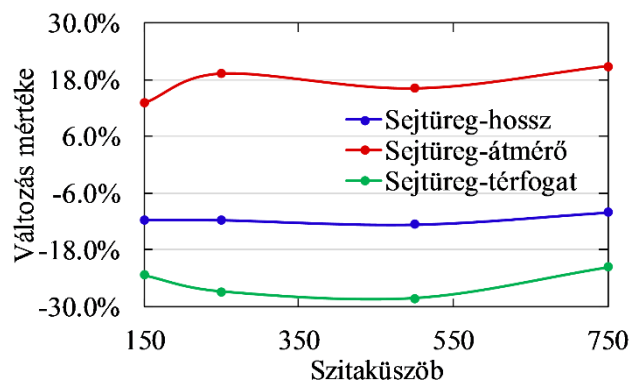


3.26. ábra A tömörítetlen és tömörített rostsejtek üregeinek hosszvizsgálata a különböző szitaküszöbértékeken (sT) való szitálás után. A dobozdiagramok mediánokkal, átlaggal (plusszal jelölve), interkvartilis tartományokkal (IQR) és a bajuszjelölésekkel  $\pm 1,5 \times IQR$  szerepelnek. A bajuszjelölések a dobozok feletti legszélsőségebb  $\pm 1,5 \times IQR$  adatpontra is kiterjednek. A bajuszjelöléseken kívüli eredményeket üres körök jelölik. A 750  $\mu\text{m}$ -nél látható szaggatott vonal felett a tracheida-sejtek jelenléte kizárt (Koddenberg 2019 alapján)

Magasabb szitaküszöb alkalmazásával a szórás csökken. Ez egy természetes jelenség, mert ugyanazon mintacsoporton alkalmazzuk a különböző szitaküszöbököt; magasabb szitaküszöbnél az adott értéknél kisebb elemeket eltávolítjuk, csökkentve ezzel a vizsgálatba vont mintahosszok változékonyságát és logikusan a csoport szórását is. Világosan kimutatható, hogy **ha a tömörítetlen és a tömörített rosthosszúságot összehasonlítjuk, akkor a tömörített hosszeredmények mindig alacsonyabbak.** Ez az sT<sub>150</sub>, az sT<sub>250</sub>, az sT<sub>500</sub> és az sT<sub>750</sub> szitaküszöbnél rendre 11,7%, 11,7%, 12,7% és 10,1% csökkenést jelent. Figyelembe véve a leghosszabb sejtüreg-tizedet, ugyanezen csökkenések hasonlóan változatosak és jóval magasabbak: 18,5%, 19,4%, 20,1% és 20,3%. Ezek természetesen csak a vizsgált szitaküszöbök pontos értékei. Az általánosított eredményeket a 3.27. ábra Weibull-eloszlást követő hisztogramjai és a 3.28. ábra grafikonja mutatják. A 3.27. ábrán a hisztogramok az sT<sub>150</sub> csoport hosszúság-, átmérő- és térfogatmérési adatain alapulnak. Elsősorban az sT<sub>150</sub> mintacsoportot érdemes elemezni, mivel ez a szitászűrő-szint tartalmazza a legtöbb eredményt a reális átlagértékek eléréséhez. A sejtüreg-hosszúságokat vizsgálva szembevetendő, hogy a kezelt mintáknál nem található 1000  $\mu\text{m}$  feletti méret, míg a kezeletleneknél említésre méltó mennyiség jelenik meg. A rövid sejtek is hasonlóan változtak: a tömörített mintáknál a legkisebb méretcsoport van túlsúlyban, míg a kezeletleneknél a legkisebb méretcsoport mennyiségileg csak a 2. helyen szerepel. Azonos küszöbértékek mellett számított eredményeket összevetve különbségek mutatkoznak a nem tömörített és a tömörített szövetekben található sejtek közepes hosszai között. Átlagosan  $11,6 \pm 1,1\%$ -os csökkenés figyelhető meg (3.28. ábra).



3.27. ábra Tömörítetlen (bal oldal) és tömörített (jobb oldal) rostsejtüreg-vizsgálati eredmények hisztogramos összesítése. A hisztogramok bemutatják a sejtüreghossz (a és b), a sejtüregátmérő (c és d) és a sejtüregtérfogat (e és f) adatait. A 750 μm sejtüreghossznál látható szaggatott vonal felett a tracheida-sejtek jelenléte kizárt



3.28. ábra A tömörítetlen és tömörített minták hisztogramjainak várható normál értékei közötti eltérések

Mint korábban említettük, a szegmentálás a rostok több részre osztódásához vezethet, ezért további elemzést végeztünk a rostok leghosszabb tizedén. Erre a célcsoportra összpontosítva is hasonló tendenciát figyeltünk meg. A középértékek a sejtüregek hosszának jelentős csökkenését mutatták a tömörítés után, a leghosszabb tized átlagosan  $19,6 \pm 0,8\%$ -kal rövidült. Összegezve, **a vizsgálati megközelítéstől függően a tölgy faanyag rostüregeinek rövidülése kb. 12-20% a rostirányú tömörítés és fixálás hatására.**

A tömörítetlen tölgy faanyag rostüreg-hosszának  $X_{\mu}CT$ -vel meghatározott eredményeinek validálásához nem találtunk irodalmi referenciaértékeket. A rostok kvantitatív elemzését meglehetősen nehéz 3D-ben elvégezni az általánosan használt képalkotó módszerekkel (pl. fény- vagy pásztázó elektronmikroszkópia) anélkül, hogy a minta sértetlensége veszélybe kerülne. Megállapítottuk, hogy a tömörítetlen szövetek átlagos sejtüreghossza lényegesen rövidebb (3.26. ábra), mint az irodalomban közölt méretek, természetesen a szitaküszöb értékétől függően (lásd alább). Az okok összefügghetnek a célsejtek típusával, a sejtek hosszának változásával, és az adatgyűjtés és az adatelemzés  $X_{\mu}CT$ -n keresztüli megközelítésével. Továbbá az irodalmi értékek a sejtüreghosszokkal foglalkoztak, míg mi a sejtüregek méreteit vizsgáltuk, ami a hosszan csúcsosodó, kihegyesedő rostsejtek esetében jelentős eltérést okozhat.

A rövidebb rostüreg-hossz (3.26. ábra) magyarázata lehet, hogy maguk a célsejtek is rövidebbek. Mivel a sejtek válogatása szita-szűréssel történt ( $\geq sT_{150}$ ), az elemzés a kocsánytalan tölgy késői pásztájában bennmaradt összes rostszerű sejtet tartalmazta, beleértve a rostokat (libriform rostok és a rosttracheidák) és a tracheidákat is (vazicentrikus tracheidák) (IAWA Committee 1989, Ilvessalo-Pfäffli 1995, Rosenthal és Bäucker 2013). Ezek a sejtípusok jelentősen különböznek egymástól. Ilvessalo-Pfäffli (1995) a *Quercus robur* rosthossz-tartományának egy széles skáláját vizsgálta 500-1600  $\mu m$  között, az átlag 1100  $\mu m$  lett. Manwiller (1974) a *Quercus* nemzetség különféle fajain a rostok hosszát 1180 és 1340  $\mu m$  közöttinek mérte. Helińska-Raczkowska és Fabisiak (1991) a *Quercus petraea*-nél megfigyelték, hogy a domináns egyedek átlagos rosthossza  $990 \pm 130 \mu m$ , míg juvenilis faanyagban a tracheidák  $560 \pm 80 \mu m$  hosszúságúak. Érettfa rostjai esetében az átlagos hosszúság 16,1%-os növekedését, míg tracheidák esetében 8,2%-os növekedését mérték. Taylor (1976) megállapította, hogy a keményfák rosthossza jobban változik az érettfa évgyűrűiben, mint a juvenilis faanyag évgyűrűiben. Emellett Helińska-Raczkowska és Fabisiak (1991) a *Quercus petraea* sejtüreghosszának változását vizsgáló tanulmányukban kimutatták, hogy a rostosok hossza a beltől kifelé növekszik. Hasonló tendenciát figyelt meg Leal és tsai. (2006) a *Quercus suber*-ben. Emellett Helińska-Raczkowska és Fabisiak (1991), valamint Lei és tsai. (1996) jelezték, hogy a rostok hossza az első 30 évgyűrűben növekszik. A kambiummal kapcsolatban Lei és tsai. (1996) kijelentették, hogy a *Quercus garryana* rosthossza a fatörzsön belüli magassági elhelyezkedéstől is függ. Az általunk elvégzett vizsgálathoz a minták a fatörzs alsó két méteres szakaszából származtak, pontos helyük a

geszten belül azonban nem ismert. A fajokon belüli természetes eltérések, ideértve a földrajzi régió jellemzőit (pl. tengerszint feletti magasság, talaj, éghajlat), valamint az erdőgazdálkodást, amely befolyásolja a fák közti növekedési versenyt, különbségeket okozhatnak a rosthosszban. A kísérleti eljárások is okozhatnak bizonyos eltéréseket, például a macerálási technika, melynek következtében a rövid rostok eltűnhetnek a tesztanyagból (Mahesh és tsai. 2015).

A sejthossz valódi eltérésén kívül az adatgyűjtés tomográfiai megközelítését látjuk további lehetséges oknak a rövidebb rosthosszúság mérésére a nem tömörített faanyagban, összehasonlítva a korábbi vizsgálatokkal. A ROI-n belül a rosttal párhuzamos irányban azonban csak néhány sejt található meg teljes egészében annak ellenére, hogy a rostok a teljes térfogat kb. 50%-át teszik ki, amint azt Ilvessalo-Pfäffli (1995) megállapította, és a rostok alig több, mint 1000  $\mu\text{m}$  hosszúságúak a tölgyben. A vizsgálataink során a korlátozott számú rostmennyiség oka a sejtek elrendezésében keresendő. A sejtek többnyire egymás mellett helyezkednek el, bizonyos mértékű átfedésekkel (Evert 2006, Tyree és Zimmermann 2002). A sejtek hossza és elrendezése, valamint a kicsi ROI miatt nem minden sejtet lehetett vizsgálni teljes egészében, különösen igaz ez a hosszú sejtekre. Ezért a tracheidák, amelyek lényegesen rövidebbek a rostokhoz képest (lásd fentebb), nagyobb arányban kerültek elemzésre, legalábbis az  $sT_{150}$  és az  $sT_{250}$  szitaküszöb-értékeknél. A tracheidák kizárását csak az  $sT_{750}$  szita küszöbértéknél lehet biztosra venni, mivel azok átlagos hossza  $\geq 750 \mu\text{m}$  alatti (Helińska-Raczkowska és Fabisiak 1991). A 3D renderelés során kiderült, hogy **a sejtfal redőződése, hullámosodása (azaz a sejtüregekbe benyomódó részek) helyileg csökkentette a rostok üregének átmérőjét**, és így a sejtüreghez rendelt voxelek számát. Feltételezzük, hogy a sejtüreg átmérőjének csökkenése a kép szegmentálását befolyásolja. Mivel így kevesebb „tisza” sejtüreg-voxel marad, a hibrid voxelek száma növekszik. Ennek eredményeként nem minden rostot lehetett megfelelően meghatározni: a tömörített faanyagban lévő rostok leszűkült sejtürege a rostok két, vagy több egyedi szegmensre való felosztását okozhatja, ami nagyobb mennyiségű, de rövidebb rost érzékeléséhez vezet. Ezért nem tudjuk egyértelműen meghatározni, hogy a hosszú sejteket jobban befolyásolja-e a rostirányú tömörítés, mint a rövidebb sejteket.

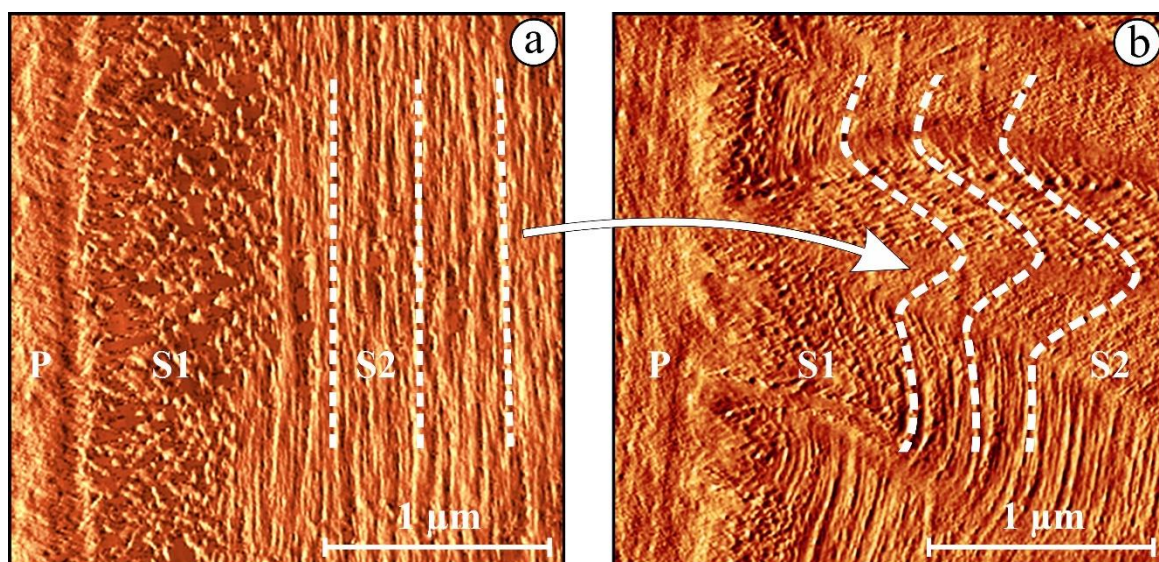
A  $X\mu\text{CT}$  hasznos eszköz a tömörített tölgyfa szerkezeti deformációjának numerikus elemzésére. A  $X\mu\text{CT}$  alkalmazásával végzett rostanalízis fent részletezett kihívásainak ellenére a rostok leghosszabb tizedének hossza 20%-kal csökkent, ami megegyezik a tömörítési aránnyal. A leghosszabb rostok tehát vélhetően erősen összenyomódtak, míg a rövidebbek csak részlegesen tömörödtek, átlagosan 12%-kal. Mivel a fa egy nagyon inhomogén anyag (részben független sejtek építik fel), a sejtek egymáshoz viszonyítva mozoghatnak, ami csökkenti azok rövidülését a rostokkal párhuzamos összenyomás során. Más szavakkal, a sejtek relatív elmozdulása szintén szerepet játszhat az eredmények alakulásában. A rosthosszokat vizsgáló kutatóknak egyaránt tisztában kell lenniük a sejthossz természetes variációjával és az  $X\mu\text{CT}$  elemzés korlátaival.

### 3.7.2. Atomerő mikroszkóp

Fontos szem előtt tartani, hogy a lombosok fatestének legjelentősebb, nagy arányban megtalálható mechanikai eleme a farost. Vastagabb fallal rendelkeznek, mint az edények és a szilárdítás a fő feladatuk (Ivánovics 2012, Molnár és tsai. 2007, Molnár és tsai. 2016). Báder és Németh (2018a) SEM felvételeinek elemzése alapján a farostok fala kevésbé hajlamos hullámosodásra – azaz kisebb mértékű deformációt szenvednek a tömörítés során – de nagyarányú tömörítés és hosszú időtartamú fixálás hatására a változások egyértelműen megmutatkoznak az edényekről készült képekkel összehangban. Amennyiben rostirányú préselés hatására a minta nem tud kihajolni, törni, vagy nem szenved egyéb mechanikai sérüléseket, akkor a bemutatott mikroszkopikus változásoknak szükségszerűen az összes rostirányban egyenletesen tömöríthető fafaj esetében végbe kell menniük.

Az ultrastrukturális változások vizsgálatához minden tölgy mintát egyazon tölgy gesztrészének azonos évgyűrűjéből készítettük. **Kezeletlen és 20% mértékben tömörített, 25 órát fixált mintákat vizsgáltunk.** A további felhasználás előtt normál körülmények között kondicionáltuk őket. A rostirányban tömörített faanyag vizsgálatához rostiránnyal párhuzamos, sima felületek lettek előkészítve, kb. 3×5 mm méretben (H × R), sugárirányban vágott késői pásztából. A sugárirányú felületeket fémlemezekre ragasztottuk 2K epoxigyantával (Uhu Plus Sofortfest). Ezekre a mintákra egy sima felületet vágunk a rostiránnyal párhuzamosan Ultra AFM gyémántkéssel (Diatome, Svájc) a végső felületképzéshez, így elég simákká váltak, hogy felhasználhatók legyenek. A felületek a hordozó fémlemezzel párhuzamosak voltak.

Atomerőmikroszkópos vizsgálatot (atomic force microscope; AFM) alkalmaztunk a mikrofibrillák helyi elrendeződésének jellemzésére, hogy összehasonlítsuk a kezeletlen mintákat a tömörített-fixált mintákkal azok ultrastrukturális szintjén. Az AFM csúcsérték-hiba csatornája a topográfiának egy származéka a letapogatás irányában (Heu és tsai. 2012). A csúcsérték-hiba képeinek elemzése bizonyult a legjobbnak a fibrilláris elrendezés megjelenítéséhez. A mikrofibrillák egyenesen és párhuzamosan jelennek meg a kezeletlen mintákban (3.29.a ábra), a sejteken belül elvárt elrendezésnek megfelelően.



3.29. ábra Atomerő mikroszkóppal készült képek tölgyfa rostjának sejtfaláról egy kezeletlen mintában (a) és egy tömörített és hosszú ideig fixált mintában (b). A szaggatott vonalak a mikrofibrillák irányát mutatják az S2 sejtfalrétegben (Báder és tsai. 2019 alapján). Rövidítések: P – elsődleges sejtfal; S1 és S2 – másodlagos sejtfal rétegei

Az S2 sejtfalrétegben a mikrofibrillák irányát szaggatott vonallal jelöltük. A **rostirányú tömörítés és hosszú idejű fixálás eredményeképpen az S2 sejtfalréteg eredetileg egyenes és a sejt tengelyével közel párhuzamos tengelyű mikrofibrillái elhajolnak**, amint azt a 3.29.b ábrán a szaggatott vonalak jelzik. Az egyértelmű fibrilla-elhajlás hullámszerű ráncokként írható le. **A mikrofibrillák párhuzamos elrendezése továbbra is látható, de a mikrofibrillák megváltoztatják az irányukat egyik gyűrődéstől a másikig.** Tekintve, hogy az AFM sík felületeket vizsgál, a 3.29. ábrán is csupán sík felületek láthatók; ennek ellenére a mikrofibrillák kihajlása térbeli jelenség, ezért lettek a mikrofibrillák több helyen átmetszve a mintaelőkészítés során (3.29.b ábra).



### 3.8. Sejten belüli mikromechanikai változások

A rostirányban tömörített faanyag mikromechanikai jellemzését nanoindentációval (NI) végeztük. A mintákat egy tölgy rönk gesztrészének azonos évgyűrűiből készítettük. Kezeletlen (OC) és gőzölt (OSC) mintákon kívül rostirányban tömörített minták készültek, az eredeti hosszukhoz képest 20% mértékben tömörítve. Egy tömörített minta fixálás nélkül (O0m), a többi a tömörítési arány megtartásával 1 perc (O1m), 3 perc (O3m) és 25 óra (OLm) fixálással készült. A felhasznált minták általános tulajdonságait a 3.7. táblázat mutatja. További felhasználás előtt normál körülmények között kondicionáltuk őket, ami végül 9–10% nedvességtartalmat eredményezett a szobaszáraz klímán továbbmunkált mintáknál.

3.7. táblázat *A vizsgálatban alkalmazott egyes minták tulajdonságai (forrás: Báder és tsai. 2019). Rövidítések: OC – kezeletlen minta; OSC – gőzölt minta; O0m, O1m, O3m – rostirányban tömörített minták 0, 1 és 3 perc fixálási idővel; OLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta; n/a – nincs adat*

Kezelés megnevezése	Tömörítési arány [%]	Nyomófeszültség változása a fixálás során [%]	Egyensúlyi nedvességtartalom a kondicionálás után [%]	Maradandó rövidülés a tömörítést követően [%]	Hosszváltozás a száradás során [%]
OC	n/a	n/a	9.9%	0.00%	-0.08%
OSC	n/a	n/a	9.4%	0.00%	-0.08%
O0m	20.1%	n/a	9.5%	-2.49%	-0.49%
O1m	20.3%	-31.8%	9.7%	-3.04%	-0.66%
O3m	20.3%	-38.9%	9.7%	-3.49%	-0.66%
OLm	20.1%	-79.7%	9.3%	-19.01%	-0.96%

A NI vizsgálatához kb.  $2 \times 2 \times 2$  mm méretű (H  $\times$  S  $\times$  R) kis minták készültek az eredeti minták középső részéből. Mindegyik ugyanazon évgyűrű késői pásztaját tartalmazta. A kis mintákat alternáló vákuumkezeléssel, epoxigyantával telítettük (AGAR alacsony viszkozitású gyantakészlet, AGAR Scientific, Egyesült Királyság), odafigyelve az egységes telítőszerfelvételre (Konnerth és tsai. 2008). A beágyazott epoxi-blokkokat egy éjszakán át 60 °C hőmérsékleten kemencében kezeltük. A mintáknak rostirányra merőlegesen párhuzamos felületeket készítettünk és fémlemezre ragasztottuk őket kétkomponensű epoxi gyantával (Uhu Plus Sofortfest). A hordozó fémlemizzel párhuzamosan minden mintának sima bütüfelületet készítettünk Leica Ultracut-R mikrotom segítségével (Leica Microsystems, Németország), gyémántkéssel (Trim 45° és Histo, Diatome, Svájc). Ezek a felületek megfelelően simák voltak, hogy felhasználhatók legyenek a nanoindenterben. A NI mérések előtt Zeiss Axioplan 2 fénymikroszkóppal (Carl Zeiss Microscopy, Németország) felvételeket készítettünk a vizsgálandó felületekről, amelyeken a NI-vizsgálat sejtjeit bejelöltük.

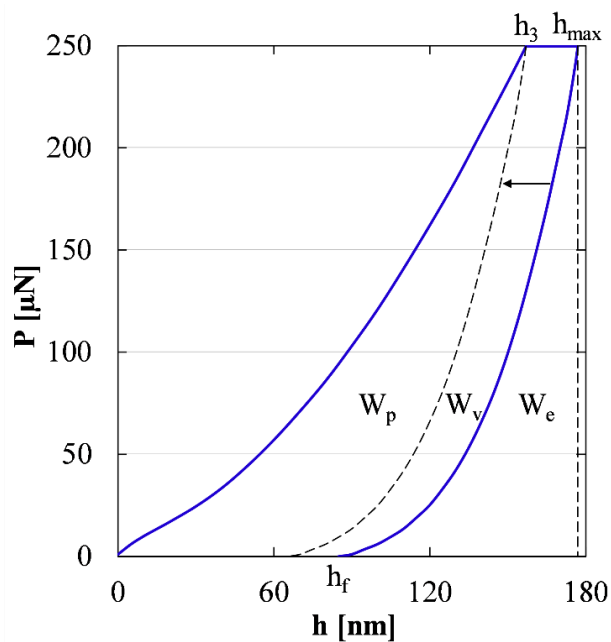
**A NI kísérleteket mind az S2 sejtfalrétegen, mind a sejtek találkozási sarokpontjainál található középső lamellán (corner middle lamella; CML) elvégeztük egy Triboindenter<sup>®</sup> segítségével (Hysitron Inc, Minneapolis, USA), amelyet Berkovich típusú nyomócsúccsal láttak el. A nanoindenzációs kísérletek során 22 °C hőmérséklet és kb. 50% relatív páratartalom volt. A NI kísérletnél alkalmazott nyomóerőt úgy választottuk meg, hogy a benyomódási felületek a sejtfal vastagságának egyharmadát tegyék ki. A választott beállításokkal az eredményül kapott benyomódás átlója a faanyag tulajdonságaitól függően 1,0-1,6  $\mu\text{m}$  között volt. A minták sejtfalvastagsága 3 és 5  $\mu\text{m}$  között volt, míg a CML méretei kissé kisebbek voltak. Miután a mérőcsúc elérte a minta felületét (2  $\mu\text{N}$  előterheléssel), terhelésvezérelt üzemmódban 3 másodpercen belül 250  $\mu\text{N}$  csúcsterhelést alkalmaztunk, a**

terhelést 20 másodpercig állandó értéken tartottuk, majd a mérőcsúcs kiemelése szintén 3 másodpercet vett igénybe. Az indentáció előtt és után topográfiai képeket készítettünk a vizsgált sejtekről az eszköz pásztázó-mikroszkópos eljárásával a benyomódások elhelyezkedésének ellenőrzésére.

**A terhelés-benyomódás grafikonról megkaptuk a csúcsterhelést ( $P_{max}$ ) és az érintkezési felületet a nyomvatartási szakasz végén ( $A$ ). A sejtfaalkeménységet ( $H$ ) a  $P_{max}/A$  képlettel kaptuk. A benyomódási modulust ( $E_r$ ) automatikusan számítottuk Oliver és Pharr (1992) módszere alapján a tehermentesítési merevségből ( $S$ ), amely a tehermentesítési görbe kezdeti merevedéséből származtatható. Az anyag merevsége mellett az  $E_r$  figyelembe veszi a benyomó csúcs tulajdonságait. Mivel a vizsgált minták rugalmassági modulusa a gyémánt benyomó csúcs modulusához képest nagyon kicsi, a benyomó csúcs eredményeket befolyásoló hatása elhanyagolható mértékű (Konnerth és Gindl 2006). Ezzel a megközelítéssel készült számos más tanulmány is (Gindl és Schöberl 2004; Tze és tsai. 2007; Wagner és tsai. 2012; Eder és tsai. 2013; Zhou és tsai. 2017). Figyelembe kell venni, hogy az izotróp anyagokkal szemben az anizotróp faszemek esetében a  $E_r$  nem használható egytengelyű modulusként (Jäger és tsai. 2011). Mivel a kapott eredmények ugyanazon alapanyagból származnak (egyazon fatörzs azonos magasságú részének ugyanabból az évgyűrűjéből), így összehasonlíthatók. A  $H$  és  $E_r$  aránya a benyomódás plasztikus ellenállásaként határozható meg (Oyen és Cook 2009), ahol fizikai szempontból az a nagy értékek jelentése, hogy az anyag ellenállási feszültsége a modulushoz viszonyítva nagy, tehát indentációval nehéz plasztikusan deformálni az anyagot. Bevonatok esetében ez jelzi a felület kopásállóságát is (Skarmoutsou és tsai. 2013).**

A 3.30. ábra egy tipikus terhelés-benyomódás görbét mutat be. A gyémántcsúcs benyomásához szükséges teljes deformációs munka ( $W_t$ ) numerikusan számítható. A gyémántcsúcs benyomási mélységének időegység alatt bekövetkezett változásának ( $\Delta h$ ) és a mért terhelésnek ( $P$ ) a megfelelő időegységre eső szorzata. Mivel az időegység 0,017 másodpercre lett beállítva (az idő, terhelés és benyomási mélység mérési jel frekvenciájának megfelelően), a deformációs munka számítása kellően pontos eredményt szolgáltatott. A terhelés-elmozdulás görbe alatti teljes terület ( $W_t$ ) három részre osztható (3.30. ábra), ahogyan az korábbi munkákban is látható (Konnerth és tsai. 2006). Plasztikus deformációs munkára ( $W_p$ ), viszkoelasztikus deformációs munkára ( $W_v$ ) és rugalmas alakváltozási munkára ( $W_e$ ). A  $W_v$  a benyomódás kúszásához ( $C_{IT}$ ) hasonló információt nyújt a vizsgált anyagról. A  $C_{IT}$  értéke a benyomódás mélységének relatív változása az állandó terheléses szakaszban, és gyakran használják különböző anyagok tulajdonságainak összehasonlítására (Wang és tsai. 2006; Jha és tsai. 2012; Eder és tsai. 2013).

**Amikor a sejtfalet egy ideig állandó terhelésnek teszik ki, a terhelési időtől függő alakváltozás lép fel, amely a  $h_3$  és a  $h_{max}$  pontok között látható a 3.30. ábrán. A legnagyobb benyomódási mélység ( $h_{max}$ ) az állandó terheléses szakasz végén mérhető, majd a deformáló erő megszűnik és a deformáció lenyomata részben visszaalakul. A végső, vagy a maradandó benyomódási mélység ( $h_f$ ) - más néven elasztikusan helyreállt mélység - jelzi az anyag maradandó deformációját (viszkoelasztikus, plasztikus deformáció) (Oliver és Pharr 1992). A  $W_e$  információt nyújt a sejtfaalak rugalmas tulajdonságairól a  $h_{max}$  és  $h_f$  különbségéhez hasonlóan, amelyet más szerzők is alkalmaznak, például Richter és tsai. (2000). A bemutatott paraméterek mennyiségi összehasonlításával a faanyag rostirányú tömörítése eredményeként bekövetkezett viselkedés-változását vizsgálhatjuk. A NI kísérletekhez a TriboScan v8.2.0.18 (Hysitron Inc., Minneapolis, USA) szoftverét használtuk.**



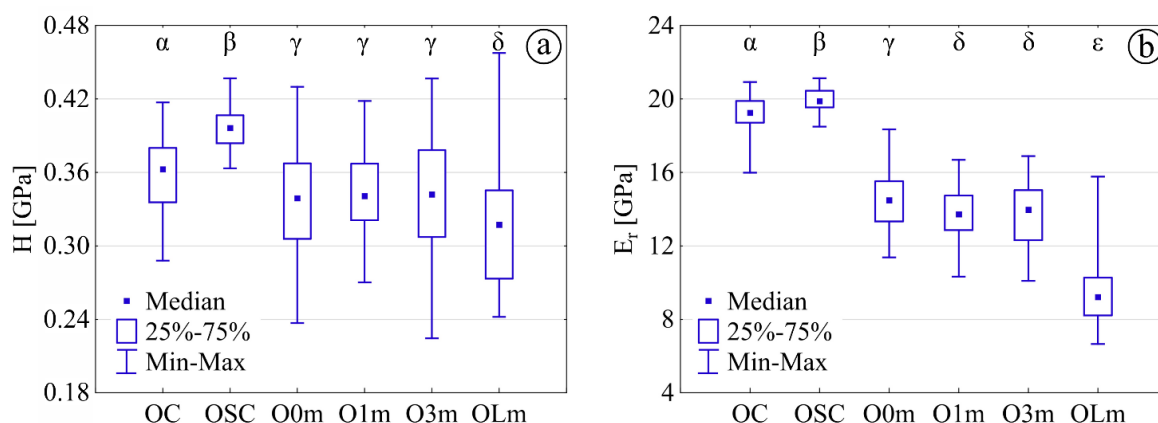
3.30. ábra Egy rostirányban tömörített és hosszú ideig fixált minta tipikus nanoindentációs terhelés-benyomódás görbéje. A különböző benyomódási munkafázisok területeit a határvonalak jelzik (forrás: Báder és tsai. 2019). Rövidítések:  $P$  – terhelés;  $W_e$  – rugalmas benyomódási munka;  $W_v$  – viszkoelasztikus benyomódási munka;  $W_p$  – plasztikus benyomódási munka;  $h_3$  – benyomódási mélység a tartó szegmens elején;  $h_{max}$  – legnagyobb benyomódási mélység;  $h_f$  – maradandó benyomódás mélysége

A vizsgálatokhoz felhasznált fa alapanyag és a rostirányú tömörítés megegyezett a 3.5. fejezetben ismertetettel, ezért a makromechanikai tulajdonságokat az ott kapott eredmények alapján foglalja össze a 3.8. táblázat. A rostirányú tömörítés eredményeként már makroszkopikus léptékben is a maximális alakváltozás jelentős növekedése látható a növekvő fixálási idővel. Ez a nagy deformáció a  $MoR$  csökkenésével és a  $MoE$  jelentős csökkenésével jár. A négyponos hajlítóvizsgálatok során a minták maximális lehajlása megtöbbszöröződött.

3.8. táblázat A rostirányú tömörítés és a különböző fixálási időtartamok hatása a tölgy faanyag mechanikai tulajdonságaira, átlagértékek (forrás: Báder és tsai. 2019). Rövidítések: OC – kezeletlen minta; OSC – gőzölt minta; O0m, O1m, O3m – rostirányban tömörített minták 0, 1, és 3 perc fixálási idővel; O1m – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta;  $MoR$  – hajlítószilárdság;  $MoE$  – hajlítórugalmassági modulus

Kezelés megnevezése	Tömörítési arány [%]	Rövidülés a kondicionálást követően [%]	$MoR$ [MPa]	$MoE$ [GPa]	Lehajlás a legnagyobb terhelésnél [%]	Legnagyobb lehajlás [%]
OC	0.0%	-0.1%	110.4	10.0	100%	100%
OSC	0.0%	-0.1%	112.8	10.1	104%	104%
O0m	20.3%	-3.7%	106.9	4.2	298%	319%
O1m	20.3%	-4.3%	105.3	3.7	330%	353%
O3m	20.3%	-4.7%	103.7	3.4	364%	396%
O5m	20.3%	-5.1%	102.7	3.2	343%	364%
O1m	20.0%	-16.6%	53.5	1.9	370%	675% +

A 3.31. ábrán bemutatott dobozdiagramokon látható a kezeletlen csoportnak és a különféle módokon kezelt mintacsoportoknak a  $H$  és  $E_r$  értékei. A bemutatott diagramok mintacsoportonként 60-94 mérés eredményeit ábrázolják. A gőzölés kissé növelte a  $H$  értékét. A rostirányú tömörítés eredményeként a  $H$  6%-kal csökkent, míg a  $E_r$  25%-kal csökkent a kezeletlen mintákhoz viszonyítva. 1 perc fixálást követően a  $E_r$  a kezeletlen mintákhoz viszonyítva 28%-kal csökkent, de a 3 perces fixálás nem változtatta meg a vizsgált értékeket. A hosszú idejű fixálásnak kitett mintákban a  $H$  és  $E_r$  értékeinek további változása mutatkozott, ami a kezeletlen mintákhoz képest rendre 12%, illetve 51% veszteségeket okozott. Ez azt jelenti, hogy hosszú fixálási idő elteltével a  $E_r$  legalább az eredeti értékének felére csökken, és ezt tekinthető a legfontosabb tulajdonságváltozásnak az anyag hajlíthatósága szempontjából. A sejtfaalkeménységeket és a benyomódási modulusokat összehasonlítva (3.31.a és 3.31.b ábra) megállapítható, hogy a  $E_r$ -t a kezelés lényegesen nagyobb mértékben befolyásolta.

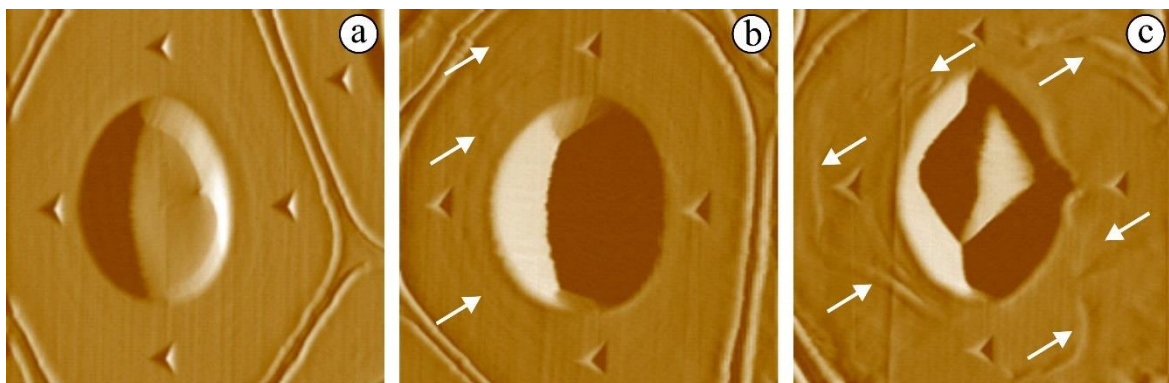


3.31. ábra Tölgy faanyag sejtfaalkeménysége (a) és benyomódási modulusa (b). Az ANOVA-teszt által statisztikailag homogénként azonosított csoportokat görög betűkkel jelöltük. A dobozdiagramok jelzik a mediánokat, a kvartiliseket és a minimális és maximális értékeket (forrás: Báder és tsai. 2019). Rövidítések: OC – kezeletlen minta; OSC – gőzölt minta; O0m, O1m, O3m – rostirányban tömörített minták 0, 1, és 3 perc fixálási idővel; OLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta; MoR – hajlítószilárdság; MoE – hajlítórugalmassági modulus

A statisztikai elemzések nem tudtak kimutatni szignifikáns különbségeket az O0m-O1m-O3m  $H$  értékei és a O1m-O3m  $E_r$  értékei között. Az O0m-O1m között  $E_r$  esetében enyhe, de szignifikáns csökkenés volt megfigyelhető. A makromechanikai tulajdonságok (például a  $MoE$ ) azonban a legtöbb paraméternél sokkal nagyobb változásokat mutattak (3.8. táblázat). Ha összehasonlítjuk a makromechanikai tulajdonságokat ( $MoE$  és a legnagyobb lehajlás) a mikroszkópos skálán végzett megfigyelésekkel ( $H$  és  $E_r$ ), hasonló tendenciákat találunk. A rövid ideig tartó fixálás kisebb mértékű változásokat eredményez a sejtfalban, mint a hosszú időtartamú fixálás. Az abszolút eredményeket tekintve a tömörítés és az 1 perces fixálás hatására a  $MoE$  csökkenése 63% a kezeletlen tölgyhöz képest, míg a  $E_r$  csökkenése csupán 28%. A rostirányban tömörített faanyag mikromechanikai jellemzése ugyan kisebb mértékű, de azonos változási tendenciát mutat a makroskálán kapott egytengelyű vizsgálati eredményekkel. Ez a megállapítás nem meglepő, mivel a  $E_r$  tükrözi az ortotropikus felépítésű faanyagban a sejtfaalkeménységi tenzor összes komponensének anyagparamétereit (Jäger és tsai. 2011), szemben az egytengelyű makromechanikai tulajdonságokkal, amelyek csak egyetlen anyagirányt jellemeznek.

