

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Faipari és Műszaki Intézet

Hőkezelt Invazív fafajok (*Fraxinus pennsylvanica*, *Acer negundo*) faanyagának jellemzői

Konzulensek:

Dr. Komán Szabolcs
egyetemi docens

Dr. Bak Miklós
tudományos munkatárs

A szakdolgozat készítője:

Szmorad Gergely
faipari mérnök hallgató

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	6
2. Szakirodalmi áttekintés.....	7
2.1. Zöld juhar (<i>Acer negundo</i> L.)	7
2.2. Amerikai kőris (<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh.)	9
2.3. A faanyag degradációja	11
2.3.1. A termikus átalakulások jellemzői és a befolyásoló tényezők	11
2.3.2. A faanyag átalakulása 100-200°C közötti hőmérsékleten.....	12
2.3.3. A cellulóz hőbomlása	13
2.3.4. A poliózok termikus degradációja	14
2.3.5. A lignin hőbomlása	14
2.3.6. Járulékos anyagok szerepe a termikus degradáció során	15
2.4. A termikus modifikáció hatása a faanyag tulajdonságaira	16
2.4.1. A hőkezelés hatása a dimenzióstabilitásra	16
2.4.2. A hőkezelt faanyagok gombaállósága	16
2.4.3. A faanyag szilárdságának változása hőkezelés hatására	17
2.5. Hőkezelt termékek a piacon	18
3. A kezelés és a vizsgálatok módszere	21
3.1. A faanyag hőkezelése	21
3.2. A színmérés	22
3.3. A faanyag sűrűségének meghatározása	23
3.4. A zsugorodás-dagadás meghatározása.....	24
3.5. A hajlító szilárdság és a rugalmassági modulusz vizsgálata.....	27
3.6. Az üté-hajlítószilárdság vizsgálata	30
3.7. A rostokkal párhuzamos nyomószilárdság meghatározása	31
3.8. A gombaállóság meghatározása	32
4. A vizsgálati eredmények kiértékelése	35
4.1. A színmérés eredménye	35
4.2. A színtelítettség és színinger-különbség meghatározása	38
4.3. Tömegveszteség a faanyag hőkezelése során	39

4.4. A faanyag sűrűségének meghatározása	43
4.5. Zsugorodási-dagadási jellemzők	45
4.6. A hajlítoszilárdság és a rugalmassági modulusz vizsgálatának eredményei	50
4.7. Az ütő-hajlítoszilárdság vizsgálat eredményei	53
4.8. A nyomószilárdság-mérés eredményei	54
4.9. A gombaállósági vizsgálat eredményei	56
5. Összefoglalás	59
6. Köszönetnyilvánítás	60
7. Irodalomjegyzék	61

1. Bevezetés

A szakdolgozatom témája invazív fafajok faanyagának hőkezelése, és ezen hőkezelt faanyagok fizikai tulajdonságainak vizsgálata. Azért választottam ezt a témát, mert több dologban is előremutató lehet mind az invazív fafajok felhasználása, mind pedig a termikus modifikáció térnyerése miatt. Az általam választott fafajok nem őshonosak, és invazívak, tehát jó alkalmazkodó képességűek. Ez lehetővé teszi, hogy felülkerekedjenek az élőhelyért vívott versenyben a hazánkra jellemző növénytársulások őshonos fajaival szemben. A vizsgálat tárgyát képező zöld juhart és az amerikai kőrist is gyakran ültették az alföldeken és az ártéri véderdőkben. A természetvédelem szeretné kiszorítani az invazív fafajokat, így ezek „irtása” alapanyagot jelenthet a faipar számára. A faanyag árak utóbbi időben történő drasztikus növekedése miatt jelentős szerephez juthatnak az eddig kvázi értéktelennek számító faanyagok, ha új technológiák segítségével felhasználhatóvá tesszük őket.

A fafajok választásánál továbbá az is szerepet játszott, hogy egy gyűrűs likacsú és egy szórt likacsú fajt válasszak. Ezáltal az ilyen különbségek okozta változások is megfigyelhetők lesznek. A hőkezelés fontos eljárás lehet a jövőben. Az Európai Unió irányelveinek megfelelően a faanyagok kemikáliákkal való kezelését háttérbe kell szorítani. Az ilyen anyagokat felhasználó eljárások kiváltására lehet alternatíva a hőkezelés is. Nyugaton már számos termék található a piacon, melyeket ilyen módszerrel tettek ellenállóbbá a biotikus károsítókkal szemben. A számos kedvező tulajdonság, mint a gombaállóság növekedése és a nagyobb dimenzióstabilitás, mellett jelentkeznek a kezelés során negatív változások is a faanyagban. A legtöbb ilyen jellegű kezelés során már a fa szerkezeti felépítése is károsodik. Ez a folyamat a mechanikai ellenállóképesség csökkenésével jár. A hőkezelés során létrejövő termék tulajdonságát számos dolog befolyásolja, de különböző eljárásokkal egyedi helyzetekre is tudunk terméket előállítani. Ehhez azonban szükséges tudni, hogy az adott faanyag hogyan viselkedik egyes körülmények között. Szakdolgozatom célja a kiválasztott fafajok faanyaga felhasználási lehetőségeinek növelése, és a hőkezelt faanyagokról szóló szakirodalom bővítése.

tölgygyel való további felújítást teljesen lehetetlenné teszik. Az ilyen állabokban mindenekelőtt szükséges az állabban előforduló mindazon öregebb gyertyán-, szil- és juhar-törzseket, melyek magtermő korban vannak, a mennyire csak lehetséges s ha mindjárt költséggel járna is, még a tulajdonképeni vetővágás behelyezése előtt eltávolítani, mert csak ily módon vehetjük elejét ezen fanemek túlságos elszaporodásának. Ha ezen fanemek alnövedéke már létrejött, azt legalább részben oly módon is kiküszöbölhetjük, ha nyár idején kivágjuk, midőn a fák árnyéka alatt igen sok kivész; teljesen kiirtani azonban soha sem lehet.” (PAUSINGER, 1877)

Az 1880-as évektől kezdve homokfogó szerepe is teret nyer. Ennek oka a földművelésügyi tárca politikája, mely alapján kedvezményesen, vagy ingyenesen osztottak csemetét. Az 1800-as évek végére viszont egyre jobban nyilvánvalóvá válik a fa agresszivitása, és az a tény, hogy fája nem igazán alkalmas sem tűzifának, sem pedig műszaki célra. *„Fája nem sokat ér, műszaki célokra nem való, tűzifának is gyenge, kitűnő azonban papírgyártásra és házi szerszámok készítésére.”* (PÉCH, 1894). A 20. század elején folytatódik a fafaj telepítése homokfogási céllal, és megkezdődik alkalmazása a sziken is. A második világháborút követően árterekre is előszeretettel telepítették. Az 1960-as évektől egyre nagyobb számban jelennek meg a szakirodalomban a faj inváziós mivoltára utaló megjegyzések, és erdészeti jelentősége is jelentősen csökken. 2004-ben felkerül a hazai inváziós fajok listájára. Az ezt követő évek során egyre-másra jelennek meg a zöld juhar alkalmazását korlátozó jogszabályok.

2010-es évektől egyre több helyen olvashatunk a szakirodalomban, vagy folyóiratokban a fafaj irtásáról, visszaszorításáról. 2017-ben EU-s rendelet hatására született egy nemzeti inváziós lista, mely azt mutatja, hogy a hazai Natura 2000-es területeken milyen mértékben fordulnak elő, és okoznak gondot az inváziós fafajok. Ebben a listában a zöld juhar a 7. helyen szerepel, és a vizsgált területek mintegy 26%-ban okoz problémát (KORDA et al., 2017; KÉZDY et al., 2017). A fafaj elterjedését hazánkban az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A zöld juhar (*Acer negundo* L.) magyarországi elterjedése

(UDVARDY – NÓTÁRI, 2012)

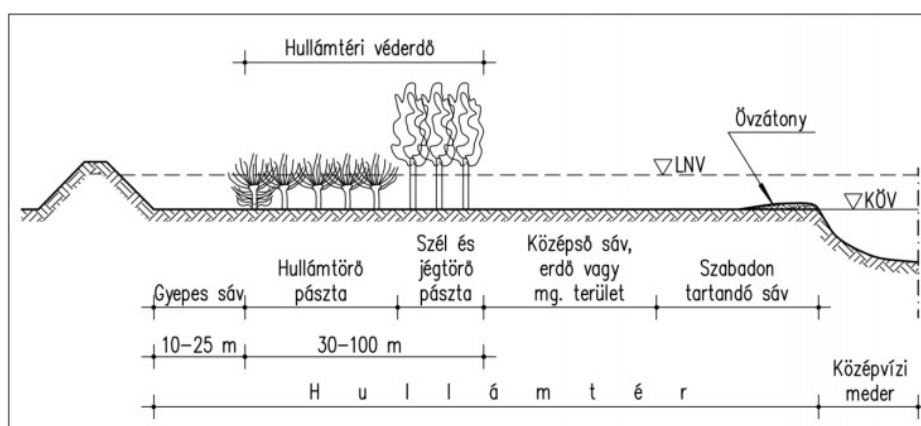
2.2. Amerikai kőris (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.)