A makromechanikai eredmények és gazdaságossági indokok alapján 1 perces fixálási idő javasolt (3.5. fejezet). Egy perc után a mechanikai tulajdonságok leggyorsabb változásai már végbementek. Az ezzel összehasonlítható nagyságrendű további változások eléréséhez

lényegesen hosszabb időre van szükség. A faanyag sejtszerkezetének bizonyos változása az S2 sejtfalréteg a 3.32.a, b, c ábrán bemutatott keresztmetszeti képein látható: durvább a felület és bizonyos ráncok jelennek meg az S2 sejtfalon a megnövekedett fixálási idővel. Ezek a változások a rostok helyi elhajlásainak tulajdoníthatók. Mivel a felvételek pásztázó mikroszkóp segítségével készültek, amely csak korlátozott felbontást tesz lehetővé, ezek a megfigyelések más apróbb változások, például repedések eredményei is lehetnek, bár ez meglehetősen valószínűtlen. A 3.32.a, b, c ábrán bemutatott összes vizsgált sejt üregét gyantával töltöttük fel a mintafelületek előkészítése előtt. A minták újrakondicionálása során a sejtfalak kissé duzzadtak, ami eltéréseket okozott a sejtfalban, továbbá a sejtfal és a beágyazó gyanta között (3.32.a ábra). Az összes minta azonos módon lett előkészítve, ugyanazokkal az eszközökkel és módszerekkel, azonos beállításokkal. A sejtek felületének előkészítése során elszenvedett nanométeres méretű különbségek – úgynevezett ráncok – a különböző módokon kezelt faanyagok sejtfalainak eltérő reakcióira vezethető vissza. Ennek oka a sejtfalon belüli mikrofibrillák tipikus elrendeződéstől való eltérései. A sejtfal rostirányú zsugorodásában-dagadásában helyi különbségek jelennek meg a minta előkészítése és a mérés között lezajlott enyhe nedvességtartalmi változások eredményeként. A keresztmetszeti elemzések alapján feltételezhető, hogy a sejt szerkezetének megváltozása kezdetben csak lokális, majd a növekvő fixálási időtartammal a változások szélesebb keresztmetszeti területen jelennek meg, kiterjednek. A felületi érdesség növekedése valószínűleg hozzájárul a 3.31.a és 3.31.b ábrán bemutatott eredmények növekvő szórásához, mivel a rövid idejű fixálásnak kitett minták esetében könnyű volt sima felületű területeket találni a NI vizsgálatokhoz, de lényegesen kevesebb sima területet találtunk a hosszú időn keresztül fixált minták esetében.



3.32. ábra A vizsgálóhegy segítségével készült  $15 \times 15 \mu\text{m}$  méretű, pásztázó mikroszkópos üzemmódban letapogatott magasságvizsgálati képek: kezeletlen minta (a), tömörített minta fixálás nélkül (b) és tömörített minta hosszú ideig tartó fixálással (c). A nyilak a sejtfalon mutakozó ráncokat jelölik (forrás: Báder és tsai. 2019)

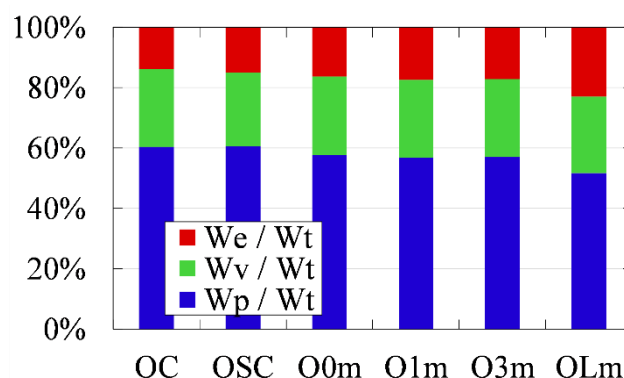
A  $H/E_r$  arány egy olyan paraméter, amely a vizsgált anyagnak a benyomódással szemben kifejtett plasztikus ellenállását jelzi. Már a rövid fixálási időtartamokkal végzett tömörítési eljárás hatására jelentősen, 25%-kal nőtt a  $H/E_r$  arány. A hosszú időtartamú fixálás ezt még tovább növeli, összesen mintegy 80%-kal (3.9. táblázat). Felületek, például bevonatok esetében ez a paraméter a kopást jellemzi, ami azt sugallhatja, hogy a bemutatott faanyagmodifikációs eljárás javíthatja a sejtek mechanikai kopásállóságát, ezáltal javítva a faanyag keresztmetszeti kopásállóságát. A legnagyobb benyomódási mélység növekedése, valamint a  $W_t$  paraméter növekedése (3.9. táblázat) kiválóan összhangban van az anyag mechanikai tulajdonságainak megváltozásával és a modifikáció mértékével. A statisztikai elemzések nem mutattak szignifikáns különbséget a rövid fixálási időtartamok között (O0m-O1m-O3m) sem a  $H/E_r$  arány, sem a különféle típusú munkák ( $W_b$ ,  $W_p$ ,  $W_v$ ,  $W_e$ ) esetében.



3.9. táblázat A nanoindentációs adatokból számított eredmények. Az ANOVA által azonosított statisztikailag homogén csoportokat görög betűkkel jelöljük (forrás: Báder és tsai. 2019). Rövidítések: OC – kezeletlen minta; OSC – gőzölt minta; O0m, O1m, O3m – rostirányban tömörített minták 0, 1, és 3 perc fixálási idővel; OLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta; H – sejtfalkeményesség;  $E_r$  – benyomódási modulus;  $W_t$  – teljes benyomódási munka

	H/ $E_r$ [ $\times 10^3$ ]	$W_t$ [%]	Statisztikai egyezés
OC	18.6	100.0%	$\alpha$
OSC	19.8	95.3%	$\beta$
O0m	23.3	106.5%	$\gamma$
O1m	24.8	106.3%	$\gamma$
O3m	24.9	106.9%	$\gamma$
OLm	33.4	113.5%	$\delta$

Mivel a sejt anyagi viselkedése egyetlen rugalmassági paraméterrel ( $E_r$ ) nem jellemezhető, ezért a benyomódás során végzett deformációs munkát is elemeztük és plasztikus ( $W_p$ ), viszkoelasztikus ( $W_v$ ) és elasztikus ( $W_e$ ) részekre osztottuk fel, amint a 3.30. ábrán látható. Ily módon a benyomódási munka arányainak kezelési típusonkénti elemzésével összehasonlíthatók a benyomódáshoz szükséges különféle alakváltozási munkák és azok változásai (3.33. ábra). A teljes deformációs munkák eltéréseit ( $W_t$ ) a 3.9. táblázat középső oszlopa mutatja.



3.33. ábra A kezelt minták nanoindentációs vizsgálatánál alkalmazott relatív benyomódási munka. A csoportokat az ANOVA-elemzés azonosította. Azok a kezelések vannak azonos görög betűkkel jelölve, ahol az összes relatív benyomódási munka statisztikailag homogén (forrás: Báder és tsai. 2019). Rövidítések: OC – kezeletlen minta; OSC – gőzölt minta; O0m, O1m, O3m – rostirányban tömörített minták 0, 1, és 3 perc fixálási idővel; OLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta;  $W_t$  – teljes benyomódási munka;  $W_e$  – rugalmas benyomódási munka;  $W_v$  – viszkoelasztikus benyomódási munka;  $W_p$  – plasztikus benyomódási munka

**A rugalmas benyomódási munka relatív mennyisége növekszik mind a tömörítéssel (3%), mind a hosszú idejű fixálással (9%), azaz a sejtfal anyagának mechanikai tulajdonságai a nagyobb rugalmasság felé tolódnak el a hosszú időtartamú fixálással.** Az elasztikus benyomódási munka növekedése az anyag plasztikus benyomódási munkájának rovására következett be, amely mind a rostirányú tömörítéssel (3%), mind a hosszú időtartamú fixálással (9%) csökkent (3.33. ábra). E két benyomódási művelet aránya ( $W_e/W_p$ ) a hosszú időtartamú fixálás hatására 23%-ról 44%-ra növekedett. Ez nagyobb

rugalmasságot (rugalmas benyomódási munka) és gyengébb alakíthatóságot (plasztikus benyomódási munka) jelent a sejtfal szintjén. Úgy tűnik, hogy ez a megállapítás ellentmond a korábban ismertetett, makroszkopikus szinten megfigyelt változásoknak (3.5. fejezet, 3.8. táblázat). Itt a drámai módon megnövekedett maximális alakváltozás jelentősen megnövekedett alakíthatósággal jár együtt hosszú időtartamú fixálás esetén. A viszkoelasztikus benyomódási munka értékét tekintve a kezeletlen és a kezelt minták közötti különbség statisztikailag jelentéktelen volt. A  $W_v$  az időtől függő deformációs viselkedés számszerűsítésére szolgál, mely állandó terhelés mellett lett megvizsgálva. A sejtek viszkoelasztikus viselkedését a bemutatott kezelések nem befolyásolják.

Az S2 sejtfalréteg mechanikai tulajdonságai mellett, amelyek meghatározók a faanyag mechanikai tulajdonságai szempontjából, a középső lamellában (CML) bekövetkező változások vizsgálata is megtörtént. A 3.10. táblázatban feltüntetett átlagok tizenegy mérés eredményeit reprezentálják az OC és OLM mintacsoportokban. A két szöveti elem (S2 és CML) összehasonlításához a CML vizsgálati helyek közelében található S2 mérési pontokat választottunk. Összehasonlítottuk a kezeletlen és a hosszú ideig fixált minták tulajdonságainak változásait mind a CML, mind az S2 szekunder sejtfal esetében (3.10. táblázat).

3.10. táblázat A tömörített és hosszú ideig fixált (OLM), valamint a kezeletlen (OC) minták mechanikai tulajdonságváltozásainak aránya a szekunder sejtfalréteg (S2) és a középső lamella (CML) esetében (forrás: Báder és tsai. 2019). Rövidítések:  $H$  – sejtfalkeménység;  $E_r$  – benyomódási modulus;  $W_t$  – teljes benyomódási munka;  $W_e$  – rugalmas benyomódási munka;  $W_v$  – viszkoelasztikus benyomódási munka;  $W_p$  – plasztikus benyomódási munka

	H	$E_r$	$W_t$	$W_e$	$W_v$	$W_p$
S2 sejtfalréteg OLM/OC aránya	-12.9%	-47.9%	13.8%	8.6%	0.2%	-8.7%
CML OLM/OC aránya	1.5%	-19.0%	-1.2%	6.1%	-2.1%	-4.1%

A 3.10. táblázat azt mutatja, hogy a kezelés hatására bekövetkező legtöbb mikromechanikai tulajdonság változása sokkal alacsonyabb a CML esetén, mint a S2 esetén, de az  $E_r$  esetében még mindig jelentős (19%). A CML keménysége, teljes benyomódási munkája és viszkoelasztikus benyomódási munkája nem változott észrevehetően. Az S2 sejtrétegben a hosszú ideig tartó fixálás eredményeképp a  $W_e/W_p$  arány 24%-ról 45%-ra növekedett. A CML esetében a  $W_e/W_p$  arány 60%-ról 81%-ra változott. Így elmondható, hogy mind az S2, mind a CML a nagyobb rugalmasság irányában változik. Az S2 és a CML közötti különbségek azok kémiai összetételének és szerkezeti felépítésének eltéréseiből adódnak. A CML homogénnek tekinthető összetétele ellentétes az erősen anizotróp S2 sejtfalréteg összetételével. A kezelés eredményeként az S2 sejtfalréteg sejten belüli rostszerkezeti, mikrofibrilláris elrendezése jelentősen megváltozik. A CML hasonló szerkezeti változásai kevésbé valószínűek a magas rendezettségű mikrofibrilláris rendszer hiánya miatt. A CML tulajdonságváltozásai bizonyos mechanikai változásokra utalnak, nevezetesen a középső lamellák gyengülésére, amely elősegíti a faanyag hajlításához szükséges szerkezeti integritás elérését. Ezenkívül feltételezzük, hogy a rosthosszúság csökkenése és a CML tulajdonságainak megváltozása a tömörítéses kezelés eredményeként egyaránt hozzájárulnak a faanyag általános mechanikai viselkedésének változásához.

### 3.9. A rostirányú tömörítés hatása a fa-víz kapcsolatokra

A természetes faanyag nedvességtartalma (*MC*) követi a levegő páratartalmát, emellett a pillanatnyi hőmérséklet és légnyomás is befolyásolja. A faanyag állandó hőmérsékleten és légnedvességen idővel beáll egy egyensúlyi nedvességtartalomra (*EMC*). A maximális relatív légnedvességhez tartozik a faanyag rosttelítettségi állapota (*FSP*). Ekkor a legnagyobb mennyiségű vízmolekula, melyet a faanyag meg tud kötni, a faanyag sejtfalaiban található fő alkotóelemeinek hidroxil-csoportjaihoz (-OH) kapcsolódik (Berthold és tsai. 1996; Thygesen és tsai. 2010; Ansell 2011). Az abszolút száraz és az *FSP* közötti nedvességtartalmi tartományban a *MC* rendkívüli hatással van a fizikai-mechanikai tulajdonságokra. Jó példa erre a zsugorodás és dagadás, mely nagyságrendileg a fémeknek a hőmérsékletváltozás miatt bekövetkező méretváltozásához hasonlítható. Azonban tekintettel arra, hogy egy ortogónálisan anizotróp, természetes anyagról van szó, a faanyag fő anatómiai irányaiban más és más reakciókkal bír. Általánosságban elmondható, hogy a faanyag dagadási értékei nulla és rosttelítettségi nedvességtartalom között húrirányban 10-12%, sugárirányban 5-6%, míg rostirányban 0,1-0,3%. A kötött *MC* változása a szorpció. A *MC* csökkenését deszorpciónak, míg a nedvességfelvételt reszorpciónak vagy adszorpciónak nevezzük (Siau 1984).

Az *EMC* általában az élőnedves faanyag kezdeti deszorpciója során a legmagasabb (Skaar 1988). A magasabb kezdeti nedvességtartalom magasabb deszorpciók görbét eredményez (Németh 2002). Az élőnedves faanyag száradásakor annak higroszkóposága visszafordíthatatlanul csökken az 50% feletti *RH* tartományban (Skaar 1988). Amikor az élőnedves faanyag szárad, visszanedvesedik és újra szárad, a kezdeti deszorpció, az első adszorpció és a második deszorpció görbéi nem egyeznek. A *MC* különbségét a deszorpciók és adszorpciók görbéi között szorpciók hiszterézisnek hívjuk (Németh 2002). A szakirodalomban számos ok található a szorpciók hiszterézisre, például:

- A száraz állapotú faanyag sejtfalaiban a száradás során végbement zsugorodás miatt nem található üregek. Az intermicelláris és interfibrilláris üregek és pórusok szemben álló falai annyira közel kerülnek egymáshoz, hogy szabad -OH csoportjaik között új, erős kötések alakulnak ki. Amikor a víz belép ebbe a rendszerbe, eltávolítja egymástól a mikrofibrillákat és megduzzasztja az anyagot, de nem képes felszakítani az összes új kémiai kötést. Ezáltal a faanyag kevesebb vizet tud felvenni a levegőből
- a gödörkék rések a sejtfalakban és csatornákat képeznek a sejtek között. A szárítás során sok gödörke bezáródik, ezáltal lassítja és akadályozza a későbbi nedvességfelvételt
- a hemicellulózok állapotváltozását a hemicellulózok nedvességtartalomtól függő mobilitása szabályozza a sejtekben, amikor a térfogati relaxációs folyamatok utáni dagadás és zsugorodás történik (Engelund és tsai. 2013)
- A szorpciók izotermák tipikusan fordított S alakúak (Niemz 1993, Khazaei 2008, Niemz és Sonderegger 2017, Shi és Avramidis 2017). Ez azt jelenti, hogy a görbék meredeksége nagyobb, azaz a víz mozgása gyorsabb mind alacsony, mind magas *RH* mellett.

A faanyag rostirányú tömörítését megelőző rostlágyítása tulajdonképpen a hemicellulózok és a lignin kötéseinek gyengítését jelenti, tehát a sejtek közötti és a mikrofibrillák közötti kötőerő is csökken. A növekvő nedvességtartalom csökkenti az amorf polimerek, mint a lignin és a hemicellulózok lágyulási hőmérsékletét (Lenth és Kamke 2001). Például a hemicellulózok lágyulása már szobahőmérsékleten, 70–75% *RH* mellett megtörténik (Olsson és Salmén 2003, Engelund és tsai. 2013). A lignin kémiai kötéseinek aktivitása rendkívül széles tartományban mozog, ami a lignin bomlását széles hőmérsékleti tartományban, 900 °C hőmérsékletig eredményezi. A hemicellulózok bomlási tartományának felső határa szintén 900 °C, de a folyamat könnyebben végbemegy (Yang és tsai. 2007). A faanyag szárítása abszolút szárazra 100 °C felett történik. 100 °C-nál

magasabb hőmérsékleti tartományban a kezelések a fakomponensek kémiai átalakulását eredményezik (Bak 2012, Fehér és tsai. 2014). A faanyag lebomlása körülbelül 70 °C hőmérsékleten kezdődik nedves körülmények között (Yang és tsai. 2007, Poletto és tsai. 2010) és a hemicellulózok a leghigroszkóposabb tulajdonságúak a sejtfal fő alkotóelemei közül (Stamm 1964, Lenth és Kamke 2001), emiatt bomlásuk nagymértékben befolyásolja a faanyag későbbi szorpciós tulajdonságait.

A faanyag nedvességtartalmának és változásának ismerete fontos, mert ezek számos kérdésre válaszokat adnak a későbbi felhasználása során fellépő viselkedésével kapcsolatban. A MC változásával az abszolút száraz állapot és a FSP között jelentős eltérések mutatkoznak a szilárdságban és a rugalmasságban, a sűrűségben, a zsugorodásban és dagadásban éppúgy, mint az anizotróp tulajdonságokban, a felület adszorpciójában, az optikai tulajdonságokban, a rovarokkal és gombákkal szembeni ellenállóképességben, stb. (Huang és tsai. 2006, Hernández és tsai. 2014). Faanyagok felhasználásakor a méretstabilitás a legfontosabb tényezők között foglal helyet. A tulajdonságok fafajonként és kezelésként eltérnek, ezért nemcsak fafajonként, hanem faanyag-modifikációként is vizsgálni szükséges nedvességtartalom hatásait. Ezen felül célszerű tisztában lenni a rostirányban tömörített faanyag nedvességtartalom-felvételével különböző RH mellett. E területen nem sikerült fellelni tudományos szakirodalmat, ezért vizsgáltuk a faanyag vízfelvételében bekövetkező változásokat a rostirányú tömörítés és fixálás következtében éppúgy, mint a zsugorodás-dagadás változását és a nedvességtartalom mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását.

### 3.9.1. Szorpciós tulajdonságok

**Kezeletlen, gőzölt, rostirányban tömörített és tömörített, majd hosszan fixált bükk mintákat használtunk.** 20×20×10 mm (H × S × R) méretű mintákból csoportonként 30 darab került a klímazekrénybe, ahol a viszonylag kis rostirányú méretnek és a praktikus elrendezésnek köszönhetően gyorsan tudtak a RH változásaira reagálni (3.34. ábra).

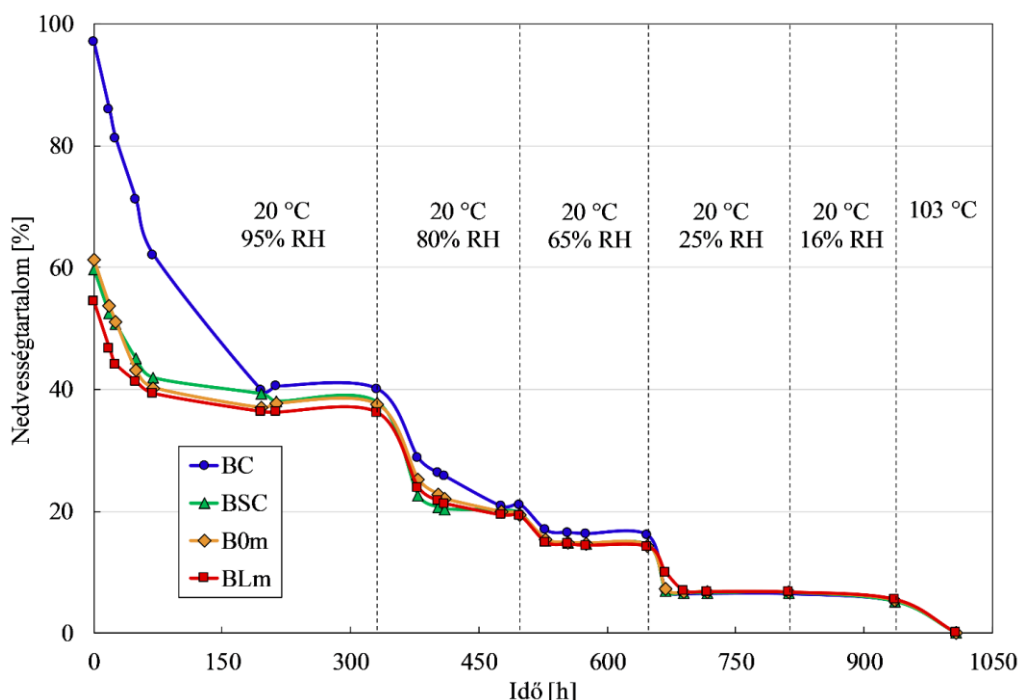


3.34. ábra Higroszkóposági vizsgálatok mintái csoportonként (forrás: Báder és Németh 2017b)

A minták tömegét csoportonként egyszerre mértük, így egyből a tömegváltozások átlagértékeit kaptuk eredményül. Tekintettel arra, hogy nagyon kis változásokról van szó, a tömegmérésekkor a minták a lehető legrövidebb ideig voltak a klímazekrényen kívül. Emiatt a labor páratartalma nagyon minimális mértékben változtathatta meg a minták pillanatnyi nedvességtartalmát, ami nagyban javította a mérések pontosságát. Ennek a módszernek az a másik előnye, hogy pontosabb eredmény érhető el, ha az apró minták kis tömegei helyett az összes minta tömegét mérjük meg ugyanolyan precizitással (jelen esetben 0,001 gramm).

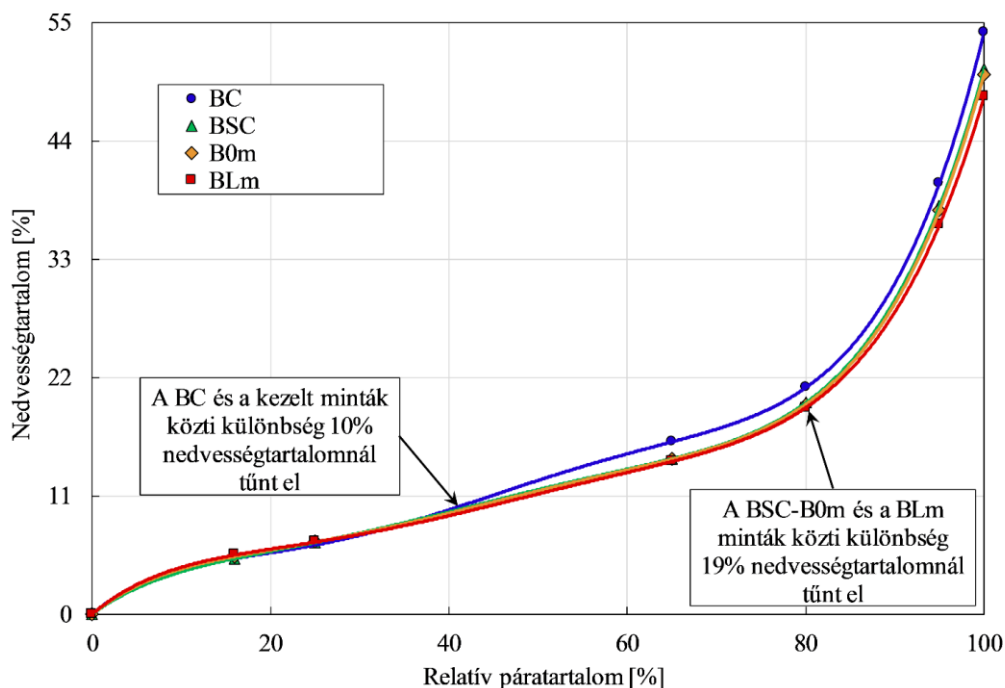
A hőmérséklet a vizsgálatok során folyamatosan 20 °C volt, ekkor a Binder klímasekrény *RH* tartománya 95–16% között változtatható. Az első mérési sorozatban a nedves mintákat 95% *RH* mellett kondicionáltuk, amíg az első egyensúlyi nedvességtartalmat el nem értük. A beállított *RH* a későbbiekben 80%, 65%, 25% és 16% volt. Nem volt szükséges megvizsgálni az *EMC*-t 65% és 25% *RH* között, mivel ebben a tartományban a *RH* és a *MC* aránya megközelítőleg állandó. Végül a mintákat abszolút szárazra szárítottuk 103 °C hőmérsékleten. A második mérési sorozatban az abszolút száraz mintákat a klímasekrénybe helyeztük és a relatív páratartalmat 95%-ra állítottuk, hogy a nedvességnövekedés sebességét is meg tudjuk vizsgálni. A mintacsoportok tömegét 30 percenként mértük az első 3 órában. A következő 3 órában a tömeget óránként mértük, ezt követően egyre ritkábban, mivel az *EMC*-hez közeledve a nedvességfelvétel lelassul.

A vizsgálatok kezdetén a minták kezdeti nedvességtartalma messze meghaladta az *FSP*-t. A *MC* csökkent a gőzölés hatására, ami magyarázza a kezeletlen és az összes többi minta közötti nagy különbséget (3.35. ábra). **A minták az első *EMC*-t kb. 40%-on (20 °C hőmérséklet és 95% *RH*) érték el. A kezelt minták mindig valamivel gyorsabban elérték az *EMC*-t, mint a kezeletlen minták.** A 100% *RH*-hoz tartozó *FSP*-t ötödrendű polinomokkal számítottuk a 3.36. ábra görbéinek megfelelő szakaszai alapján. A gőzölés ugyan csökkentette az *EMC*-t, de a gőzölt és a rostirányban tömörített minták között nem mutatkozott különbség, tehát **önmagában a tömörítés nem változtatja meg a minták *FSP* és *EMC* értékeit.** A hosszú fixálás azonban egyértelműen csökkentette az *EMC*-t magas *RH* esetében. A gőzölés hatására az *FSP* 3,7%-kal (*MC*%) csökkent, a gőzölt és a fixált minták között pedig 2,3% (*MC*%) különbség mutatkozott, tehát összesen 6,0% (*MC*%) volt a *FSP*-ok különbsége a kezeletlen és a fixált minták közt. A kezdetben jelentős különbségek a nedvességtartalom csökkenésével fokozatosan visszaestek, és a gőzölt és a fixált minták közötti különbség 19%-os *EMC* mellett, míg a kezeletlen és a gőzölt minták közötti különbség 10% *EMC* mellett tűnt el. **10% *EMC*-től az abszolút száraz állapotig azonosak az *EMC*-k és ebből kifolyólag a *MC* csökkenésének sebessége is.**



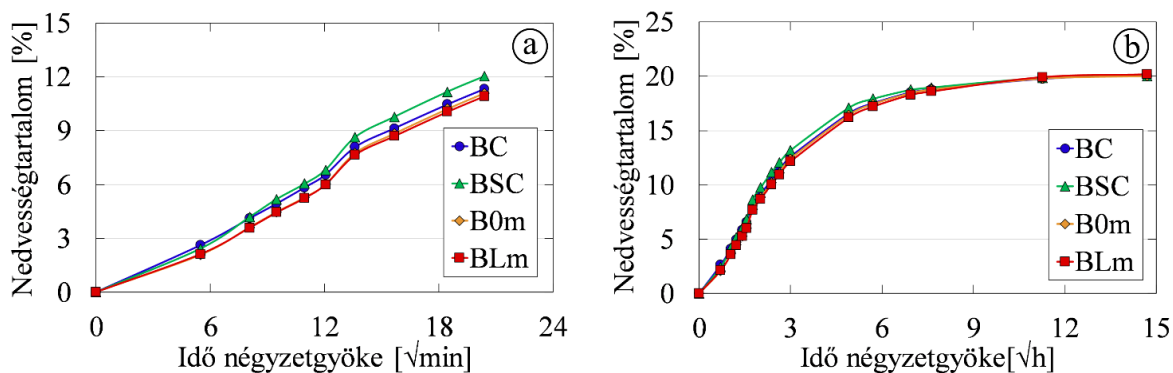
3.35. ábra *Bükk faanyag nedvességtartalma különböző páratartalmakon az első deszorpció során (Báder és Németh 2017b alapján). Rövidítések: RH – relatív páratartalom; BC – kezeletlen minta; BSC – gőzölt minta; B0m – rostirányban tömörített minta; BLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta*





3.36. ábra Bükk faanyag szorpciós izotermái az első deszorpció során (Báder és Németh 2017b alapján). Rövidítések: BC – kezeletlen minta; BSC – gőzölt minta; B0m – rostirányban tömörített minta; BLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta

A vizsgálatok második szakaszában a nedvességfelvételi sebesség megismerése volt a cél. A nedvességfelvételben nem volt különbség a tömörített és a fixált minták MC-je között. A kezeletlen és gőzölt minták MC-je körülbelül 7% MC-nél kezdett elkülönülni egymástól. A legnagyobb különbség 0,7% (MC%) volt 12%-os MC mellett. Ez azt jelenti, hogy **a gőzölés javítja a párafelvételi sebességet** (3.37.a. ábra). A grafikonoknál az idő négyzetgyökét használva a vízszintes tengelyen, az idő és a MC lineárisnak mutatózó kapcsolata diffúziós vízfelvételt jelez. A nedvességfelvételi vizsgálat első 7 órájában a kezeletlen minták grafikonja közel egyenesek, míg a kezelt minták grafikonjai valamelyest eltérnek az egyenes formától.



3.37. ábra Abszolút száraz bükk faanyag nedvességfelvétele 20 °C hőmérsékletű és 95% relatív páratartalmú klímában az első órákban (a) és a teljes ciklusban (b) (Báder és Németh 2017b alapján). Rövidítések: BC – kezeletlen minta; BSC – gőzölt minta; B0m – rostirányban tömörített minta; BLm – tömörített és hosszú időn keresztül fixált minta

**A tömörített és a fixált minták nedvességtartalma a nedvességfelvétel teljes időszakában alacsonyabb volt a kezeletlen mintákénál.** A legnagyobb különbség a gőzölt és a tömörített minták között volt 12% *MC* mellett, 1% (*MC*%). 12% *MC* felett az eltérések csökkenni kezdtek és végül 19% *MC*-nél eltűntek (3.37.b. ábra). 95% relatív páratartalom kondicionálva körülbelül 200 óra elteltével az *EMC* 20% volt minden mintában, tehát az *FSP* körülbelül 30%-ra becsülhető, mert a faanyag nedvességfelvételi képessége jelentősen növekszik 95% *RH* felett (Németh 2002). Ez megfelel a bükkfa irodalmi *FSP* értékének figyelembe véve, hogy a mintákat 103 °C-on szárítottuk és ez a művelet csökkenti a faanyagok *EMC*-jét. A gőzölésnél és a szárításnál alkalmazott hőmérsékletek a higroszkóposág maradandó csökkenését eredményezték, elsődlegesen az erősen hidrofil hemicellulózok hőbomlásának köszönhetően.

**Az első deszorpció során a tömörített faanyag gyorsabban alkalmazkodik a megváltozott klimatikus viszonyokhoz, így a szárítása a kezeletlen faanyaghoz viszonyítva rövidebb idő alatt végrehajtható.** Jellemzően *FSP* körüli, vagy kicsivel *FSP* alatti nedvességtartalmú faanyag szárításáról van szó. A szárítás hőmérséklete a felületi repedések elkerülése érdekében fokozatos, de gyors felfűtéssel már kezdetben is magasabb lehet. A 2.4.3. fejezetben leírtaknak megfelelően a 60 °C kezdeti léghőmérséklet tovább emelhető akár 80 °C-ig. **A rostirányban tömörített faanyag adszorpciója kissé lassabb a kezeletlenéhez viszonyítva, ezért az épületeken belüli használat során kevésbé reagál intenzíven a korlátozottan, de gyors ütemben változó klimatikus körülményekre.** Egy egész napos ciklikus beltéri klimatikus állapotváltozást figyelembe véve mire a tömörített faanyag alkalmazkodni tudna a megváltozott feltételekhez, azok változása megfordul és így a tömörített faanyagnak látszólag jobb a méretstabilitása és egyúttal ellenállóbb a száradási repedésekkel szemben. Természetesen a rostirányban tömörített faanyag a *MC* komolyabb változására a kezelés miatt jelentősen megnövekedett rostirányú méretváltoztatásaival nagyon rosszul reagál, ezért nem alkalmas a kültéri felhasználásra.

### **3.9.2. Visszarugózás, memória-hatás, zsugorodás-dagadás**

**A memória-hatás** egyes, pl. szerves anyagok domináns tulajdonságaként határozható meg. Ezek az anyagok bizonyos körülmények között képesek egy deformációs hatás eredményeként kapott alakjukat átmenetileg megtartani. **De a minta emlékszik a korábbi alakjára** – ezért dermesztett alakváltozásnak is hívják – és bármikor lehetőség van az eredeti alakját teljesen, vagy legalább részben visszaállítani. Ennek megfelelően a minta legalább két alakra emlékszik (Laine és tsai. 2016, Gorbacheva és tsai. 2019). **Ezzel ellentétben a visszarugózás egy olyan természetes reakció, amikor a faanyag egy művelet során keletkezett, az anyagba bevitt feszültségeket old fel** (Peck 1957). A rostirányú tömörítés esetében a visszarugózás (alaki- és méretváltozás) a faanyag plasztifikált, forró állapotában, nagyon rövid időn belül végbemegy, amint megszűnnek a deformációt okozó feszültségek. A szobahőmérsékletűre hűtött, és még inkább a szárított minták már visszarugózástól mentesnek, alakilag és méretileg stabilnak tekinthetők. A 20% mértékű tömörítés után a minta visszarugózik, és a maradandó rövidülése általában körülbelül 3-5%. Tölgy mintáknál az eredeti hosszhoz képest 20% mértékű tömörítés és azonnali elengedés átlagosan 2,49% maradandó rövidülést eredményezett. **1, 3 és 1 500 perces fixálás esetén a maradandó rövidülés rendre 3,04%, 3,49% és 19,01% volt.** A megfigyelések alapján a bükk mintáknak mindig nagyobb a visszarugózása.

A faanyagok jelentős zsugorodása és dagadása figyelhető meg nedvességtartalmának csökkenése és növekedése folyamán. A szakirodalomban fellelhető adatok szerint a bükk faanyagra térfogatilag, húr-, sugár- és rostirányban (T, H, S, R) átlagosan 17,7%, 11,7%, 5,8% és 0,30% adódik, míg tölgyre rendre 13,9%, 8,8%, 4,7% és 0,40% (Wagenführ 2006, Molnár 2016, Meier 2016, Meier 2019). A zsugorodás és a dagadás értékeit az érvényben

lévő ISO 13061 és a már visszavont, de új szabvánnyal nem helyettesített MSZ 6786 szabványcsomagokat alapul véve határoztuk meg, abszolút száraz állapotú mintákból kiindulva. Bár a rendelkezésre álló mintatestek méretei miatt az előírtnál jellemzően kisebb mintákat felhasználva, de nagyobb mérési pontosságot alkalmazva és az anatómiai irányok szigorú figyelembevételével hajtottuk végre a méréseket. A számításokat a (13) és a (14) képletekben meghatározott formulák alapján végeztük el. Dagadási érték számításánál a nedves méretet a korábbi száraz mérethez kell viszonyítani, míg zsugorodás esetén a nedves méret későbbi száraz mérethez viszonyítandó.

$$\alpha_V = \frac{l_{hn} \cdot l_{sn} \cdot l_{rn} - l_{h0} \cdot l_{s0} \cdot l_{r0}}{l_{h0} \cdot l_{s0} \cdot l_{r0}} \cdot 100; \alpha_h = \frac{l_{hn} - l_{h0}}{l_{h0}} \cdot 100; \alpha_s = \frac{l_{sn} - l_{s0}}{l_{s0}} \cdot 100;$$

$$\alpha_r = \frac{l_{rn} - l_{r0}}{l_{r0}} \cdot 100; [\%] \quad (13)$$

$$\beta_V = \frac{l_{hn} \cdot l_{sn} \cdot l_{rn} - l_{h0} \cdot l_{s0} \cdot l_{r0}}{l_{hn} \cdot l_{sn} \cdot l_{rn}} \cdot 100; \beta_h = \frac{l_{hn} - l_{h0}}{l_{hn}} \cdot 100; \beta_s = \frac{l_{sn} - l_{s0}}{l_{sn}} \cdot 100;$$

$$\beta_r = \frac{l_{rn} - l_{r0}}{l_{rn}} \cdot 100; [\%] \quad (14)$$

ahol:

$\alpha_V, \alpha_h, \alpha_s, \alpha_r$  – térfogati-, húrirányú-, sugárirányú és rostirányú dagadás

$\beta_V, \beta_h, \beta_s, \beta_r$  – térfogati-, húrirányú-, sugárirányú és rostirányú zsugorodás

$l_{hn}, l_{sn}, l_{rn}$  – telített minták méretei húrirányban, sugárirányban és rostirányban

$l_{h0}, l_{s0}, l_{r0}$  – abszolút száraz minták méretei húrirányban, sugárirányban és rostirányban.

A következőkben bemutatandó kísérletet a rostirányú tömörítést követő visszarugózás megfigyelésére terveztük tölgy fafajú minták alkalmazásával. 20 db gesztrészből származó mintát rostlágúítás után 20% mértékben tömörítettünk 25%/min sebességgel és 1 percig fixáltuk, így mintánként összesen 110 másodpercet vett igénybe a tömörítési folyamat. Mivel a tömörítő berendezésből a minta eltávolítása és a mérések elvégzése időt vesz igénybe, legkorábban fél percnél van az első lehetséges mérési pillanat. A vizsgálat céljának megfelelően az egyes minták tömegét és hosszát a kezelés befejezését követő 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60, 120 és 240. percen mértük. A keresztmetszeti méreteket 5, 60 és 240 perc elteltével ellenőriztük. A mintákat ekkor a laborban tároltuk, hozzávetőleg 22 °C hőmérsékleten és 50% relatív páratartalom. Ezek után mértük a minták tömegét és mindhárom fő méretét a kezelést követő 6, 25, 118, 170, 261, 307, 423, 495 és 596 órával. A következő körülmények között végeztük a kondicionálást:

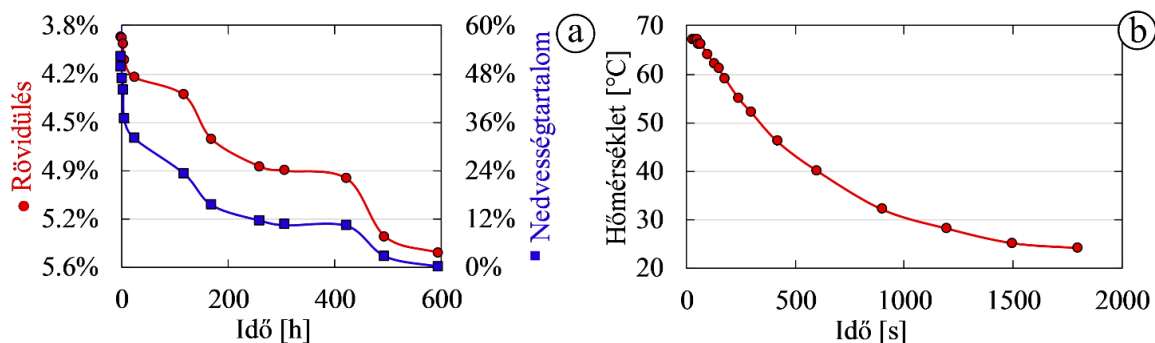
- a 4. és a 118. óra között 20 °C hőmérséklet és 65% RH
- a 118. és a 307. óra között 30 °C hőmérséklet és 50% RH
- a 307. és a 423. óra között 20 °C hőmérséklet és 40% RH
- a 423. és a 495. óra között fokozatos növekedéssel 60-80 °C hőmérséklet és 50% RH
- a 495. és az 596. óra között 103 °C hőmérsékleten, hogy megkapjuk a minták abszolút száraz tömeg- és méretértékeit.