Rendszerint 20-25 méter magasra növő fa. Kezdetben karógyökérzete van, majd sekély, de terjedelmes szívgyökérzetet növeszt. Hajlamos csavarodásra, mely a faanyag vetemedéséhez vezethet. Kérge korán, hosszanti irányba repedezik. Fiatal hajtása barnásszürke, rügyei rozsdabarnák. Levelei páratlanul szárnyaltak, 20-25 centiméter hosszúak, általában 7, ritkán 9 levélkéből állnak. A levélké tojásdadok, vagy lándzsás tojásdadok. Hosszuk 7-10 cm, szélességük 3-5 cm, szélük fűrészszelű. Kétfajta fafaj, porzós virágai zömökek, termősek pedig nyúlánkak (GENCSI – VANCSURA, 1992).

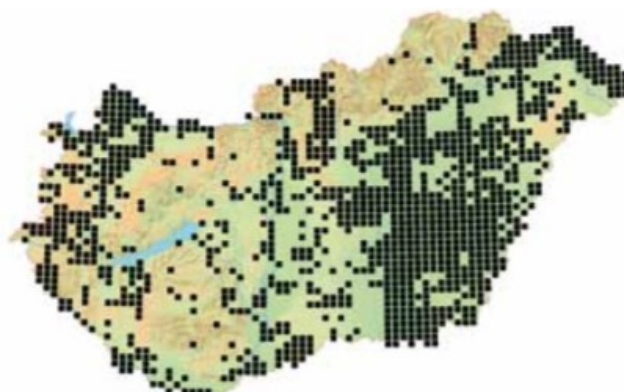
Az amerikai kőris fiatalkori magassági növekedése igen gyors, azonban 30-35 éves korára a növekedés erősen visszaesik. Rövid életű fafaj, a 80 éves egyedek már ritkának számítanak.

Észak-Amerika atlantikus részeiről származik, elterjedési területe a Mexikói-öböltől egész Kanadáig terjed. Amerikában a legészakabbra felhúzódnak a kőrisnek számít. Síkvidéki és dombvidéki folyóvölgyekben található leginkább, de tavak partvidékén is nő. Az elterjedési terület méretei miatt számos klímátípusa alakult ki. Napjainkra Európa nagy részén megtelepedett. Az első magyarországi említése 1802-ből származik, ekkor a pesti botanikus kertből említik *Fraxinus pennsylvanica* egyedet. Ezt követően a század végéig nem nagyon van jelentősége a hazai erdőgazdálkodásban. Az 20. század elejétől azonban fellendül a telepítése az ártereken és a homokvidékeken is (bár utóbbi területen a faj nem bizonyult hatékonynak). A 20. század folyamán egyre nagyobb szerepet kap, termesztése néhol ipari méreteket ölt. Az 1960-as évektől még nagyobb a jelentősége, csaknem minden alföldi erdőtársulásban megjelenik. Gyakori volt az alkalmazása ártéri véderdőként telepítésekor (2. ábra), ugyanis jól tűri a magas

talajvizet, illetve az időszakos elárasztásokat. Ilyen funkciójában szél- és jégtörő pásztákban alkalmazták, főleg nemesnyár és kocsányos tölgy állományok mellett. Mivel az ártéri területek nagy része napjainkra Natura 2000-es terület minősítést kapott, az amerikai kőris jelenléte és inváziós viselkedése komoly gondot jelent. A fafajjal kapcsolatban az 2000-es évektől egyre nagyobb természetvédelmi problémákról olvashatunk a szakirodalomban, emiatt jogszabályok is korlátozzák felhasználását. A Natura 2000-es területeken 2017-ben készült nemzeti inváziós lista szerint a 9. helyen található kártékonyság szempontjából (a faj a vizsgált területek 17%-án okoz problémát). A faj elterjedését a 3. ábra mutatja.



2. ábra: A hullámtér és a hullámtéri véderdő szerkezete (PANKOTAI – RÁCZ, 1975)



3. ábra: Az amerikai kőris (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) elterjedése hazánkban (BARTHA – CSISZÁR, 2012)

Az 1990-es években Európa szerte felbukkant egy a magas kőris (*Fraxinus excelsior* L.) hajtását pusztító kórokozó. A kórokozót 2006-ban sikerült új fajként leírni, *Chalara fraxinea* néven. Néhány évvel később kiderült, hogy ez az anamorph életciklusban lévő *Hymenoscyphus fraxineus*. Azóta bizonyított tény, hogy a kórokozó más kőrisfajokat is megfertőz. Az amerikai kőris ellenállóképessége ugyanakkor nagynak tűnik, a faanyag erősen ellenáll a fertőzésnek még akkor is, ha az érintett erdőrészekben elszórtan fertőzött magas kőris egyedek is találhatók (NAGY, 2016).

2.3. A faanyag degradációja

2.3.1. A termikus átalakulások jellemzői és a befolyásoló tényezők

„A faanyag, mint komplex, makromolekulás rendszer hő hatására rendkívül bonyolult, összetett kémiai és fizikai-kémiai változásokon megy keresztül. A lejátszódó változások, elsősorban az összetett rendszer kémiai, fizikai, anatómiai felépítéstől – mint belső tényezőktől –, valamint az alkalmazott hőmérséklettől, nyomástól, a hőhatás idejétől, a rendszert körülvevő atmoszférától, mint külső tényezőktől függenek.” (NÉMETH, 1998).

A külső tényezők közül fontos szerepet játszik hőkezelés során az atmoszféra, mely körülveszi a faanyagot hőkezelés során. Az eltérő tulajdonságú környezet más-más folyamatoknak kedvez a modifikáció során. Így a végeredményként kapott anyag tulajdonságai a külső tényezőktől is nagymértékben függenek.

- Az inert gázatmoszféra, és a vákuum a termikus bomlásfolyamatoknak kedvez.
- Az oxigén, illetve levegő jelenlétében – különösen magasabb hőmérsékleten – az oxidációs reakciók a mérvadók.
- A vízgőz mind oxidatív, mind inert gázatmoszférában a hidrolitikus folyamatokat segíti elő. (NÉMETH, 1998)

A belső tényezők a faanyag összetételéből, fizikai és kémiai tulajdonságaiból – a különböző összetevők arányából, járulékos anyagok mennyiségéből stb. – adódnak. Ez fajonként, de akár termőhelyenként is eltérő lehet.

A 100°C-ig lejátszódó folyamatok mind a faanyagban lévő vízre vannak hatással, így ebben a hőtartományban a hidrogénhidas kötésekben bekövetkezett változások a jellemzőek.

100°C és 200-300°C között a gyengébb kémiai kötések hasadnak, illetve oxidatív környezetben a járulékos anyagok nagy része ezen a hőmérsékleten oxidálódik.

230°C és 400°C-on játszódnak le a legintenzívebb reakciók valamennyi környezetben. A legtöbb alkotóelemben nagy változások mennek végbe ezen hőmérsékleten.

400°C felett már a szenesedési folyamatok mennek végbe az eredeti felépítés teljes mértékű eltűnésével.

2.3.2. A faanyag átalakulása 100-200°C közötti hőmérsékleten

A 100°C alatti folyamatoknál a víz a fára, mint komplex rendszerre hatott, és így alakította annak tulajdonságait. A 100°C feletti folyamatoknál már előtérbe kerülnek a fa kémiai összetevői. Ezen összetevőkben végbement változások adják a végeredményt. Ebben a hőtartományban leginkább a fát felépítő amorf alkotóelemek és a járulékos anyagok játszik a főszerepet.

A faanyag színváltozását ebben a tartományban a járulékos anyagok adják. A színváltozás intenzitása a 160-200°C tartományban megnő. A színváltozás függhet a választott fafajtától, a kezelés hőmérsékletétől, a modifikáció hosszától, és a kezelés atomszférájától. A fa világossága csökken és a pirosas tartomány felé tolódik el. A faanyag színének változása a kezelés előrehaladtával nagymértékben csökken.

A lignocellulózokban végbemenő folyamatok gyengék, de megfigyelhetők. Vízgőz hatására a fából kioldódó anyagok mennyisége megnő. A hemicellulózból jelentősebb mennyiségű ecetsav is kioldódik. A vízgőz jelenléte (a vízgőz hidrolizáló képessége) miatt új funkciós csoportok jönnek létre. Ez azonban nem jelenti az anyag higroszkóposságának a növekedését. A zsugorodás a folyamat során megfigyelhető, különösen a géles struktúrájú részekben. Ezen folyamatok jelentős része visszafordíthatatlan.

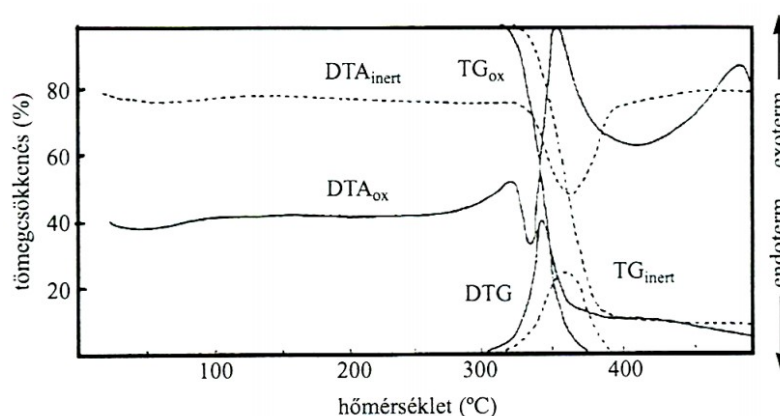
2.3.3. A cellulóz hőbomlása

A cellulóz hővel szemben ellenállóbb, mint az alacsonyabb polimerizációs fokú poliózok.

A cellulóz hőbomlásánál a belső tényezők nagy szerepet játszanak. Ezen tényezők a cellulóz kristályosságának mértéke, polimerizációs foka és tisztasága. A külső tényezők közül a nyomás, az atmoszféra és a hőmérséklet a meghatározóak.

Inert atmoszférában a cellulóz hőbomlása 300°C-ig lassú. A bomlás intenzitásának csúcsa 360°C körül található. A teljes folyamat 390°C-ig megy végbe. Ezen folyamatok első része inert atmoszférában endoterm jellegű, azonban megtalálható a folyamat végén egy exoterm szakasz is, melynek oka bomlástermékek polikondenzációja és polimerizációja. Az ilyen atmoszférában történő bomlás végén 10% körüli szenesedett anyag marad.

Oxidatív környezetben a folyamat nagy tömegcsökkenéssel jár, illetve a reakciók hamarabb indulnak meg. A bomlási maximum 320-350°C között található. Az oxidáció során a cellulóz egy exoterm folyamat során teljesen lebomlik (410-500°C-ig). A reakció végbemenetele után csak hamu marad.



4. ábra: A cellulóz termikus bomlása oxidatív és inert környezetben (NÉMETH, 1998)

TG - cellulóz tömegcsökkenése

DTA - lejátszódó folyamatok hőeffektusa

2.3.4. A poliózok termikus degradációja

A faanyag 100-200°C hőmérsékleten történő modifikálása során a poliózok degradációja adja a faanyag fizikai tulajdonságainak változását. Ezen anyagok degradációja nehezen követhető, mivel amorf szerkezetük és összetettségük miatt nincs olyan leírható minta a szakirodalomban, mely pontos képet adhatna a bomlásra. A tömegvesztésen alapuló globálkinetikával lehet legjobban jellemezni, azonban ez is csak közelítő értékű, ugyanis nem történt olyan részletes vizsgálat, mint a cellulóznál.

A poliózok bomlása a globálkinetika segítségével két szakaszra bontható. Az egyik a 190-227°C között végbemenő kismértékű bomlással járó elsőrendű szakasz, majd az ezt követő nagy bomlással járó másodrendű szakasz.

Inert atmoszférában történő bomlása során a víz távozása utáni 185-205°C intervallumban mutat másodfajú átalakulást. Az intenzív endoterm bomlás 210°C körül kezdődik, és 275°C körül éri el maximális sebességét. A cellulózhoz hasonlóan itt is követi az endoterm bomlást egy exoterm szakasz. A bomlás végére egy 10-12% körüli elszenesült rész marad vissza.

Oxidatív környezetben alacsonyabb hőmérsékleten kezdődik a bomlás. A cellulózhoz hasonlóan itt is exoterm folyamat játszódik le. A bomlás maximum sebességét itt 280°C körül éri el. Az ezután maradt szenesült részek véglegesen csak 400°C fölött bomlanak el teljesen.

A poliózok bomlása során bekövetkező molekulatömeg-csökkenés egyes polióz frakciók változását mutatja, mely molekulatördelésre utal. Ez a folyamat 180°C felett lesz nagymértékű.

2.3.5. A lignin hőbomlása

A lignin a faanyag legellenállóbb alkotórésze hővel szemben, habár bizonyos részfolyamatok már alacsony hőmérsékleten is lejátszódnak. Molekuláris felépítése miatt a lignin egy igen bonyolult amorf szerkezetű faösszetevő. Ez okozza a degradáció alatt mutatott változékonyságot is. A lignin hőbomlása nagymértékben függ a lignin izolációs módjától is. A kíméletesebb eljárással nyert lignin 150-160°C-on is megindul, míg egy durvább kondenzálással nyert lignin csak 200°C felett kezd el degradálódni.

A lignin üvegesedési hőmérséklete 127-194°C közé tehető. Ez mintától és izolációs eljárástól függően változik. Ezen folyamatokat nagyban befolyásolja a környezet és a minta nedvességtartalma. Az üvegesedési hőmérséklet a lignin nedvességtartalmának csökkenésével nő (NÉMETH,1998).

Néhány lignin minta esetében megfigyelhetünk egy endoterm folyamatot 165°C környékén. Ennek oka a minta izolációja során nem eltávolított szénhidrát-lignin kapcsolat, melyek bomlása okozza a reakciót.

A lignin monomerek közötti nagyszámú kapcsolódás miatt a bomlási folyamatok nagyon sokrétűek lehetnek. A homolitikus és heterolitikus bomlási folyamatokat polimerizációs folyamatok kísérik. A legalacsonyabb hőmérsékleten az észterkötések bomlanak fel, melyek degradációja 150-270°C közötti hőintervallumon belül játszódik le. A C-C kötések hasadása már jelentősen magasabb energiaigényű. Ezen folyamatok a 325-375°C közötti intervallumban játszódnak le. A legnehezebben az aromás gyűrű hasad.

A lignin degradációja során a gáztermelődés a hőmérséklet növekedésével nő. A gázok közül metán és hidrogén szabadul fel. Ezeken kívül vízgőz és illékony termékek (alkoholok, aldehidek, furán-és fenolszármazékok, stb.) keletkeznek. A lignin bomlása után maradt szén szerkezete nagymértékben aromás.

2.3.6. Járulékos anyagok szerepe a termikus degradáció során

A járulékos anyagok a fa szerkezete szempontjából nem játszanak nagy szerepet, azonban késleltethetik, vagy elősegíthetik a degradációt. A tanninok 140-190°C intervallumban antioxidánsként működve stabilizálják a fát. Ez a folyamat mind inert, mind pedig oxidatív környezetben is megfigyelhető. A 100-200°C közötti intervallumban a járulékos anyagok oxidációja adja a fa színváltozását.

A járulékos anyagok közül az aromás szerkezetű vegyületek (elsősorban tanninok) alacsonyabb hőmérsékleten (140-190°C) égéskésleltető hatásúak. Ennek oka a komponensek gyökképződése, mely antioxidánsként hat.