Már az első mintáknál kiderült, hogy a minták tömegének mérése a kezelés utáni első percekben nem szükséges, mivel a minták kezdeti nedvességtartalma annyira magas volt (körülbelül 60%), hogy a nedvességvesztés nem okozhatott fizikai változásokat. Ennek ellenére maradtak feszültségek a faanyagban tömörítés után, így várható volt hosszváltozás, amint azt a 3.11. táblázat is bizonyítja.

3.11. táblázat Tölgy minták átlagos nedvességtartalma és rövidülése a tömörítés befejezésének pillanatától (forrás: Báder és Németh 2020)

Idő [min]	0.0	0.5	1.0	3.0	5.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Nedvességtartalom	60.13%	-	-	-	52.25%	50.72%	49.68%	-	46.74%	43.79%
Rövidülés	20.00%	4.09%	3.96%	3.85%	3.84%	3.83%	3.84%	3.84%	3.85%	3.89%

A 3.11. táblázatot és a 3.38.a ábrát áttekintve egyértelmű, hogy a MC csökkenése, azaz a tömegvesztés az első rövid időszakban a legintenzívebb. A hőmérséklet ellenőrzése azt mutatta, hogy a minták körülbelül 20 perc elteltével közelítették meg a laboratórium léghőmérsékletét (3.38.b ábra). Magas hőmérséklet mellett a tömegvesztés is intenzívebb, azaz jelentős az erős párolgás miatti MC veszteség. A faanyag külső rétegei közvetlenül érintkeznek a környező levegővel. A MC a felületen ezért gyorsabban csökken, mint a faanyag belső részeiben és bár később a vízvesztés üteme lelassul, továbbra is jelentős marad. Ezen természetes, gyorsütemű vízvesztésüket követően a faanyag mesterséges szárítását végeztük el a korábban leírtak szerint, a mintáknak folyamatosan csökkenő egyensúlyi nedvességtartalmát célozva.

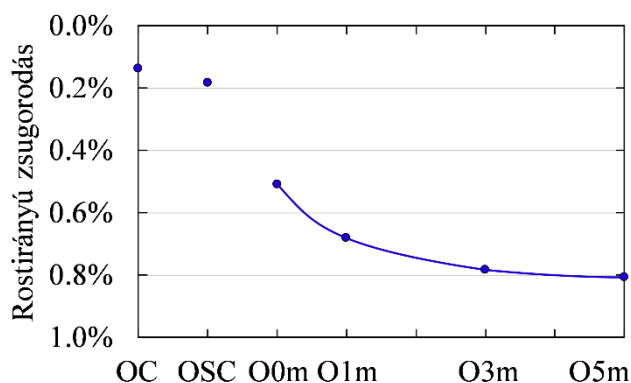


3.38. ábra 20% mértékű rostirányú tömörítés és 1 perc fixálás után a tölgy minták átlagos rövidülése és nedvességtartalma az idő függvényében (a) és a minták hőmérséklet-változásával összevetve (b) (forrás: Báder és Németh 2020)

A tömörítési arány a minták eredeti hosszához képest 20% volt, majd a tömörítő erők megszűntek és a minták az első néhány másodpercben visszanyerték eredeti hosszuk nagy részét. Amint a 3.11. táblázatból látható, **a tömörítő erők megszűnését követő első 3 percben a vizsgált 20 minta átlagos hosszúsága növekedett. A minták hossza állandósult a 3. és a 120. perc közötti időszakban.** A megfelelő léptéket használva az Idő-Rövidülés és az Idő-Nedvességtartalom változását szemléltető grafikonok illeszkednek egymáshoz (3.38.a ábra). Ez előrejelzést ad a MC és a minták méretváltozásai közötti összefüggésre. Két órával a tömörítés után a minták nedvességtartalma még erősen meghaladta a FSP-t, mégis csökkent a hosszuk a MC csökkenésével (3.38.a ábra). Ha elfogadjuk az irodalmi értéket, amely szerint a tölgy FSP értéke 24,5% (Molnár és tsai. 2000), akkor **0,4%-os hosszcsökkenés figyelhető meg a 22%-os vízvesztés során az FSP feletti nedvességtartalmi tartományban.** A szakirodalomban található információk alapján a FSP feletti nedvességtartalmaknál a faanyagok száradás miatti méretváltozása nem lehetséges. Emiatt csakis a visszazugózás hatása, majd a feszültségcsökkentés lehet az oka a minták imént leírt hossznövekedésnek és hosszcsökkenésnek. A FSP feletti nedvességtartalmaknál megfigyelt zsugorodás a sejtfalak meggyűrődésének következménye lehet, ami mikrorepedések kialakulásához vezet. A gyűrődések a sejtfal felületének növekedését és olyan kémiai kapcsolódási pontok kialakulását okozzák, amelyek korábban nem voltak elérhetők, ezt a 3.10. fejezet eredményei is alátámasztják. Továbbá laboratóriumi megfigyelésünk alapján, ha egy rostirányban tömörített mintát a tömörítést követően nedves és meleg állapotban többször hajlítanak és kiegyenesítenek, akkor a közvetlenül a tömörítés után beállt hossz nagyobb mértékben növekszik, mint az a 3.11. táblázatban látható. Ez a gyűrődött sejtfalak hatása, melyek a minta oda-vissza hajlítása eredményeként részben kiegyenesednek. **Az FSP alatti nedvességtartományban a zsugorodás 1,2% volt, ez egy 4-6-szoros érték a kezeletlen minták zsugorodásához viszonyítva (általában 0,2-0,3%).**

A 3.6. fejezetben és az imént bemutatott zsugorodási vizsgálatok előkísérletnek tekinthetők: nem szabványos méretű és szintén nem szabványos oldalirányú mintákon lett elvégezve. Az eredmények azonban azt mutatták, hogy érdemes odafigyelni a rostirányban tömörített faanyagok rostirányú zsugorodására és dagadására. Az előkísérletek számszerűsített eredményeinek bemutatása és tárgyalása tehát felesleges, mert nem biztosít kellően pontos adatokat. Azt azonban egyértelműen jelzik, hogy a rostirányú zsugorodás jelentősen növekszik a rostirányú tömörítés hatására.

Egy következő munkában (Báder és Németh 2018a) már kezeletlen, gőzölt, rostirányban tömörített, rostirányban tömörített és 1, 3 és 5 percet fixált, valamint hosszú időn keresztül fixált tölgy minták felhasználásával végeztünk előkísérleteket a faanyag rostirányú zsugorodási képességének feltérképezésére. Újfent olyan minták hossz méretének változásának vizsgálatára volt lehetőségünk, amelyek nem feleltek meg a vonatkozó szabványok által előírtaknak (ca.  $20 \times 20 \times 160-200$  mm, H  $\times$  S  $\times$  R). A magas nedvességtartalmú mintákat a párhuzamosan futó kísérletek miatt 12% nedvességtartalomra kondicionáltuk. A 0%-os nedvességtartalomra történő szárítás folyamán bekövetkező hosszváltozás a telített és a normál klímán kondicionált minták adatainak különbsége alapján, egyenes arányossággal került kiszámításra. **A rostirányú tömörítés hatására (fixálás nélkül) a faanyag rostirányú száradási zsugorodása a 3.39. ábra szerint megháromszorozódik. A fixálási folyamat tovább növeli a zsugorodást, már az egy perces időtartamú is 0,51%-ról 0,68%-ra.** A minták visszarugózásával foglalkozó, előzőekben bemutatott kísérletnél az egy perces fixált minták zsugorodása a kezeletlenekéhez viszonyítva 4-6-szoros lett, míg jelen esetben négyszeres. A különbséget az okozhatja, hogy a 0-12% nedvességtartalom között bekövetkező zsugorodást jelen esetben egyenes arányossággal számítottuk ki, tehát közelítő értékekről beszélhetünk. **A hosszú ideig fixált mintáknál a zsugorodás eléri 0,94%-ot, mely a kezeletlen mintákhoz viszonyítva körülbelül hatszoros érték.** Ennek a jelenségnek a magyarázata a harmonika-szerűen meghajlott sejtfaalaknak köszönhető (lásd 2.5.3. és 3.7. fejezet), mert a sejtfaalak részleges irány-változtatásával a sokkal nagyobb mértékű keresztirányú zsugorodás egy része hozzáadódik a rostirányú zsugorodáshoz, jelentősen megnövelve azt.



3.39. ábra Tölgy minták maximális zsugorodása a száradás során, a fixálási időtartam függvényében (Báder és Németh 2018a alapján). Rövidítések: OC – kezeletlen minta; OSC – gőzölt minta; O0m, O1m, O3m, O5m – rostirányban tömörített minták 0, 1, 3 és 5 perc fixálási idővel

A témát tovább elemezve kiderült, hogy a nedvességtartalom változásából fakadó zsugorodás-dagadást külön kell választani a faanyag rostirányú tömörítésből fakadó további három tényezőtől: a visszarugózástól, a maradandó rövidüléstől és a memória-hatástól. A következőkben egy kimondottan e célra tervezett kísérlet bemutatása következik. A rosttelítettségi pont alatti nedvességtartalmaknál a szárítás folyamán, a nedvességvesztésből adódóan természetes zsugorodás figyelhető meg a faanyagok minden anatómiai irányában. Köztudott, hogy ugyanez igaz visszafelé is: amikor a száraz faanyagot



nedvesítjük, az növeli méreteit. Azonban a rostirányban tömörített faanyagoknál megjelenik a memória-hatás is, amivel rendkívül nagymértékűnek tűnik a minták első rostirányú dagadása. Valójában nem csupán a nedvességtartalom növekedése okozta méretnövekedésről van szó, hanem a nagymértékű nedvesítés „emlékezteti” a nedvesség hatására valamelyest plasztifikálódó faanyagot eredeti, tömörítés előtti állapotára és a sejtfalak igyekeznek visszanyerni eredeti formájukat. Emiatt a sejtfalak tömörítés következtében létrejött gyűrődései részben újra kiegyenesednek. Nagymértékű szerkezeti változtatások esetén ez a folyamat csak korlátozott mértékben mehet végbe. Gorbacheva és tsai. (2015) példáját alapul véve, ha egy eredendően egyenes famintát megfelelő körülmények között (pl. gőzölve) adott formára hajlítunk és megszáritunk, az esetleges plasztikus (visszafordíthatatlan) alakváltozáson kívül ún. dermesztett alakváltozás keletkezik, amely a faanyagban megfigyelhető memória-hatásért felelős. A minta újranedvesítésekor bekövetkezik az eredeti (egyenes) forma teljes, vagy részleges visszaállása a dermesztett alakváltozás eltűnésével. Matematikailag leírva a minta alakváltozása ( $\varepsilon$ ) a dermesztett alakváltozás ( $\varepsilon_d$ ) és a plasztikus alakváltozás ( $\varepsilon_p$ ) felhasználásával a (15) képletben látható.

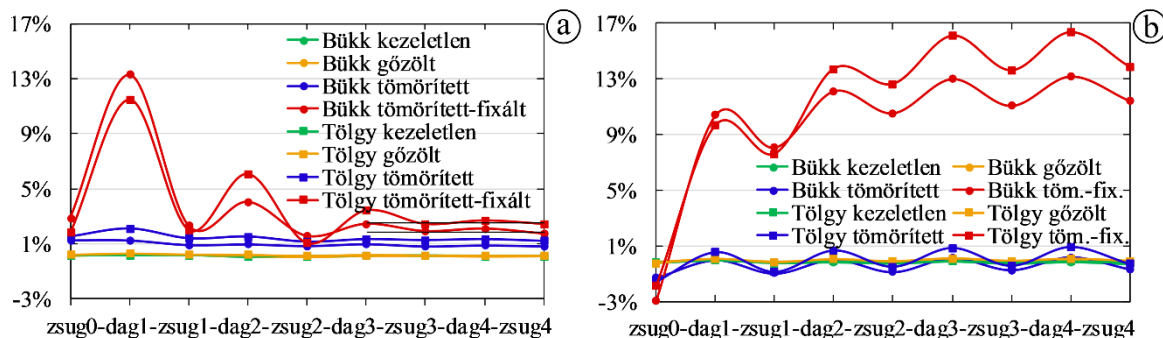
$$\varepsilon = 0 \xrightarrow[\text{száritás}]{\text{formára hajlítás,}} \varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_d \xrightarrow{\text{nedvesítés}} \varepsilon = \varepsilon_p \geq 0 \quad (15)$$

A memória-hatást a modifikáció során elszenvedett, visszafordítható szerkezeti változások okozzák. A faanyag-mátrix térszerkezete három egymásba fűzött hálózat szuperpozíciója: a H-háló hidrogénkötések hálózata a szénhidrátok, valamint a lignin és a szénhidrátok között; az LH-háló kovalens kötésekkel bíró hálózat a lignin és a hemicellulózok között; az L-háló fizikai kötődést jelöl a lignin-makromolekulák között. A faanyag terhelés közben végzett száritása elsősorban az amorf cellulózoknál, valamint a hidrogénkötések hálózatában vezet változásokhoz. Egyes elméletek szerint a hemicellulózok dominálnak az alakrögzítési (dermesztési) mechanizmusokban és a lignin dominál az eredeti forma visszaállításban. A faanyag képes az ingerekre adott molekuláris szintű érzékenységet makroszkopikus szintű mozgássá alakítani. A visszafordítható alakváltozásokat, jellemzően az aktív mozgási jelenségeket a faanyag molekuláris-topológiai szerkezetének átalakulása magyarázza (Gorbacheva és tsai. 2015).

A zsugorodás-dagadási vizsgálatokhoz csoportonként 20-20 db  $12 \times 12 \times 20$  mm (H  $\times$  S  $\times$  R) méretű minta került kialakításra (kezeletlen, gőzölt, rostirányban tömörített és 1 percet fixált, tömörített és hosszú időn keresztül fixált). Utóbbi tömörített-fixált minták minimum 15 óras, átlagosan 18 óras fixáláson estek át. A mintaválasztás fontos szempontjai bükk- és tölgy fafaj esetében is az oldalakkal párhuzamos évgyűrűállás és az érettfából származó hibátlan alapanyag voltak. Az előkezelés, a 25%/min sebességű tömörítés, a klímaszobás kondicionálás és a tömeg- és mintaméret meghatározása a korábban leírtak szerint zajlott (3. fejezet). A dagadási vizsgálatoknál a minták végnedvessége minden esetben jóval a fafajra jellemző irodalmi rosttelítettségi határ feletti volt, tehát az eredmények e szempontból feltétlenül megbízhatók.

A bemutatott laboratóriumi tömörítéseket követően a minták a rosttelítettségi határuk feletti nedvességtartalommal rendelkeztek. A mintákat normál körülmények között rövid ideig pihentetve beáll egy stabilnak tekinthető hossz méret, ekkorra a visszarugózás befejeződik és megmutatkozik a tömörítési eljárás okozta maradandó rövidülés. Az eredeti, kezeletlen mintaméretből kiindulva ekkor kiszámolható a mintának a tömörítés miatt elszenvedett maradandó méretváltozása. A tömörített nedves minták méretéből, valamint a száritás során végbemenő további hosszcsökkenésből a tiszta száradási zsugorodás számítható ki a (14) képlet alapján. Azonban **a már abszolút száraz, rostirányban tömörített famintákat vízbe áztatva a nedvességnövekedés okozta dagadás mellett – mely a (13) képletből**

számítható – megjelenik a memória-hatás is. E kettő együttes értéke irreálisan magas dagadási eredményt ad az első áztatási ciklusban (3.40.a és b ábra). Sajnos az egyértelmű és pontos szétválasztása a dagadásnak és a memória-hatásnak ekkor még nem lehetséges. A harmadik ciklustól kezdődően azonban állandósulnak a dagadási és a zsugorodási értékek, azaz véglegesnek tekintendő értékeket kapunk. A tömörített-fixált minták eredményeinél nagyobb a változékonyság, ezért ott vízszintes fekete vonalakkal bejelöltük az átlagértékeket a 3. és 4. ciklusban (3.40.a ábra). Eszerint a kezeletlen és a gőzölt minták 0,11-0,16% közötti rostirányú dagadással és zsugorodással rendelkeztek. Ugyanez tömörített bükknél 0,8%, tömörített tölgynél 1,3%, míg a tömörített-fixált minták végleges értékei rendre 1,8-2,1% és 2,4-2,7% a 3. és 4. ciklusban. A jelentősebb mozgások a tömörített-fixált minták esetében a nagyobb mértékű maradandó rövidüléssel, azaz a modifikáció okozta sokkal jelentősebb szerkezeti átrendeződéssel magyarázhatók. Azonos a magyarázat a kezeletlenekhez viszonyítva nagyságrendileg megnövekedett zsugorodási-dagadási értékekre. Ezek komoly dimenzió-stabilitási gondokat okozhatnak a rostirányban tömörített faanyagok potenciálisan nedves helyen történő felhasználásánál. Általános trend, hogy a faanyagok sok cikluson keresztül véghezvitt áztatásos telítése, majd kíméletes szárítása kismértékű, fokozatos csökkenést okoz a zsugorodásban és a dagadásban egyaránt. A kezeletlen és a gőzölt minták kezdeti zsugorodása-dagadása 0,14-0,30%, jellemzően 0,2% volt. Ez megfelel az irodalomban fellelhető adatoknak (3.9.2. fejezet).



3.40. ábra Rostirányú zsugorodás-dagadási értékek a vizsgált négy ciklusban, szabványos számítási módszer szerint (a) és ugyanezen eredmények halmozott ábrája (b). Rövidítések: zsug – zsugorodási ciklus; dag – dagadási ciklus. Megjegyzés: a zsugorodási-dagadási ciklusok sorszámozva vannak; a 0. ciklus az élőnedves minták szabványban meghatározott szárítását jelöli

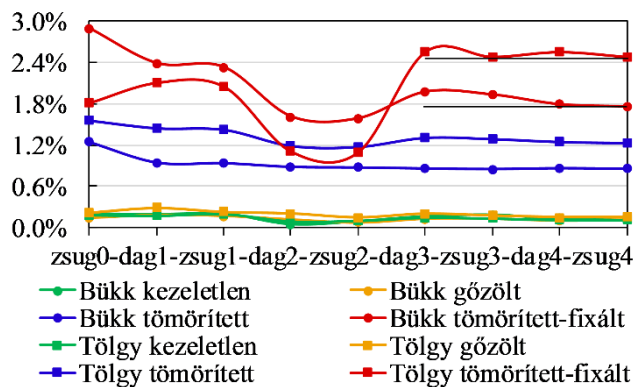
Ha a 3.40.a ábrán bemutatott rostirányú méretváltozásokat csoportonként előjelesen összegezzük, 3.40.b ábra halmozott grafikonját kapjuk. Az egyes grafikonokon a zsugorodások és a dagadások kilengései legkésőbb a 3. ciklustól állandósulnak. Ha ezen állandósult értékeket vesszük végleges zsugorodásnak és dagadásnak, akkor kiszámítható a memória-hatás mértéke, amely az első ciklusok során markánsan megmutatkozik. A nedvesítés a faanyagban maradt rejtett feszültségeket feloldja, a tömörített minták hossz mérete véglegesen megnövekszik egy bizonyos mértékben, már csak a nedvességváltozás okozta természetes zsugorodás és dagadás marad a későbbi ciklusokra, azaz a harmadik ciklustól kezdődően. A 3.40.b ábrán látható 3. és 4. ciklusok minimum eredményeit csoportonként átlagolva és kivonva a kezeletlen értékek átlagaiból megkapjuk a memória-hatás értékét. Tömörített bükk és tölgy mintáknál rendre 0,19% és 0,14%, azaz szinte elhanyagolható a memória-hatás, mert a maradandó rövidülés jellemzően 3-5%. A rostirányú tömörítést követően a plasztikus állapotban végbemenő nagymértékű visszarugózás miatt a faanyagban kevésbé maradnak a tömörítésből feszültségek. A tömörített-hosszan fixált bükk és tölgy mintáknál a memória-hatás értéke rendre 11,6% és 13,9%. Figyelembe véve, hogy a 20% mértékű rostirányú tömörítés utáni

maradandó rövidülés ezeknél rendre 12,5% és 18,4% volt, megállapítható, hogy bükk faanyag esetén a plasztikus alakváltozás minimális, míg tölgyeknél számottevő. Ebből következik, hogy a tölgyeknél a 20% mértékű tömörítés közelebb van a tömöríthetőségi maximumhoz, mint a bükköknél. Tömöríthetőségi maximum alatt azt a legnagyobb rostirányú tömörítési arányt értjük, amit a faanyag makroszkopikusan látható elváltozások nélkül elvisel, azaz nem jelennek meg rostelcsúszások, megrogyások, repedések, nem megy tönkre a faanyag.

Az előzőekből adódik, hogy a memória-hatás mértéke ciklusonként is számítható, de összességében igazán érdekes. Kezeletlen és gőzölt bükk és tölgy mintáknál memória-hatásról nem beszélhetünk. Tömörítetteknel a 4. ciklus után rendre 0,6% és 1,3%, míg tömörített-fixált minták esetében rendre 14,3% és 15,7% a rostirányú méretváltozás, az első ciklus elején mért zsugorodási értékekhez viszonyítva. Ha egy 1 méteres hosszúságú alkatrésze vonatkoztatjuk ezen értékeket, egyértelművé válik, hogy már a tömörített, de nem fixált faanyagok esetében is jelentős torzulásokat okozhat a faanyag rostirányú mozgása. Bár szerkezeti elemként nem engedélyezett a mechanikailag modifikált faanyagok használata, de egyéb helyen (bútor, falburkolat, dekoráció, stb.) alkalmazva őket, némi keresztmetszeti nedvességkülönbség komoly görbülést- és egyéb alakváltozást okozhat. Ennek kiküszöbölési lehetőségeivel a 3.11. fejezet foglalkozik.

**A későbbi vizsgálatok egyszerűsítésére, amennyiben a szabványos képlettől (13) eltérően nem a korábbi abszolút száraz rostirányú mérettel ( $l_{r0}$ ), hanem a következő ciklus abszolút száraz rostirányú méretével ( $l_{r0+}$ ) vetjük össze a minta telített rostirányú méretét ( $l_{rn}$ ), megközelítőleg memória-hatástól mentes dagadási eredményt ( $\alpha_{r+}$ ) kaphatunk ( (16) képlet és 3.41. ábra).**

$$\alpha_{r+} = \frac{l_{rn} - l_{r0+}}{l_{r0+}} \cdot 100; [\%] \quad (16)$$



3.41. ábra Rostirányú zsugorodás-dagadási értékek a vizsgált négy ciklusban a tömörített faanyagoknál jelentkező memória-hatás kiszűrése céljából módosított számítási módszer szerint. Rövidítések: zsug – zsugorodási ciklus; dag – dagadási ciklus.

Megjegyzés: lásd 3.40. ábra

A 3.41. ábrán jól látható, hogy már az első dagadási-zsugorodási ciklus módosított számítással kapott eredményei közel voltak a véglegesnek tekinthető értékekhez. Ezek összehasonlítása a szabványosan kalkulált eredményekkel a 3.12. táblázatban található. A két számítási módszert összevetve a tömörített mintáknál megegyeztek az eredmények és a bükk fixáltaknál is alig volt eltérés. A tölgy fixáltak esetében kicsivel nagyobb differencia mutatkozott. Erre a tölgy fafajnál a memória-hatás hosszabb, bükkhöz viszonyítva több cikluson keresztül tartó megjelenése ad magyarázatot. Ezzel együtt megállapítható, hogy a módosított számítási módszer segítségével memória-hatástól mentes, a valós dagadási-zsugorodási értékeket nagyon jól közelítő eredményeket kapunk.

3.12. táblázat Különböző zsugorodás-dagadás számítási módszerek átlageredményei azonos, mechanikailag modifikált mintacsoportokra

		Szabványos számítási módszer, 1. ciklus eredményei	Szabványos számítási módszer, 3-4. ciklus eredményei	Módosított számítási módszer, 1. ciklus eredményei	Módosított számítási módszer, 3-4. ciklus eredményei
Bükk	tömörített	1.1%	0.9%	0.9%	0.9%
	tömörített-fixált	7.8%	2.1%	2.4%	1.9%
Tölgy	tömörített	1.8%	1.3%	1.4%	1.3%
	tömörített-fixált	6.8%	2.8%	2.1%	2.5%

A zsugorodás és dagadás vizsgálata körültekintő mintaelőkészítést igényel, melyet a hosszadalmas szárítási és áztatási eljárások követnek, a minták tömegének és méreteinek nagy pontosságú méréseivel. Utóbbit a faminták sok esetben előforduló deformációi, repedései és a szabad levegőből történő gyors párafelvétel, vagy páraleadás miatt nehéz megfelelően kivitelezni, hatványozottan igaz ez a több ciklusban elvégzett vizsgálatokra. Ezt figyelembe véve óriási könnyebbséget és előrelépést jelent, ha elegendő a minimálisan három helyett mindössze egyetlen vizsgálati ciklust végigvinni még akkor is, ha a tömörített-fixált mintáknál marad némi bizonytalanság az eredményekben.

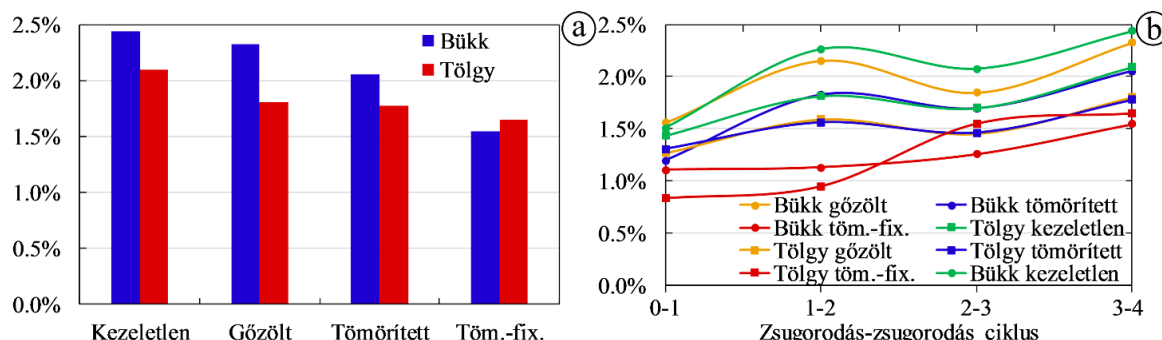
A bemutatott áztatásos-szárítási vizsgálatosorozat a minták zsugorodásának és dagadásának csökkenésén túl tömegvesztést is okozott, mint az minden áztatásos, kimosódással járó eljárásnál bekövetkezik. Természetesen közrejátszik a sorja, kis szálkák mintákról való leválása is, de az alapos mintaelőkészítés és óvatos mintakezelés miatt elhanyagolható mértékű volt e jelenség. Az abszolút száraz minták adatait felhasználva a százalékos tömegcsökkenés (weight percentage loss, WPL) a (17) alapján számítható, amiből a 3.42.a ábrán látható eredmények születtek.

$$WPL = \frac{m_{0\_korábbi} - m_{0\_későbbi}}{m_{0\_korábbi}} \cdot 100; [\%] \quad (17)$$

ahol:

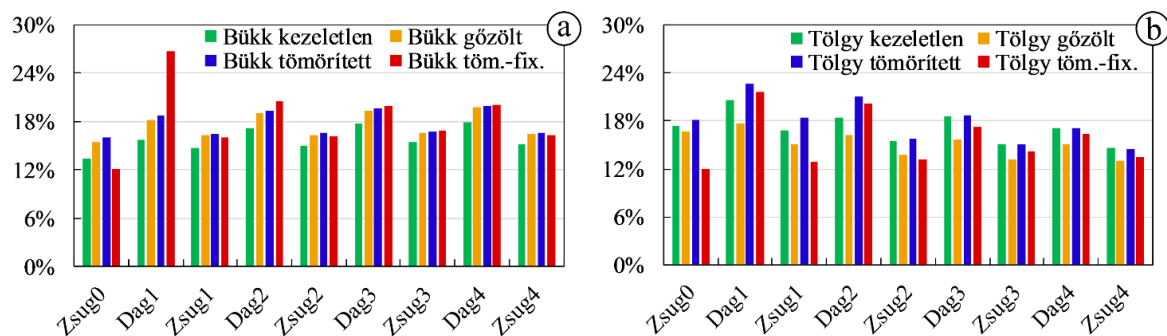
$m_{0\_korábbi}$  – áztatás előtti abszolút száraz tömeg

$m_{0\_későbbi}$  – áztatás utáni abszolút száraz tömeg.



3.42. ábra Abszolút száraz minták adatainak felhasználásával a minták teljes tömegvesztése a 4 ciklus során (a) és a tömegvesztés ciklusonként halmozva (b). Rövidítések: töm.-fix. – tömörített-fixált mintacsoport

A kezeletlen és a gőzölt bükk minták *WPL* eredményei 2,4% és 2,3%, míg a kezeletlen és a gőzölt tölgyé 2,1 és 1,8% volt. A rostirányú tömörítés bükknél 0,3%-kal csökkentette, míg tölgnél nem befolyásolta a *WPL*-t. Végül a tömörített-fixált bükk és tölgy mintáknál rendre 1,5% és 1,7% lett a kimosódás értéke, azaz a kezeletlen mintákhoz viszonyítva bükknél 0,9%-kal, tölgnél 0,4%-kal kisebb mértékű volt a kimosódás a tömörítés-fixálás eredményeképpen. A *WPL* már a gőzölésnél megjelent, mert a gőzölés során eltávoztak a kevésbé kötődő anyagok a fatestből. A tömörítés csak bükknél volt befolyásoló hatással, vélhetően az erősen tiliszes tölgy gesztje nem változott meg olyan mértékben, hogy jelentős anyagmennyiség távozhasson az amúgy is zártabb sejtszerkezetből. A tömörített-fixált minták jelentős szerkezeti változásokat szenvedtek, ezt jelzi a nagymértékű maradandó rövidülés, ami miatt valószínűleg sok anyagnak megváltozott a helyzete és kötődése, és a sejtüregek is szűkölhettek. Ezek a szerkezeti-kémiai változások a minták víz általi átjárhatóságát és az összetevők kimoshatóságát csökkentik. A molekuláris szerkezet átrendeződését infravörös spektroszkópia segítségével vizsgáltuk, részletesen a 3.10. fejezetben tárgyaljuk. Víz által kiázthatató, vagy kimosható részek minden faanyagban megtalálhatók és az első alkalom a legszámottevőbb, amint a 4 szárítási-áztatási ciklus halmozott tömegvesztését bemutató 3.42.b ábrán is látható. Míg a kezeletlen és a gőzölt mintáknál 1,3-1,6% tömegvesztés figyelhető meg az első ciklusban, addig a tömörítettekénél 1,2-1,3% és a tömörített-fixáltaknál 0,8-1,1%. Ez a tendencia a későbbi ciklusok között is megmarad, kivéve a 2-3. ciklusok közti tömegkülönbséget, ahol a tömörített-fixált mintákén kívül az összes eredmény negatív lett. Ez azt jelzi, az abszolút száraz értékek kissé növekedtek a korábbi abszolút száraz értékekhez képest, vagyis áztatást követően nem száradtak meg tökéletesen egyes mintacsoportok. A bemutatott elemzés rendkívül érzékeny és a legkisebb hibát is szigorúan jelzi: mindössze tizedszázalékos nedvességtartalmi eltérésekről van szó és a vizsgálat hozzávetőleg 30%-os rosttelítettségi nedvességtartalmi tartományában végbemenő zsugorodás-dagadásának eredményeit éppúgy nem befolyásolja, mint a 4 ciklusra vonatkoztatott teljes kimosódást. A keresztmetszeti és térfogati változásai a zsugorodásnak és dagadásnak sokkal kevésbé jelentősek, mint azt rostirányban láthattuk. A térfogati eredmények gyakorlatilag összegzik a húrirányú, sugárirányú és rostirányú részeredményeket, ezért a következőkben ennek elemzésével foglalkozunk (3.43. ábra).



3.43. ábra Térfogati zsugorodási-dagadási eredmények kezeletlen, gőzölt, tömörített és tömörített-fixált bükk (a) és tölgy (b) mintákra. Rövidítések: zsug – zsugorodási ciklus; dag – dagadási ciklus; töm.-fix. – tömörített-fixált mintacsoport

Bükknél (3.43.a ábra) már az első zsugorodási fázissal kezdődően stabilnak tekinthetők a térfogati értékek, ez alól kis mértékben a tömörített-fixált csoport képez kivételt, ahol a 2. dagadási fázissal kezdődően áll be egy állandó zsugorodás-dagadási ciklus. Továbbá megfigyelhető, hogy az első dagadás során a memória-hatást okozó feszültségek jelentős részben megszűntek, kiugróan nagy méretváltozást okozva. Tölgnél (3.43.b ábra) ezzel szemben kevésbé kiugró a tömörített-fixált mintacsoport első dagadási fázisa, viszont



**még a második dagadási fázisban is kiemelkedően dominál a memória-hatás.** Rostirányban tömörített tölgyeknél a 3. dagadási fázissal kezdődően stabilizálódnak csak az értékek. Ez a lassú, nehézkes feszültségmentesítés a nagymértékű plasztikus torzulások miatt lehet, mert a tömörítést a sejtekben és a szerkezetben komoly változásokat okozott. Szintén a sejszerkezet plasztikus torzulásának tudható be, hogy míg bükköknél a tömörített minták a tömörített-fixáltakéhoz hasonló értékeket vesznek fel, addig tölgyeknél a tömörített minták térfogati zsugorodása és dagadása mindig határozottan magasabb. A keresztirányú méretváltozások csökkenését nem képes ellensúlyozni a rostirányú méretváltozások növekedése, tehát a tömörített-fixált tölgy minták térfogati zsugorodása mindig alatta marad a kevésbé drasztikusan kezelt tömörített mintákénak.

A dagadás-csökkentési hatékonyság (anti-swelling efficiency,  $ASE_{\alpha}$ ) és a zsugorodási-csökkentési hatékonyság (anti-shrinkage efficiency,  $ASE_{\beta}$ ) meghatározásához a (18) képleteit használtuk, ahol  $\alpha$  a dagadási együttható és  $\beta$  a zsugorodási együttható.

$$ASE_{\alpha} = \frac{\alpha_{kezeletlen} - \alpha_{kezelt}}{\alpha_{kezeletlen}} \cdot 100; ASE_{\beta} = \frac{\beta_{kezeletlen} - \beta_{kezelt}}{\beta_{kezeletlen}} \cdot 100; [\%] \quad (18)$$

Az  $ASE$  fogalmát annak kifejezésére alkották meg, hogy egy adott kezelés milyen mértékben csökkenti, azaz javítja a faanyagok nedvességváltozás miatti dagadását és zsugorodását. Ha negatív értéket kapunk az  $ASE$  számításakor, akkor romlott a vizsgált minta dimenzió-stabilitása. Vagyis ha az  $ASE$  megfelel a dimenzió-stabilitás javításának bemutatására, akkor éppúgy alkalmas a dimenzió-stabilitás romlásának kifejezésére is; jelen esetben utóbbi tulajdonságát használjuk ki, míg a későbbi 3.11. fejezetben az eredeti céljának megfelelően alkalmazzuk. Habár a rostirányú tömörítés hatással van a faanyagok dimenzió-stabilitására, nem célja annak befolyásolása, így negatív értékekre számíthatunk (3.13. táblázat). **A tömörített faanyagok rostirányában az eredmények hozzávetőlegesen két nagyságrendnyi romlást mutatnak, míg tömörített-fixált mintáknál ennek is a dupláját. Keresztirányban a tömörített faanyagoknál az  $ASE$  nem jelez egyértelmű hatást, a tömörítés-fixálás azonban határozottan előnyösen befolyásolja az  $ASE$  mértékét.** Térfogatilag vizsgálva bükknél kismértékű romlást, míg tölgyenél minimális javulást okoz a rostirányú tömörítés és a tömörítés-fixálás is.

3.13. táblázat Kezeletlen mintákhoz viszonyított dagadás-csökkentési hatékonyság ( $ASE_{\alpha}$ ) és zsugorodási-csökkentési hatékonyság ( $ASE_{\beta}$ ) eredmények a 4. vizsgálati ciklusban

			Térfogati	Húr	Sugár	Rost
$ASE_{\alpha 4}$	Bükk	Tömörített	-11.7%	-4.9%	-5.1%	-587.5%
		Tömörített-fixált	-12.3%	3.9%	-0.2%	-1491.6%
	Tölgy	Tömörített	0.3%	12.8%	-0.2%	-1053.3%
		Tömörített-fixált	4.1%	26.4%	22.3%	-2211.5%
$ASE_{\beta 4}$	Bükk	Tömörített	-9.0%	-5.2%	-4.6%	-432.9%
		Tömörített-fixált	-7.7%	1.4%	4.7%	-993.8%
	Tölgy	Tömörített	1.3%	9.8%	2.5%	-961.0%
		Tömörített-fixált	7.7%	24.3%	29.0%	-2035.2%

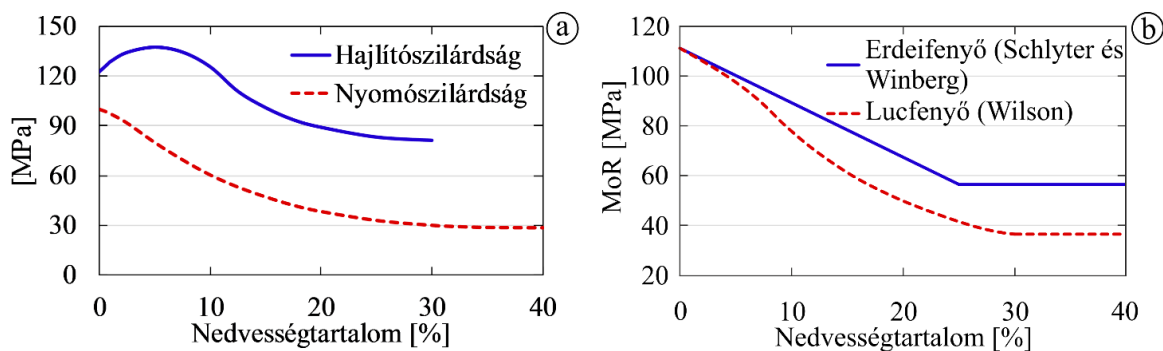
### 3.9.3. Nedvességtartalom hatása a mechanikai tulajdonságokra

A faanyagok nedvességtartalma rendkívüli hatással van azok fizikai-mechanikai tulajdonságaira. Bauschinger ezt a tényt 1883-ban Münchenben tette közzé, és sok kutató foglalkozott később a témával annak elméleti és gyakorlati jelentősége miatt (Tiemann 1907, Vorreiter 1949, Kollmann 1951, Niemz és Sonderegger 2017). A változás mérőszámát a mechanikai tulajdonságok nedvesség-függési együtthatójának nevezzük, és  $\alpha$  (Molnár 2004),  $B$  (Skaar 1988),  $E$  (Vorreiter 1949, Kollmann 1951) vagy  $K$  (Jiang és tsai. 2012) jelölésekkel látták el eddig. Együtthatóként soha nem rendelkezik mértékegységgel.