NÉMETH (1998) szerint a terpének, gyanták és olajok, az előbb említett aromás vegyületekkel szemben az oxidatív bomlásfolyamatok iniciátorai. Ez akár 30-40%-os gyulladáspont csökkenéssel is járhat.

2.4. A termikus modifikáció hatása a faanyag tulajdonságaira

2.4.1. A hőkezelés hatása a dimenzióstabilitásra

A hőkezelés hatására a dimenzióstabilitás nő. Ezt az angol nyelvű szakirodalom Anti Swelling Efficiency-nek (ASE), vagyis zsugorodáscsökkentő hatékonyságnak nevezi. A faanyag hőkezelése során végbemenő kémiai folyamatok hatására a kezelt faanyag higroszkóposága csökken. Ennek oka a poliózokban történő kémiai változások. Az újonnan kialakult polimerek kevésbé higroszkóposok. A méretstabilitás ezen polimerek kisebb vízfelvételi képességéből ered (DIROL-GUYONNET, 1993).

A dimenzióstabilitás függ a fafajtól, hőmérséklettől és a kezelés idejétől (YUN et al., 1999). Azonban a legfontosabb tényező a hőmérséklet, hiszen nagyobb hőmérsékleten jelentősen rövidebb idő alatt érhető el azonos méretstabilitás (REZAYATI CHARANI et al., 2007; AKYILDIZ et al., 2009). A méretstabilitás a tömegvesztéssel aszimptonos összefüggésben változik, mely azt mutatja, hogy 20% tömegvesztés esetén a legnagyobb mértékű.

A hőkezelés során a ligninben végbemenő kémiai változások a lignin reakcióképességének növekedéséhez vezetnek. Ez keresztkötések kialakulását teszi lehetővé. Ennek hatására a sejtfal molekulái veszítenek a rugalmasságukból, és így a cellulóz mikrofibrilláknak kisebb lehetőségük van a vízfelvételre és a dagadásra. Ennek a folyamatnak az eredményeképpen tovább csökken a faanyag vízfelvételi képessége, ezáltal a méretstabilitás is (TJEERDSMA et al., 1998).

2.4.2. A hőkezelt faanyagok gombaállósága

A gombák a számukra megfelelő környezetben (hőmérséklet, nedvességtartalom) korhadást okoznak a faanyagban. Ezt a folyamatot befolyásolja az adott fafaj, annak kémiai összetétele, illetve járulékos anyag tartalma. A hőkezelés növeli a faanyag gombákkal szembeni ellenállóképességét (DIROL-GUYONNET, 1993; MAZELA et al., 2003). A hőkezelés általában a barna korhadás ellen nyújt védelmet, azonban vannak olyan eljárások is, amelyek a fehér korhadással szemben is hatásosak. A hőkezelés során végbemenő hemicellulóz degradáció során létrejönnek olyan anyagok (például cukrok), melyek a penész megtelepedésének kedveznek, így a hőkezelt faanyagon ez a jelenség gyakran megfigyelhető.

A biotikus károsítókkal szembeni ellenállóképesség növekedése két okkal magyarázható. Az egyik, hogy a hőkezelés során létrejövő furfural képes térhálósítani a lignint, így az elérhetetlenné válik a lebontó enzimek számára. Továbbá a hemicellulóz degradációja során keletkező szerves savak is segítik ezt a folyamatot. A másik ok az, hogy a hőkezelt faanyagok kisebb rosttelítettséggel, illetve egyensúlyi nedvességtartalommal rendelkeznek, és ez a gombák számára kedvezőtlen körülményeket teremt (HORVÁTH, 2008; WEILAND-GUYONNET, 2003; TJEERDSMA et al., 2002). Ezekből megállapítható, hogy a gombakárosítókkal szembeni tényleges védelmet a 200°C feletti hőkezelés ad, alacsony hőmérsékleten csak rendkívül hosszú kezelés hatására érhető el jelentős eredmény.

A barna korhadás elleni nagyobb ellenállóképesség oka a cellulóz és a hemicellulóz kisebb hőmérsékleten való bomlása, így ezek átalakulása nehezíti a biodegradációt. A fehér korhadás során a gombakárosítók a lignint támadják, melynek hőstabilitása nagyobb, mint a másik két összetevőé. Ez azt eredményezi, hogy a lignin átalakulása kisebb mértékű lesz. Ezáltal a fehér korhadás elleni védelem alacsonyabb az ilyen eljárásokkal kezelt faanyagban.

2.4.3. A faanyag szilárdságának változása hőkezelés hatására

A hőkezelés során a legkritikusabbak a faanyag szilárdsági tulajdonságának változásai, hiszen ezek komolyan befolyásolhatják a faanyag felhasználhatóságát. A fa felhasználási szempontból egyik legfontosabb tulajdonsága a hajlítoszilárdság, itt megkülönböztethetünk statikus hajlítoszilárdságot, illetve dinamikus ütőhajlítoszilárdságot. Enyhébb kezeléseknél a hajlító rugalmassági modulusz növekedése volt megfigyelhető (ESTEVEZ et al., 2007).

A szilárdsági tulajdonságok módosulásában nagy szerepe van a kezelés paramétereinek. A kezelés és a szilárdsági tulajdonságok között jól megfigyelhető összefüggés van. Ez legjobban a kezelési idő függvényében mutatható ki. Ez az összefüggés azonban nem írható le csak a kezelés egy kis szakaszára (KIM et al., 1998). Levegő atmoszférában a kezelés hatása a faanyagra függ a kiinduló faanyag nedvességtartalmától. Nagyobb mértékben csökkennek nedves faanyag esetében a szilárdsági tényezők, mint száraz faanyag esetén. Nitrogén atmoszférában a modulusz

csökkenése elhanyagolható, levegő atmoszférában pedig kisebb, mint oxigénben, ez mutatja az oxigén degradáló hatását a faanyagra (MITCHELL, 1988).

A nyomószilárdság változása nagymértékben függ a fafajtól és a hőkezelés paramétereitől. Itt csökkenés, de akár növekedés is megfigyelhető (KORKUT et al., 2008; BOONSTRA et al., 2007).

A faanyag modifikációja során megfigyelhető, hogy a kezelt faanyag ridegebbé válik. Ennek oka a rugalmasságért felelős poliszacharidok amorf részeinek kisebb ellenállóképessége a hővel szemben. Így a rugalmatlanabb kristályos szerkezetű részek maradnak meg, melyek a faanyagot rideggé teszik. A mechanikai tulajdonságok változásáért elsősorban a hemicellulózok a felelősek, ugyanis leginkább ezek a részek bomlanak el a leggyakrabban alkalmazott hőkezelési eljárások során. Illetve szoros összefüggés van a hemicellulóz tartalom és a szilárdság között (WINANDY-LOBOW, 2001; ESTEVES et al., 2008; BOONSTRA et al., 2007).

2.5. Hőkezelt termékek a piacon

A hőkezelt faanyagok csak néhány évtizede vannak a piacon. Számos fafaj és eljárási típus található belőlük. Van olyan eljárás, amit csak egy adott fafajra használnak, és van olyan technológia, melyet több fafajon is alkalmaznak. Természetesen ezen eljárások időtartama a faanyag és a fafaj függvényében változhatnak.

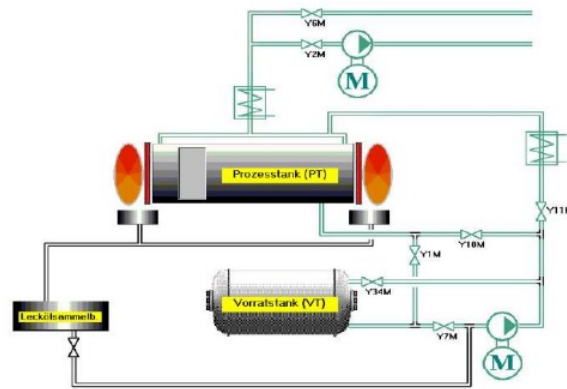
A **Plato-Process (Plato BV – Hollandia)** egy két kezelési lépésből álló technológia. Az első egy hidrotermológiai lépés, mely magas nyomáson egy autoklávban történik. Itt pontos, megadott időtartama van a felmelegítésnek, a kezelésnek és a lehűtésnek, mely nagyjából 4-5 óráig tart. Ezután egy szárítási ciklus következik, ahol a modifikált faanyag nedvességtartalmát nagyjából 8%-ra állítják be. A folyamat ezen része 5-től 21 napig is eltarthat fafajtól és mérettől függően. Majd a második kezelési ciklus következik, ahol egy nagy hőkezelőbe kerül a faanyag. Itt felhevítik és 16-18 óráig a megadott hőmérsékleten tartják. Ebben a fázisban fontos, hogy a faanyag környezetében az oxigén koncentráció 2% alatt legyen. A következő lépés a kondicionálás, mely 2-3 napot vesz igénybe. Ez nagyon fontos folyamat a belső feszültségek csökkentése miatt.

Retification process (NOW New Option Wood – Franciaország). Ez egy nitrogén atmoszférás környezetben történő hőkezelés. A nagyjából 12% nedvességtartalmú faanyagot felhevítik 200-240°C környékére. Az oxigén koncentrációnak itt is 2% alatt kell lennie.

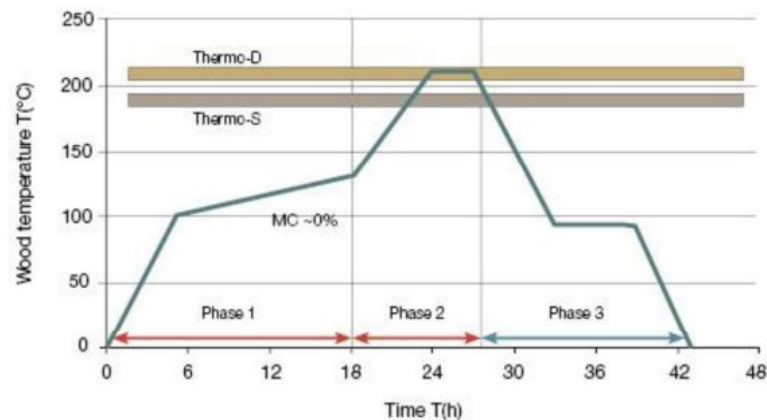
Bois perdure (BCI-MBS – Franciaország). Ez egy olyan kezelés, amelyet a nyers, frissen kitermelt fára alkalmaznak. Egy gyors szárítási módszer, melynek során a fát 200-240°C-ra hevítik, és a fa saját nedvességtartalmából származó gőz segíti a faanyagban történő átalakulásokat.

OTH process (Olajban modifikált faanyag) (Menz Holz – Németország). Ebben az eljárásban a faanyagot nagy hőmérsékletű olajfürdőben kezelik. A kezelés során a faanyagot egy tartályba helyezik, melyet a lezárás után feltöltenek olajjal (5. ábra). A hőmérsékletet a kívánt tulajdonságok alapján változtatják. Az olajfelhasználás szempontjából a leghatékosabb a 220°C-on történő kezelés. Azonban a faanyag optimális szilárdsági tulajdonságait 180-200°C közötti hőintervallumban kapjuk, itt nagyobb mennyiségű olajra van szükség. A modifikáció 2-4 órát vesz igénybe. Ez nem tartalmazza a felfűtési és a hűtési szakaszt, melyek szintén függenek a kezelt faanyag méretétől. Az eljárás során növényi eredetű olajat alkalmaznak. Az olaj egyenletes hőeloszlást biztosít a teljes tartályban, valamint teljes mértékben távol tartja az oxigént a reakció ideje alatt.

ThermoWood (Finnország). Ezen eljáráshoz használható friss, vagy előszárított faanyag is. Az eljárás 3 lépésre osztható szét. Az első lépés a felmelegítés. Ebben a fázisban hő és gőz segítségével a faanyagot gyorsan hevítik fel 100°C-ig hő, majd 130°C-ig fokozatosan hevítik. A gőz megakadályozza a faanyag repedését. A második modifikációs lépés maga a hőkezelés. Itt a hőmérséklet 185-215°C a választott eljárási osztálytól függően. Ez a fázis 2-3 óráig tart. A gőz szerepe ebben a stádiumban az, hogy a faanyag égését megakadályozza. A harmadik lépés a lehűtés és kondicionálás. A végleges termék nedvességtartalma 4-6% között lesz.



5. ábra: A Menz Holz cég által tervezett olajmodifikációs berendezés (SAHIN, 2017)



6. ábra: A ThermoWood előállításának menete (SAHIN, 2017)

A fent említett eljárásokkal készült termékek mára mind a piacon vannak. A környezettudatosság jegyében kezdenek teret hódítani a különböző kemikáliákkal kezelt faanyagokkal szemben. A ma piacon elérhető termékeket mind 180-260 °C-on kezelték. Ez az a hőmérsékleti intervallum, amiben a faanyagok szerkezete csak mérsékelten degradálódik. A piacon szereplő termékek mindegyike valamilyen gáz atmoszférában, olajban vagy vízgőzben lett kezelve.

3. A kezelés és a vizsgálatok módszere

3.1. A faanyag hőkezelése

A minták kiválasztása során szempont volt, hogy korábbi szakirodalmakkal összehasonlítási alapot képezhessenek. TOLNAI (2018) mintatestjei pontosan azon időben beszállított törzsekből lettek készítve, melyből én is készítettem a sajátjaimat. Így ezek azonos termőhelyen, sőt egymáshoz nagyon közeli, esetleg akár ugyanazon fából is származhatnak.

Mivel mindkét fafajból nagy mennyiségű alapanyag állt rendelkezésre, ezért kétféle hőmérsékletet próbáltunk ki a hőkezelés során. A két hőmérséklet úgy lett megválasztva, hogy azok pont a poliózok intenzívebb bomlásának megkezdése előttre és utánra essenek. Az alacsonyabb hőmérséklet 180°C , melynél még nem megy végbe olyan nagymértékű változás a faanyag belső felépítésében megtalálható hemicellulózokban, mint a második hőmérsékleten, mely 200°C volt. Mindkét hőmérséklet esetében a kezelés oxidatív környezetben történt, így az extraktanyagok oxidációja, illetve a faalkotók exoterm bomlása jelentős volt. Mivel a nedves faanyag hőkezelésének következménye a nagymértékű szilárdság-csökkenés, ezért előre leszártított faanyag került a kezelőbe. Ezeken a hőmérsékleteken még nem megy végbe nagymértékű degradáció. Azonban a poliózok és a lignin kismértékű átalakulása, és az új polimerek kialakulása miatt a szilárdsági tulajdonságok csökkenése várható.



7. ábra: Faanyag hőkezelés előtt

Hőkezelés előtt a kezelőkamrában a faanyag mintasorok közé hézaglécet helyeztünk. Ezzel biztosítottuk, hogy a kezelés során keringetett levegő a faanyag nagy részét elérje.

3.2. A színmérés

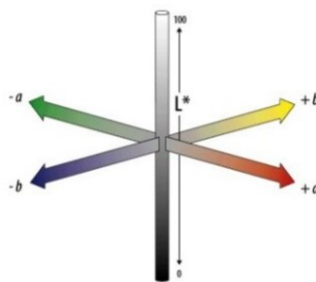
A szakirodalmi részben említésre került, hogy a faanyagok színváltozását a 100-200°C közötti intervallumban a járulékos anyagok adják. A faanyag színváltozása segít megérteni a kezelés során lejátszódó folyamatokat, valamint a faanyagok későbbi felhasználásakor is jelentős szempont lehet.

Színmérés Konica-Minolta 2600d spektrofotométerrel történt. Minden mintatestre 3 mintavételi pont került. Ez lehetővé tette a színváltozás pontos mérését. A mintavételi pontokat úgy választottam meg, hogy a hőkezelés előtt álló, durván megmunkált faanyagon a leghelyesebb pozícióban legyenek. Nagyjából 70-90 mérést készítettem fajonként és hőkezelési módonként.



8. ábra: A Konica-Minolta 2600d spektrofotométer mérés közben

A spektrofotométer a CIELAB (L^* , a^* , b^*) színingertér használatával ad meg számunkra adatokat. Ez egy 3 dimenziós koordináta rendszerben ábrázolható. A három tengelyen pedig a faanyag világossága (L), vörös színezete (a) és sárga színezete (b) található. Ha ezeket az RGB-színkódhoz hasonlóan behelyettesítjük a CIELAB-ba, megkapjuk a mért színünket az színingertérben.