3.14. táblázat Egyes mechanikai tulajdonságok 1% nedvességtartalom-változásra jutó szilárdságváltozása (érvényes a zárójelben szereplő nedvességtartalom-tartományban, kerekítve 0,5-re) (forrás: Báder és Németh 2019a).

Hajlító-szilárdság	Rugalmassági modulus	Nyomószilárdság		Húzó-szilárdság	
4%	2%	5%		3%	Vorreiter (1949)
(5-25%)	(8-25%)	(5-25%)		(10-25%)	
4%	1-2%*	4-6%		3%	Kollmann (1951)
(5%-FSP)	(0%-FSP)	(0%-FSP)		(8%-FSP)	
4%	2%	5-6%	2-3%	3%	Lohmann és tsai. (1987)
(0-30%)	(0-30%)	(10-20%)	(20-30%)	(10-30%)	
4%	2%	5-6%		1.5%	Skaar (1988)
-	-	-		-	
4%	1%*	2.5-3.5%*		3%	Niemz (1993)
-	(0%-FSP)	(0%-FSP)		(10%-FSP)	
4%	-	4%		1.5-3.0%	Sitkei (1994)
-	-	-		-	
4%	2%	4%		3%	Molnár (2004)
(0%-FSP)	(0%-FSP)	(0%-FSP)		(0%-FSP)	
4%	2%	5-6%		-	Winandy és Rowell (2005)
(0%-FSP)	(0%-FSP)	(0%-FSP)		-	

A 3.14. táblázatban szereplő különféle kutatások eredményei nem egyeznek tökéletesen, de a tendencia hasonló. A különbségek okai lehetnek a fafajok, a minták száma és kiválasztása, az  $MC$  és a hőmérséklet mérési pontossága és a vizsgálat érzékenysége, vagy az adatok elemzési módja. **A faanyag mechanikai tulajdonságai bizonyos esetekben az abszolút száraz állapothoz viszonyítva (0%  $MC$ ) körülbelül 5-10%  $MC$ -ig növekednek (3.44.a ábra) (Kollmann 1951, Ansell 2011). A nedvességtartalom további növelése 10%-tól a  $FSP$ -ig egyértelműen rontja a mechanikai tulajdonságokat (Tiemann 1907, Skaar 1988). A  $FSP$  felett a mechanikai tulajdonságok állandó értéket mutatnak (3.44.a. ábra).**



3.44. ábra Tipikus példák a szilárdság és a nedvességtartalom kapcsolatára (a) és egy példa a különböző elméletekre, melyek a nedvességtartalom és egy mechanikai tulajdonság kapcsolatát mutatják be (b) (Kollmann 1951, valamint Kollmann és Coté 1968 alapján)

Tiemann (1906) vizsgálata alapján a  $MC$  növelésével a sejtfalak megdagadnak, ennek eredményeként a fibrillák távolabb kerülnek egymástól. A szerkezet lazábbá válik, a mechanikai tulajdonságok romlanak. Gerhards (1980) leírása szerint a különféle kutatók következtetései eltérnek abban, hogy lineáris (Drow, Greenhill, James, Kitahara és Suematsu, Okohira, Sellevold, Tang és Hsu), vagy bonyolultabb (Ishida, Leont'ev, Wilson) a  $MC$  és a mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolat, amint az a 3.44.b. ábrán látható. Manapság a laboratóriumi mechanikai vizsgálatok előtt a mintákat általában normál körülmények mellett szokás kondicionálni és a faanyag kb. 12%-os nedvességtartalomra áll be (Gerhards 1980, Skaar 1988, EN 408: 2010 + A1 2012). Éppen ezért a mechanikai tulajdonságoknak a  $MC$  változásra való érzékenységének meghatározásához a 12%  $MC$ -nál mért értékeket használjuk referenciaértékeként ( $\sigma_{12}$ ). Ezután egy jól korreláló lineáris szakaszt kell illeszteni a mérési eredményekből kapott görbéhez, és az  $\alpha$  együttható e szakasz meredekségéből számítható (19).

$$\alpha = 100 \cdot (\Delta\sigma/\Delta MC)/\sigma_{12} \quad (19)$$

ahol  $\Delta\sigma/\Delta MC$  a lineáris egyenlet meredeksége (Jiang és tsai. 2012). Az  $\alpha$  értékeket alapul véve a faanyagok mechanikai tulajdonságai kiszámíthatók a (20) képlet alapján, mely számos publikációban és szabványban fellelhető, pl. Kollmann (1951) és ISO 13061-1 (2014).

$$\sigma_{12} = \sigma_{MC} \cdot [1 + \alpha \cdot (MC - 12)] \quad (20)$$

ahol  $\sigma_{MC}$  egy adott mechanikai tulajdonság, és  $MC$  a minta nedvességtartalma a mérés idején. **A kezeletlen faanyagok  $\alpha$  együtthatója a hajlítószilárdságra 0,04, a rugalmassági modulusra 0,01 és a nyomószilárdságra 0,04** (MSZ 6786-5 2004, MSZ 6786-8 2004, MSZ 6786-15 2004). A (20) képlet alkalmazásával a kutatási eredmények összehasonlításához alkalmas eredményeket kapunk. A képlet  $12 \pm 3\%$ -os intervallumban értelmezhető az MSZ 6786-15 (2004) magyar szabvány szerint, de a kutatók általában sokkal szélesebb tartományt adnak meg (Vorreiter 1949, Kollmann 1951, Lohmann és tsai. 1987, Niemz 1993, Molnár 2004).

A következőkben bemutatandó kutatás célja, hogy meghatározza a  $MC$  hatását a rostirányban tömörített faanyag egyes fizikai és mechanikai tulajdonságaira (hajlítórugalmassági modulus, hajlítószilárdság, hajítófeszültség 4 mm keresztfej elmozdulásnál, hajlíthatóság és rostokkal párhuzamos nyomószilárdság). Az eredmények hozzájárulnak a mechanikai és fizikai viselkedés megértéséhez és a legfontosabb tulajdonságok pontosabb kiszámításához.

A bükk mintákból véletlenszerű elosztással 9 csoportot hoztunk létre, minden csoport 20 darab eltérő évgűrűszélességű, esetenként szijácsos mintát tartalmazott. A mintacsoportok felhasználását a 3.15. táblázat mutatja.

3.15. táblázat *A mintacsoportok jelölése és nedvességtartalma (forrás: Báder és Németh 2019a). Rövidítések: EMC – egyensúlyi nedvességtartalom*

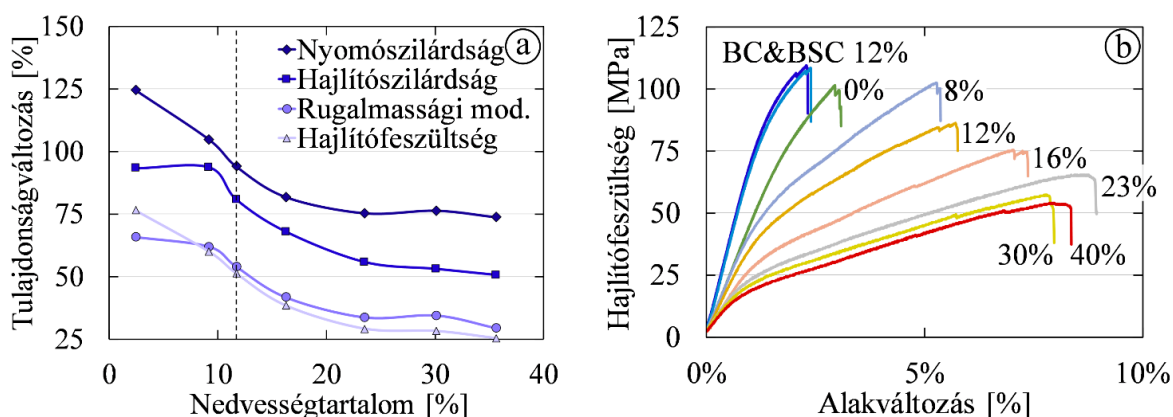
Minta jelölés	Minta leírás	EMC, cél	EMC, átlag
BC	Bükk kezeletlen	12%	12.2±0.2%
BSC	Bükk gőzölt	12%	11.9±0.1%
B1mA	Bükk rostirányban tömörített és 1 percet fixált	0%	2.4±0.2%
B1mB		8%	9.2±0.3%
B1mC		12%	11.7±0.3%
B1mD		16%	16.3±0.3%
B1mE		23%	23.5±1.1%
B1mF		30%	30.1±1.2%
B1mG		40%	39.6±1.6%

A BC, BSC és B1mD mintacsoportokat szárítószekrényben szárítottuk 40 °C hőmérsékleten 24 órán keresztül, míg a B1mB mintacsoportot 65 órán keresztül. A B1mA mintacsoportot 40 °C hőmérsékleten 65 órát, 60 °C-on 24 órát, 80 °C-on 7 órát és 103 °C-on 41 órát szárítottuk. A B1mE, B1mF és B1mG mintacsoportokat a klímaszobában rendre 45, 10 és 2 órán keresztül tároltuk. A leírt szárítási folyamatok után a BC, BSC és B1mC mintacsoportokat 117 napra a klímaszobába helyeztük. A többi mintacsoport zárható, légcserét nem engedő dobozokba került. Ilyen módon a mintákat több, mint 100 napon keresztül tárolva kiegyenlített bennük a *MC* az állandó 20 °C hőmérsékleten. Kivételt képeztek a B1mF és B1mG minták, mivel nagy volt a gombabontás kockázata a magas *MC* miatt. Ezért látható a magas nedvességtartalmú mintáknál nagyobb szórás a 3.15. táblázatban. A *MC* pontos meghatározásához a hajlítóvizsgálati mintákból a hajlítási tesztek után apró darabokat vágunk le a nyomóvizsgálati próbatestekkel együtt, ezeket felhasználva határoztuk meg a *MC* értékét szárításos eljárással.

Végül a BC, BSC és B1mA csoportok mintáiból 1 mm vastag minták készültek a felhasznált faanyag rosttelítettségi pontjának és a kezeléseket esetleges módosító hatásának meghatározására. A szárítószekrényben 103±2 °C hőmérsékleten szárított vékony minták tömegét Sartorius 2007 MP6E típusú mérleggel mértük (Sartorius GmbH., Németország), amely 0,0001 gramm pontosságra képes. Ezután a mintákat telített CuSO<sub>4</sub>-só-oldatot tartalmazó exsikkátorban kondicionáltuk, ez 97,6 ± 0,5% *RH*-t biztosít (Greenspan 1977). Az exsikkátort 5 hónapig 20 °C állandó hőmérsékleten a klímaszobába helyeztük és a *RH*-t folyamatosan mértük egy Testo 174H páratartalom mérővel (Testo SE & Co. KGaA., Németország). A levegő relatív páratartalma az első napokban 96-99% között ingadozott. Egy hét után az *RH* 99,6-99,9%-ra nőtt, amelyet a vízzel telített sóoldat okozott. A telített minták tömegmérése során vigyáztunk, hogy a *MC* változatlan maradjon, majd az egyes minták *FSP*-jét a (4) képlet alkalmazásával számítottuk ki.

Az átlagos *FSP* a BC mintáknak  $25,6 \pm 0,6\%$ , a BSC mintáknak  $25,9 \pm 0,4\%$ , míg a B1mA csoportnak  $25,4 \pm 0,8\%$  volt. Az irodalmi *FSP* és a mért adatok közötti nagy különbséget ( $35,6\%$ , Molnár 2004) okozhatta a minták szárítása  $103 \pm 2$  °C hőmérsékleten és a kissé  $100\%$  alatti *RH* is a tesztek során. Azonban biztonsággal kijelenthető, hogy a kezeletlen és kezelt minták *FSP*-je azonos, mintegy  $25,6\%$ . Ezt az eredményt a 3.45.a ábra grafikonjai is igazolják.  $25\%$  *MC* felett a mechanikai tulajdonságok jól láthatóan már csak elhanyagolható mértékben változnak. Ez egybevág a megfigyeléssel, miszerint a mechanikai tulajdonságok nem változnak a rosttelítettség feletti *MC* esetén, megerősíti az elvégzett vizsgálat helyességét.

Korábban megállapítást nyert, hogy a faanyag mechanikai tulajdonságai a tömörítés előtti gőzölés okán kezeletlen mintákhoz viszonyítva nem változnak (3.5. fejezet). Ebben a kutatásban sem volt statisztikai különbség a BC és a BSC mintacsoportok között, ezt a 3.45.b ábra igazolja. A grafikon a kezeletlen és gőzölt minták tipikus hajlítófeszültség-alakváltozás görbéit mutatja  $12\%$  *MC* mellett, és tipikus hajlítófeszültség-alakváltozás görbéit a tömörített és 1 percet fixált mintadaraboknak minden vizsgált *MC* szinten. **A tömörített faanyag hajlítógörbéinek egyes grafikonok eleji meredeksége csökken a *MC* növekedésével, ami jelzi a *MoE* változását. Az eredetileg csúcsos grafikonok fokozatosan lekerekednek, tehát a kezelt minták alakíthatósága növekszik a *MC* növekedésével** (Hayden és tsai. 1965). A 3.45.a és 3.45.b ábrán bemutatott tömörített faanyag tulajdonságait  $0\%$  *MC* és *FSP* között elemeztük, mivel ezen érték felett a mechanikai tulajdonságok állandónak tekinthetők (Stamm 1964, Glass és Zelinka 2010).



3.45. ábra A rostirányban tömörített faanyag bizonyos mechanikai tulajdonságainak változása különböző nedvességtartalmak mellett (*MC*), összehasonlítva a kezeletlen mintákkal  $12\%$  *MC*-nál; a hajlítófeszültség változása  $4$  mm keresztfej elmozdulásnál lett meghatározva (a). Kezeletlen (BC), gőzölt (BSC) és különböző nedvességtartalmú rostirányban tömörített minták tipikus hajlítófeszültség-alakváltozás görbéi (*MC*-kal jelölve) (b) (forrás: Báder és Németh 2019a)

Az irodalomban különféle adatok találhatóak *MoR*-ra: bükk faanyagnak Wagenführ (2007)  $78$ - $110$ - $117$  MPa-t adott meg, Kretschmann (2010)  $105$  MPa-t, Meier (2016)  $110$  MPa-t, Niemi és Sonderegger (2017) pedig  $95$  MPa-t. Ebben a kutatásban a kezeletlen minták *MoR* értéke átlagosan  $111,7$  MPa volt. A különbségek magyarázhatók a mintadarabok különböző méreteivel, eltérő *L/h* arányaival, az eltérő sűrűséggel, valamint a három- és négyponos hajlítóvizsgálatok közötti különbségekkel. A *MoR*  $12\%$ -os *MC*-n vizsgálva  $19,2\%$ -kal csökkent a rostirányú tömörítés és a rövid ideig tartó fixálás miatt a kezeletlen mintákhoz képest (3.45.a ábra). Ez megegyezik a korábbi eredményekkel, ahol a *MoR* csökkenése körülbelül  $24\%$  volt (Báder és Németh 2018c). Amint az irodalmi elemzésből kiderült, a *MoR* alacsony nedvességtartalmakon kb.  $5\%$  *MC*-ig nem csökken (3.14. táblázat és 3.44.a ábra). A jelenlegi tesztek megközelítőleg ugyanazokat a *MoR* értékeket adták  $2,4\%$  és  $9,2\%$

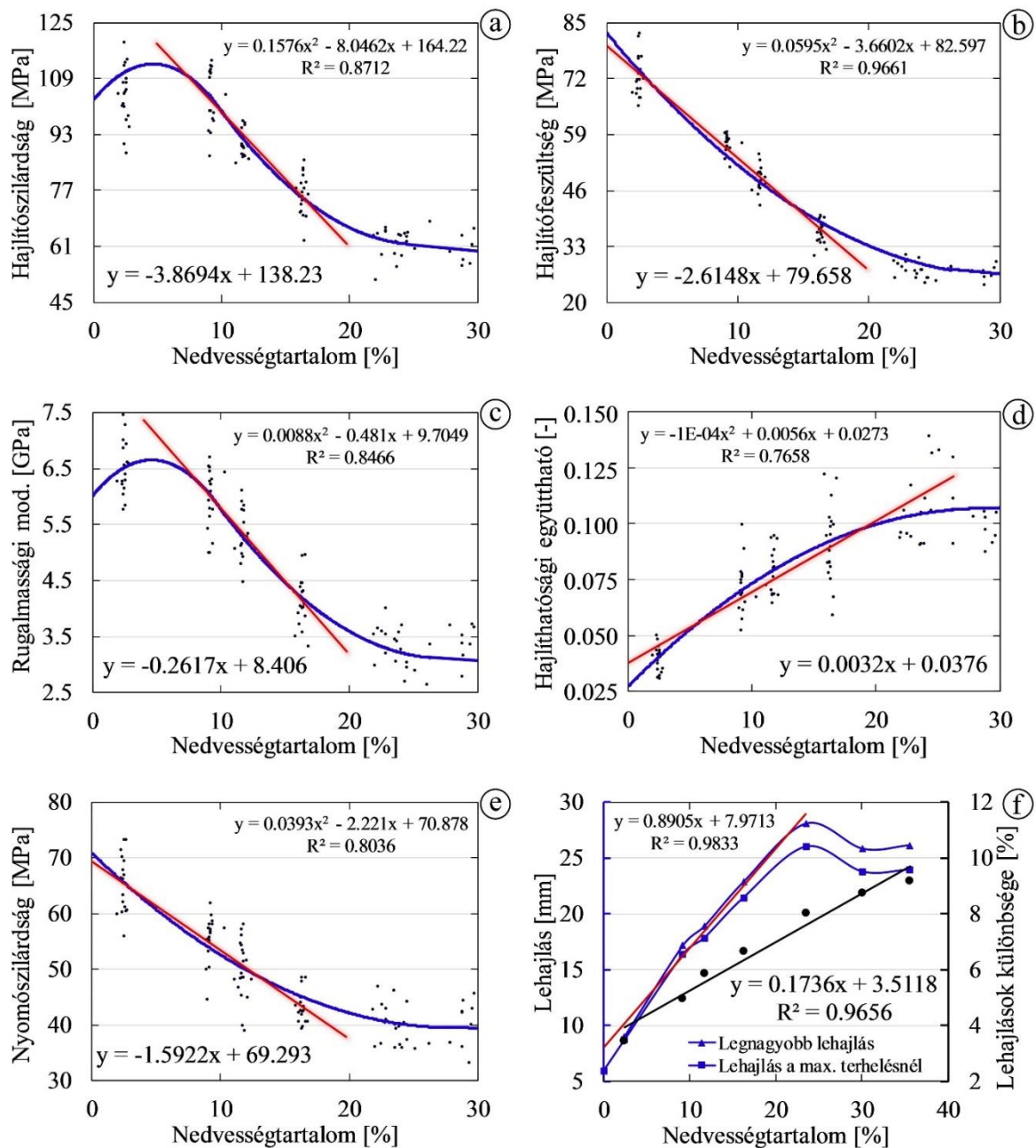


*MC* mellett és feltételezhető, hogy körülbelül 5% *MC*-nél egy lokális maximum érték található az irodalmi adatokkal összhangban (Kollmann 1951, Skaar 1988). Figyelembe véve ezt a megállapítást, felvázolható a *MOR* változása a *MC* növekedésével (3.46.a ábra), és meghatározható egy másodfokú görbe 9% és 24% *MC* között. A mérési eredményekből kapott görbéhez Jiang és társaihoz (2012) hasonlóan egy egyenes szakaszt tudunk illeszteni úgy, hogy csak 7-16% *MC* tartományban érvényes annak egyenlete. A szobahőmérsékleten mért *MC* ritkán lép ki ebből a 7% és 16% közti tartományból, tehát elég széles ahhoz, hogy módosítani lehessen a *MoR* vizsgálati eredményeit és kiszámíthatjuk a szabványos *MoR*-t 12% *MC*-nál. Az 3.46.a ábra lineáris egyenletéből következik, hogy minden 1% *MC* változás 3,87 MPa növekedést vagy csökkenést eredményez a *MoR*-ban. A (19) képlettel kiszámítva a ***MoR* változásának mértéke  $\alpha = 4,2$  minden 1% *MC* változásra. A 3.44.a és a 3.46.a ábra összehasonlításával a kezeletlen és tömörített faanyagok *MoR* grafikonjai nagyon hasonlóak, az  $\alpha$  együtthatóik úgyszintén (3.14. táblázat).**

A további  $\alpha$  együtthatókat a *MoR*-hoz hasonlóan számítottuk ki, melyeket az alábbiakban ismertetünk. **A hajlítófeszültség 4 mm keresztfej elmozdulásnál a kezeletlen minták esetén 95,1 MPa volt 12% *MC*-nál, és ezt körülbelül megfelezte a tömörítés, amint az a 3.45.a ábrán látható. A 3.46.b ábra grafikonja az abszolút száraz állapot és a *FSP* közötti teljes tartományon belül enyhén görbül. Az alkalmazott lineáris közelítés nagy meredekségű, tehát magas  $\alpha$  értéket eredményez, amely a (19) képlet alapján 5,4. Ebből következően a faanyag hajlításához szükséges erő jelentősen csökken a tömörített faanyag magas nedvességtartalma miatt (3.45.b és 3.46.b ábra).**

Wagenführ (2007) eredménye bükk faanyag *MoE* értékére 9,2-13,0-13,5 GPa, továbbá Kretschmann (2010) 12,3 GPa, Meier (2016) 14,3 GPa, míg Niemz és Sonderegger (2017) 13,0 GPa-t adott meg. Jelen kutatásban a kezeletlen minták *MoE* értéke átlagosan 9,89 GPa volt. A különbségek a 3 és 4 pontos hajlítóvizsgálatok eltéréseivel magyarázhatók a faanyagnak akár egy rönkön belüli természetes változatossága mellett. **Rostirányú tömörítés és rövid időtartamú fixálás után a *MoE* 5,34 GPa lett, ami 46,0% csökkenést jelent, mindkettő 12% *MC*-nál (3.45.a ábra). Az eredmények alapján a *MoR* grafikonjához hasonló görbe készíthető (3.46.c ábra). Lineáris közelítéssel megkapható az egyszerűbb képlet, amely az  $\alpha=5,0$  értéket mutatja 6% és 17% *MC* között. Az irodalmi 1-2%-hoz képest (3.14. táblázat) ez az eredmény jelentős változásokat mutat.**

A *MoE* és az alakíthatóság szorosan összefüggenek (Ashby és Jones 2003). A  $k_{bend}$  használata kiváló lehetőség az alakíthatóság vizsgálatára. 12% *MC*-n összehasonlítva a  $k_{bend}$  136%-kal növekszik a tömörítés eredményeként. A 3.46.d ábra grafikonja egy enyhe ívű görbével rendelkezik. A közelítő egyenes  $\alpha$ -együtthatója 4,2 és 2%-22% *MC* között érvényes. A *MC* érték növelésével a rostirányban tömörített faanyag  $k_{bend}$ -ja négyszeresére növekszik, míg a kezeletlen mintákhoz viszonyítva már 12% *MC*-nél 2,4-szeres volt. Ez a hajlékonyság további jelentős növekedését jelenti. Mint korábban leírtuk, a *MC* növelése csökkenti a lignin és a hemicellulózok lágyulási hőmérsékletét, így ezek az alkotóelemek valószínűleg legalább részben lágyított állapotban vannak, ha a *MC* magas. Olsson és Salmén (2003) és Engelund és tsai. (2013) is megerősítették, hogy a hemicellulózok lágyulása szobahőmérsékleten 70-75% relatív páratartalom mellett zajlik. Ezek a tények magyarázzák a sokkal jobb hajlíthatóságot magas *MC* mellett nemcsak a tömörített, hanem még kezeletlen faanyag esetében is.



3.46. ábra A rostirányban tömörített faanyag hajlítószilárdsága (a), hajlítófeszültsége 4 mm keresztfej elmozdulásnál (b), hajlítórugalmassági modulusa (c), hajlíthatósági együtthatója (d), nyomószilárdsága (e) és különböző lehajlási típusai (f) a 4-pontos hajlítóvizsgálatok során. A görbék az adatpontokhoz illesztett másodrendű polinomok a felírt  $R^2$ -nek megfelelő illeszkedéssel, míg az egyenesek és a hozzájuk kapcsolódó elsőfokú egyenletek a másodrendű polinomokhoz illeszkednek. A 3.46.f ábrán a fekete pontok és a vastag fekete egyenes vonal a jobb oldali függőleges tengelyhez tartoznak és a kétféle lehajlás százalékos eltérését mutatják (forrás: Báder és Németh 2019a)

A 4-pontos hajlítóvizsgálatnál 12% MC mellett a lehajlás a legnagyobb terhelésnél és a legnagyobb lehajlás a kezeletlen minták törésekor átlagosan 7,3 és 7,6 mm volt. Ezek a lehajlások rendre 143%-kal és 149%-kal növekedtek a tömörítés eredményeként. A 3.46.f ábra a kezelt minták lehajlásait mutatja. Egyúttal látható, hogy a növekvő MC-vel együtt növekszik a legnagyobb hajlítóerőnél és a tönkremenetel pillanatában mért lehajlások különbsége (Y tengely a 3.46.f ábra jobb oldalán). Következésképp a minták egyre nagyobb alakváltozást viselnek el a törést megelőzően. Vorreiter (1949) leírása szerint a minták a

növekvő  $MC$ -vel a plasztikus állapotot közelítik. **A tömörített faanyag hajlítási képességének  $\alpha$  együtthatója rendkívül magas, 7,6 és ez az érték 5%  $MC$ -tól  $FSP$ -ig érvényes.** Annak ellenére, hogy  $FSP$  felett a  $MoE$  minimálisan csökken (3.45.a ábra), a minták lehajlása meglepő módon a  $FSP$ -nél szintén kissé csökken és  $FSP$  felett állandóvá válik (3.46.f ábra). Az  $FSP$  feletti  $MC$  esetében megtalálható szabad víz csökkenti a rendelkezésre álló szabad sejtüreg-térfogatot és sejteken belüli hidraulikus nyomást okoz a hajlítás során, ami feszültségeket kelt a faanyagban (Stevens és Turner 1948, Peck 1957). A szabad víz által kifejtett hidraulikus erők megjelenése a feszültséggyűjtő területeken korábbi rotszakadást idéz elő.

A  $MoE$  csökkenése 12%  $MC$  és a  $FSP$  között 25% ( $MoE\%$ ), hasonlóan a hosszú időtartamú fixáláshoz, mely 19%-ot ( $MoE\%$ ) csökkentett a  $MoE$ -n az egy percet fixált mintákhoz képest, mindkettő értékét 12%  $MC$ -n meghatározva. Ezek az eredmények előre vetítik, hogy a tömörített és rövid ideig fixált, de magas nedvességtartalmú faanyag és a hosszú időn keresztül fixált faanyag 12%  $MC$ -n hasonló alakíthatósági képességgel rendelkezik. A legnagyobb lehajlási érték növekedése 12%  $MC$  és  $FSP$  között 120%, míg a hosszú ideig fixált minták lehajlása 320%-kal magasabb volt az egy percig fixált mintákhoz képest. Az alakíthatóság javulása nem olyan jelentős, mint ahogyan azt a  $MoE$  csökkenése mutatta, de a 120%-os növekedés továbbra is nagyon magas. A hajlítás során bekövetkező tönkremenetel általában a húzott oldalon történik meg, mert a faanyag sokkal kisebb nyúlási alakváltozásra képes, mint nyomó alakváltozásra (Gaff és tsai. 2015). Ezért a semleges tengelyt a húzott oldalhoz a lehető legközelebb kell vinni, hogy elkerüljük annak tönkremenetelét. A hajlítás során fellépő nagy húzófeszültségek megjelenése késleltethető, vagy akár kiküszöbölhető, ha hullámos sejtfalakat alakítunk ki. A hosszú ideig fixált faanyag sejtfallai sokkal hullámosabbak, mint azon sejtek falai, amelyeket rövid ideig fixáltak. A rövid ideig fixált faanyag gyengébb alakíthatóságának oka, hogy kevésbé képesek nyúlni a húzott oldalon a hajlítás során. A nagyobb tömörítési arány és a hosszabb fixálási idő megoldja ezt a gondot, de utóbbi nagyon időigényes eljárás. Ezt helyettesítheti bizonyos mértékben a nedves állapotban lévő rostirányban tömörített és rövid ideig fixált faanyag. A legjobb alakíthatóság érdekében a rostirányban tömörített faanyagok nedvességtartalmának minél közelebb kell lennie az  $FSP$ -hez, legalább 15-25%  $MC$  között.

**A bükk faanyag rostiránnyal párhuzamos nyomószilárdságára ( $\sigma_c$ )** vonatkozóan közzétett adatok 48-65-70 MPa Wagenführ (2007), 51,3 MPa Kretschmann (2010), 57,0 MPa Meier (2016) és 52 MPa Niemz és Sonderegger (2017) részéről. A kezeletlen minták eredményeinek átlaga 53,1 MPa lett, mely összhangban van az irodalmi értékekkel. A 12×12×18 mm és 20×20×30 mm (H × S × R) méretű minták összehasonlítása nem eredményezett statisztikai különbséget a  $\sigma_c$ -ban. Ez igaz a kezeletlen és a kezelt mintacsoportokra is. A kezelt minták átlagos  $\sigma_c$  értéke 12%  $MC$ -nál 49,9 MPa, ami azonosnak tekinthető a kezeletlen minták értékeivel (3.45.a ábra). **A 0% és 17%  $MC$  közötti tartományban az  $\alpha$ -együttható 3,2** (3.46.e ábra), ami körülbelül az irodalomban a kezeletlen faanyagra megadott adatok fele (3.14. táblázat).

Összegezve, a nedvességtartalom befolyásolja a faanyag mechanikai tulajdonságait. A rostirányú nyomószilárdsága, hajlíthatósági együtthatója és rugalmassági modulusa a kezeletlen és a rostirányban tömörített faanyagoknak eltér egymástól. Az  $\alpha$  értéke 3,2% rostirányú nyomószilárdság esetén. Az  $\alpha$  egyaránt 4,2% a  $MoR$  és a  $k_{bend}$  esetében; 5,0% a  $MoE$ -nál és 7,6% az elérhető legnagyobb lehajlásnál a 4 pontos hajlítóvizsgálat során. **A rostirányban tömörített faanyag legjobb hajlíthatósága érdekében a nedvességtartalmának közel kell lennie az  $FSP$ -hez. A fixálási időtartam irreális megnövelése helyett célszerű magasabb nedvességtartalmú faanyagot felhasználni olyan munkákhoz, amelyek rendkívül nagy képlékenységu faanyagot igényelnek.** Így a rendkívüli mértékben megnövekedő fixálási időtartam kiváltható például rövidebb fixálási időtartammal és a komoly hatást eredményező és egyszerűbb nedvesítéssel, vagy felhasználás előtti nedvesen tartással.

### **3.10. A faanyag funkciós (kémiai) csoportjainak átrendeződése a tömörítés hatására**

Kémiai szempontból a bükk és a tölgy fafaj hasonló a cellulóz-, hemicellulóz- és lignintartalom tekintetében (rendre kb. 45-42%, 23-25% és 24-25%) (Pouwels és tsai. 1987; Jahnel 2000; Cortez és tsai. 1996; Szczepkowski és tsai. 2007; Wagenführ 2007; Bodírläu és tsai. 2008; Fišerová és tsai. 2013, Sikora és tsai. 2018). Azonban a bükk kevesebb extraktanyagot tartalmaz (0,6%), mint a tölgy (3,0%). Még ha a bükk és a tölgy teljes hemicellulóztartalma közötti különbség nem is jelentős ( $\pm 1\%$  tartományban változik), a mátrix poliszacharidjainak összetétele nagyon eltérő. Ez a különbség további, főként szerkezeti eltérésekkel együtt, a tölgy sokkal jobb időjárásállóságát és kiváló tartósságát biztosítja. Ugyanakkor számos kutató igazolta, hogy magas extraktanyag-tartalma nagyobb tömegvesztéssel eredményez a megemelt hőmérsékleteken történő hőkezelések során (Ferrari és tsai. 2013, Costa és tsai. 2019).

**A szorpciós helyek a vízmolekulákat vonzó polimerek funkcionális csoportjai. A hidroxil-csoportok (-OH) az elsődleges szorpciós helyek,** amelyek hidrogén-kötésekkel kapcsolják a vízmolekulákat a fa kémiai alkotóihoz (Engelund és tsai. 2013; Willems 2018). Következésképpen a rendelkezésre álló -OH csoportok száma befolyásolja a szorpció termodinamikai mechanizmusait, amelyek a nedvességtartalom, vagy más tulajdonságok változásában mutatkoznak meg. Összességében a hemicellulózok tartalmazzák a szorpciós helyek többségét, amelyeket a cellulóz és a lignin követ. Ugyanakkor a hemicellulózok a kémiai bomlás szempontjából a leginkább érzékeny polimerek, amikor a faanyagot megemelt hőmérsékletnek teszik ki. Ebből következik, hogy a termikus bomlás sokkal gyorsabban megy végbe, mint a cellulóznál (Schniewind 1989, Rowell és tsai. 2002, Sandak és tsai. 2016a és b). Az alacsony gőzölési hőmérséklet (legfeljebb 80 °C) enyhe vöröses színváltozást idéz elő, de a Fourier-transzformációs infravörös spektrofotométer (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer; FTIR) spektrumjain bekövetkező változások csekélyek, nehezen azonosíthatók. Az FTIR spektrumban bekövetkező változások kimutatása csak a vonatkozó abszorpciós csúcsok arányainak kiszámításával lehetséges (Timar és tsai. 2016). A faanyag már 100 °C-os gőzölési hőmérsékleten jelentősen bomlik. Néhány kondenzáló lignin és hemicellulóz vegyület már 10 perces lágyítás után áthatol az edények gödörkéinek membránjain (Mamonová és tsai. 2002), ám ennek ellenére nem következik be jelentős szénhidrogén-vesztés (Schniewind 1989). Némi szilárdságvesztés történik, ami a depolimerizációs reakciók következménye (Schniewind 1989). A gőzölés során egyértelmű színváltozás főleg az extraktanyagoknak tulajdonítható (Cao és tsai. 2012).

A rostlágyítás – esetünkben 100 °C-os telített vízgőzzel történő gőzölés – elsősorban a hemicellulózok és a lignin kötéseinek gyengülését okozza, a sejtek közötti és a mikrofibrillák közötti kötőerő jelentősen csökken. A magasabb MC csökkenti az amorf polimerek, például a hemicellulózok és a lignin lágyulási hőmérsékletét (Lenth és Kamke 2001). Például a hemicellulózok szobahőmérsékleten már 70–75% relatív páratartalom mellett lágyulnak (Olsson és Salmén 2003; Engelund és tsai. 2013). Mikroszerkezeti szinten a rostirányú tömörítés a faanyag lágyításával és a megemelt hőmérséklettel kombinálva a molekulák erőteljes átrendeződését okozza. A gőzölés ideiglenesen megszünteti a lignin és a hemicellulóz közötti kötéseket és bizonyos mértékig átalakítja ezen összetevőket. A tömörítés egy mechanikus faanyag-modifikációs folyamat, amely változásokat okoz a sejtek között és a sejteken belül is. Például az S2 sejtfalréteget alkotó, eredetileg egyenes mikrofibrillák elhajolnak, meggörbülnek, mely a 3.7. fejezetben került bemutatásra. Tehát a bemutatott folyamatok átrendezik a faanyag szerkezetét molekuláris-, mikro- és makro szinten egyaránt. Következésképpen az várható, hogy a szorpciós helyek (funkciós csoportok) elérhetősége és térszerkezete különféle mértékben megváltozik a faanyag lágyításával, tömörítésével és/vagy fixálásával.

A funkciós csoportok átrendeződésének kiértékelése közvetetten lehetséges a vibrációs spektroszkópiával. **Az infravörös spektroszkópia (IR) megfelelő módszer a különféle**

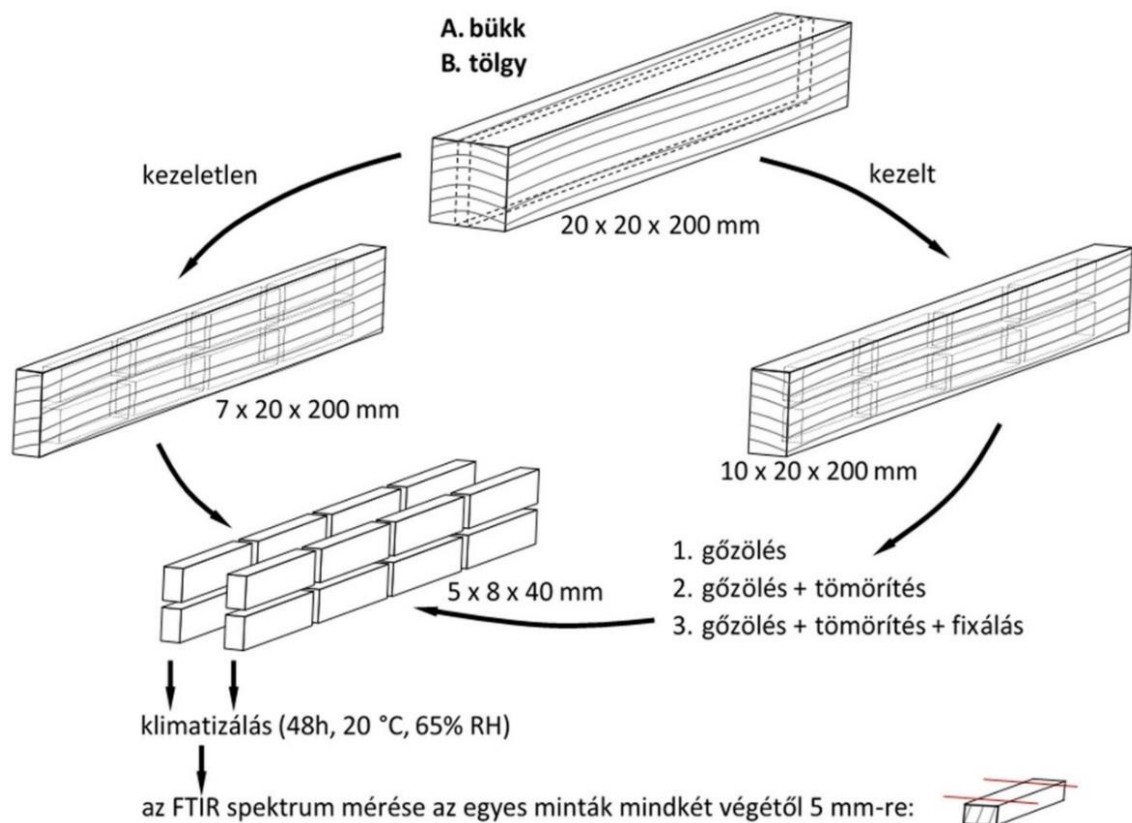
**famodifikációs folyamatok által okozott egyes kémiai jellegű változások kimutatására** (Sandak és tsai. 2015; Sandak és tsai. 2016a és b). A vizsgált felületre bocsátott infravörös sugárzás egy részét a dipólus-momentummal rendelkező funkciós csoportok fokozzák, amelyet az IR spektrumban abszorbanciaként rögzítenek. Az abszorpciós mintázat rendkívül szelektív és a vizsgált polimermátrix molekuláris összeállításától, valamint az alkalmazott ingerek (sugárzás) tulajdonságaitól függ (Sandak és Sandak 2018). Az IR spektrum tehát számos abszorpciós csúcs szuperpozíciója, amelyet több szerző korábban közzétett sávértékelési táblázataival lehet értelmezni (Faix 1991; Schwanninger és tsai. 2004; Popescu és tsai. 2007; McLean és tsai. 2014; Guo és tsai. 2018; Moosavinejad és tsai. 2019). Az infravörös spektroszkópiát választottuk tehát analitikai módszerként a gőzölésnek és a tömörítésnek kitett faminták fizikai-kémiai változásainak értékeléséhez.

Az eszköz egy Jasco FT/IR 6300 FTIR (Jasco Inc., USA) volt egy diffúz visszaverődést vizsgáló infravörös Fourier-transzformátor tartozékkal felszerelve (Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform; DRIFT), amely megvilágítja a vizsgálandó felületet, és ezzel egyidejűleg meghatározza a visszavert fény spektrumát. Ezt a technikát olyan mind szerves, mind szervetlen durva felületű szilárd minták vagy porok jellemzésére használják, mint például textil, fa, csont vagy papír. A porított minták részecskemérete, homogenitása és préselt sűrűsége nagyban befolyásolja a spektrum minőségét, ezért különös figyelmet kell fordítani a minták elkészítésére és bemutatására (Sandak és Sandak 2018). Esetünkben tömörfa mintákat vizsgáltunk, így a legfontosabb az volt, hogy állandó felületi érdességet biztosítsunk a kezelések hatásainak összehasonlíthatósága érdekében. Az FTIR vizsgálatoknál elterjedten használt gyengített teljes visszaverődésű (Attenuated Total Reflection; ATR) tartozékhoz viszonyítva a DRIFT tartozék a spektrumok felbontásának megnövekedését eredményezheti, de az eredményeket befolyásolják a minta méretbeli különbségei, hasonlóan a KBr pellet előállításakor felmerülő nehézségekhez (Beasley és tsai. 2014). Ennek ellenére a kifinomult spektrometriás mérések, például a DRIFT spektroszkópiai módszer a többváltozós elemzési módszerrel együtt a legígéretesebb megoldás a lignocellulóz anyagok jellemzésére (Toivanen és Alén 2006).

**Négy-négy mintatípus készült bükk (*Fagus sylvatica* L.) és kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) fafajokból:**

- **kezeletlen:** a kezeletlen mintákat csak a vizsgálat előtt kondicionáltuk
- **gőzölt:** a mintákat gőzöltük és kondicionáltuk, de nem tömörítettük
- **tömörített:** a mintákat gőzöltük, rostirányban tömörítettük és tömörítés után csak 1 percig fixáltuk, majd kondicionáltuk
- **tömörített-fixált:** a mintákat gőzöltük, rostirányban tömörítettük, majd hosszan, 18 óráig időn keresztül fixáltuk és kondicionáltuk.

A faanyagot úgy választottuk meg, hogy azonos rönkből származó gesztanyagot tartalmazzon, biztosítva legyen az egyenes szálirány, az oldalakkal párhuzamos és egyenletes évgyűrűszerkezetet göcsök és más fahibák nélkül. A minták élőnedves kiinduló mérete  $20 \times 20 \times 200 \text{ mm}^3$  volt (H  $\times$  S  $\times$  R). Minden mintát kettéfűrészeltünk az SR irányában, hogy két ikerminta keletkezzen, amelyek mérete  $7 \times 20 \times 200$  és  $10 \times 20 \times 200 \text{ mm}^3$  (H  $\times$  S  $\times$  R) (3.47. ábra).



3.47. ábra Kísérleti iker-mintatestek előkészítése (forrás: Báder és tsai. 2020)

Az első ikerdarab maradt kezeletlen, míg a második darabot a fent felsorolt három famodifikációs eljárás egyikének vetettük alá. Ez a mintakialakítás lehetővé tette a kezelt minták lehető legközvetlenebb összehasonlítását a kezeletlen mintákkal, figyelembe véve az összetartozó felületek tökéletes illesztését, minimalizálva az eredmények variabilitását. A kezelt mintákat egy órán át telített gőzben 100 °C hőmérsékleten lágyítottuk. A gőzölt minták kétharmadát rostirányban tömörítettük. A tömörítési eljárás a 3. fejezetben leírtak szerint zajlott 25%/min sebességgel. A tömörített minták felét 1 percre fixáltuk, a másik felét 18 órán keresztül. Az összes mintát a sötét klímaszobában tömegállandóságig kondicionáltuk 20 °C hőmérsékleten és 65% relatív páratartalom mellett, hogy elkerüljük a fénydegradációt vagy a kezelést követő egyéb nemkívánatos változást. A minták egyensúlyi nedvességtartalmát (EMC) a különféle kezeléseket után a 3.16. táblázat foglalja össze.

3.16. táblázat A kezelt faanyag egyensúlyi nedvességtartalma (%) az FTIR mérések idején (forrás: Báder és tsai. 2020)

	Kezeletlen	Gőzölt	Tömörített	Tömörített-fixált
Bükk	12.3 (0.6) <sup>a</sup>	12.5 (0.1) <sup>b</sup>	11.1 (0.1) <sup>c</sup>	11.8 (0.1) <sup>d</sup>
Tölgy	12.6 (0.4) <sup>a</sup>	12.5 (0.1) <sup>a</sup>	12.3 (0.5) <sup>a</sup>	12.3 (0.3) <sup>b</sup>

Megjegyzés: zárójelben a szórás értékei láthatók, a felső indexben látható betűk a post-hoc ANOVA teszttel azonosított statisztikailag hasonló csoportokat mutatják fafajonként ( $p < 0,05$ ).

A kezeletlen és a különbözőképpen kezelt mintákból kisméretű, 5×8×40 mm<sup>3</sup>-es (H × S × R) próbatesteket készítettünk. Ez a méret ideális volt a fizikai-kémiai tulajdonságok értékeléséhez az infravörös spektroszkópia segítségével. A vágásképet úgy optimalizáltuk, hogy nyolc kis FTIR próbatest készüljön minden nagy mintából, kivéve a tömörített-fixált

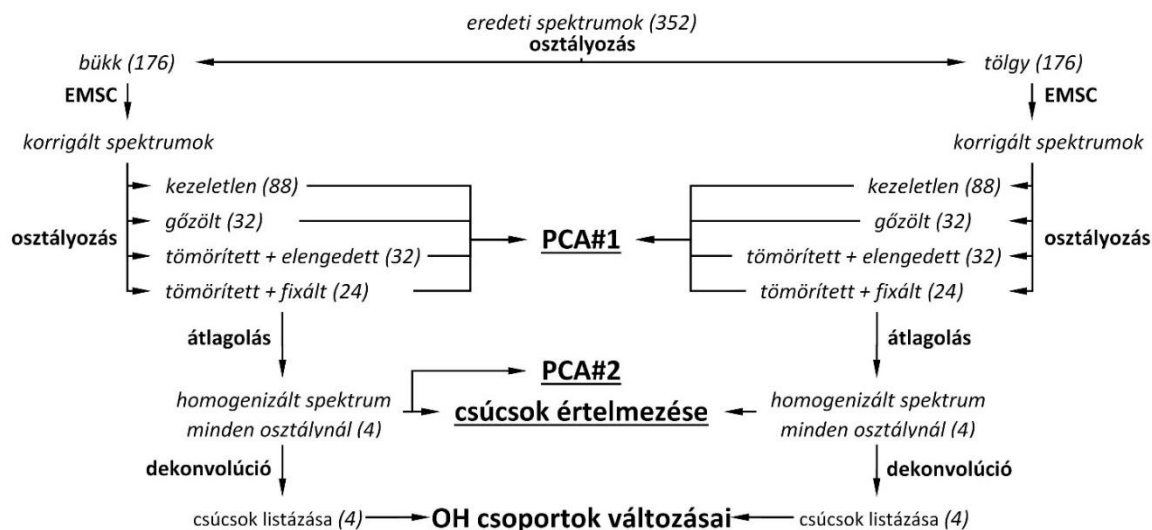


mintákat, amikből hat darab készült a nagymértékű rövidülés miatt. A vizsgált felületről visszaverődő infravörös sugárzás szóródása nagyban függ a felület simaságától (Tolvaj és Faix 1995), ezért különös figyelmet fordítottunk a minták megfelelő előkészítésére. Éles, nagy forgácsolási sebességű körfűrészlapot használtunk kis előtolás mellett az alaki torzulások elkerülésére és a felületi érdesség minimalizálására. Minden mintát egyedi kóddal jelöltünk, amely lehetővé tette a további nyomon követést és a pontos hivatkozást a statisztikai elemzéseknél. A kis próbatesteket a kialakításuk után 48 órán át normál körülmények között, sötét helyen kondicionáltuk az egyenletes nedvességeloszlás és felületoxidációs állapot elérése érdekében.

Az előkészített mintákat úgy helyeztük a műszerbe, hogy biztosítsuk a megvilágító fénynyaláb optikai tengelyére merőleges rostirányt. A faanyag rostirányú-sugárirányú felületét vizsgáltuk, hogy több évgűrűt lefedő terület átlagos fényvisszaverődését tudjuk megmérni. Az alkalmazott közép-infravörös spektrum hullámszám-tartománya 400 és 4000  $\text{cm}^{-1}$  között volt, ami a 25  $\mu\text{m}$  és 2500 nm közötti hullámhossznak felel meg. A spektrumokat reflexiós módban érzékelt a berendezés 1  $\text{cm}^{-1}$  felbontással és abszorbanciaként, azaz fényelnyelésként jelezte ki. Tizenhat egymásutáni spektrum átlagolása történt minden mérési ponton a jel-zaj arány javítása érdekében. Az egyes minták mindkét végétől 5 mm-re mértük a sugárirányú felületet (3.47. ábra). Így minden csoportban 16 független spektrumot rögzítettünk, külön a kezeletlen és a kezelt párokét. Az egyetlen kivétel a tömörített-fixált csoport volt, amelyekben csak 6 minta készülhetett a faanyagnak a kezelés okozta nagymértékű rövidülése miatt. Összesen 176 spektrum készült a modifikált mintákról és ugyanennyi a kezeletlen párokról, mindkét vizsgált fafajnál.

Az összes spektrumot a Spectra Manager v.2.09.00 (Jasco Inc, USA) szoftver segítségével rögzítettük és a számítógépen szöveges fájlkként tároltuk a további feldolgozáshoz. A háttér-spektrumot a fénycsapda alkalmazásával kaptuk meg, míg referenciamintának üres alumínium mintatartót használtunk. Az összes vizsgálat 20 °C hőmérsékleten, 50% relatív páratartalom mellett történt.

A reflexiós módban a faanyag felületéről összegyűjtött infravörös spektrum a fapolimerek funkciós csoportjai fényelnyelésének (kémiai információk) és a fény szóródásának (fizikai információk) szuperpozíciója. Sajnos lehetetlen szétválasztani e jeleket a DRIFT által mért spektrumban. Mindazonáltal szükséges a szisztematikus vizsgálatok és értelmezésük előtt a spektrumok előkészítése. A kutatásban alkalmazott adatelemzés algoritmusát a 3.48. ábra foglalja össze. A két fafajt (bükk és tölgy) a kezdeti szakaszban szétválasztottuk, hogy a fajtajellemzőkből fakadó változékonyság elkerülhető legyen. Kiterjesztett többszörözött szórás-korrektíót (Extended Multiplicative Scatter Correction; EMSC) alkalmaztunk, hogy csökkentjük a nem egységes optikai sűrűség hatását a vizsgált famintákon, valamint a mért amplitúdó és az alapvonal-eltérés kapcsolódó különbségeit (Gallagher és tsai. 2005). Az EMSC egy modell-alapú előfeldolgozó algoritmus, amely képes az infravörös visszaverődés fizikai és kémiai jellegzetességeinek korrekciójára. Alapvonal-korrektíót és normalizálást, valamint a vibrációs spektrumok kémiai és fizikai variációinak elválasztását és számszerűsítését biztosítja, ezáltal a későbbi kalibrációs modellek egyszerűbbé és statisztikailag robusztusabbá válnak (Santos Panero és tsai. 2013). Noha elveszít némi információt, helyettük megbecsüli matematikai paramétereket, amelyek felhasználhatók a különféle hatások elkülönített tanulmányozásához (Afseth és Kohler 2012). A kutatásban alkalmazott EMSC egyedi beállításai a következők voltak: átlag spektrum referenciaként, másodrendű polinomok, korrekciós módszer a klasszikus legkisebb négyzetekkel (Classical Least Squares) és 0,99-es T-négyzet határértékkel.



3.48. ábra A termo-hidro-mechanikailag modifikált faanyag spektrumadatainak elemzése. A zárójelben lévő számok az elemzéshez rendelkezésre álló spektrumok / adatok darabszámát mutatják (Báder és tsai. 2020 alapján). Rövidítések: EMSC – kiterjesztett többszörözött szóráskorrekció; PCA – főkomponens elemzés

Specifikus alapvonal-korrekciót célszerűen nem alkalmaztunk az elemzés ezen szakaszában a spektrumgörbék eredeti alakjának, valamint az elnyelési- és szórásjeleknek a megőrzése érdekében. A spektrumokat négy osztályba soroltuk a kezelés típusa és intenzitása szerint. Ezen adatkészleten elvégeztük a főkomponensek elemzését (Principal Components Analysis #1; PCA #1) annak érdekében, hogy beazonosíthassuk a különböző osztályokból származó minták csoportosulási módjait. Emellett a különféle mintaosztályokból vett spektrumok ANOVA tesztjével statisztikai szignifikancia különbséget vizsgáltuk külön a tölgy és a bükk fafajokon. Ennek eredményeként bizonyítottuk a spektrumok csoportosulását és összefoglaltuk a 3.17. táblázatban  $p < 0,05$  szignifikancia-különbséget alkalmazva. A felhasznált szoftver egyedi fejlesztéssel készült el a LabView 2018 (National Instruments, USA) és a Matlab (Mathworks, USA) szoftverekben, több összehasonlító algoritmust beágyazva a Bonferroni-módszer szerint.

A rendezett spektrumok változékonysága még mindig túl magas volt a spektrumok közvetlen összevetéséhez, így végrehajtottuk az egyes kezelési osztályokhoz tartozó összes spektrum átlagolását a minták spektrális ábrázolásának maximális homogenizálása és általánosítása érdekében. Ezen a korlátozott adatkészleten további elemzést végeztünk (PCA #2) az összes osztályt megkülönböztető spektrumjellemzők kiemelésé céljából: a PCA-k különbségeit különválasztottuk és elemeztük. Az átlagolt spektrumokat szintén közvetlenül hasonlítottuk össze, és a csúcsok értelmezését az irodalmi referenciák alapján végeztük. A csúcsok eltolódását és az amplitúdók változását vizuálisan, minden csúcra külön értékeltük és az összes megfigyelést rendszereztük és összefoglaltuk a 3.17. táblázatban.

3.17. táblázat Szakaszok hozzárendelése és spektrumcsúcsok változása eltérően kezelt tölgy és bükk faanyagokban (Báder és tsai. 2020 alapján)

#	csúcs helye	sáv irodalmi értéke	hivatkozás	sáv leírása	bükk			tölgy		
					gőzölt	tömörített & elengedett	tömörített & fixált	gőzölt	tömörített & elengedett	tömörített & fixált
1	670	670	[3]	C-OH kötés síkra merőleges deformációs rezgései	↓ a	↑ b	↑ b	- b	- b	↓ c
2	834	834	[1, 8]	C-H kötés síkra merőleges deformációs rezgései a lignin H-egységeinek minden pozícióiban	↑ a	↑ b	↑ b	- a	- a	↑ b
3	897	897	[10]	C-H kötések síkbeli deformációs rezgései cellulózban	↓ a	- a	- a	- a	- a	↑ b
4	996	985-996	[5]	C-O vegyértékrezgések	↓ a	↓ b	↓ b	- a	↓ b	↓ c
5	1044	1015-1060	[6]	C-O vegyértékrezgések cellulózban						
		1033	[1]	aromás C-H síkban deformációs rezgései, gvajacil > sziringil; C-O deformáció. Primer alkoholokban; C=O nvújtás (nem konjugált)						
		1034	[6]	acetil csoportok C-O-C kötéseinek szimmetrikus vezvértékrezgései. nazvon avennee sáv a xiloglükánban	↓	↓	↓	-	↓	↓
		1035	[6]	C-O nyújtás főleg a cellulóz C <sub>6</sub> H <sub>2</sub> -O <sub>4</sub> H primer alkoholjaiban						
		1041	[6]	C-O és C-C gyűrű rezgések xiloglükánban						
		1044	[8]	C-O vegyértékrezgések cellulózban és nem-cellulóz poliszacharidokban	b	c	c	a	b	c
6	1086	1086	[5]	C-O deformáció szekunder alkoholokban és alifás éterekben	↓ a	↓ b	↓ b	- b	- ab	↓ c
7	1132	1139	[8]	aromás C-H síkban deformációs rezgései a gvajacil egységeiben, szekunder alkoholokban és C-O nvújtás	↓	↓	↓	↑	↑	↑
		1126	[1]	kondenzált gvajacil > éterezett (tipikus a sziringil egységéknél); másodlagos alkoholok C-O nvújtása	ab	b	a	b	b	c
		1125-1162	[3]	C-O-C aszimmetrikus vegyérték rezgések						
8	1174	1173	[8]	C-O nyújtás a lignin észter csoportjaiban	↑ b	↑ c	↑ c	↑ b	↑ b	↑ a
9	1270	1269	[8]	gvajacil-gyűrű rezgések és lignin C-O nyújtás	↑ b	↑ bc	↑ c	↑ b	↑ b	- a
		1266	[1]	gvajacil-gyűrű rezgések és lignin C-O nyújtás						
10	1330	1330	[10]	sziringil egységekhez köthető C-H rezgések és C-O nyújtás	↑ b	↑ c	↑ b	↓ b	↓ b	↑ c
		1329	[1]	gvajacil és sziringil gyűrű kondenzáció						
11	1378	1374-1378	[6, 8]	C-H deformáció cellulózban és nem-cellulóz poliszacharidokban	↑ b	↑ c	↑ b	↑ b	↑ b	- a
		1367	[1]	alifás C-H vegyértékrezgés CH <sub>3</sub> -ban						
12	1428	1425	[6, 10]	karbonsav és szimmetrikus COO- nyújtása; xiloglükán CH csoportjainak deformációs rezgései; lignin aromás szerkezeteinek rezgése	↑	↑	↑	↑	↑	-
		1422	[1, 6]	lignin aromás szerkezeteinek rezgése; aromás váz C-H-vel kombinált síkban deformációs rezgései						
		1407-1428	[2]	CH csoportok deformációs rezgése cellulózban	b	c	bc	b	b	a
		1430	[6]	CH <sub>2</sub> csoportok deformációs rezgése cellulózban						
13	1458	1462	[1, 6]	C-H deformáció (aszimmetrikus a -CH <sub>3</sub> és -CH <sub>2</sub> csoportokban)	↑	↑	↑	↑	↑	-
		1460	[6]	xiloglükánban a pyran gyűrű CH <sub>2</sub> csoportjainak szimmetrikus deformációs rezgése						
		1458	[8]	aromás vázrezgések ligninben és a CH <sub>2</sub> rezgései cellulózban						
		1455	[6]	OH csoportok síkban deformációs rezgése cellulózban						
		1447-1459	[2]	CH <sub>3</sub> deformációs rezgése cellulózban	b	c	bc	b	b	a
14	1505	1506	[8]	aromás vázrezgések és C=O nyújtás ligninben	↑ b	↑ b	↑ b	- a	↑ b	- ab
		1505	[1]	aromás vázrezgések és C=O nyújtás ligninben						
15	1598	1600	[8]	aromás vázrezgések és C=O nyújtás ligninben	↑ b	↑ b	↑ ab	- a	- a	- a
		1594	[1, 9]	aromás vázrezgések és C=O nyújtás ligninben						
16	1652	1651	[2]	HOH csoportok deformációs rezgése; kristályos víz	↑	↑	↑	-	-	-
		1654	[10]	konjugált C=O kötések vegyértékrezgései						
		1658	[1]	C=O nyújtás; konjugált, p-szubsztituált aril-ketonokban; erős elektronegatív szubsztituens esetén alacsonyabb hullámszám	b	c	c	a	b	ab
17	1740	1739	[9]	C=O nyújtás rezgések a xilán glükuronsav egységeinek O=C-OH csoportjaiban	↑	↓	↓	↑	-	↑
		1735	[1]	C=O nyújtás nem konjugált ketonokban, karbonil és észter csoportokban (gyakran szénhidrát eredetű); konjugált aldehidek és karbonsavak 1700 cm <sup>-1</sup> körül és alatt abszorbeálnak.						
		1725-1745	[6]	acetil- vagy karboxil csoportok C=O nyújtása xiloglükánban	b	b	ab	b	ab	b
18	2902	2850-2940	[3]	szimmetrikus CH <sub>2</sub> vegyértékrezgések	↓ a	↓ b	↓ b	↑ b	- a	↑ c
		2862-2988	[2]	C-H csoportok nyújtása						
19	2940	2933	[10]	a C-H kötés aszimmetrikus vegyértékrezgései a lignin metil és metilén csoportjaiban, a cellulózban és a hemicellulózban	↓	↓	↓	-	-	↑
		2842-3000	[3]	C-H nyújtás metil és metilén csoportokban						
		2840-3000	[1]	C-H nyújtás metil és metilén csoportokban	a	b	b	a	a	b
20	3149	3149	[9]	erős hidrogén kötéssel kötött víz	↓	↓	↓	-	-	-
		3175	[5]	-OH nyújtás a cellulóz intramolekuláris hidrogénkötéseiben						
21	3280	3277	[7]	-OH intra- és intermolekuláris vegyértékrezgései	↓ b	↓ c	↓ c	- a	- b	↓ c
22	3375	3375-3340	[4]	O(3)H...O(5) intramolekuláris hidrogén kötés cellulózban	↓ b	↓ c	↓ c	- b	- ab	↓ c
23	3496	3496	[9]	közepesen erős hidrogén kötéssel kötött víz						
		3450-3570	[3]	hidrogénkötéssel kötött OH csoportok vegyértékrezgései	- a	↑ b	↑ b	- a	↑ b	↑ b
24	3565	3580-3550	[4]	szabad OH(6) és OH(2), gyengén kötött víz	↑ b	↑ c	↑ c	- a	- b	↑ c
25	3602	3602	[9]	gyenge hidrogén kötéssel kötött víz	↑ b	↑ c	↑ c	- a	- a	↑ b

Megjegyzés: a kis betűk a post-hoc ANOVA teszttel azonosított statisztikailag hasonló csoportokat jelölik ( $p < 0,05$ ), ahol a kezeletlen az „a” csoport volt. A spektrális változások

trendjeit nyilakkal mutatjuk be  $\downarrow$  - alacsony,  $\updownarrow$  - közepes,  $\uparrow$  - magas. A  $\leftarrow$   $\rightarrow$  nyilak a szakaszok eltolódását jelzik. Hivatkozások: [1] Faix 1991; [2] Kacurakova és tsai. 1998; [3] Schwanninger és tsai. 2004; [4] Popescu és tsai. 2006; [5] Popescu és tsai. 2007; [6] Gierlinger és tsai. 2008; [7] Popescu és tsai. 2009; [8] McLean és tsai. 2014; [9] Guo és tsai. 2018; [10] Moosavinejad és tsai. 2019.

A spektrumoknak az -OH funkciós csoportoknak megfelelő részét ( $2800-3750\text{ cm}^{-1}$ ) elkülönítettük az átlagolt spektrumokból, hogy a kiválasztott részek körvonalait elemeire bontsuk (deconvolution, dekonvolúció). A spektrális dekonvolúció (azaz a csúcsok szétválasztása) egy módszer a csúcsok összetételének meghatározására egy komplex spektrumban, amely vélhetően több csúcs kombinációjából tevődik össze. Az IR-spektroszkópia esetében előállhat ilyen helyzet, amikor több széles és egymást átfedő -OH csúcs található a faanyag felületén vizsgált spektrum egy részében. Az egyes csúcsok alakját Gauss-görbéként közelítettük az ismert csúcsok középértékével és teljes szélességével a maximum érték felénél. Egyetlen alapvonal-korrekciót alkalmaztunk minden spektrumra / osztályra a felosztást megelőzően, ideértve a szélső (minimum) spektrális pontok négyzetes polinomiális illesztését  $1028$ ,  $1900$  és  $3812\text{ cm}^{-1}$ -en. A dekonvolúciós algoritmust egy valószínűségi alapon működő hibrid helyi keresési algoritmus alapján optimalizáltuk, amelyet a LabView 2018 (National Instruments, USA) szoftverben fejlesztettünk ki és valósítottunk meg.

Az egyedi fejlesztésű algoritmus azonosította a csúcsok helyének, magasságának és szélességének optimális összeállítását, amelyekből az eredeti spektrum helyesen rekonstruálható a kapott görbék szuperpozíciójával. A legjobb szoftverteljesítményt, azaz a görbék legjobb egyezését az összes kezdeti változó optimalizált meghatározása után értük el. Ezeket manuálisan adtuk meg az irodalmi hivatkozások alapján (3.17. táblázat). A szoftver célja az volt, hogy ezeket a változókat ismétléses módszerrel beállítsa minden csúcshoz, egyszeri kisméretű, de véletlenszerű paraméter-eltérést feltételezve. Ez az ismétlődő ciklus akkor ért véget, amikor a spektrum eredeti és illesztett körvonala közötti különbség négyzetes közepének hibája legalább 20 egymást követő iteráció során nem csökkent. Ezáltal kompromisszumra került sor az optimalizálási eljárás (szoftveres gépi tanulás) és a komplex spektrális szakaszok dekonvolúciójának tudományos alapjai között. A csúcs alatti terület változását, valamint annak eltolódását a kezelés-intenzitás azonosítójának tekintettük. A dekonvolúció sikerének számszerűsítésére az eredeti és a szétválasztott spektrumok közti négyzetes közepet használtuk a szétválasztott görbék csökkentett khi-négyzet értéke kiszámításának alternatívájaként (Popescu és tsai. 2007; Donaldson és tsai. 2010).

A spektrumok feldolgozásához és elemzéséhez használt szoftver, beleértve az EMSC-t, az átlagolást és a PCA-t is, a Matlab csomag (Mathworks, USA) kiegészítőjeként elérhető PLS\_Toolbox volt (Eigenvector Inc, USA). Fontos megjegyezni, hogy a spektrum  $2600$  és  $1900\text{ cm}^{-1}$  közötti részét szándékosan figyelmen kívül hagytuk, mivel nem tartalmaz releváns spektroszkópiái információkat.

Az infravörös spektroszkópia nagy előnye a spektrum közvetlen értelmezésének lehetősége, mivel a faanyag különböző molekuláinak és funkciós csoportjainak fényelnyelése nagyon szelektív. Ugyanakkor a faanyag erősen anizotrop felépítésű és bonyolult polimermátrix-szerkezetű, ahol a különféle alkotóelemek kölcsönhatásba lépnek egymással. Egy másik kritikus tényező a magas higroszkópos képesség, amely óriási hatással van a spektroszkópos jellemzésre. Rengeteg kutatás foglalkozott az infravörös csúcsok értelmezésével és rendszerezésével, amelyek tudományos publikációkban kerültek ismertetésre (Faix 1991; Schwanninger és tsai. 2004; Popescu és tsai. 2007; McLean és tsai. 2014; Guo és tsai. 2018;

Moosavinejad és tsai. 2019; Popescu és tsai. 2006; Popescu és tsai. 2009). Ezen tanulmányok arra ösztönöztek, hogy áttekintsük a rendelkezésre álló know-how-t és alkalmazzuk azt a kutatásunk speciális igényeihez (termo-hidro-mechanikailag kezelt lombos faanyagok). A vizsgálati mintáinkban megfigyelt csúcsok teljes listáját a korábban bemutatott *3.17. táblázat* foglalja össze.

**A rostirányú tömörítés eredményeként az -OH csoportokban és más funkcióscsoportokban bekövetkező változásokkal kapcsolatos ismeretek magyarázatot adhatnak a faanyag sokrétű nedvességfüggő tulajdonságaira, mint a nedvességtartalom, szorpciós hiszterézis, zsugorodás, tartósság vagy felhasználhatósági időtartam.** E tanulmány célja tehát, hogy pótolja a hiányzó ismereteket, és feltárja a faanyag funkcióscsoportjainak a rostirányú tömörítés által létrehozott változásait.

Bükk és tölgy esetében az *EMC* a kezeletlen minták esetében rendre 12,3% és 12,6% volt, tömörített-fixált faanyag esetében 11,8%-ra és 12,3%-ra változott. Bár a különbségek kicsik, egyes mintacsoportok *EMC*-je megváltozott a termo-hidro-mechanikus kezelések hatására. A tölgy stabilabb szerkezetű, mivel az *EMC* változása statisztikailag csak a tömörítés-fixálás után lett szignifikáns (*3.16. táblázat*). A bükk *EMC*-változása már a gőzölési folyamat után kimutatható. Sejtüregeit nem tömítik tiliszek, mint a tölgnél, ami megkönnyíti a gőzölés által okozott kimosódást.

Fontos különbség a bükk és a tölgy fajok kémiai összetétele között a hemicellulózok összeállítása. A bükkfából hidrolízissel kivont xilán mennyisége több, mint kétszerese annak a polimernek, amely a tölgyből extrahálódik, ugyanolyan tömegvesztéssel feltételezve. A xilóz a bükkben lévő monoszacharid-mennyiség 77%-ának felel meg, összehasonlítva a tölgyből nyert 49%-kal (Fišerová és tsai. 2013). Bizonyították, hogy a xilán a legkevésbé stabil poliszacharid, amikor különféle hemicellulózokat (köztük  $\beta$ -glükánt, arabinogalaktánt, arabinoxilánt, galaktomannánt, glükomannánt, xiloglükánt és xilánt) hőbomlásnak teszik ki inert atmoszférában (Werner és tsai. 2014). A hemicellulózok fafajonkénti összetételbeli különbsége még inkább hozzájárul az eltérő gőzölési hatásokhoz, amelyet itt a fa enyhe hőkezelésének tekintünk. **Bár a kezelés által okozott teljes tömegvesztés elhanyagolható, a faanyagot felépítő polimerek bizonyos fokú kémiai változása megtörtént** (például dehidráció, deacetilezés, rekonfiguráció, térhálósodás). A hemicellulózok az elsődleges szerkezeti összetevők, amelyek már viszonylag alacsony hőmérsékleten is érintettek (Sandak és Sandak 2013). A bomlás deacetilezéssel kezdődik, ami ecetsav felszabadulását okozza. Az ecetsav depolimerizációs katalizátorként működik, ami további poliszacharidok bomlásához vezet. Ezzel egyidejűleg a hemicellulózok dehidratálódnak, amely hatással van a -OH csoportok csökkenésére (Esteves és Pereira 2009). Az infravörös reflexiós spektrumok tárgyalásánál bizonyításra kerül, hogy a leírt kémiai változások sokkal jelentősebbek voltak a bükkben, mint a tölgyben, megerősítve az *EMC*-ben látott megfigyeléseket. A tömörítés eredményezte a bükk *EMC*-ben a legnagyobb változásokat. Ez a rendelkezésre álló szorpciós helyek (például -OH csoportok) számának változásával magyarázható, amelyet a faanyagot felépítő polimerek átrendeződése okoz az enyhe hőkezeléssel (gőzöléssel) kombinált mechanikai hatások (rostirányú, teljes térfogatra kiterjedő tömörítés) következményeként.

A *3.49. ábra* bemutatja a kutatás során vizsgált bükk és tölgy minták eredményeiből átlagolt IR spektrum-sorozatot (kezeletlen, gőzölt, tömörített, tömörített-fixált). A beazonosított spektrális csúcsokat a *3.17. táblázatban* felsorolt irodalmi hivatkozások alapján jelöltük és számoztuk. Ugyanebben a táblázatban összefoglaltuk a vizuális értékelésen alapuló spektrális elemzést és a magyarázatokat is. A függőleges nyilak a változások (növekedés vagy csökkenés) intenzitását jelzik, míg a csúcs helyzetének változásait a magasabb vagy

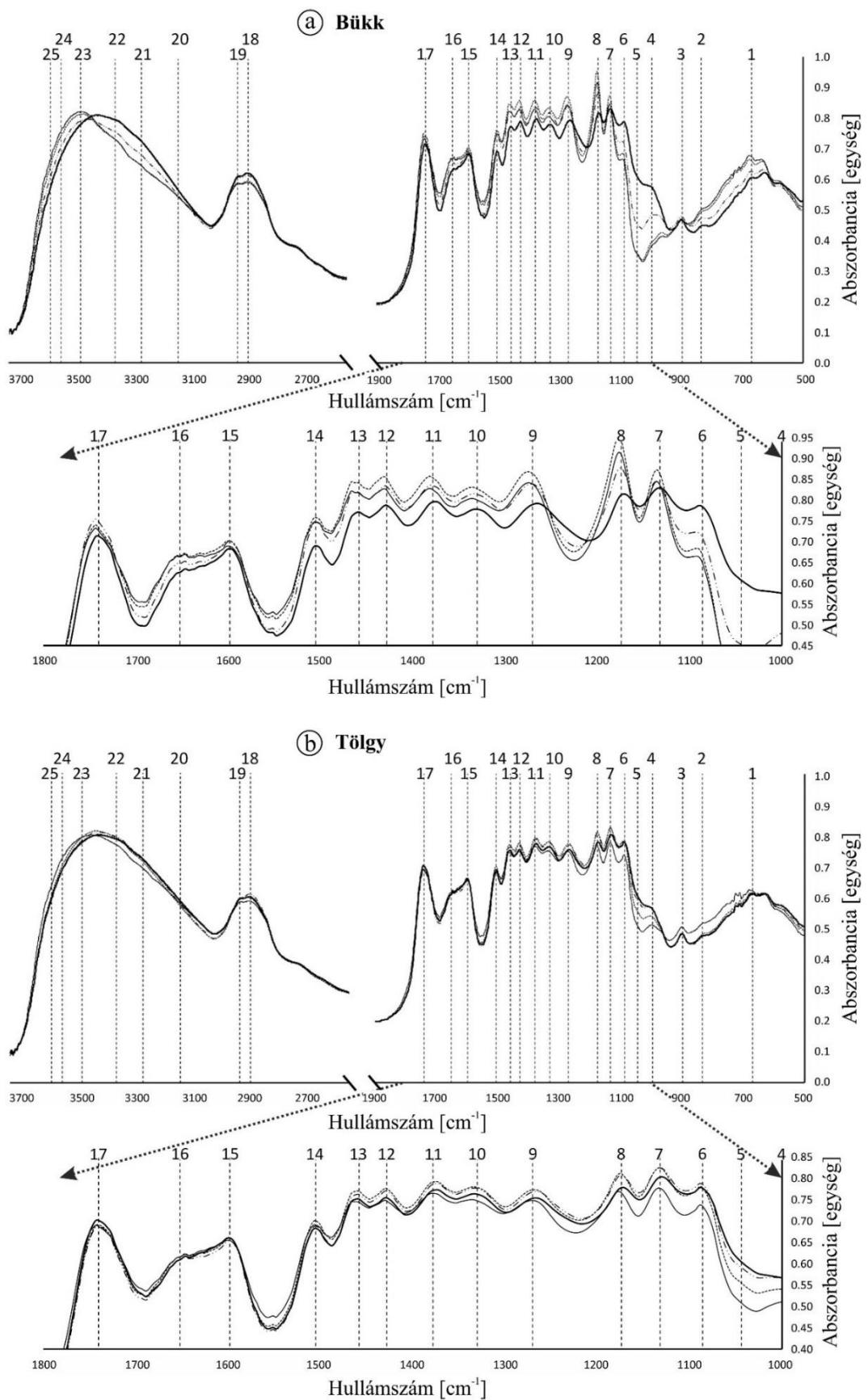
alacsonyabb hullámszám felé (eltolódások) vízszintes nyilak jelzik. Minden esetben a kezelt faanyagok átlagolt spektrumait fajonként összehasonlítottuk a kezeletlen spektrumokkal. **A kezeletlen és a modifikált faanyagok infravörös spektrumainak látszólagos különbségei bükk esetén markánsabbak, mint a tölgnél, ami azt jelzi, hogy ez a faj érzékenyebb a kémiai-fizikai változásokra, amelyeket a tömörítési folyamat okoz.** Ezt megerősítette az ANOVA-vizsgálat: a gőzölés viszonylag enyhe folyamat, csak kis mértékben befolyásolja a faanyagot alkotó polimerek kémiai változásait. Bükk esetében több sávban észlelhetők a funkciós csoportok változásai a gőzölés hatására; ezek intenzitása azonban egyértelműen alacsonyabb, mint a tömörített és tömörített-fixált minták esetén. A gőzölés eredményeként a legszembetűnőbb csúcsérték-csökkenés és alacsonyabb hullámszám felé történő elmozdulás a 4. (996) és az 5. (1044) sávban figyelhető meg: C-O-vegyérték rezgések, C-O nyúlás, C=O nyúlás, valamint aromás C-H síkbeli deformációi. Az alacsonyabb reflexiós értékek, amelyek ezekben a sávokban fordulnak elő a funkciós csoportok (poliszacharidok) lebomlását és a lignin kevesebb keresztjét jelentik.

A spektrum reflexiójának további csökkenése figyelhető meg a 6. sávban (1086), amelyet a szekunder alkoholok és alifás éterek C-O deformációjának tulajdonítanak. A 18. (2902) és 19. (2940) sávok, amelyek a szimmetrikus CH<sub>2</sub> vegyértékrezgésekhez és a CH aszimmetrikus nyújtó rezgésekhez kapcsolódnak a lignin, cellulóz és hemicellulózok metiljeiben és metilénjeiben, szintén csökkennek, de csak a tömörítés és a tömörítés-fixálás hatására. Ezzel ellentétben számos IR sávban növekszik a reflexió a modifikációs folyamatok eredményeként. Ez különösen az 1. (670), a 2. (834) és a 8–14. (1147–1505) sávok esetében érvényes. Összekapcsolható a lignin kondenzációjával, amely a megemelt hőmérséklet és a mechanikus feszültségek hatására üvegesedést indukál. A tölgy IR spektrumának azonos csúcsai közt nem láthatók határozott különbségek. Ráadásul úgy tűnik, hogy a tölgy esetében néhány sávot egyáltalán nem érint a rostirányú tömörítési eljárás, jó példa erre a 15. (1598) és a 16. (1652) csúcs, melyek a C=O nyújtásához és az aromás vázak rezgéséhez tartoznak. Az is megfigyelhető, hogy az IR-spektrumok értékelhető eltérései a polimerek hidroxil-funciós csoportjait lefedő tartományban fordultak elő (20-25. sáv (3149 - 3602)), ami a kezelt minták higroszkópos tulajdonságainak megváltozására utal. Ezért külön elemzéseket végeztünk ezekre a spektrális sávokra.