9. ábra: CIELAB (L^* , a^* , b^*) színingertér

(https://www.slideshare.net/Refrigeratorgood/line-photography?next_slideshow=1)

3.3. A faanyag sűrűségének meghatározása

„A sűrűség egy fizikai tulajdonság, ami megmutatja, hogy az egységnyi térfogatú anyag mekkora tömeget képvisel. Jele ρ (ró), mértékegysége kg/m^3 , ezen kívül használjuk még a g/cm^3 -t. A sűrűség a faanyag legmeghatározóbb jellemzője, következtetni lehet belőle az adott fafaj legtöbb fizikai és mechanikai tulajdonságára; a nagyobb sűrűséghez általában nagyobb szilárdsági értékek tartoznak.” (MOLNÁR, 1999)

VERES (2008) szerint faanyagok sűrűségét sok minden befolyásolhatja. Elsősorban a fafaj, de a termőhelyek között is lehet jelentős különbség fajon belül. A nedvességtartalom szintén jelentős befolyásoló tényező. A faanyag háromfázisú (levegő, víz, tömörfa) porózus rendszert alkot. A levegőnek nincs gyakorlati jelentősége. A fafajokat 3 csoportra osztjuk sűrűség szempontjából: magas ($> 700 \text{ kg/m}^3$), közepes ($550\text{-}700 \text{ kg/m}^3$), alacsony ($< 550 \text{ kg/m}^3$).

A faanyagok esetében a nedvességtartalom függvényében háromféle sűrűséget különböztethetünk meg. Ezek az abszolút száraz, légszáraz és bázis sűrűség.

Sűrűség meghatározását a MSZ 6786-3: 1988 szabványban előírtak szerint végeztem. $20 \times 20 \times 30 \text{ mm}$ méretű próbatesteket készítettem a hajlító és az ütő-hajlító vizsgálatok épen maradt végeiből. Ez egy a szabványban nem leírt új módszer, melynek az előnye, hogy a visszamért mintatestek sűrűsége jobban összehasonlítható lesz a szilárdsági jellemzőkkel. A klímahelyiségből elővett mintatestek méreteit anatómiai irányokban lemértem, és a tömeget ezredgramm pontossággal meghatároztam. Ezt követően a próbatesteket szárítószekrénybe helyeztem, melynek hőmérséklete $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

volt. A mintatesteket abszolút szárazságig szárítottam. Ismételten lemértem a tömeget és a méreteket, majd vízbe áztattam a próbatesteket. A rosttelítettség elérését követően ismételten meghatároztam a tömeget és a méreteket.

Az abszolút sűrűség meghatározása:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

m_0 - abszolút száraz tömeg [g]

V_0 - abszolút száraz térfogat [cm³]

A légszáraz sűrűség meghatározása:

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

m_{12} - légszáraz száraz tömeg [g]

V_{12} - légszáraz száraz térfogat [cm³]

A bázis sűrűség meghatározása:

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_{max}} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

m_0 - abszolút száraz tömeg [g]

V_{max} - vízzel telített térfogat [cm³]

(MOLNÁR, 1999)

3.4. A zsugorodás-dagadás meghatározása

„A faanyag egyik jellegzetessége, hogy a levegő relatív páratartalmától (φ) képes a nedvességtartalmat változtatni, melyet „hygroszkópikus” tulajdonságnak nevezünk. Ez abban nyilvánul meg, hogy az ún. „hygroszkópikus tartományban” ($u=0-30\%$) a szárazabb faanyag nedvességet képes felvenni miközben megduzzad.

A nedves faanyag ugyanakkor száraz környezetben – alacsony relatív páratartalom mellett – nedvességet ad le, mialatt mérete jelentősen csökken(zsugorodik)” (TAKÁTS, 2014)

Már a hőkezelés első vizsgálataiban TIEMANN (1920) megállapította, hogy a faanyag dimenzióstabilitása a hőkezelés hatására megnő. Ez egy fontos tulajdonság a hőkezelt faanyagok esetében, ugyanis helyenként alkalmaznak hőkezelt faanyagborítást magas páratartalmú környezetben (például: szaunák, dézsák). A gyakorlatban kétfajta fanedvességet különböztetünk meg. Ezek a nettó (u) és a bruttó (q) fanedvesség.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$q = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

m_u - nedves faanyag tömeg [g]

m_0 - abszolút száraz faanyag tömeg [g]

(MOLNÁR, 1999)

MOLNÁR (1999) féle módszerrel határoztam meg a fa nedvességtartalmát. Ez lehet kötött vagy szabad víz. A víz létfeltétel az élő fának. Döntéskor a fa maximális nedvességtartalma bükk és tölgyek esetén 100%, fenyőknél 150%, balsafánál viszont elérheti akár a 600%-ot is. Ebből következik, hogy a kisebb sűrűségű faanyagok nagyobb mennyiségű víz felvételére képesek. A kidöntött rönk rosttelítettségi határig (nagyjából 30%) leadja a benne lévő vizet. Ezután a kötött víz esetében a nedvességtartalom csökkentéséhez egyre nagyobb energia szükséges. A kötött víz a sejtfalban található, ez okozza a faanyag méreteinek változását (duzzadás).

Mérés menete: A klímahelyiségből (20°C, 65% páratartalom) elővett mintatestek méreteit anatómiai irányokban lemértem, majd a tömeget ezred gramm pontossággal meghatároztam. Ezután a próbatesteket szárítószekrénybe helyeztem, melynek hőmérséklete 103±2 °C volt. Ezt követően a mintatestek tömegállandóságig szárazsáig szárítottam. Ismételten lemértem a tömeget és a méreteket, majd vízbe áztattam a próbatesteket. A rosttelítettség elérését követően ismételten meghatároztam a tömeget és a méreteket.

Dagadás meghatározása anatómiai irányok szerint:

$$d_{h,s,r} = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

$d_{h,s,r}$ - dagadás mértéke az adott anatómiai irányban (húr, sugár ,rost) [%]

l_u - rosttelítettség felett mért érték [mm]

l_0 - abszolút száraz állapotban mért érték [mm]

Dagadás térfogatra vetítve:

$$d_v = \frac{(100 - d_h) \cdot (100 - d_s) \cdot (100 - d_r)}{10000} - 100 \quad [\%]$$

d_h - dagadás mértéke húr irányban [%]

d_s - dagadás mértéke sugár irányban [%]

d_r - dagadás mértéke rost irányban [%]

Zsugorodás meghatározása anatómiai irányok szerint:

$$z_{h,s,r} = \frac{l_u - l_0}{l_u} \cdot 100 \quad [\%]$$

$z_{h,s,r}$ - zsugorodás mértéke az adott anatómiai irányban (húr, sugár ,rost) [%]

l_u - rosttelítettség felett mért érték [mm]

l_0 - abszolút száraz állapotban mért érték [mm]

Zsugorodás térfogatra vetítve:

$$z_v = \frac{(100 - z_h) \cdot (100 - z_s) \cdot (100 - z_r)}{10000} - 100 \quad [\%]$$

z_h - zsugorodás mértéke húr irányban [%]

z_s - zsugorodás mértéke sugár irányban [%]

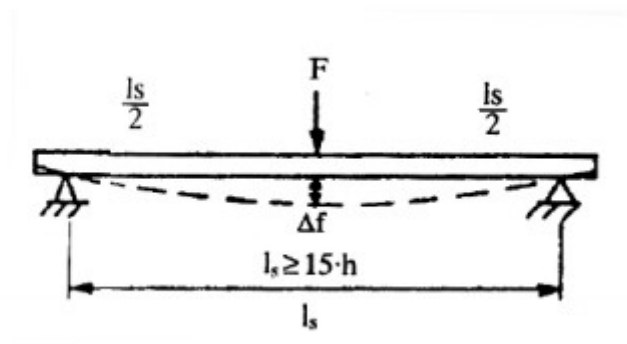
z_r - zsugorodás mértéke rost irányban [%]

(MOLNÁR, 1999)