**A főkomponens-elemzés (PCA) egy hatékony kemometriás módszer a szorosan korreláló és többdimenziós adatkészletek alacsonyabb dimenzióra konvertálására.** A spektrális adatok egyedi tulajdonságait keresi, és ezek alapján csoportosít. Két PCA elemzést végeztünk; az elsőben az egyes minták méréseiből összegyűjtött spektrumok teljes tartományát elemeztük, az osztályokon belüli variációkra összpontosítva (PCA #1). A második elemzést az egyes osztályok átlagolt spektrumaival végeztük, és a vizsgált anyagok sokkal általánosabb spektroszkópos leírását kaptuk (PCA #2). Az adatoknak az elemzés előtt a középértékét vettük az átlagos abszorpciós spektrum kivonásával. Ez az előfeldolgozás egy rutin eljárás, amelyet a PCA kiszámítása előtt hajtanak végre, hogy minimálisra csökkentsék a domináns csúcsok hatását az általános kémiai modellre.

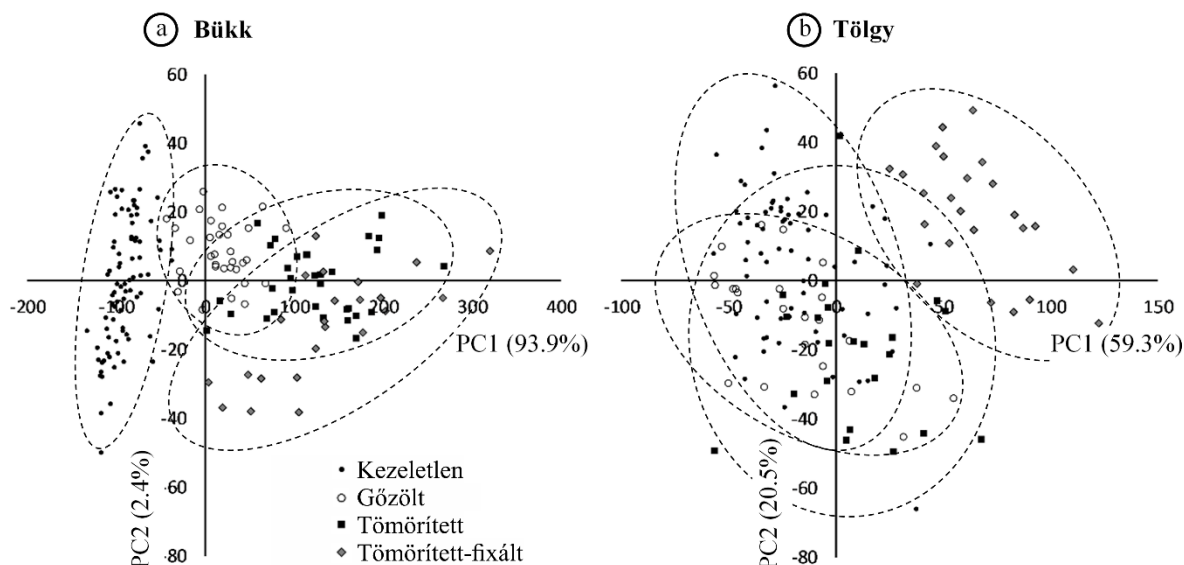
A bükk és tölgy faanyagok spektrumán elvégzett PCA #1 eredményeit a 3.50. ábra szemlélteti. **Nyilvánvaló, hogy a kezelések jobban elkülönülnek bükk esetében, ahol a kezeletlentől a tömörített-fixáltig az adatpontok követik a PC1 tengelyt. Ez a komponens domináns a modellben, és az adatok eltéréseinek közel 94%-át magyarázza.** A kezeletlen csoport egyértelműen elkülönül, megerősítve a gőzölés és a tömörítés jelentős hatását a bükk faanyag fizikai-kémiai összeállítására vonatkozóan. A gőzölt minták csoportja kissé átfedésben van a tömörített mintákkal és a PC1 tengely közepe körül helyezkedik el. A tömörített mintatípusok részleges átfedésben vannak, de a PC2 pontszámok figyelembevételével bizonyos elkülönülés észlelhető.





3.49. ábra Kezeletlen és különbözőképpen kezelt bükk (a) és tölgy (b) minták infravörös spektrumai. A számozás a 3.17. táblázatban összefoglalt, azonosított csúcsoknak felelnek meg (forrás: Báder és tsai. 2020)

A tölgy spektrumai átfedésben vannak, és egyetlen csoportot képeznek a kezeletlen, a gőzölt és a tömörített minták (3.50. ábra). Csak a tömörített-fixált spektrumok különülnek el bizonyos mértékig, különálló csoportot hozva létre, amely kissé átfedésben van a tömörítetttel. Tölgy faanyag esetében a PCA #1 első komponense (PC1) a variancia csaknem 60%-át, a második komponense (PC2) pedig több, mint 20%-át magyarázza.



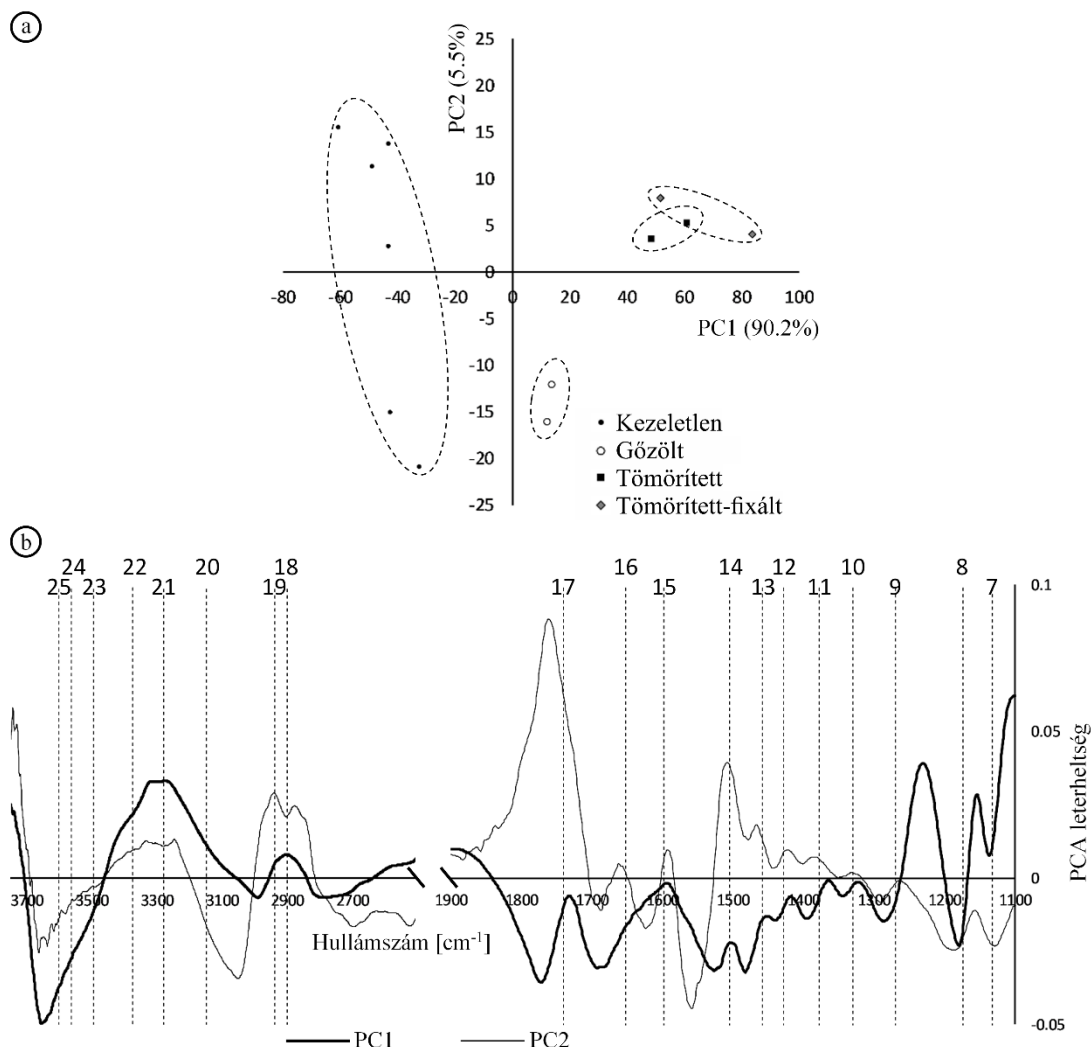
3.50. ábra Bükk (a) és tölgy (b) spektrumok főkomponens-elemzése (PCA #1), a kísérleti minták egyedi eredményeit figyelembe véve. Az ellipszisek illesztése 95%-os megbízhatósági határértékkel történt (forrás: Báder és tsai. 2020)

Elvégeztünk egy kiegészítő elemzést (PCA #2) a bükk minták átlagolt spektrumain. Ebben az esetben minden csoportot homogenizáltunk, csoportonként egyetlen átlagos abszorbancia-értéket számítva a teljes hullámszám-tartományra. Ez a módszer két adatpontot eredményezett kezelésként, valamint a kapcsolódó kezeletlen csoportokhoz további hat pontot. A kapott pontgrafikon a 3.51.a ábrán látható. A jobb szétválaszthatóság nyilvánvaló a 3.50. ábrán bemutatott adatpont-felhőkhöz képest. Ismét az első főkomponens (PC1) választja szét a kezeletlen- és a modifikált csoportokat, a kezelés intenzitása szerint. A gőzölt mintákat egyetlen csoportba sorolja, egyértelműen elkülönítve a többi kezeléstől a második főkomponens (PC2) segítségével. A tömörített minták átlagos spektrumai átfedésben vannak, ugyanakkor távol a többi csoporttól.

A PCA nagy előnye az elkülönítést támogató spektrális jellemzők azonosításának lehetősége. A 3.51.b ábrán a PC1 és PC2 tengelyekhez tartozó leterheltségek és az azonosítható spektrumcsúcsok referenciapozíciói láthatók (3.17. táblázat). Az első főkomponens elkülöníti a referenciát (negatív értékek) az összes kezelt mintától (pozitív értékek). A legszembetűnőbb csúcsok a 3.51.b ábra leterheltségeinél a 8, 9, 13, 14, 16, 17, 21–25. (1174, 1270, 1458, 1505, 1652, 1740, 3280–3602). Feltárja, hogy a kezelés által leginkább érintett polimerek a lignin (C-O, C=O, CH<sub>2</sub>), a cellulóz (CH<sub>2</sub>) és az összes hidroxil-csoport, amelyek a faanyag higroszkópos tulajdonságait befolyásolják. A PC1 közepes mértékű változásokat sugall a kezelt faanyagoknál. A második főkomponens a gőzölt és a tömörített minták megkülönböztetését teszi lehetővé, ahol a 7, 8, 14, 17, 18, 19. (1132, 1174, 1505, 1740, 2902, 2940) csúcsok a meghatározók. Ez különösen a ligninben (CH, C-O, C=O, CH<sub>2</sub>), a guaiacil kondenzációban, valamint a hemicellulózban (CH, C=O, CH<sub>2</sub>) tapasztalható spektrális változásoknak felel meg. Mindkét főkomponensben rögzített információ egybevághat a vizuális értékelés eredményeivel, kivéve a 17. csúcsot (1740), amely nagy PC2 leterheltséget mutat. A hidroxil-csoportok (21–25. csúcsok (3280–3602)) nagy

jelentősége azonban bizonyított, amelyek a minták szorpciós mechanizmusainak változására utalnak a termo-hidro-mechanikus kezelések hatására.

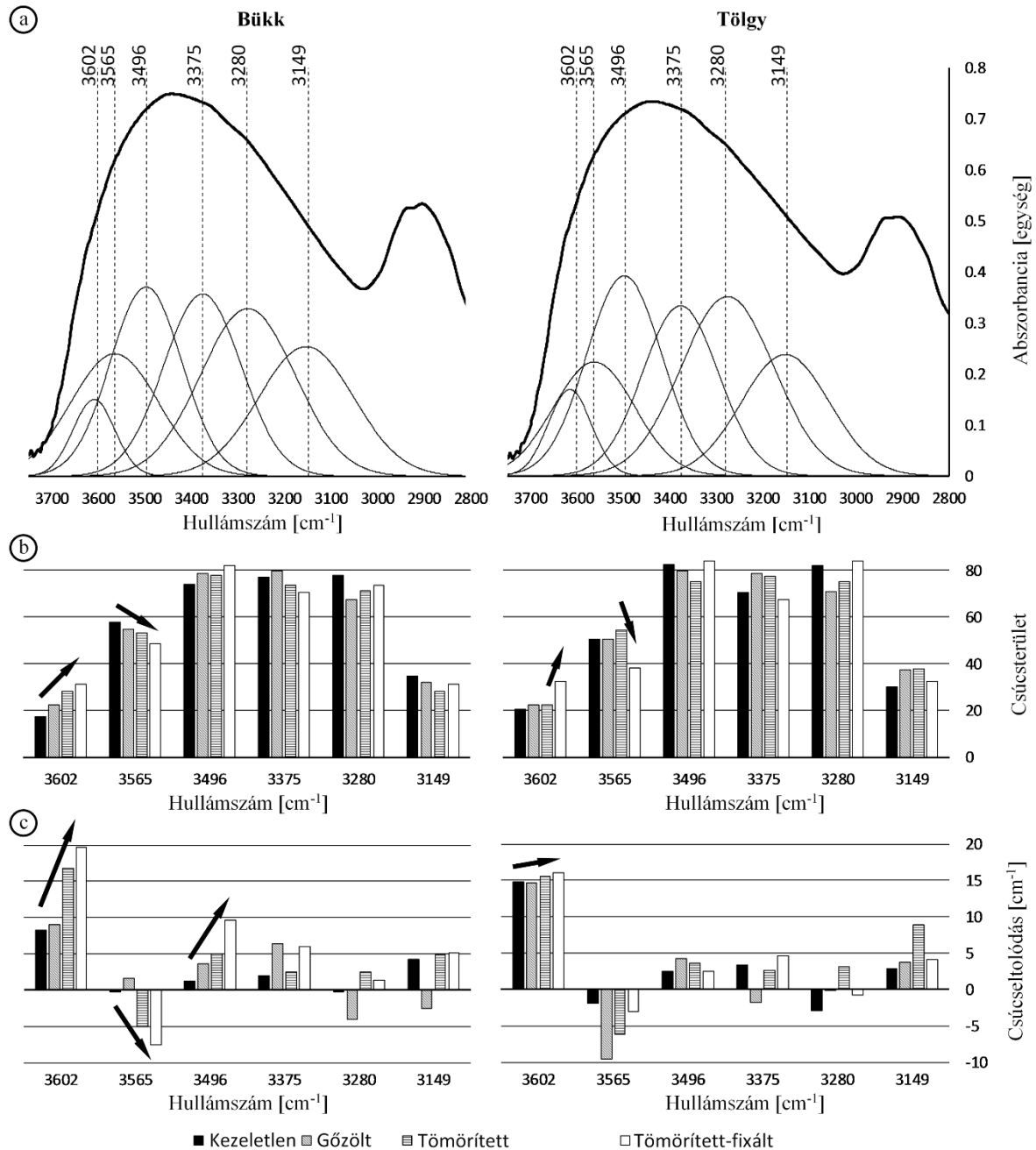
Mint korábban jeleztük, a tölgy FTIR vizsgálatával kimutatható változások mértéke sokkal kisebb, mint a bükk változásai. Ezt az itt bemutatásra nem kerülő PCA #2 megerősítette, mert a különböző kezeléseknek megfelelő csoportok közötti elkülönítés nagyon korlátozott volt.



3.51. ábra A különböző kezelések átlagolt bükk spektrumainak főkomponens-elemzése (PCA #2); PCA pontszámok (a) és PCA leterheltségek (b) (forrás: Báder és tsai. 2020)

Az FTIR-spektrumok termo-hidro-mechanikus kezelések miatt bekövetkezett lényeges változásai a faanyag higroszkópos tulajdonságainak módosulásához kapcsolódnak. Még ha az EMC eltérései nem is voltak magasak a különböző mintacsoportokban a kondicionálás után (3.16. táblázat), sok különbség statisztikailag szignifikáns volt (ANOVA  $p < 0,05$ ). Szignifikáns különbséget lehetett kimutatni az összes eltérően kezelt bükk mintacsoport, valamint a kezeletlen és a tömörített-fixált tölgy mintacsoportok között. Hasonlóképpen, az IR spektrumok kontúrja az abszorbált víznek és az -OH csoportoknak megfelelő tartományban ( $3700-3000 \text{ cm}^{-1}$ ) a kezelés intenzitása szerint változott, különösen a bükk esetében (3.49. ábra). A közvetlen spektrumértelmezés legfőbb korlátozója ebben a tartományban a számos széles csúcs, melyek jelentős, akár többszörös átfedésben vannak egymással. Ezért egy speciális szoftvert fejlesztettünk ki a spektrális csúcsok

szétválasztására, azaz a dekonvolúcióra. Az volt az alapvető feltételezésünk, hogy a szétválasztott csúcsok szélessége és maximális eltolódása korlátozott és ellenőrizhető. A vizsgálat céljainak megfelelően hat -OH csúcsot azonosítottunk a 3.17. táblázatban összefoglalt irodalmi referenciák alapján. Ezek mindegyike a faanyagok különböző polimerjeihez kapcsolódik, és nedvességfelvételt bonyolít le a különböző szorpciós szakaszokban. A tömörített-fixált spektrum bükk- és tölgy mintákra vonatkozó dekonvolúciójának eredményét a 3.52. ábra mutatja be.



3.52. ábra A kezeletlen minták spektrumának dekonvolúciója a faanyag -OH csoportjaira (a), a dekonvolvált csúcssterület változásokkal (b) és csúcseltolódásokkal (c) együtt, bükk (balra) és tölgy (jobbra) esetében (forrás: Báder és tsai. 2020)

A megfigyelt csúcsok területét és eltolódását oszlopdiagramon ábrázoljuk, hogy kiemeljük a faanyagok higroszkópos változásainak mechanizmusait a kezelés során. Bár az IR-spektrum kontúrja hasonló a két vizsgált fajnál, némi eltérés mégis mutatkozik a szétválasztott csúcsokban. A legnagyobb abszorbancia a 21 (3280), 22 (3375) és 23. (3496) csúcsoknál figyelhető meg, bár a vizsgált csúcsok alatti területek meglehetősen állandóak, és a kezeléseket nem változtattak rajtuk. Ezzel ellentétben a gyengén kötött vízhez rendelt 24-es (3565) csúcs csökken a kezelés intenzitásának növekedésével. Ez a változás sokkal monotonabb tölgy, mint bükk esetében. A 25-ös csúcs  $3602\text{ cm}^{-1}$ -nél (gyenge H-kötésű víz) ellentétes tendenciát követ, és területe a kezelés intenzitásával növekszik. A csúcsterület változásai a csúcsetolódásokhoz kapcsolódnak. Különösen jól megfigyelhető bükk faanyag esetében, ahol a 23 (3496), 24 (3565) és 25. (3602) csúcsok elmozdulása monoton a referenciaértékhez viszonyítva. Ez kevésbé volt nyilvánvaló a rostirányú tömörítéssel szemben ellenállóbb tölgy faanyag esetében.

**A fenti megfigyeléseket összefoglalva arra következtethetünk, hogy a vízzel gyenge kötést létesítő hidroxil-csoportok kötése erősege határozottan növekszik a kezelés intenzitásával.** Ezzel ellentétben a faanyag alapvetően erős kötése a vízzel viszonylag stabilak és a bemutatott kezeléseket nem befolyásolják azokat. A spektrumok vizuális értékelése (3.17. táblázat), valamint az EMC változásai megerősítik a megfigyelt tendenciát. Meg kell említeni, hogy a termo-hidro-mechanikus kezelés a faanyagban morfológiai változásokat indukál, amelyek befolyásolhatják a vízgőz szállítását az anyag belsejében (diffúzió), valamint a faanyag és a környező levegő határán (abszorpció). Még ha az infravörös spektroszkópiával nem is igazolható közvetlenül, a víz szorpciós helyeinek elérhetősége megváltozik. Bekövetkezik a faanyagot felépítő polimerek mechanikai rekonfigurálása (szorpciós helyek áthelyeződése és részleges sűrűsödése) és a sejtfalakon mikro- és nanoszintű repedések jelennek meg.

A rostirányban tömörített faanyagot különböző szinteken vizsgálva megállapítást nyert, hogy a rostirányban megfelelően tömörített faanyagok makroszkopikusan nem mutatnak elváltozást. Mikroszkopikus szinten, 300-szoros nagyítás felett a sejtek elváltozásai megfigyelhetők, különösen a jelentős maradandó hosszcsökkenést szenvedő, hosszú ideig fixált faanyagoknál. A sejtfalak hullámosodnak, a sejtüregek torzulnak, a gödörkék sok esetben a láthatatlanságig összezáródnak. Tovább lépve, hozzávetőleg 30 000-szeres nagyításkor a sejtfalakat felépítő alkotókat figyelhetjük meg. Itt a faanyag mechanikai tulajdonságait leginkább meghatározó farostok e szempontból legfontosabb, S2 sejtfalrétegét vizsgálva megállapíthatóvá vált, hogy **a sejtfalakat felépítő cellulózkegerek, mikrofibrillák a tér minden irányában elhajolnak a rostirányú tömörítés hatására. Ez a sejtfalak meggyengülését kell, hogy okozza.** Még mélyebbre hatolva az anyagban, molekuláris szinten is megváltoznak egyes alkotók. A vízzel eredendően gyenge kötést létesítő hidroxil-csoportok kötése erősege a rostirányú tömörítés intenzitásával növekszik, azonban a faanyag vízzel alapvetően erős kötése viszonylag stabilan erősek maradnak. A faanyagot felépítő polimerek mechanikai rekonfigurációja történik meg a sejtfalak mikro- és nanoszintű repedései következtében. A rostirányban tömörített faanyag szerkezeti változásai tehát számos szinten feltérképezésre kerültek.

### 3.11. Tömörített faanyag további kezelési lehetőségei

A rostirányban tömörített faanyagoknál a legtöbb bonyodalmat a nedvességfelvétel- és leadás miatt bekövetkező méretbeli- és alakváltozások okozzák. Ha a formára alakított és leszárított, tehát stabillá tett tömörített faanyagot újra megnedvesítjük, az részben visszanyeri eredeti alakját a tapasztalatok szerint, ahhoz hasonlóan, amit Inoue és tsai. (2008) és Kúdela és tsai. (2018) leírtak, mivel ez a modifikált faanyag rostirányban magas zsugorodás-dagadási képességgel rendelkezik. A faanyagok zsugorodásának és dagadásának legegyszerűbb csökkentési módja a nedvességfelvételi képesség redukálása. Ezt sokféle kezeléssel el lehet érni, például különféle összetételű és nyomású atmoszférákban történő hőkezelésekkel, vagy telítéssel (Inoue és tsai. 2008, Obataya és Higashihara 2017, Báder és Németh 2018b). Terjedelmi okokból a rostirányban tömörített faanyagok hőkezeléses modifikációjának ismertetésétől eltekintünk, azonban egy telítéses megoldást, a tejsavas kezelést – mint a faanyagtudományok és főként a faanyagok dimenzió-stabilitása területén újdonságnak számító technológiát – bemutatjuk.

**Rostirányban tömörített faanyagok esetében a rostirányú méretváltozás 4-6-szoros értéket vesz fel, ami a termékeknek nagyon jelentős dimenzió-stabilitási problémát eredményez nedvességváltozás esetén** (lásd 3.9.2. fejezet). Ebből következik, hogy csakis beltéri, viszonylag szűk tartományban ingadozó relatív páratartalmú helyiségekben használható fel. Amennyiben sikerülne a nedvességfelvételi képességét csökkenteni a rostirányban tömörített faanyagok, lényegesen javulna a méret-stabilitása. Léteznek megoldások, például a különböző műgyantákkal és egyéb nem természetes anyagokkal való kezelések, de egy biotermék előnyeit is magában hordozó modifikált faanyagoknál ezek alkalmazása nem célszerű. **A hőkezelés levegős közegben sokkal előnyösebbnek tűnik, valamint a faanyag tejsavval való telítését követően annak faanyagban belüli polimerizációja is, mely a vízmolekuláknak a faanyagba jutását és a kémiai kötések megakadályozását hivatott elérni.**

A tejsavas kezelés elsődleges célja esetünkben a faanyag zsugorodásának és dagadásának csökkentése, azaz a méretstabilitás javítása. Ennek megfelelően a tömegnövekedést vizsgáltuk a telítés hatására (weight percentage gain, *WPG*), valamint a tömegcsökkenést az áztatás során (weight percentage loss, *WPL*), minden esetben abszolút száraz állapotú faanyagot felhasználva. Az áztatás desztillált vízben történt 10 napon keresztül, a zsugorodás-dagadási képesség vizsgálatához a három anatómiai főirány (H, S, R) méretei rögzítésre kerültek áztatást megelőzően, áztatás után és az ismételt szárítást követően. A dagadás és a zsugorodás vonatkozó ISO 13061 szabványok szerint lettek kiszámítva. A telítés előtti és utáni, valamint az áztatás előtti és utáni két abszolút száraz állapot közti tömegkülönbségből számítottuk a százalékos tömegcsökkenést ( (12) és (21) képlet). A dagadás-csökkentési hatékonyság (anti-swelling efficiency,  $ASE_{\alpha}$ ) és a zsugorodási-csökkentési hatékonyság (anti-shrinkage efficiency,  $ASE_{\beta}$ ) javulásának meghatározásához a (18) képletben bemutatott összefüggéseket használtuk.

$$WPG = \frac{m_{0\_telített} - m_{0\_kezeletlen}}{m_{0\_kezeletlen}} \cdot 100; [\%] \quad (21)$$

ahol:

$m_{0\_kezeletlen}$  – faanyag abszolút száraz tömege

$m_{0\_telített}$  – telített faanyag abszolút száraz tömege.

Kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) és bükk (*Fagus sylvatica* L.), 20×30×200 mm (H × S × R) méretű minták kerültek felhasználásra. A kísérleteket megelőzően a további feldolgozás során mindegyikből egy 20×15×200 mm (H × S × R) és egy 20×12×200 mm (H × S × R) méretű minta készült, melyek nedvességtartalma a rosttelítettségi határ felett volt. Utóbbi mintaméret alkalmas volt tömörítetlen anyagként való



felhasználásra, míg a tömörítő berendezés befogadóképességéhez igazodva 2 db  $20 \times 15 \times 200$  mm (H  $\times$  S  $\times$  R) méretű minta lett tömörítve egyidejűleg. A dupla-minták 25%/min relatív tömörítési sebességgel 20% mértékben lettek tömörítve az eredeti hosszukhoz képest, majd egy perc fixálás következett. Klímaszobában 20 °C és 65% relatív páratartalom mellett érték el az egyensúlyi tömegállapotot, végül fokozatosan emelkedő hőmérsékleten abszolút szárazra lettek szárítva. Megjegyzendő, hogy a 3.5. fejezet végén olvasható megállapítás szerint a rostirányban tömörített faanyag a szárítása után lényegesen ridegebbé válik, azaz elveszti hajlíthatóságát. Az itt leírt technológia felhasználása esetén tehát a tejsavas telítési módszernél éppúgy, mint hőkezelésnél a tömörített munkadarabokat először a kívánt formára kell alakítani és csak utána szabad szárítani és további kezelésnek alávetni.

Az Acros Organics b.v.b.a. (Belgium) L(+)-tejsav monomerének vizes oldatát (töménység  $\geq 90\%$ ) használtuk a kísérletekhez. Az alkalmazott monomer híg folyadék, melynek meg kell oldani a faanyagba jutását és azon belül a rögzítését, célszerűen polimerizációval. Így az összekapcsolódó monomerek hosszú polimer láncokat alkotva és a faanyag összetevőivel is kapcsolatot létesítve a faanyagba épülnek. Tekintettel arra, hogy a faanyag, a tömörítési technológia és a tejsav-monomer egyaránt kizárólag természetes és természetre káros összetevőktől mentes környezetbarát anyagok és technológia, az iparban katalizátorként használt kiegészítők alkalmazását igyekeztünk elkerülni. Noël és tsai. (2015) tanulmányát alapul véve egy hosszabb, de katalizátoroktól mentes főzési folyamattal tejsav-oligomereket képeztünk, mely szobahőmérsékleten átlátszó, méz állagú anyaggá vált. A monomert Witeg MSH-20D típusú (Witeg GmbH, Németország), mágneses keverővel ellátott főzőlapon 175 RPM fordulatszámú folyamatos keverés közben, 150 mbar vákuumon tartva kezeltük egy Memmert VO-400 típusú vákuumkamrában (Memmert GmbH+Co KG, Németország). Először a víz eltávolítása történt meg 70 °C hőmérsékleten 90 perc alatt, majd 100 °C-on 125 percig és további főzéssel 130 °C-on 200 percig kezelve tejsav-oligomer keletkezett. Minden tömörítetlen és tömörített faminta-csoport ketté lett osztva és egyik fele natúr (tejsavval nem kezelt) faanyagként, míg másik fele tejsav-oligomerral kezelve lett felhasználva. A telítésre szánt, abszolút száraz famintákat az előkészített tejsav-oligomerbe helyeztük és fémlapokkal lesúlyozva és 90 °C hőmérsékleten 30 percig 100 mbar vákuumban kezeltük. A ciklus végén a rendszer a vákuum fokozatos csökkentésével 20 perc alatt elérte a légköri nyomást, majd a telített minták szárazra törölve és alufóliába csomagolva egy Memmert 100-800 típusú szárítószekrénybe kerültek (Memmert GmbH, Németország), ahol 6 órán keresztül 120 °C hőmérsékleten ment végbe a faanyagban lévő oligomerek polimerizációja.

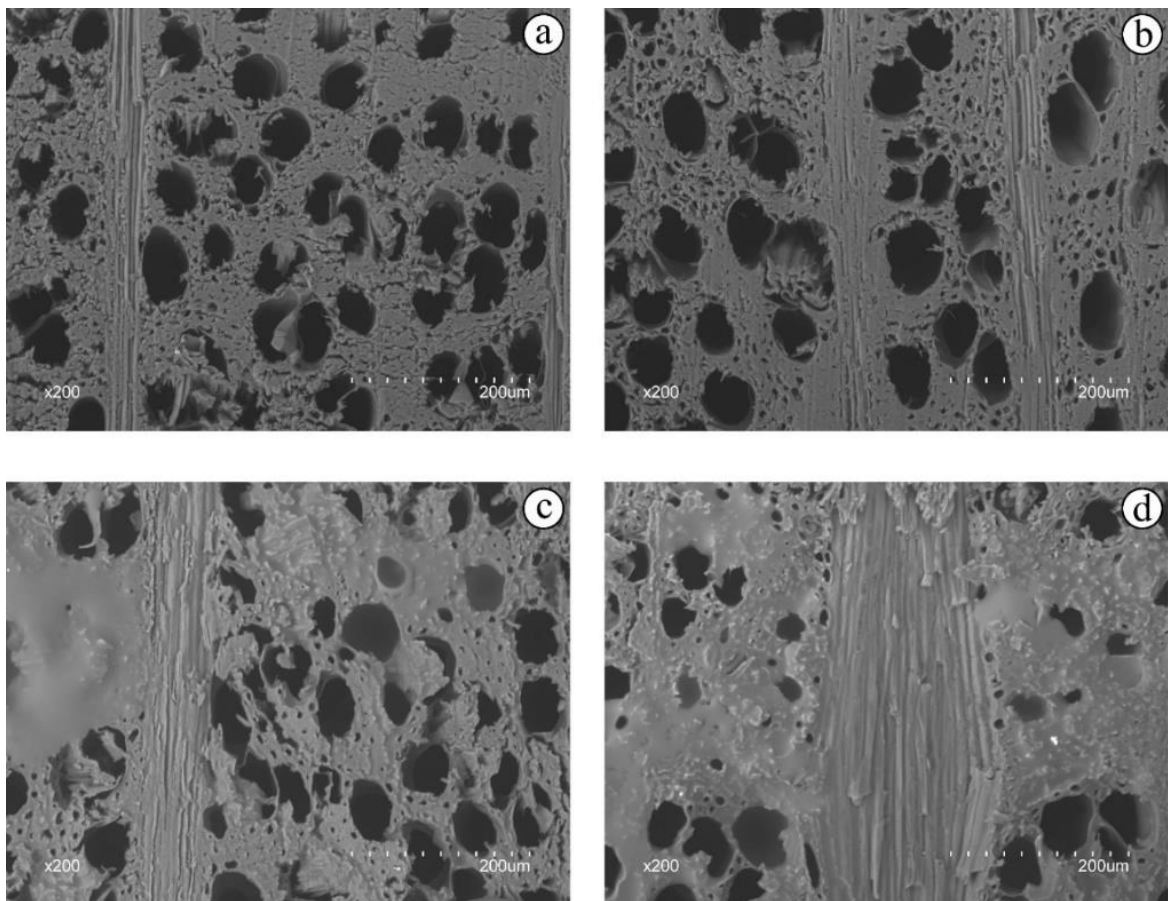
A telítés első fázisában - a vákuum alkalmazása során - buborékokként megfigyelhető volt a bükk faanyagban tárolt levegő eltávozása, ami előrevetítette a folyamat sikerességét. A kezelés hatására a faanyag színe jelentősen sötétedett, ezzel egy, az emberi szemnek még kellemesebb felületű faanyag jött létre (3.53. ábra). A 3.53. ábrán bemutatott képek alapján valószínűsíthető volt, hogy míg a bükk minták teljes keresztmetszetben telítődtek, addig a tölgy minták telítése sikertelen volt, csupán a felületükre rakódott a tejsav-oligomerból. Mindezt a tömegméréssel meghatározott tejsavfelvételi számítások igazolták, továbbá kimutatták, hogy a tölgy minták telítést megelőzően nem voltak abszolút száraz állapotban. Ennek oka, hogy a tölgy faanyag lassabban szárad a sejtüregeiben található sok tömítőanyag (tílisz) miatt. A tölgy mintákban megmaradt minimális vízmennyiség ugyan csökkenthette valamelyest a tejsav-oligomer felvételi képességet, azonban nem akadályozhatta azt olyan jelentős mértékben, hogy a 3.53.d ábrán láthatóan egyáltalán ne legyen képes a telítőanyag a faanyagba jutni. Ez a jelenség tipikus a nagymértékben tíliszesedő fafajokra. A nedvességszállító járatokban a már említett tömítő hárttyák zárják el a folyadékok útját, ezzel téve a faanyagot időjárásállóvá és egyúttal gyakorlatilag telíthetetlenné. A vizsgálatok alapján tehát a tejsav-oligomerek molekulamérete túl nagy ahhoz, hogy még jelentős vákuum alkalmazása mellett is a tíliszes tölgybe bejuthassanak.



3.53. ábra Natúr (világos színű) és tejsavval kezelt (sötét színű) bükk (a) és tölgy (b) minták. Először a tömörítetlen párok, majd a tömörítettek, valamint ezek keresztmetszeti képei ugyanebben az elrendezésben (c és d) (forrás: Báder és Németh 2019b)

Bükk esetén az anyag bejuttatása nem jelent gondot, melyet a 3.53.c ábra felvételein felül a tömegmérési és a telítés során bekövetkezett méretváltozási adatok is igazolnak. **A telítés hatására bekövetkezett teljes tömegnövekedés (WPG) tömörítetlen bükkfa esetében 73%, míg tömörített bükkfa esetében 64% volt.** A faanyag mérete vízzel való telítés során növekszik, bükk esetében a legnagyobb átlagos növekedés a három fő anatómiai irányban (H, S, R) Molnár és tsai. (2007) szerint rendre 11,8%, 5,8% és 0,3%, míg az elvégzett vizsgálataink alapján rendre 10,9%, 4,4% és 0,2% volt. A nagymértékű tejsavfelvétel hatására a tömörítetlen faanyag méretei a vízzel való telítéshez hasonló mértékben növekedtek, 13,5%, 4,6% és 0,2%-kal, míg a tömörített faanyagnak 13,6%, 4,9% és 1,1%-kal. Természetesen a faanyag sűrűsége is jelentősen magasabb lett: **tömörítetlen faanyag esetén 43%, míg tömörített faanyagnál 36% sűrűségnövekedés következett be, amivel mindkét bükk mintacsoport elérte a 0,94 g/cm<sup>3</sup> sűrűségi értéket.**

Pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgálva megállapítható, hogy a telítő anyagból a bükk faanyag nedvességszállító edényeibe jutott nagyobb mennyiség, de a rostüregbe is került (3.54. ábra).



3.54. ábra Pásztázó elektronmikroszkóppal készült felvételek a 4 vizsgált bükk minta-típusról: kezeletlen (a), rostirányban tömörített (b), tejsavval telített (c), tömörített és tejsavval telített (d). Keresztmetszeti képek, rajtuk a szerkezet fő alkotói (farostok, edények, bélsugarak) láthatók (Báder és Németh 2019b alapján)

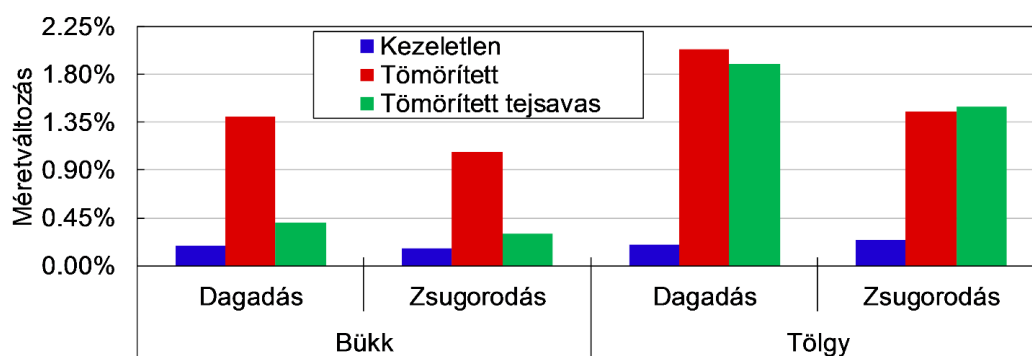
Továbbá megállapítható, hogy a polimerizáció nem ment végbe a teljes tejsav-oligomer anyagmennyiségnél, mert a felvételek készítésekor alkalmazott erős vákuum a faanyag üregeiből szabad folyadékcspepeket juttatott a bütüfelszínre, mely buborékokat alkotott, vagy szétterült a felületen (3.54.c és 3.54.d ábra). A tejsavval telített faanyag érintése ugyan kissé műanyagos hatású, de az optikai javulás mellett ezt a hibát kiküszöböli a felületkezelés, ami szinte minden esetben megtörténik a késztermékek gyártása során.

**Áztatás során a telítő anyag kimosódása következett be, ami nincs hatással a bemutatott eredményekre, az  $ASE_{\alpha}$  és az  $ASE_{\beta}$  javulására.** Ennek az az oka, hogy a kimosódás a telítést követően polimerizált tejsav-frakciókat csupán minimálisan érinti Noël és tsai. (2015) és a nem polimerizálódott részeket mossa ki a víz. Utóbbi elemek viszont sem fizikai, sem kémiai kötással nem kapcsolódnak sem a faanyaghoz, sem egymáshoz, tehát a minták tulajdonságaira nem gyakorolhatnak szignifikáns hatást. Az áztatási metódus eredményeit a 3.18. táblázat tartalmazza.

A táblázatból kiderül, hogy a kezeletlen és a rostirányban tömörített minták húr- és sugárirányú dagadása és zsugorodása közel azonos. A térfogati változások sem térnek el jelentősen, amint az a 3.9.2. fejezetben is megállapításra került. A 3.18. táblázat adatai közül érdemes külön kiemelni a rostirányú méretváltozásokat. A rostirányú tömörítés következtében meggyűrődött sejtfalak az áztatás során a memória-hatásnak megfelelően megpróbálnak kiegyenesedni, ahogy eredeti állapotukban voltak. Ennek köszönhető a nagymértékű, közel nagyságrendi változás a dagadási és a zsugorodási értékekben, valamint ez okozza a rostirányban tömörített faanyag megbízhatatlanságát változó nedvességtartalmi körülmények között (3.55. ábra).

3.18. táblázat *Dagadási és zsugorodási vizsgálatok eredményei bükk és tölgy faanyagok esetében a három fő anatómiai irányban (húr – T, sugár - R és rost - L) és térfogatilag (V) (forrás: Báder és Németh 2019b). Rövidítések:  $\alpha$  – dagadási együttható;  $\beta$  – zsugorodási együttható*

		Dagadás				Zsugorodás			
		$\alpha_R$	$\alpha_T$	$\alpha_L$	$\alpha_V$	$\beta_{R2}$	$\beta_{T2}$	$\beta_{L2}$	$\beta_{V2}$
Bükk	Kezeletlen	4.4%	10.9%	0.2%	15.9%	4.6%	10.6%	0.2%	14.9%
	Tömörített	4.9%	12.0%	1.4%	19.1%	5.0%	11.4%	1.1%	16.7%
	Tömörített tejsavas	2.2%	5.1%	0.4%	7.5%	2.0%	5.1%	0.3%	6.1%
Tölgy	Kezeletlen	6.1%	14.0%	0.2%	21.2%	6.2%	12.2%	0.2%	17.9%
	Tömörített	6.3%	13.1%	2.0%	22.7%	6.3%	11.6%	1.5%	18.4%
	Tömörített tejsavas	6.2%	12.8%	1.9%	22.5%	6.1%	11.8%	1.5%	18.2%



3.55. ábra *Dagadási és zsugorodási vizsgálatok eredményei bükk és tölgy faanyagok rostirányában (forrás: Báder és Németh 2019b)*

**Tölgy fajtánál a korábban leírtak szerint az impregnálás nem volt kivitelezhető, tehát a tejsavas kezelésnek nem lehetett jelentős hatása.** A tömörítés következtében a rostirányú mértváltozás közel nagyságrendileg megnőtt, amit a tejsavas kezelés nem tudott szignifikánsan befolyásolni (3.55. ábra). **Bükk fafaj esetében azonban jelentősen mérséklődött a rostirányú dagadás és zsugorodás.** Bár a kezeletlen faanyag szintjére nem sikerült ezen értékeket visszaszorítani, de megközelítették azokat. **Mindeközben a keresztirányú dagadási és zsugorodási értékeket éppúgy, mint a térfogatit kevesebb, mint felére csökkentette a kezelés.** A tejsavas impregnálás tehát sikeres volt, a jövőben alkalmazható lesz akár kezeletlen, vagy egyéb eljárással modifikált, telíthető faanyagok dimenzió-stabilitásának javítására.

Kémia szempontból a leglényegesebb változás a faanyagba jutó tejsav mennyisége és ennek az áztatás után a faanyagban maradó hányada. Mivel a nem polimerizálódott tejsav jelentős része nem tud a faanyagban maradni a vízben áztatás során és a faanyag tulajdonságaira sincs kimutatható hatással, ezért célszerű csakis a polimerizálódott részt hatékony mennyiségnek tekinteni, azaz az áztatás után megmaradt tejsav-polimer tömeggel, mint funkcionális összetevővel számolni. A faanyag kémiai összetétele a kezelése során többször megváltozott, de végeredményként egy továbbra is környezetbarát terméket kaptunk.

## 4. Összefoglalás

A huszadik század elején kidolgoztak egy fahajlítási módszert, amely egyszerűsíteni és egyúttal javítani hivatott az akkorra már világszerte ismertté vált gőzöléses Thonet-technológiát. A rostirányú tömörítés segítségével a faanyag kisebb sugárba hajlítható, és a klasszikus lágyított faanyaghoz képest jobban bírja a többirányú hajlítást és csavarást. Az első szabadalmat 1917-ben jegyezték be, amely tartalmazta a folyamat alapelveit. Manapság már létezik a modern kor vívmányait felhasználó ipari technológia a sorozatgyártáshoz.

A rostirányú tömörítéshez és hajlításhoz egészséges keményfa-egyedekből származó, kiváló minőségű, egyenletes felépítésű alapanyagra van szükség közepes, vagy magas sűrűséggel. A legkevesebb 20% nedvességtartalmú faanyag lágyítása után a hőmérsékletet teljes keresztmetszetben meg kell tartani az összenyomás során. A rostirányú nyomás a faanyag kihajlását okozná, amit a tömörítő eszköz megakadályoz. A tömöríthető fafajok az eredeti hosszukhoz képest 10-30%-kal összenyomhatók, a végtermékkel szemben támasztott igényektől függően. Általában 20%-os tömörítési arányt alkalmaznak. A faanyag tömörítés után visszarugózik, a maradandó rövidülése 3-5%. Ha a faanyagot tömörített állapotában rögzítjük (fixálás) és lehűl, a visszarugás sokkal kisebb lesz. Tömörítés után a faanyag azonnal alkalmas hajlításra, de szükség esetén megfelelő körülmények között tárolható is. Annak érdekében, hogy a munkadarab megtartsa a kívánt formát, sablonra kell hajlítani és szárítás után a tetszőleges ideig megőrzi beállított alakját, továbbá normál faanyagként továbbmunkálható lesz. Az alkalmazási területei a bútorgyártás, a belsőépítészet, a sport- és hangszergyártás, a modellezés, a képzőművészet, a restaurálás, stb. A késztermék hajlítási sugarán még kissé lehet változtatni. A termék környezetbarát, nem tartalmaz vegyi adalékanyagokat.

A rostirányú tömörítés felére-harmadára csökkenti a rugalmassági modulust, egyharmaddal-felé pedig a hajlítószilárdságot. A törésig elnyelt energia megsokszorozódik, így a tömörített faanyag viszkoelasztikusabban viselkedik, mint a kezeletlen faanyag. A modifikációtól függően a sűrűség az eredeti marad, vagy növekszik, és mindenképpen kisebb erő szükséges a hajlításhoz. Az ütő-törő szilárdság megháromszorozódik, a fajlagos ütőmunka szintén növekszik, mert a tömörített faanyag kevésbé merev, mint a kezeletlen faanyag. A rostirányú alakváltozási képesség (nyújthatóság) növekszik, ezzel együtt a meghibásodás előtti alakváltozás is jelentősen megnő. Tömörítés és szárítás után a faanyag statikus szilárdsági tulajdonságai gyengébbek lesznek, miközben dinamikus tulajdonságai javulnak.

Szinte az összes sejtfa a plisszé-árnyékolókhöz hasonlóan hullámosná válik már a 15%-os tömörítési arány elérésekor. A rostszerkezet változásán kívül a mechanikai tulajdonságok változása a plasztifikálódás során bekövetkező ligninkötések gyengülésének és a hemicellulózok részleges átalakulásának is köszönhető. Helytelenül végrehajtott, vagy túlzott tömörítésnél a sejtszinten mutatózó hullámosodás és a nyírési deformációk a teljes keresztmetszetre kiterjednek, ami a faanyag szerkezeti tönkremenetelét jelenti. A megfelelően kivitelezett tömörítés során a sejtfaalak hullámosodnak, de a rostok nem válnak szét, ezáltal biztosítva nyújtási tartalékot a hajlítás során a külső íven. Mikrorepedések alakulnak ki a sejtfaalakban és az intercelluláris terekben, megszakad a folytonosság, ami gyengíti az anyag ellenállását az alkalmazott hajlítóerőkkel szemben.

A laboratóriumban és az iparban tömörítésre kerülő különböző alapanyag hosszok és alkalmazott műveleti idők objektív összehasonlításához a %/min mértékegység bevezetése volt szükséges. A tömörítés relatív sebessége alapvető mértékegységek alkalmazásával fejezi ki, hogy egységnyi idő alatt egységnyi hosszon mennyit rövidül a faanyag. 5 és 30%/min közötti sebességekkel tömörített mintákat vizsgálva a hajlítóvizsgálati eredmények alapján a *MoR* és a hajlítófeszültség változása a növekvő tömörítési sebesség mellett jelentéktelen. A *MoE* kissé növekszik, egyúttal a minta lehajlása a maximális terhelésnél

tölgy esetében 9%-kal, bükk esetében 22%-kal csökken a növekvő tömörítési sebességgel. A hajlékonyság ezzel együtt is többszöröse marad a kezeletlen faanyagénak, így a kezelés hatékonyságát figyelembe véve a magasabb tömörítési sebesség alkalmazása javasolt, főként a kimondottan alacsony sebességek (1-2%/min) mellett jelentkező rossz kihozatal miatt. A kutatásokhoz használt laboratóriumi berendezésnél jellemzően 17-25%/min relatív tömörítési sebességet alkalmazunk.

Az álgesztesség – ideértve az egészséges álgesztet – kissé rontja a rostirányú tömörítés kihozatalát. Ha álgesztesség miatti hiba fordul elő, a legtöbbször rostelválás figyelhető meg. Az álgesztetesedett részek tönkremenetele összefüggésben lehet az álgesztesség által okozott nedvességfelvételi képességromlással. A rostlágnyítás módja (magasabb nyomás, vagy hosszabb időtartam) nincs hatással az álgesztet rész tönkremenetelére.

A fixálási fázisban a préselési erő kezdetben gyorsan csökken, majd a csökkenés fokozatosan egyre lassabbá válik. Tölgy mintáknál az eredeti hosszhoz képest 20% mértékű tömörítés és azonnali elengedés átlagosan 2,49% maradandó rövidülést eredményezett. Hosszú idejű fixálással a maradandó rövidülés eléri a 19-20%-ot. A bükk mintáknak mindig nagyobb a visszarugózása. Egy perces fixálási idő elteltével az anyag tulajdonságainak változása lelassul, ezért, a gazdaságos előállítási időtartam és az alakíthatóság növelésének ideális kombinációjaként 1 perc fixálási idő mindenképpen ajánlott. Ennek eredményeként a maximális alakváltozás a 4 pontos hajlítóvizsgálatok során 353%-ra növekszik, a rugalmassági modulus 37%-ra csökken, míg a hajlítófeszültség 44%-ra csökken a kezeletlen mintákhoz képest. A termékre vonatkozó különleges követelmények teljesítése érdekében mind a tömörítési arány, mind a fixálási időtartam növelhető bizonyos határok között. Hosszú idejű fixálással a minták lehajlási képessége annyira megnövekszik, hogy a hajlítóvizsgálatok során nem törnek el. A fixálás alatt készült idő-nyomófeszültség grafikonokból megállapítható volt, hogy a fixálás első hat órája után már nem változik a nyomófeszültség. A 3 órán, 5 órán és 18 órán keresztül fixált minták eredményeit összehasonlítva megállapítható, hogy felesleges három óránál hosszabban fixálni a faanyagot.

Statisztikailag meghatározott korrelációk alapján, ha ismerjük néhány minta tulajdonságait, nagy biztonsággal megállapíthatjuk az egész populáció hajlíthatóságát a nyomófeszültség változása alapján, már a fixálási folyamat közben. Ezek egyszerű előrejelzési módszerek lehetnek a rostirányban tömörített faanyag későbbi felhasználáshoz, már az előállítás során. A maradandó rövidülés szintén jó korrelációval jelzi a minta alakíthatóságát.

A gőzölés nem okozott eltérést sem a nyomószilárdság, sem a nyomórugalmassági modulus szempontjából. A tömörítés fixálás nélkül kis csökkenést eredményezett a nyomószilárdság értékében, miközben a nyomórugalmassági modulus hozzávetőleg a felére csökkent. Ezen értékek a rövid fixálási időtartam miatt stabilak maradtak, míg a hosszú időtartamú, 18 órás fixálás minimálisan növelte a nyomószilárdságot, egyúttal a kezeletlen értéknek körülbelül ötödére csökkentette a nyomórugalmassági modulusot. Az arányossági határhoz tartozó nyomófeszültségi értékek a kezeletlen és a gőzölt mintáknál minden esetben meghatározhatók voltak, rendre 54,0 és 55,1 MPa. Ugyanez a mechanikai modifikáción átesett mintákról nem mondható el. Ez a rostirányú tömörítés következménye, mivel a faanyag a tömörítési folyamat során a rugalmassági határán túl lett összenyomva.

A rostirányban tömörített mintákban maradó feszültségek csökkentésére egy tömörítést követő 24 órás normál körülmények között töltött időszakot iktattunk be a mintáknak szárítás előtt, hogy pihenhessen a mechanikailag modifikált faanyag. A vizsgálatok elvégzése után nem találtunk különbségeket a pihentetett és a nem pihentetett minták tulajdonságai között, tehát a pihentetés felesleges folyamatnak tekinthető.



Mikroszkópos vizsgálatok alapján kezeletlen faanyagoknál a sejtfalak simák és az összes rész ép (belsőugarak, parenchimák, gödörkék, stb). Rostirányban tömörített mintáknál az edények sértetlennek tűnnek, míg a rostok falai kissé torzultak, faluk enyhén hullámos. A rostirányban tömörített és hosszú időn keresztül fixált minták esetében az edények és a farostok falai egyaránt erősen torzultak. A kisebb rostüregek és a gödörkenyílások (pl. az edények falán) gyakran teljesen eltűnnek. A rostirányban összenyomott és hosszú ideig fixált faanyag jelentősen megváltozott tulajdonságainak oka a sejtfal deformációival magyarázható (a sejtfalak egy plisszé árnyékolóhoz hasonlók lesznek), ezért a folyamatot nevezhetük „redőzésnek”, angolul „pleatingnek”.

Tölgy minták szövetének roncsolásmentes háromdimenziós elemzésére röntgensugaras mikro-komputer-tomográfiát (X $\mu$ CT) használtunk. A X $\mu$ CT bizonyította, hogy az edények vékony falai redőződnek (teleszkópos rövidülés), és kiemelkedéseik egyértelműen a sejttöregbe nyúlnak. A vastag falú rostoknál csak helyi deformációkat tártunk fel a vékony falú parenchima-sejtek közelében. A belsőugar-sejtek mérete a faanyag rostjaival párhuzamosan 25%-ot csökkent. A numerikus elemzés kimutatta, hogy a rostok hossza akár 20%-kal is lerövidülhet a tömörítés és fixálás hatására.

A rostok S2 sejtfalrétege mikrofibrillák szövetéből épül fel. Az atomerő-mikroszkópos felvételek alapján kezeletlen faanyagoknál a rost hossz tengelyével párhuzamosan futnak a mikrofibrillák a sugárirány-rostirány síkjában. Tömörített-fixált mintáknál a mikrofibrillák a tér minden irányában elhajolnak, ezzel a sejtfalak gyengülését okozva. Tölgy- és bükk minták indentációs modulusa a másodlagos sejtfal S2 rétegében, a rostiránnyal párhuzamosan vizsgálva 48%-kal csökken a 20% mértékű rostirányú tömörítést követő hosszú idejű fixálás hatására. Az S2 sejtfalréteg keménysége csak kis mértékben csökken. A teljes alakváltozási munka 14%-kal növekszik, és eltolódik az elasztikus munka irányába a plasztikus deformációs munka rovására. Ebből következően a kezelések nagyobb rugalmasságot és kisebb alakíthatóságot eredményeznek a sejtfalak szintjén. Ultrastukturális szinten a mikrofibrillák irányváltoztatásai csökkentik az indentációs modulus értékét. A makromechanikai változások, amelyek a sejtfalak hosszirányú kihajlásának az eredményei, meghaladják az ellentétes mikromechanikai eredményeket adó mikrofibrilláris változásokat. Tehát a mikrofibrillák gyűrődései és/vagy törései, valamint a sejtfalak kihajlása együttesen magyarázzák mind az indentációs modulus, mind a rugalmassági modulus változásait.

A gőzölési-tömörítési-fixálási folyamatot követően a minták kezdeti nedvességtartalma messze meghaladta a rosttelítettséget. A deszorpció során a kezelt minták mindig gyorsabban elérték az egyensúlyi nedvességtartalmat, mint a kezeletlen minták. A gőzölt és a rostirányban tömörített minták egyensúlyi nedvességtartalma között nem mutatkozott különbség, a hosszú fixálás azonban egyértelműen csökkentette magas páratartalom esetében. Adszorpciónál nem volt különbség a tömörített és a fixált minták nedvességtartalma között. A gőzölés növeli a párafelvételi sebességet. A tömörített és a fixált minták nedvességtartalma a nedvességfelvétel teljes időszakában alacsonyabb volt a kezeletlen mintáknál, legfeljebb 1%-kal.

A minták jelentős részben visszanyerik eredeti hosszukat már a tömörítés utáni pillanatokban (visszarugózás), azonban további 3 percen keresztül még folytatódik a hossznövekedés. Ezt követően a vizsgálatok során két órán keresztül nem változott, majd kissé csökkenni kezdett a minták hossza. A rosttelítettség feletti tartományban 0,4%-os volt a zsugorodás, ami a sejtfalak meggyűrődésének és a mikrorepedések kialakulásának következménye lehet. A gyűrődések a sejtfal felületének növekedését és olyan kémiai kapcsolódási pontok kialakulását okozzák, amelyek korábban nem voltak elérhetőek. A további száradási zsugorodás 1,18% volt, ami többszörös érték a kezeletlen minták zsugorodásához viszonyítva.

A szárított minták nedvesítésekor, a dagadás mellett azonban megjelenik a memória-hatás. A faanyag igyekszik újra kialakítani sejtjeinek eredeti helyzetét, szerkezetét. A keresztmetszeti- és térfogati zsugorodás és dagadás csak kissé térnek el a kezeletlen faanyagokétól, azonban rostirányban jelentős a változás, így utóbbival kiemelten érdemes foglalkozni. A 3. és 4. zsugorodás-dagadási ciklusban állandósulnak az eredmények. A kezeletlen és a gőzölt minták 0,11-0,16% közötti rostirányú dagadással és zsugorodással rendelkeznek. Ugyanez tömörített büknél 0,8%, tömörített tölgyenél 1,3%, míg a tömörített-fixált mintáknál rendre 1,8-2,1% és 2,4-2,7%. Tömörített faanyagoknál elhanyagolható a memória-hatás. A tömörített-fixált bükk és tölgy mintáknál azonban rendre 11,6% és 13,9% a memória-hatás, melyek könnyen meghamisítják a dagadás értékét. Amennyiben az első dagadási ciklus eredményének kiszámításánál nem szabványosan, a korábbi abszolút száraz rostirányú mérettel, hanem a következő ciklus abszolút száraz rostirányú méretével vetjük össze a minta telített rostirányú méretét, megközelítőleg memória-hatástól mentes dagadási eredményt kapunk. Ezzel a számítási módszerrel jelentősen egyszerűsíthető és gyorsítható a zsugorodás-dagadás vizsgálata. A kezeletlen mintákhoz viszonyítva büknél 0,9%-kal, tölgyenél 0,4%-kal kisebb mértékű volt a kimosódás a tömörítés-fixálás hatására.

A faanyag mechanikai tulajdonságai a nedvességtartalommal változnak, a változás mértékét az  $\alpha$  együttható mutatja. A rostirányú tömörítés hatására az  $\alpha$  együttható megváltozik. A rostiránnyal párhuzamos nyomószilárdság mutatja a legkisebb érzékenységet a nedvességtartalom változásaira 3,2%-os  $\alpha$ -értékkel, ezt követi 4,2%-kal a hajlítószilárdság, 5,0%-kal a rugalmassági modulus, majd 5,4%-kal a hajlítófeszültség 4 mm keresztfejl-elmозdulás esetén. A nedvességtartalom növekedésével a hajlíthatósági együttható  $\alpha$ -értéke 4,2%-kal, illetve a négyponos hajlítóvizsgálatnál a legnagyobb alakváltozás 7,6%-kal növekszik.

Kezeletlen, gőzölt, tömörített és fixált bükk és tölgy mintákat vetettünk alá Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiának. A kapott spektrumok alapján változások figyelhetők meg a hidroxil-csoportokban, valamint a poliszacharidok és a lignin C-O és C-H funkciós csoportjaiban. A bükk minták főkomponens-elemzése határozott különbséget mutat a mintacsoportok között. Tölgyenél csak a fixált mintacsoportokat lehet jól elkülöníteni a többitől. Ez bizonyítja, hogy a bükk faanyag érzékenyebben reagál a végrehajtott modifikációs eljárásokra, mint a tölgy. A dekonvolúció a spektrumokban csúcsterület-változásokat és csúcscsúszódásokat tárt fel.

A rostirányban tömörített bükk faanyag sikeres tejsavas telítése következtében annak dagadási és zsugorodási képessége a tér minden irányában jelentősen lecsökkent, azaz a komoly gondokat okozó dimenzió-stabilitási problémákon nagymértékben sikerült javítani. Az eljárás alkalmas lehet ipari méretekben a legkülönbözőbb faanyagok kezelésére a dimenzió-stabilitásuk és egyúttal fizikai tulajdonságaik esetleges javítása érdekében.

A Soproni Egyetemen a rostirányban tömörített faanyagokkal kapcsolatos tudományos ismeretanyag folyamatosan növekszik, a jövőben újabb eredmények megjelenésére lehet számítani különféle publikációk formájában.

## **5. Köszönetnyilvánítás**

Először szüleimet illeti köszönet, mert általuk létezhetek és lehetek olyan, amilyenek mindenki ismer. Folyamatosan mellettem állnak, hál' Istennek a mai napig. Húgom, Anna nagy-fejezetet nyitott új kutatási irányokkal és motivációt adott: megbízott bennem szakdolgozati konzulenseként. Egy új család támogatásával erősít és tart a földi valóságban feleségem, Ági. A barátokra, Szekeres Balázusra, Ónodi Botondra, Szécsi Áronra mindig számíthatok, legyen szó komoly dolgokról vagy vidámabb időtöltésről. Ugyanezen baráti körből Bak Miklóstól sok további segítséget kapok a mindennapi tennivalók terén: kutatási irányok, ötletek, tanácsok.

Fóti Zsuzsa és Fóti Ede irányított vissza a kutatói pályára, majd Ivánovics Gergely önzetlenül adott tanácsokat s szakirodalmat a témában való elmélyedésemhez. Bolgár Tamás segített megtervezni, majd kivitelezte a sok éve kiválóan működő tömörítő berendezést a FAEKA támogatásával. Az elvégzett munka legfőbb oszlopa Németh Róbert professzor, aki apai szeretettel ad tanácsot mindennemű dilemmára és főnökömként is türelmesen gardíroz tevékenységeim közepette, kapcsolati tőkéjével sem fukarkodva. Ábrahám József időről időre kutatási-kivitelezési segítséggel lát el, Horváth Imre mindig készségesen rendelkezésre áll a mintatestek kialakításában. Hofmann Tamásnak szintén hálával tartozom e dolgozat kémiai részeinek ellenőrzéséért éppúgy, mint Kalmár Jánosnak és Szollár Nándornak a matematikai és stilisztikai szemléletű áttekintésért. Komoly elismerés számomra, hogy hallgatók témavezetőjünknek választottak és részt vettek a bemutatott kutatásokban (Karl Ádám, Varga Dániel, Báder Anna, Somogyi Tibor, Szántó Péter, Novák Dominik, Horváth Bíbor Júlia, Vadkerti Tóth Balázs).

Egy mondatba sűrítve mindenkinek, az iméntiekben nem említetteknek is köszönöm a támogatását, akik akár a legkisebb mértékben hozzátettek ezen munkámhoz 😊

## 6. Tézisek

### 1. tézis A fixálás és fizikai-mechanikai hatásai

A fixálás a próbatest tömörítést követő állandó méreten tartása. Megállapítottam, hogy a fixálás felerősíti a tömörítés fizikai-mechanikai hatásait. Kísérleteim alapján a legrövidebb ajánlott fixálási idő 1 perc, amivel a maximális alakváltozás a 4 pontos hajlítóvizsgálatok során 353%-ra növekszik, a rugalmassági modulus 37%-ra és a hajlítófeszültség 44%-ra csökken a kezeletlen mintákhoz viszonyítva. Több órás fixálással a faanyagok lehajlási képessége 600% fölé növekszik (Báder és Németh 2018a). A hosszan, 3 órán, 5 órán és 18 órán keresztül fixált minták eredményei közel megegyeznek.

Továbbá megállapítottam, hogy a fixálás során a nyomófeszültség változása és a maradandó rövidülés jó korrelációval jelzi a minta tulajdonságváltozásainak mértékét (Báder és Németh 2018a).

### 2. tézis Mikromechanikai változások

Rostirányú tömörítés és hosszan tartó fixálás hatására a sejtszintű mechanikai tulajdonságok jelentősen változnak. Méréseim bizonyították, hogy a másodlagos sejtfa S2 rétegének indentációs modulusa 48%-kal csökken, melyet a mikrofibrillák torzulása magyaráz. Az S2 sejtfa rétegben a teljes alakváltozási munka 14%-kal növekszik és az elasztikusság irányába tolódik el (Báder és tsai. 2019).

### 3. tézis Szöveti tulajdonságok

A faanyag visszazugózása a rostirányú tömörítést követő 3 percben lezajlik (Báder és Németh 2020). A tömörítéseim után az edények sértetlennek tünnek, míg a rostfalak enyhén hullámosnak. A hosszan fixált minták esetében az edények- és a rostok falain is erős torzulások jelentek meg, a kisebb rostüreges és a gödörkék gyakran teljesen eltűntek (Báder és Németh 2018a). Hosszú fixálás hatására a sejtfa hullámai a sejtüregbe nyúlnak, de a rostok az edényektől eltérően a vékony falú parenchima-sejtek közelében deformálódnak jelentősen. A bélsugarsejtek magassága 25%-kal csökken és a farostok akár 20%-kal is rövidülhetnek.

### 4. tézis Fa-víz kapcsolatok változásai

A fa-víz kapcsolatok vizsgálata során megállapítottam, hogy a megnövekedett sejtfa felületen kialakult új kémiai kapcsolódási pontok hatására a rosttelítettség feletti tartományban a nedvességtartalom csökkenésével rostirányban 0,4%-ot zsugorodnak a tömörített minták (Báder és Németh 2020). A memória-hatás 10% feletti értékkel jelentkezik a rostirányban tömörített és hosszan fixált minták első rostirányú dagadásánál. Az eredményekből levontam a következtetést, hogy amennyiben az első dagadási érték kiszámításánál nem szabványosan, a korábbi abszolút száraz rostirányú mérettel, hanem a következő ciklus abszolút száraz méretével vetjük össze a minta telített méretét, megközelítőleg memória-hatástól mentes, valós dagadási eredményt kapunk.

Meghatároztam, hogy rostirányú tömörítés után a zsugorodás és dagadás keresztmetszeti- és térfogati változásai nem jelentősek. A rostirányú zsugorodás-dagadás azonban tömörített büknél 0,8%, tömörített tölgyenél 1,3%, tömörített-fixált mintáknál rendre 1,8-2,1% és 2,4-2,7%.

A faanyag mechanikai tulajdonságai a nedvességtartalommal változnak és bizonyítottam, hogy a rostirányban tömörített faanyagnál a változás mértéke esetenként jelentősen eltér a kezeletlen faanyagokétól. A lehető legjobb alakíthatóság érdekében a rostirányban tömörített faanyag nedvességtartalmának közel kell lennie a rosttelítettségi ponthoz (Báder és Németh 2019a).

### **5. tézis Különböző tömörítési sebességek hatása és az álgesztes faanyag alkalmazhatósága**

A különböző hosszúságú minták rostirányú tömörítési sebességének összehasonlításához a relatív tömörítési sebesség bevezetésének szükségességét állapítottam meg [%/min], ami alapvető mértékegységek alkalmazásával fejezi ki, hogy egységnyi idő alatt egységnyi hosszban mennyit rövidül a faanyag. Bizonyítottam, hogy a túl alacsony sebességű tömörítés éppúgy rontja a kihozatalt, mint az álgeszt. Makroszkopikusan megjelenő hiba esetén mindig az álgesztes rész károsodik először és a legtöbb esetben bélsugármenti repedések figyelhetők meg (Báder és Németh 2017e).

### **6. tézis Kémiai vizsgálat, a funkciós csoportok változásai**

A mintáim infravörös spektroszkópos vizsgálata alapján a kezeletlenhez képest a gőzölt, a tömörített és a tömörített-hosszan fixáltakban megváltoztak a hidroxil-csoportok, valamint a poliszacharidok és a lignin C-O és C-H funkciós csoportjai. A spektrumok alapján minden bükk mintacsoport különválasztható, tölgy esetében azonban csak a hosszban fixált csoport. A bükk faanyag érzékenyebben reagál az elvégzett modifikációkra (Báder és tsai. 2020).

### **7. tézis Rostirányban tömörített faanyag dimenzió-stabilitásának javítása**

Meghatároztam, hogy a rostirányú tömörítés megtöbbszörözi a faanyagok nedvességtartalom-változás hatására bekövetkező rostirányú méretváltozását. Bükk faanyagot tejsavval telítve, majd a tejsavat *in situ* polimerizálva sikerült jelentősen javítanom a dimenzió-stabilitást, miközben minden alkotó biológiai úton lebomló maradt. A tömörített bükk faanyag tejsavas kezelése után annak rostirányú dagadása és zsugorodása megközelíti a kezeletlen faanyagét, míg a keresztirányú és térfogati dimenzió-stabilitási értékek több, mint duplájukra javultak (Báder és Németh 2019b).

## 7. Szabványjegyzék

EN 408 (2010) + A1 (2012)	Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties
ISO 13061-1 (2014)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 01: Determination of moisture content for physical and mechanical tests
ISO 13061-3 (2014)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 03: Determination of ultimate strength in static bending
ISO 13061-4 (2014)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 04: Determination of modulus of elasticity in static bending
ISO 13061-13 (2016)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 13: Determination of radial and tangential shrinkage
ISO 13061-14 (2016)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 14: Determination of volumetric shrinkage
ISO 13061-15 (2017)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 15: Determination of radial and tangential swelling
ISO 13061-16 (2017)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 16: Determination of volumetric swelling
ISO 13061-17 (2017)	Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 17: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain
MSZ 6786-2 (1988)	Faanyagvizsgálatok. Nedvességtartalom meghatározása
MSZ 6786-5 (2004)	Faanyagvizsgálatok. Faanyagok statikus hajlítószilárdságának meghatározása
MSZ 6786-8 (2004)	Faanyagvizsgálatok. Faanyagok rostirányú nyomószilárdságának meghatározása
MSZ 6786-9 (1989)	Faanyagvizsgálatok. A dagadás meghatározása
MSZ 6786-15 (2004)	Faanyagvizsgálatok. Rugalmassági együttható meghatározása statikus hajlítással
MSZ 6786-18 (1989)	Faanyagvizsgálatok. A zsugorodás meghatározása



## 8. Irodalomjegyzék

- 1stbids (2019) Early 18th century english windsor chair.  
[https://www.1stdibs.com/furniture/seating/windsor-chairs/early-18th-century-english-windsor-chair/id-f\\_7294183/](https://www.1stdibs.com/furniture/seating/windsor-chairs/early-18th-century-english-windsor-chair/id-f_7294183/)> Megtekintve: 2019.01.10.
- Abe K, Yamamoto H (2006) Change in mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall induced by hygrothermal treatment. *Journal of Wood Science* 52:107–110. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0738-3>
- Ábrahám J, Németh R, Molnár S (2010) Thermo-mechanical densification of Pannónia Poplar. In: Proceedings of the final conference of COST Action E53: Quality control for wood and wood products, pp 282–292
- Afseth N, Kohler A (2012) Extended multiplicative signal correction in vibrational spectroscopy, a tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 117:92–99. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2012.03.004>
- Alpár T (2011) Faalapú lemezek. Egyetemi jegyzet, 706 p.
- Ansell MP (2011) Wood - a 45th anniversary review of JMS papers. Part 1: The wood cell wall and mechanical properties. *Journal of Materials Science* 46:7357–7368. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5856-2>
- Anssary EA (2006) An approach to support the design process considering technological possibilities. PhD disszertáció, University of Duisburg-Essen, Department of Art and Design
- Ashby MF (2005) Materials selection in mechanical design, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, Amsterdam, Boston
- Ashby MF, Jones DRH (1996) Engineering materials 1 - An introduction to their properties & applications, 2. ed. Butterworth-Heinemann, Oxford
- Ashby MF, Jones DRH (2003) Engineering materials 1 - An introduction to their properties & applications, 2. ed., reprinted. Butterworth-Heinemann, Oxford
- Báder M (2015a) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése - 1. rész: Az alapanyagok és előkészítésük, a tömörítés elmélete. *Faipar* 63:1–9. <https://doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.8>
- Báder M (2015b) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése - 3. rész: A tömörített fa mechanikai tulajdonságai, felhasználási lehetőségei. *Faipar* 63:52–65. <https://doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.2.53>
- Báder M, Németh R (2016) The solid wood crushing's conditions. In: Teischinger A, Németh R, Rademacher P, Bak M, Fodor F (eds) Eco-efficient resource wood with special focus on hardwoods. Nyugat-magyarországi Egyetem, p 120
- Báder M, Németh R (2017a) Faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei - 1. rész. *Gradus* 4:403–411
- Báder M, Németh R (2017b) Hygroscopicity of longitudinally compressed wood. *Acta Silv et Lignaria Hungarica* 13:135–144. <https://doi.org/10.1515/aslh-2017-0010>
- Báder M, Németh R (2017c) Faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei - 3. rész. *Gradus* 4:419–425
- Báder M, Németh R (2017d) Mechanical characterisation of accordionisated wood, effect of relaxation conditions. *Pro Ligno* 13:63–70
- Báder M, Németh R (2017e) Faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei - 2. rész. *Gradus* 4:412–418
- Báder M, Németh R (2018a) The effect of the relaxation time on the mechanical properties of longitudinally compressed wood. *Wood Res* 63:383–398
- Báder M, Németh R (2018b) Production technology and properties of longitudinally compressed wood. In: Župčić I, Španić N (eds) Proceedings of the 29th International Conference on Wood Science and Technology. University of Zagreb - Faculty of Forestry, Zagreb, Croatia, pp 35–43

- Báder M, Németh R (2018c) The effect of the rate of longitudinal compression on selected wood properties. *Acta Silv et Lignaria Hungarica* 14:83–92
- Báder M, Németh R (2019a) Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood. *Eur J Wood Prod* 77:1009–1019. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01448-1>
- Báder M, Németh R (2019b) Hosszirányban tömörített faanyagok kezelése tejsavval. *Gradus* 6:59–66
- Báder M, Németh R (2020) Spring-back of wood after longitudinal compression. In: 6th International Conference on Environment and Renewable Energy (ICERE). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 505:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012018>
- Báder M, Németh R, Ábrahám J (2015) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése - 2. rész: Történelem és szabadalmak. A tömörítési folyamat tulajdonságai és a tömörítést követő eljárások. *Faipar* 63:10–20. <https://doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.8>
- Báder M, Németh R, Konnerth J (2019) Micromechanical properties of longitudinally compressed wood. *Eur J Wood Prod* 77:11. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01392-0>
- Báder M, Németh R, Sandak J, Sandak A (2020) FTIR analysis of chemical changes in wood induced by steaming and longitudinal compression. *Cellulose* 27:6811–6829. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03131-8>
- Báder M, Radim R (2018) Combined longitudinal and transversal compression of beech wood. In: Németh R, Teischinger A, Rademacher P, Bak M, Fodor F (eds) *Hardwood Conference Proceedings Volume 8*. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron, pp 46-47
- Bak M (2012) Növényi olajokban hőkezelt nyár faanyag tulajdonságainak vizsgálata. PhD disszertáció, Nyugat-magyarországi Egyetem
- Bakos Z (1993) A fa tömörítésének hatása a fa hajlítására. Szakdolgozat, Erdészeti és Faipari Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
- Bátori K (2000) A fa tömörítése és alkalmazási területei. Szakdolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
- Beasley M, Bartelink E, Taylor L, Miller R (2014) Comparison of transmission FTIR, ATR, and DRIFT spectra: implications for assessment of bone bioapatite diagenesis. *Journal of Archaeological Science* 46:16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.03.008>
- Bennett RG (1956) *Handbook of hardwoods*, Forest Products Research, Department of Scientific and Industrial Research. Her Majesty's Stationery Office, London, UK
- Bila SC (2012) Arm piece jewel. <<https://www.notjustalabel.com/designer/stephanie-chloe-bila?collection=148787>> Megtekintve: 2018.02.20.
- Bio-Textima Kft. (2015) Mattress with wood coil springs. <[http://vitalwood.hu/vitalwood-premium-selection\\_matrac.php](http://vitalwood.hu/vitalwood-premium-selection_matrac.php)> Megtekintve: 2015.09.26.
- Biró B (2012) A bükk álgesztenedés vizsgálata a Somogyi Erdészeti és Faipari Részvénytársaság erdőállományaiban. PhD disszertáció, Nyugat-magyarországi Egyetem
- Blankenstein C (1956) *Holztechnisches Taschenbuch*. Carl Hanser Verlag, München, Germany
- Bodîrlău R, Teacă CA, Spiridon I (2008) Chemical modification of beech wood: effect on thermal stability. *BioRes* 3:789–800
- Britannica (2020) Accordion. <<https://www.britannica.com/art/accordion>> Megtekintve: 2020.08.23.
- Brodersen CR (2013) Visualizing wood anatomy in three dimensions with high-resolution X-ray micro-tomography ( $\mu$ CT) – a review –. *IAWA J* 34:408–424. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000033>