3.5. A hajlítószilárdság és a rugalmassági modulusz vizsgálata

A hajlítószilárdság alatt a két helyen alátámasztott faanyag ellenállását értjük hajlító erőhatásokkal szemben. Ezek az erőhatások a fa hossztengetyére merőlegesen terhelik a fát. A hajlítószilárdságnak nagy jelentősége van mind a bútorgyártásban, mind a faépítészetben (gerenda), fontos szilárdsági jellemző. A hajlító igénybevétel esetén a terhelt gerenda alsó övében húzó-, míg a felső övében nyomófeszültség alakul ki. A húzószilárdság a fa esetében körülbelül kétszerese a nyomószilárdságnak. A két szilárdság különbözősége miatt a semleges tengely eltolódik a húzófeszültség irányába. (MOLNÁR, 1999)

A mérés pontos leírását a MSZ 6786-5: 1976 (*Faanyagvizsgálatok. Faanyagok statikus hajlítószilárdságának meghatározása*) szabvány adja meg. Ez a szabvány pontosan meghatározza a próbatest befogó méreteit, illetve az alátámasztási közt is. A szabványban leírtak szerint a próbatest keresztmetszeti nagyságának 20x20 mm-nek kell lennie. A próbatest hosszának az alapél 15-szörösének kell lennie, ami 300 mm-t jelent. Az anyagvizsgáló gépet pedig úgy kell beállítani, hogy az alátámasztási köz az alapél 12-szerese, vagyis 240 mm legyen. A szabványban szerepel három-, valamint négyponthas hajlítás is. A háromponthas hajlítás esetén a faanyag hossztengetyének a közepén kell terhelni a mintát. A négyponthas hajlítás esetén úgy kell elhelyeznünk a mintát, hogy a két nyomási pont a hossztengetyen egyenlő távolságra legyen az alátámasztási pontoktól. A mérést háromponthas séma alapján végeztem. A háromponthas hajlítás hátránya, hogy a faanyagra ható nyíróerő és a forgatónyomaték maximuma azonos pontban helyezkedik el, míg a négyponthas esetén a forgatónyomaték maximumánál a nyíróerő 0-val egyenlő.



10. ábra: Háromponthas hajlítószilárdság-mérési elrendezés (MOLNÁR, 1999)

A faanyag szilárdságának meghatározása a Navier-féle egyenlettel történik, mivel azonban a faanyag inhomogén, ezért ebben az esetben csak közelítő értéket kapunk.

Navier-féle egyenlet, koncentrált terhelés esetén:

$$\sigma_{hajlito} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot a \cdot b^2} \left[\frac{N}{mm^2}; MPa \right]$$

$\sigma_{hajlito}$ - hajítószilárdság [MPa]

F_{max} - maximális hajlítóerő [N]

l - alátámasztási köz [mm]

a - próbatest szélesség [mm]

b - próbatest magasság [mm]

A szabvány szerint a próbatesteknek 12%-os nedvességtartalmúnak kell lenniük. Amennyiben a nedvességtartalom ettől eltérő, a következő képlet segítségével kell átszámítani a hajlítószilárdságot.

$$\sigma_{h12} = \sigma [1 + \alpha(u - 12)] \left[\frac{N}{mm^2}; MPa \right]$$

σ - mért hajlítószilárdság [MPa]

α - 1% nedvességtartalomra jutó hajlítószilárdság változás (0,04)

u - a vizsgált próbatest nettó nedvességtartalma [%]

(MSZ 6786-5)

A rugalmassági moduluszt a hajlítási erőből, és a behajlásból tudjuk kiszámolni. A rugalmassági modulusz meghatározását a MSZ 6785-15: 1984 (*Faanyagvizsgálatok. Rugalmassági együthető meghatározása statikus hajlítással*) szabvány írja le pontosan. Az anyagvizsgáló gép automatikusan számol számunkra egy rugalmassági moduluszt, azonban mivel a gépbe nem vittem be a próbatestek keresztmetszeti méreteit, így ezek nem adnak teljesen pontos eredményt. A gép által szolgáltatott adatok alapján a szabványban leírt képlet segítségével számoltam ki a megfelelő értékeket.

$$E = \frac{\Delta F \cdot l^3}{4 \cdot a \cdot b^3 \cdot \Delta y} \quad \left[\frac{N}{mm^2}; MPa \right]$$

E - rugalmassági modulusz [MPa]

ΔF - rugalmassági határon belüli terheléskülönbség [N]

l - alátámasztási köz [mm]

Δy - alakváltozás nagysága [mm]

a - próbatest szélesség [mm]

b - próbatest magasság [mm]

Ha nem 12%-os nedvességtartalmúak a próbatestek, akkor a rugalmassági moduluszt át kell számítani a következő képlet alapján.

$$E_{12} = E[1 + \alpha(u - 12)] \quad \left[\frac{N}{mm^2}; MPa \right]$$

E - rugalmassági modulusz [MPa]

α - 1% nedvességtartalomra jutó hajlítózilárdság változás (0,02)

u - a vizsgált próbatest nettó nedvességtartalma [%]

(MOLNÁR, 1999)

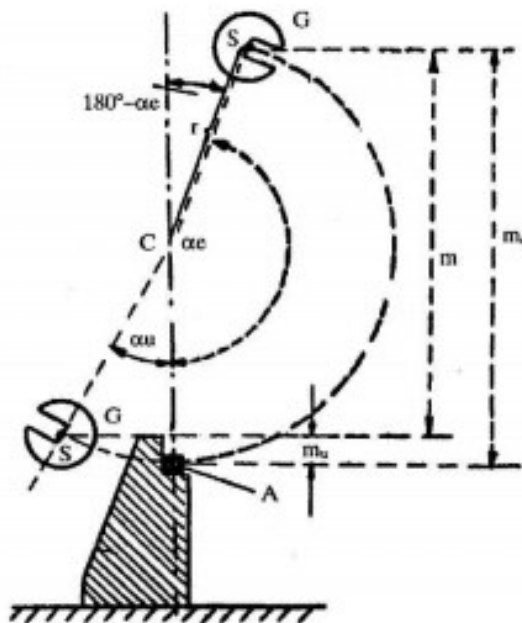
A hajlítózilárdság mérését az NNRC-ben található INSTRON 4208 géppel végeztem (11. ábra). A beállításokat a szabványban meghatározott módon végeztem el. A méréseim során a wood database irodalmi értékeit, illetve TOLNAI (2018) méréseit vettem viszonyítási alapnak. Így ezeket összehasonlítva az általam mért adatokkal, képet kaphatunk a hőkezelés során végbement változásokról.



11. ábra: A hajlítózilárdság mérése

3.6. Az ütő-hajlítószilárdság vizsgálata

Az ütő-hajlítószilárdság vizsgálat során a faanyag dinamikus terhelés esetén történő ellenállását vesszük szemügyre. A mérésből kiderül a faanyag szívóssága, illetve képet kaphatunk a faanyagban végbement folyamatokról, a kapott adatok alapján és a törési képet szemügyre véve. A vizsgálatot a MSZ 6786-7: 1977 szabványban meghatározott módon kellett elvégeznünk. A méréshez Charpy-féle ütő-törő gépet (12. ábra) használtam. A próbatest méreteit a szabvány határozza meg. Tehát 20x20 mm a keresztmetszet, a rövid élek 15-szörösének kell lennie a próbatestek hosszának, ami így 300 mm. Az alátámasztásnak pedig a rövid élek 12-szeresének, tehát 240 mm-nek kell lennie. A törési képből és a töréshez szükséges munkából tudjuk kiszámítani, illetve következtetni az anyag minőségét. Ez a mérés leginkább olyan faanyagok vizsgálatánál fontos, melyek dinamikus igénybevételnek lehetnek kitéve (sportszerek, szerszámnyelek).