- Brownell BE (2012) *Material strategies: innovative applications in architecture*, 1st ed. Princeton Architectural Press, New York, NY
- Brownell BE (2006) *Transmaterial: a catalog of materials that redefine our physical environment*. Princeton Architectural Press, New York
- Buchter J, Adelhoej J, Ljoerring J, Hansen O (1993) *Introducing Compressed Wood*. Danish Technological Institute, Department of Wood and Furniture, Taastrup, Denmark
- Butterfield BG, Meylan BA, Peszlen IM (1997) *A fatest háromdimenziós szerkezete: three-dimensional structure of wood: Hungarian edition*. Budapest
- Candidus Prugger Llp (2017) Shoe insoles. <<http://www.bendywood-insole.com/it.html>> Megtekintve: 2018.02.20.
- Candidus Prugger Llp (2020) Rosetta RR47 <<http://www.candidus-prugger.com/it/prodotti/rosette/rosette-rotonde-grandi/rr47.html>> Megtekintve: 2020.04.16.
- Cao Y, Jiang J, Lu J, Huang R, Jiang J, Wu Y (2012) Color change of Chinese fir through steam-heat treatment. *BioRes* 7:2809–2819
- Carlquist SJ (1988) *Comparative wood anatomy: systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood*. Springer-Verlag, Berlin; New York
- Chillida JV (2016) *La recepción de las sillas núm. 14 de hermanos Thonet y núm. 30 de Jacob & Josef Kohn en Barcelona: examen comparativo*. Design History Foundation, Barcelona, Spain
- Compwood Machines Ltd (2001) *Advanced wood bending technology - Compressed hardwood for easy and cold bending*. Slagelse, Denmark, 4 p
- Compwood Machines Ltd (2008) *English manual*. Slagelse, Denmark, 33 p
- Compwood Machines Ltd (2019a) FullSizeRender. <<http://compwood.com/wp-content/uploads/2016/04/FullSizeRender.jpg>> Megtekintve: 2019.02.03.
- Compwood Machines Ltd (2019b) *The process*. <<http://compwood.com/processen/>> Megtekintve: 2019.02.03.
- Conradsson P (2007) *Forma komprimerat trä*. Carl Malmsten Centrum för Träteknik & Design, Stockholm, Sweden
- Cortez J, Demard JM, Bottner P, Jocteur Monrozier L (1996) Decomposition of Mediterranean leaf litters: a microcosm experiment investigating relationships between decomposition rates and litter quality. *Soil Biol Biochem* 28:443–452
- Costa JC, Branco JM, Camoes A (2019) Thermal modification of most representative Portuguese wood species. A Prelima Study. *J Constr* 18:488–500. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.3.488>
- Curtis JR (1948) *Method of making shuttle blocks*. United States Patent Office, No.2586308
- Da Silva A, Kyriakides S (2007) Compressive response and failure of balsa wood. *International J of Solids and Structures* 44:8685–8717. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.07.003>
- Deibl H-J, Illhardt J, Walter H-J (1999) *Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen aus biegbarem Holz*. Deutsches Patent- und Markenamt, No. DE19913775 A1
- Delorme A, Verhoff S (1975) Zellwanddeformationen in sturmgeschädigtem Fichtenholz unter dem Rasterelektronenmikroskop. *Holz als Roh- und Werkstoff* 33:456–460. <https://doi.org/10.1007/BF02770103>
- Dienes Z (2013) *Terméktervezés tömörített faanyag felhasználásával*. Szakdolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
- Dinwoodie JM (1971) *Wood. Composites* 2:170–172
- Divós F, Göncz B (2015) *Bükk (Fagus sylvatica) álgeszt kimutatása elektromos feszültség-és ellenállásméréssel*. *Faipar* 63:29–35

- Dömény J, Čermák P, Koiš V, Tippner J, Rousek R (2018) Density profile and microstructural analysis of densified beech wood (*Fagus sylvatica* L.) plasticized by microwave treatment. *Eur J Wood Prod* 76:105–111. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1173-z>
- Donaldson L, Radotić K, Kalauzi A, Djikanović D, Jeremić M (2010) Quantification of compression wood severity in tracheids of *Pinus radiata* D. Don using confocal fluorescence imaging and spectral deconvolution. *Journal of Structural Biology* 169:106–115. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2009.09.006>
- Dósa J, Szabó I, Szemerey T, Németh K, Molnárné Posch P, Matlák Z (2002) A faanyag műszaki tulajdonságai. In: Molnárné Posch P (ed) *Faipari kézikönyv II. Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, Hungary*, pp 56–60
- Dresdner M (2018) Rainy day uke. <http://www.puretimber.com/music/> Megtekintve: 2018.02.20.
- Earles JM, Knipfer T, Tixier A, Orozco J, Reyes C, Zwieniecki MA, Brodersen CR, McElrone AJ (2018) In vivo quantification of plant starch reserves at micrometer resolution using X-ray microCT imaging and machine learning. *New Phytol* 218:1260–1269. <https://doi.org/10.1111/nph.15068>
- Eckardt GL (2013) Térhatároló idom. Magyar Szabadalmi Hivatal No. 230311 B1
- Eder M, Arnould O, Dunlop JWC, Hornatowska J, Salmén L (2013) Experimental micromechanical characterisation of wood cell walls. *Wood Science and Technology* 47:163–182. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0515-6>
- Engelund ET, Thygesen LG, Svensson S, Hill CAS (2013) A critical discussion of the physics of wood–water interactions. *Wood Sci and Technol* 47:141–161. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0514-7>
- Esteves B, Pereira H (2009) Wood modification by heat treatment: a review. *BioRes* 4:370–404
- Evert RF (2006) *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA
- Faix O (1991) Classification of lignins from different botanical origins by FT-IR spectroscopy. *Holzforschung* 45:21–27
- Fehér S, Komán S, Börcsök Z, Taschner R (2014) Modification of hardwood veneers by heat treatment for enhanced colors. *BioResources* 9:3456–3465
- Ferrari S, Cuccui I, Allegretti O (2013) Thermo-vacuum modification of some european softwood and hardwood species treated at different conditions. *Biores* 8:1100–1109
- Fiserová M, Opálená E, Illa A (2013) Comparative study of hemicelluloses extraction from beech and oak wood. *Wood Res* 58:543–554
- Fluted Beams Llc (2008) Curved Kitchen Island. <http://www.woodweb.com/galleries/project/posts/1298.html> Megtekintve: 2018.02.18.
- Fratzl P, Weinkamer R (2007) Nature's hierarchical materials. *Progress in Materials Science* 52:1263–1334. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.06.001>
- Gaff M, Gašparík M, Borůvka V, Haviarová E (2015) Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. *Mater & Des* 87:1065–1071. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.128>
- Gaff M, Vokatý V, Babiak M, Bal BC (2016) Coefficient of wood bendability as a function of selected factors. *Construction and Building Materials* 126:632–640. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085>
- Gallagher NB, Blake TA, Gassman PL (2005) Application of extended inverse scatter correction to mid-infrared reflectance spectra of soil. *J Chemometr* 19:271–281. <https://doi.org/10.1002/cem.929>
- Gerhards CC (1980) Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber* 14:4–36



- Gierlinger N, Goswami L, Schmidt M, Burgert I, Coutand C, Rogge T, Schwanninger M (2008) In situ FT-IR microscopic study on enzymatic treatment of poplar wood crosssections. *Biomacromol* 9:2194–2201
- Gindl W, Schöberl T (2004) The significance of the elastic modulus of wood cell walls obtained from nanoindentation measurements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35:1345–1349. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.04.002>
- Gindl W, Teischinger A (2002) Axial compression strength of Norway spruce related to structural variability and lignin content. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33:1623–1628. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00182-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00182-3)
- Glass SV, Zelinka SL (2010) Moisture relations and physical properties of wood. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wi, U.S.A.
- Gorbacheva G, Sanaev VG, Belkovskiy S (2016) Characterization of specific wood surface at shape memory effect. *Forestry Engineering Journal* 6:79–83. <https://doi.org/10.12737/21683>
- Gorbacheva G, Ugolev BN, Sanaev VG, Belkovskiy SY, Gorbachev SA (2015) Methods of characterization of memory effect of wood. *Pro Ligno* 11:65–72
- Gorbacheva GA, Tarasov MV, Smirnov DV, Sanaev VG (2019) Shape memory effect of mycologically destroyed wood. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci* 226:1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012035>
- Greenspan L (1977) Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *J of Res of the Natl Bur of Standards - A Phys and Chem* 81:89–96
- Guo X, Wu Y, Yan N (2018) In situ micro-FTIR observation of molecular association of adsorbed water with heat-treated wood. *Wood Science and Technology* 52:971–985. <https://doi.org/10.1007/s00226-018-1020-3>
- Hanemann M (1917a) Holzaufbereitungsverfahren. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 318197
- Hanemann M (1917b) Holzaufbereitungsverfahren - Zusatz zum Patent 318197. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 321629
- Hanemann M (1920) Processes for making wood everlastingly flexible. US Patent Office No. 1 457 974
- Harrison D (2012) The Homelife Blog - Wacky ways with wood. <http://www.homelife.com.au/lifestyle/blogs/wacky-ways-with-wood> Megtekinve: 2018.02.18.
- Hayden HW, Moffatt WG, Wulff J (1965) The structure and properties of materials Vol. III: Mechanical Behavior. John Wiley and Sons, New York
- Hein P, Brancheriau L (2018) Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. *Maderas, Cienc tecnol* 20:333–342. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005003401>
- Heisel U, Eggert OT (1990) Plastifizierung von Bugholz mit Hochfrequenz oder Wasserdampf. *Die Holzbearbeitung* 37:18–26
- Helińska-Raczkowska L, Fabisiak E (1991) Radial variation and growth rate in the length of the axial elements of sessile oak wood. *IAWA J* 12:257–262. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001254>
- Hernández RE, Passarini L, Koubaa A (2014) Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping process. *Wood Science and Technology* 48:1281–1301. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0673-9>
- Heu C, Berquand A, Elie-Caille C, Nicod L (2012) Glyphosate-induced stiffening of HaCaT keratinocytes, a Peak Force Tapping study on living cells. *Journal of Structural Biology* 178:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2012.02.007>
- Hill CAS (2006) Wood modification: chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons, Chichester, England; Hoboken, NJ

- Hillis WE, Rozsa AN (1978) The softening temperatures of wood. *Holzforschung* 32:68–73
- Hofmann T (2013) *Fakémia - A faanyag kémiai átalakulása*. Egyetemi jegyzet, 43 p.
- Holzveredelung Ltd (1926a) Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von weichbiegsamen Holz. Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 458923
- Holzveredelung Ltd (1926b) Method for make wood bendable (Verfahren zum biegsammachen vom Holz). Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 488765
- Huang S-H, Cortes P, Cantwell WJ (2006) The influence of moisture on the mechanical properties of wood polymer composites. *Journal of Materials Science* 41:5386–5390.
- Hyams M (2008) Can design generate information to aid in technological innovation? An investigation using industry based case studies. Diplomamunka, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Australia
- IAWA Committee (1989) IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *Iawa Bull* 10:219–332
- Ilvessalo-Pfäffli M-S (1995) *Fiber Atlas*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Inoue M, Sekino T, Morooka T, Rowell RM, Norimoto M (2008) Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *J of Tropical Forest Science* 20:273–281
- Ivánovics G (2005) The technology of wood bending nowadays. In: Danyi J, Lévai P, Csabai LSné, Fehér NIné (eds) *AGTEDU 2005*, College of Kecskemét, Hungary, pp 189–193
- Ivánovics G (2006) Strength test of longitudinally compressed wood (Rostirányban tömörített faanyagok szilárdsági vizsgálata). In: Belina K (ed) *AGTEDU 2006*, College of Kecskemét, Hungary, pp 171–176
- Ivánovics G (2008) *Fatömörítő célgép tervezése*. *Gép* 59:56–59
- Ivánovics G (2012) *A nyomott faanyag alakváltozási folyamata*. Kézirat, College of Kecskemét, Hungary, 6 p
- Jäger A, Hofstetter K, Buksnowitz Ch, Gindl-Altmutter W, Konnerth J (2011) Identification of stiffness tensor components of wood cell walls by means of nanoindentation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42:2101–2109. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.020>
- Jahnel F (2000) *Manual of guitar technology*. The Bold Summer Ltd, Westport, UK
- Jha KK, Suskawang N, Lahiri D, Agarwal A (2012) Energy-based analysis of nanoindentation curves for cementitious materials. *ACI Mater J* 109:81–90
- Jiang Z, Wang H, Tian G, Liu X, Yu Y, Herian VL (2012) Sensitivity of several selected mechanical properties of moso bamboo to moisture content change under fiber saturation point. In: Herian VL (ed) *Proceedings of the 55th International Convention of Society of Wood Science and Technology*. Beijing, China, pp 763–774
- Jouko P (1997) Wood piece and method for supporting it. European Patent Office, No. EP0948685B1
- Kacuráková M, Belton PS, Wilson RH, Hirsch J, Ebringerova A (1998) Hydration properties of xylan-type structures: an FTIR study of xylooligosaccharides. *J Sci Food Agric* 77:38–44
- Kamke FA (2014) *Modified wood for new product opportunities*. Előadás, EWPA-FWPA Symposium, Marriott Resort, Gold Coast, Queensland, Australia
- Kánnár A (2014) *A faanyag makro- és mikro-tönkremeneteli folyamatai*. Palatia Nyomda Kft., Győr
- Kärenlampi PP, Tynjälä P, Ström P (2003) Effect of temperature and compression on the mechanical behavior of steam-treated wood. *Journal of Wood Science* 49:298–304. <https://doi.org/10.1007/s10086-002-0503-9>
- Karl Á (2015) *Laboratóriumi fatömörítő berendezés használati paramétereinek optimalizálása*. Szakdolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
- Khazaei J (2008) Water absorption characteristics of three wood varieties. *Cercetari Agronomice in Moldova* 41:5–16



- Knipfer T, Brodersen CR, Zedan A, Kluepfel DA, McElrone AJ, Phillips N (2015) Patterns of drought-induced embolism formation and spread in living walnut saplings visualized using X-ray microtomography. *Tree Physiol* 35:744–755. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv040>
- Koddenberg T (2019) Three-dimensional X-ray micro-computed tomography imaging for applications to the structural characterization of wood. PhD disszertáció, University of Goettingen. Sierke Verlag, Göttingen. ISBN: 978-3-96548-059-9
- Koddenberg T, Wentzel M, Miltz H (2019) Volumetric estimate of bordered pits in *Pinus sylvestris* based on X-ray tomography and light microscopy imaging. *Micron* 124:102704. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2019.102704>
- Kollmann FFP (1936) *Technologie des Holzes*. Springer-Verlag, Berlin, Germany
- Kollmann FFP (1951) *Technology of woods and wood materials*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany
- Kollmann FFP (1955) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, zweiter Band*. Springer-Verlag, München, Germany
- Kollmann FFP, Coté WA (1968) *Principles of Wood Science and Technology - I - Solid Wood*. Springer-Verlag, New York
- Komáromy G (1999) *A fa hajlításának elméleti alapjai és néhány gyakorlati kérdése*. Szakdolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
- König E (1972) *Holz-Lexikon: Nachschlagewerk für die holzwirtschaftliche Praxis*. Bd. 1: A - M, 2. Auflage. DRW-Verl, Stuttgart
- Konnerth J, Gindl W (2006) Mechanical characterisation of wood-adhesive interphase cell walls by nanoindentation. *Holzforschung* 60: 429–433. <https://doi.org/10.1515/HF.2006.067>
- Konnerth J, Harper D, Lee S-H, Rials T, Gindl W (2008) Adhesive penetration of wood cell walls investigated by scanning thermal microscopy (SThM). *Holzforschung* 62: 91–98. <https://doi.org/10.1515/HF.2008.014>
- Konnerth J, Jäger A, Eberhardsteiner J, Müller U, Gindl W (2006) Elastic properties of adhesive polymers. II. Polymer films and bond lines by means of nanoindentation. *Journal of Applied Polymer Science* 102:1234–1239. <https://doi.org/10.1002/app.24427>
- Korte H, Koch G, Krause KC, Koddenberg T, Siemers S (2018) Wood nails to fix softwoods: characterization of structural deformation and lignin modification. *Eur J Wood Prod* 76:979–988. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1288-x>
- Kossa A (2013) 4-point bending (4-pontos hajlítás). Kézirat, Budapest University of Technology and Economics, Hungary, 3 p
- Kovács Z, Süveg J, Papp T (2006) *Mechanikai megmunkálás II - A fa hajlítása*. Egyetemi jegyzet, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, 80 p
- Krause K, Sauerbier P, Koddenberg T, Krause A (2018) Utilization of recycled material sources for wood-polypropylene composites: effect on internal composite structure, particle characteristics and physico-mechanical properties. *Fibers* 6:86. <https://doi.org/10.3390/fib6040086>
- Kretschmann DE (2010) Mechanical properties of wood. In: Ross RJ (ed) *Wood handbook – Wood as an engineering material*. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wi, U.S.A., 508 p
- Kučera LJ, Bariska M (1982) On the fracture morphology in wood: part 1: A SEM-study of deformations in wood of spruce and aspen upon ultimate axial compression load. *Wood Sci Technol* 16:241–259. <https://doi.org/10.1007/BF00353147>
- Kúdela J, Rousek R, Rademacher P, Rešetka M, Dejmal A (2018) Influence of pressing parameters on dimensional stability and density of compressed beech wood. *Eur J Wood Prod* 76:1241–1252. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1298-8>
- Kuzsella L (2011) *Rostirányú tömörítés hatása a bükk faanyag szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira*. PhD disszertáció, Miskolci Egyetem

- Kuzsella L, Bárczy P, Szabó I (2011) Ősi anyag új feldolgozása, avagy tömörített fából energiatároló rugó. *Bányászati és Kohászati Lapok* 144:40–41
- Kuzsella L, Szabó I (2006) A fa tömörítésének hatása a mechanikai tulajdonságokra. In: Bitay E (ed) XI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka. Kolozsvár, Romania, pp 233–236
- Kyriazidou E, Pesendorfer M (1999) Viennese chairs: a case study for modern industrialization. *The Journal of Economic History* 59:143–166
- Laine K, Segerholm K, Wålinder M, Rautkari L, Hughes M (2016) Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. *Wood Sci Technol* 50:883–894. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0835-z>
- Leal S, Sousa VB, Pereira H (2006) Within and between-tree variation in the biometry of wood rays and fibres in cork oak (*Quercus suber* L.). *Wood Sci Technol* 40:585–597. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0073-x>
- Lehner T (2000) Rocking chair. <<http://www.tina-design-objects.net/compwood.htm>> Megtekintve: 2018.02.20.
- Lei H, Milota MR, Gartner BL (1996) Between- and within-tree variation in the anatomy and specific gravity of wood in oregon white oak (*Quercus Garryana* Dougl.). *IAWA J* 17:445–461. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000642>
- Lenleys (2020) Plissé shades. <<http://www.lenleys.lxmi.co.uk/micro/Plisse.html>> Megtekintve: 2020.08.23.
- Lenth CA, Kamke FA (2001) Moisture dependent softening behavior of wood. *Wood and Fiber Sci* 33:492–507
- Lohmann U (2010) Holzlexikon, 4. Auflage. Nikol Verlagsgesellschaft, Hamburg, Germany
- Lohmann U, Annies T, Ermschel D (1987) Wood-Handbook, 3., völlig überarb. Aufl. DRW-Verl, Leinfelden-Echterdingen
- Magyar-Amerikai Faipari Rt (1927) Eljárás és berendezés hosszabb fahasábok állandó hajlékonyra tételére. Magyar Királyi Szabadalmi Bíróság, No. 96736
- Mahesh S, Kumar P, Ansari SA (2015) A rapid and economical method for the maceration of wood fibers in *Boswellia serrata* Roxb. *Trop Plant Res* 2:108–111
- Mamonová M, Laurová M, Nemcová V (2002) Analysis of structure of beech wood subjected to hydrothermal treatment. In: Kudela D, Kurjatko S (eds) Proceedings of the wood structure and properties '02. Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia, pp 51–55
- Manwiller FG (1974) Fiber lengths in stems and branches of small hardwoods on southern pine sites. *Wood Sci* 7:130–132
- Material Archiv (2018) Patent-Biegeholz (MA-1493). <<http://www.materialarchiv.ch/detail/1493/cms/de/cms/de/cms/de/sponsoren.html#/detail/1493/patent-biegeholz>> Megtekintve: 2018.02.20.
- Mayo SC, Chen F, Evans R (2010) Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. *Journal of Structural Biology* 171:182–188. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.04.001>
- McKinley P, Kamke FA, Sinha A, Andrade VD, Jakes JE (2018) Analysis of adhesive penetration into wood using nano-X-ray computed tomography. *Wood Fiber Sci* 50:66–76
- McLean JP, Jin G, Brennan M, Nieuwoudt MK, Harris PJ (2014) Using NIR and ATR-FTIR spectroscopy to rapidly detect compression wood in *Pinus radiata*. *Canadian Journal of Forest Research* 44:820–830. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0329>
- Meier E (2016) European beech. <<http://www.wood-database.com/european-beech/>> Megtekintve: 2018.01.20.
- Meier E (2019) Sessile oak. <<http://www.wood-database.com/european-beech/>> Megtekintve: 2019.10.09.
- Molnár S (2004) Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, Hungary

- Molnár S, Farkas P, Börcsök Z, Zoltán Gy (2016) Földünk ipari fái. ERFARET Nonprofit Kft., Sopron, Hungary
- Molnár S, Peszlen I, Paukó A (2007) Faanatómia. Szaktudás Kiadó Ház Zrt., Budapest, Hungary
- Molnár S, Varga Fné, Fehér S, Németh R (2000) A faanyag műszaki tulajdonságai. In: Molnár S (ed) Faipari kézikönyv I. Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, Hungary, pp 59–88
- Moosavinejad SM, Madhoushi M, Vakili M, Rasouli D (2019) Evaluation of degradation in chemical compounds of wood in historical buildings using ft-ir and ft-raman vibrational spectroscopy. *Maderas, Cienc tecnol* 21:381–392. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000310>
- Navi P, Pizzi A (2015) Property changes in thermo-hydro-mechanical processing. *Holzforschung* 69:863–873
- Németh R (2002) A hidrotermikus kezelés hatása az akác faanyagának szorpciós tulajdonságaira. PhD disszertáció, Nyugat-magyarországi Egyetem
- Niemz P (1993) *Physics of wood and wood-based materials*. DRW-Verl, Leinfelden-Echterdingen
- Niemz P, Sonderegger WU (2017) *Wood physics: physics of wood and wood-based materials*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München
- Noël M, Grigsby WJ, Volkmer T (2015) Evaluating the extent of bio-polyester polymerization in solid wood by thermogravimetric analysis. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 35:325–336. <https://doi.org/10.1080/02773813.2014.962154>
- Obataya E, Higashihara T (2017) Reversible and irreversible dimensional changes of heat-treated wood during alternate wetting and drying. *Wood Sci Technol* 51:739–749. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0918-5>
- Oliver WC, Pharr GM (1992) An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research* 7:1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
- Olsson A-M, Salmén L (2003) The softening behavior of hemicelluloses related to moisture. In: Gatenholm P, Tenkanen M (eds) *Hemicelluloses: Science and Technology*. American Chemical Society, Washington, DC, pp 184–197
- Oyen ML, Cook RF (2009) A practical guide for analysis of nanoindentation data. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2:396–407. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.10.002>
- Pařil P, Brabec M, Maňák O, Rousek R, Rademacher P, Čermák P, Dejmal A (2014) Comparison of selected physical and mechanical properties of densified beech wood plasticized by ammonia and saturated steam. *Eur J Wood Prod* 72:583–591. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0814-8>
- Paris JL, Kamke FA, Mbachu R, Gibson SK (2014) Phenol formaldehyde adhesives formulated for advanced X-ray imaging in wood-composite bondlines. *J Mater Sci* 49:580–591. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7738-2>
- Peck EC (1957) *Bending solid wood to form*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, U.S.A.
- Pedersen H (1918) Process for making wood lastingly soft and pliable. United States Patent Office, No. 131128
- Peres ML, Gatto DA, Delucis RA, Beltrame R (2013) Vergamento de madeira sólida: quallade de processo e matéria-prima. *Nativa-Agricultural and Environmental Research* 01:56–61
- Podmaniczky MS (2016) Samuel Gragg and the elastic chair. In: Jobe B, Ward GWR (eds) *Boston Furniture 1700-1900*. University of Virginia Press, Charlottesville, VA, USA, pp 195–207

- Poletto M, Dettenborn J, Pistor V, Zeni M, Zattera AJ (2010) Materials produced from plant biomass. Part I: evaluation of thermal stability and pyrolysis of wood. *Materials Res* 13:375–379. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000300016>
- Popescu C-M, Popescu M-C, Singurel G, Vasile C, Argyropoulos DS, Willfor S (2007) Spectral characterization of eucalyptus wood. *Applied Spectroscopy* 61:1168–1177
- Popescu C-M, Singurel G, Popescu M-C, Vasile C, Argyropoulos DS, Willför S (2009) Vibrational spectroscopy and X-ray diffraction methods to establish the differences between hardwood and softwood. *Carbohydrate Polymers* 77:851–857. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.03.011>
- Popescu C-M, Vasile C, Popescu M-C (2006) Degradation of lime wood painting supports II. Spectral characterisation. *Cellulose Chemistry and Technology* 40:649–658
- Poulsen JS, Moran PM, Shih CF, Byskov E (1997) Kink band initiation and band broadening in clear wood under compressive loading. *Mechanics of Materials* 25:67–77. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(96\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(96)00043-9)
- Pouwels AD, Tom A, Eijkel GB, Boon JJ (1987) Characterisation of beech wood and its holocellulose and xylan fractions by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *J Anal Appl Pyrolysis* 11:417–436
- Pure Timber Llc (2018) Compressed planks ready to ship. <http://www.puretimber.com/ready-to-ship/?sort=featured&page=1> Megtekintve: 2018.02.20.
- Qing H, Mishnaevsky L (2011) A 3D multilevel model of damage and strength of wood: Analysis of microstructural effects. *Mechanics of Materials* 43:487–495. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.05.007>
- Q-railing Europe Holding Ltd (2015) Bandywood handrail. <https://www.q-railing.com/en-hu/content/service/assembly-maintenance> Megtekintve: 2015.10.06.
- Rademacher P, Báder M, Németh R, Rousek R, Paril P, Baar J, Hornicek S, Dejmál A, Dömeny J, Kúdela J, Kutnar A, Neyses B, Sandberg D (2017) European co-operation in wood research from native wood to engineered materials, Part 2: Densification modification in product development. In: Gurau L, Campean M, Ispas M (eds) *Proceedings of the International Conference “Wood Science and Engineering in the Third Millenium.” “Transilvania” University of Braşov, Braşov, Romania*, pp 469–478
- Raffield T (2018) Lamp. <http://www.puretimber.com/inspiration/> Megtekintve: 2018.02.20.
- Rasmussen Engineering Ltd (2014) Bendwood Engineering. <http://bendwoodengineering.com/> Megtekintve: 2014.02.13.
- Reinhard C, Wallbaum H, Kristof K (2007) Nimm Holz! Druckerei Lokay, Reinheim, Germany
- Richter A, Ries R, Smith R, Henkel M, Wolf B (2000) Nanoindentation of diamond, graphite and fullerene films. *Diam and Relat Mater* 9:170–184
- Rosenthal M, Bäucker E (2013) Zur Anatomie des Holzes der Weiß-Eichen. *Holz-Zentralblatt* 139:278
- Rowell R, Lange S, McSweeney J, Davis M (2002) Modification of wood fiber using steam. In: Humphrey P (ed) *Proceedings of the 6th pacific rim bio-based composites symposium on the chemical modificaton of cellulotics*. Portland, Oregon, USA, pp 606–615
- Rowell RM, Pettersen R, Han JS, Rowell JS, Tschabalala MA, (2005) Cell wall chemistry. In: Rowell RM (ed) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, pp 35–74
- Roylance D (2008) *Mechanical properties of materials*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge



- Sadatnejad H, Tajvidi M, Yosefi H (2008) Effect of longitudinal compression to bulk cell wall on mechanical properties of steamed treated of beach wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research* 23:191–199
- Sandak A, Allegretti O, Cuccui I, Sandak J, Rosso L, Castro G, Negro F, Cremonini C, Zanuttini R (2016a) Thermo-vacuum modification of poplar veneers and its quality control. *BioResources* 11:10122–10139. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10122-10139>
- Sandak A, Sandak J (2013) A method for verification of the heat sterilization according to ISPM-15. In *Approfondimenti sull'applicazione del trattamento temico (HT) secondo l'ISPM15 in Italia*. Lampi di Stampa, Italy
- Sandak A, Sandak J (2018) Infrared reflectance spectroscopy. In: López Varela S (ed) *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp 1–5
- Sandak A, Sandak J, Allegretti O (2015) Quality control of vacuum thermally modified wood with near infrared spectroscopy. *Vacuum* 114:44–48. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.12.027>
- Sandak J, Sandak A, Meder R (2016b) Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 24:485–505. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1255>
- Sandberg D, Haller P, Navi P (2013) Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering* 8:64–88. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
- Sandberg D, Kutnar A, Mantanis G (2017) Wood modification technologies - a review. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10:895–908.
- Sandberg D, Navi P (2007) Introduction to thermo-hydro-mechanical (THM) wood processing. School of Technology and Design, Växjö University, Växjö, Sweden
- Santos Panero PD, Santos Panero F, Santos Panero J, Bezerra da Silva HE (2013) Application of Extended Multiplicative Signal Correction to Short-Wavelength near Infrared Spectra of Moisture in Marzipan. *JDAIP* 01:30–34.
- Schietzel R (1976) Vergütetes Vollholz. In: Watzke H (ed) *Taschenbuch der Holztechnologie*, 3rd edn. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, Germany, p 966
- Schneider H (1939) *Flugzeug-Typenbuch, Handbuch der deutschen Luftfahrt- und Zubehör-Industrie*. Hermann Beyer Verlag, Leipzig, Germany
- Schniewind A (1989) Thermal degradation. In: Schniewind A (ed) *Concise encyclopedia of wood & wood-based materials*. Pergamon Press, Elmsford, NY, USA, pp 271–273
- Schwanninger M, Rodrigues J, Pereira H, Hinterstoisser B (2004) Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose. *Vibrational Spectroscopy* 36:23–40. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2004.02.003>
- Schweingruber FH, Baas P (2011) *Anatomy of European woods*. Kessel, Remagen-Oberwinter
- Segesdy F (2003) *Modern konyhabútor tervezése tömörített anyag felhasználásával. Diplomamunka, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar*
- Shi J, Avramidis S (2017) Water sorption hysteresis in wood: I. Review and experimental patterns – geometric characteristics of scanning curves. *Holzforschung* 71:307–316.
- Siau JF (1984) *Transport processes in wood*. Springer-Verlag, Berlin, Germany
- Sikora A, Kačík F, Gaff M, Vondrová V, Bubeníková T, Kubovský I (2018) Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. *J Wood Sci* 64:406–416. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1721-0>
- Sitkei Gy (1994) *A faipari műveletek elmélete*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, Hungary
- Skaar C (1988) *Wood-water relations*. Springer-Verlag, Berlin, Germany

- Skarmoutsou A, Lolas G, Charitidis CA, Chatzinikolaidou M, Vamvakaki M, Farsari M (2013) Nanomechanical properties of hybrid coatings for bone tissue engineering. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 25:48–62. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.05.003>
- Smardzewski J (2015) Furniture design. Springer Berlin Heidelberg, New York, NY
- Somogyi T (2018) A különböző tömörítési sebességek és a kétszeri tömörítés hatásainak vizsgálata. Szakdolgozat, Soproni Egyetem
- Song J, Chen C, Zhu S, Zhu M, Dai J, Ray U, Li Y, Kuang Y, Li Y, Quispe N, Yao Y, Gong A, Leiste UH, Bruck HA, Zhu JY, Vellore A, Li H, Minus ML, Jia Z, Martini A, Li T, Hu L (2018) Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature* 554:224–228. <https://doi.org/10.1038/nature25476>
- Sőregi R (2007) Vitorlášhajó kabinbelső kialakítása tömörített fa alkalmazásával. Diplomamunka, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
- 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. Danmark Patentdirektoratet, No. 170364 B1
- Stamm AJ (1964) Wood and cellulose science. Ronald Press, New York, U.S.A.
- Stevens WC, Turner N (1948) Solid and laminated wood bending. Forest Products Research Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research. His Majesty's Stationery Office, London, UK
- Stevens WC, Turner N (1970) Wood bending handbook. Forest Products Research Laboratory. His Majesty's Stationery Office, London, UK
- Svoboda T, Ruman D, Gaff M, Gašparík M, Miftieva E, Dundek L (2015) Bending characteristics of multilayered soft and hardwood materials. *BioResources* 10: 8461–8473. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8461-8473>
- Szabó I (2002) Fahajlítás. In: Molnárné PP (ed) Faipari kézikönyv II. Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, Hungary, pp 60–61
- Szabó I, Eckhardt L, Czél Gy (2005) Energiatároló tömörített farugó. Magyar Szabadalmi Hivatal, No. 226783
- Szczepkowski A, Nicewicz D, Koczon P (2007) The relationship between tree health and chemical composition of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) wood of Polish provenances. *Acta Sci Pol* 6:77–88
- Tabarsa T, Chui YH (2011) Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction. *Wood Fiber Sci* 33:223–232
- Tamer AT, Fauziah AA (2013) Cellulose microfibril angle in wood and its dynamic mechanical significance. In: van De Ven T, Godbout L (eds) Cellulose - Fundamental Aspects. Rijeka, Croatia, pp 113–142
- Taylor FW (1976) Fiber length variation within growth rings of certain angiosperms. *Wood Fiber Sci* 8:116–119
- Thomassen T, Ljorring J, Hansen O (1990) A method and apparatus for compressing a wood sample. World Intellectual Property Organization, No. WO91/02637
- Thurn A (1932) Verfahren zur Herstellung dauernd biegsamen Holzes. Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 636232
- Thurn A, Thurn A (1943) Verfahren zum Herstellen von weichbiegsamen Holz. Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 946479
- Tiemann HD (1906) Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood. U.S. Department of Agriculture, Washington, U.S.A.
- Tiemann HD (1907) The strength of wood as influenced by moisture. U.S. Department of Agriculture, Washington, U.S.A.



- Timar M, Varodi A, Hacibektasoglu M, Campean M (2016) Color and FTIR analysis of chemical changes in beech wood (*Fagus sylvatica* L.) after light streaming and heat treatment in two different environments. *BioRes* 11:8325–8343
- Toivanen T, Alén R (2006) Variations in the chemical composition within pine (*Pinus sylvestris*) trunks determined by diffuse reflectance infrared spectroscopy and chemometrics. *Cellulose* 13:53–61. <https://doi.org/10.1007/s10570-005-9016-1>
- Tokodi LZ (2012) A fa és faalapú anyagok megjelenése és használata a ruházati kultúrában. Szakdolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar
- Tolvaj L, Faix O (1995) Artificial ageing of wood monitored by DRIFT spectroscopy and CIE L\*a\*b\* color measurements. I. Effect of UV light. *Holzforschung* 49:397–404
- Tóth SL (2009) A fa hajlítási technikája - rövid történeti áttekintés. Előadás, 23rd International Congress on the History of Science and Technology Budapest, Hungary
- Trtik P, Dual J, Keunecke D, Mannes D, Niemz P, Stahli P, Kaestner A, Groso A, Stampanoni M (2007) 3D imaging of microstructure of spruce wood. *Journal of Structural Biology* 159:46–55. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2007.02.003>
- Tyree MT, Zimmermann MH (2002) Xylem structure and the ascent of sap. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Tze WTY, Wang S, Rials TG, Pharr GM, Kelley SS (2007) Nanoindentation of wood cell walls: Continuous stiffness and hardness measurements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38:945–953. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.06.018>
- Vadas J (2011) A bútorhajlítás mestere: Michael Thonet. *Szép-Lak* 2011:68–69
- Van Acker J, Hill CAS (2003) Proceedings of the first european conference on wood modification. Ghent University, Laboratory of Wood Technology, Belgium
- Van den Bulcke J, Biziks V, Andersons B, Mahnert K-C, Militz H, Van Loo D, Dierick M, Masschaele B, Boone MN, Brabant L, De Witte Y, Vlassenbroeck J, Van Hoorebeke L, Van Acker J (2013) Potential of X-ray computed tomography for 3D anatomical analysis and microdensitometrical assessment in wood research with focus on wood modification. *Int Wood Prod J* 4:183–190. <https://doi.org/10.1179/2042645313Y.0000000046>
- Volkmer T, Wagenführ A, Buchelt B (2001) Verfahren zur Herstellung von dauernd weichbiegsamen Holz sowie Einrichtung hierzu. Deutsches Patent- und Markenamt, No. 10141391 C1
- Von Vegesack A (2009) Thonet. *Magyar Asztalos és Faipar* 2009:124–125
- Vorreiter L (1949) *Holztechnologisches Handbuch Band I*. Georg Fromme & Co., Wien, Austria
- Vorreiter L (1958) *Holztechnologisches Handbuch Band II: System Holz-Wasser-Wärme, Holz Trocknung, Dämpfen und Kochen, spanlose Holzverformung*. Georg Fromme & Co., Wien, Austria
- Wagenführ R (2007) *Holz atlas*, 6. neu bearb. und erw. Aufl. Fachbuchverl. Leipzig im Hanser Verl, Leipzig
- Wagner L, Bader TK, de Borst K, Eberhardsteiner J (2012) Nanoindentation to study within-tree variability of wood cell wall stiffness. In: Ognjanovic M (ed) *Proceedings of the 29th Danubia-Adria Symposium on Experimental Mechanics*. University of Belgrade, Belgrade, Serbia, pp 8–9
- Waller M (2006) Mobius bench. <http://www.coroflot.com/mikewaller/portfolio1>  
Megtekintve: 2018.02.20.
- Wang S, Lee S-H, Tze WTY, Rials T, Pharr GM (2006) Nanoindentation as a tool for understanding nano-mechanical properties of wood cell wall and biocomposites. In: *Proceedings of International Conference on Nanotechnology for the Forest Products Industry*. Marriott Marquis, Atlanta, Georgia, USA, pp 152–158

- Werner K, Pommer L, Broström M (2014) Thermal decomposition of hemicelluloses. *J Anal Appl Pyrolysis* 110:130–137
- Willems W (2018) Hygroscopic wood moisture: single and dimerized water molecules at hydroxyl-pair sites? *Wood Science and Technology* 52:777–791.
- Winandy JE, Rowell RM (2005) Chemistry of wood strength. In: Rowell RM (ed) *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press, Boca Raton, Fla, U.S.A., p 485
- Winkler A (1999) *Farostlemezek*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, Hungary
- Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C (2007) Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86:1781–1788.
- Zauner M, Keunecke D, Mokso R, Stampanoni M, Niemz P (2012) Synchrotron-based tomographic microscopy (SbTM) of wood: development of a testing device and observation of plastic deformation of uniaxially compressed Norway spruce samples. *Holzforschung* 66:973–979. <https://doi.org/10.1515/hf-2011-0192>
- Zauner M, Stampanoni M, Niemz P (2016) Failure and failure mechanisms of wood during longitudinal compression monitored by synchrotron micro-computed tomography. *Holzforschung* 70:179–185. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0225>
- Zhou X, Wang Y, Wang L, Lv J, Zhao R, Yao L, Chen Z (2017) Cell wall structure and mechanical properties of *Salix Psammophila*. *Wood Res* 62:1–12