12. ábra: A Charpy-féle ütő-törő gép (MOLNÁR, 1999)

A Charpy-féle ütő-törő gép működési elve a következő. A gépen az ingát egy felső helyzetbe helyezzük. Ennek hatására helyzeti energiával ruházzuk fel. Amikor kioldjuk, a helyzeti energia mozgási energiává alakul át. Ezt követően az inga találkozik a próbatesttel, melyet eltör. A töréshez szükséges munka a mozgási energiából származik, mely ennek hatására csökken. A másik oldalra fellendülő inga csak olyan magassáig tud fellendülni, amennyi mozgási energia maradt. Így abból, hogy milyen magasra lendült az inga, egy mutató segítségével leolvashatjuk a töréshez szükséges munkát.

$$w = \frac{W}{A} \left[\frac{J}{cm^2} \right]$$

w - ütés-hajlítószilárdság [J/cm²]

W - törő munka [J]

A - a próbatest keresztmetszete [cm²]

Amennyiben a próbatestjeink nem 12%-os nedvességtartalommal rendelkeznek, a munkát a következő képlettel kell átszámolni.

$$w_{12} = W[1 + \alpha(u - 12)] \left[\frac{J}{cm^2} \right]$$

w - ütés-hajlítószilárdság [MPa]

α - 1% nedvességtartalomra jutó hajlítószilárdság változás (0,025)

u - a vizsgált próbatest nettó nedvességtartalma [%]

(MOLNÁR, 1999)

3.7. A rostokkal párhuzamos nyomószilárdság meghatározása

A faanyag nyomószilárdsága a faanyag nyomóerővel szembeni ellenállóképességét mutatja. Többféle nyomószilárdságot különböztethetünk meg az anatómiai irányok szerint. Ezek a rostokkal párhuzamos és rostokra merőleges nyomószilárdságok. A hőkezelt faanyag rostokkal párhuzamos nyomószilárdságát vizsgáltam. Ezen mérés menetét a MSZ 6786-8: 1977 szabvány határozza meg.

A szabvány meghatározza a próbatestek méretét is. Az alapterületnek 20x20 mm-nek kell lennie, a magasságnak pedig a rövid él másfélszeresének (esetünkben ez 30 mm).

A vizsgálatot egy INSTRON 4208 univerzális anyagvizsgálógéppel végeztem. A mintatesteket mérés előtt egy klímatiszt helyiségben tartottam, majd innen kerültek a gép alá. A minél pontosabb értékek érdekében a mérés előtt megtörtént a mintatestek rövid élének tized milliméter pontos meghatározása, valamint ezután lemértem a tömegét. Ezt követően szárítószekrénybe helyeztem a mintatesteket. A tömegmérésre azért volt szükség, hogy pontosan meg tudjuk határozni a nyomószilárdságot 12%-os nedvességtartalomnál.

$$\sigma_{nyomó} = \frac{F_{max}}{A} \quad \left[\frac{N}{mm^2}; MPa \right]$$

$\sigma_{nyomó}$ - nyomószilárdság [MPa]

F_{max} - maximális nyomóerő [N]

A - nyomott felület [mm²]

Amennyiben a faanyag nedvességtartalma nem 12% a következő képlet segítségével határozhatjuk meg az ehhez tartozó nedvességtartalmat.

$$\sigma_{ny12} = \sigma[1 + \alpha(u - 12)] \quad \left[\frac{N}{mm^2}; MPa \right]$$

σ_{ny12} - a vizsgálati nedvességtartalomhoz tartozó nyomószilárdság [MPa]

α - 1% nedvességtartalomra jutó nyomószilárdság változás értéke (0,04)

u - vizsgált nettó nedvességtartalom [%]

(MOLNÁR, 1999)

Az adatokat az INSTRON Bluehill nevezetű szoftvere rögzíti. Illetve grafikont készít az alakváltozásról a nyomóerő függvényében. A mintákat szárítószekrénybe helyezük, és miután beállt a tömegállandóság, visszamérjük. Innen számolható a nettó nedvességtartalom.

3.8. A gombaállóság meghatározása

A gombaállóság vizsgálata az egyik legfontosabb a mérések sorában, ugyanis ez mutatja meg azt, hogy az adott hőkezelt faanyag mennyivel ellenállóbb a farontó gombákkal szemben, mint a kezeletlen. Ehhez a MSZ EN 113-1:2021, MSZ EN 113-2:2021 (*Faanyagvédő szerek. A farontó bazídiumos gombák elleni megelőző hatásosság meghatározásának vizsgálati módszere. A hatásosság határértékének meghatározása.*) szabványt hívtam segítségül.

Ehhez a méréshez egy második sorozat mintatestet is hőkezelttem az előzővel megegyező módon. Majd ezeket a mintatesteket a szabványban 12%-os nedvességtartalmon előírt méretre (50 mm x 25 mm x 15 mm) vágattam. Ezeket leszárítottuk és lemértük.

A méréshez táptalajt készítettem a szabványban leírtak szerint. A táptalaj összetevői: malátakivonat, agar és szójapepton. A táptalaj elkészítéséhez 1 liter vízbe 30 g malátakivonatot, 15 g agart és 3 g szójapeptont kell alkalmazni. Ezeket egy ideig 100 C°-on főzni és keverni kell, míg a folyadék nem lesz áttetsző. Majd Kolle-lombikokba kell helyezni úgy, hogy 80-90 milliliter jusson minden lombikba (13. ábra). A lombikot vattából készült dugókkal zárjuk, majd 121C°-on autokláv segítségével sterilizáljuk. Erre azért van szükség, hogy a levegőben lévő esetleges gombaspórák szaporodását kizárjuk a táptalajban. Majd ezután a lombikokat arra az oldalra fektetjük, melyiken a nyakán egy beugrás található. Ez megakadályozza a folyadék kifolyását. Így a táptalaj géles állagot tud felvenni kihűlése során.



13. ábra: Kolle-lombikok táptalajjal

A táptalaj elkészülte után a lombikokat az inkubátor szekrénybe helyezük, majd beoltjuk őket a választott gombafajok, a lepketapló (*Coriolus versicolor*) és a kései laskagomba (*Pleurotus ostreatus*) spóráival.

A lepketapló (*Coriolus versicolor*) gyakori kozmopolita faj. Minden lombosfát támad. Élő és nedves helyre beépített fát is támad. Gesztes fáknál jellemzően csak a szíjácsot támadja, geszttel nem rendelkező fajok esetében azonban az érett fát is bontja. Fehér korhasztó. A lebontott faanyag színe sárga lesz, ujjal könnyen morzsolhatóvá válik.

A kései laskagomba (*Pleurotus ostreatus*) „Igen változatos formájú és színűgomba. Kalapja domború, majd ellaposodó, széles nyelvszerű, vastaghúsos. Szürke, kékesszürke, okkersárga szürkésbarna. A tönk féloldalas, fehér vagy halványszürke, tövénél enyhén szőrözött. A lemezek mélyen a tönkre lefutók, fehérek

fehéres szürkék. A spórák elliptikusak, 8-13x4-4 mikron.” (GYARMATI – IGMÁNDY – PAGONY, 1964). Előfordul élő, döntött és beépített faanyagon is. Elsősorban lombos fajokat károsít, de fenyőkön is megtalálható. Gesztbontó álgesztesítő erős fehér korhasztó. Bontása hatására a faanyag erősen vanília illatú.

A táptalaj oltását egy biobiztonsági szekrényben tesszük, mert ha kívülre tennénk, a levegőben lévő gombaspórák megfertőzhetnék a táptalajt. Ekkor a szekrényben teljesen steril környezetben, minden alkalommal sterilizált tű segítségével beoltjuk a táptalajt. Ezt követően visszahelyezzük az inkubátor szekrénybe, majd néhány nappal később, mikor a micélium teljes mértékben benőtte a táptalaj teljes felszínét (ez nem haladhatja meg a 4 hetet), rá kell helyezni a próbatesteket. A próbatesteket vagy az autoklávból, vagy a szárítószekrényből helyezzük a lombikokba, hogy itt is elkerüljük a külső fertőzés lehetőségét. A mintatesteket nem közvetlenül a gombára, hanem kis üvegpálcákra helyezzük, majd visszazárjuk a lombikot és visszahelyezzük az inkubátor szekrénybe, melynek a szabványban előírtak alapján kell beállítani (sötét, 22±2°C, 70±5% páratartalom). Ezt követően a lombikokat 16 hétre magukra hagyjuk.

A 16 hét lejárta után kivesszük a mintatesteket a lombikból, megtisztogatjuk őket a gombafonalaktól, és lemérjük őket nedves állapotban, majd leszárítva is.

4. A vizsgálati eredmények kiértékelése

4.1. A színmérés eredménye

Színmérés során 3 féle adatot rögzített a mérőeszköz számunkra. Az első a világosság, ezt [L]-el jelöljük. A második a vörös színezet, melyet [a]-val jelölünk. A harmadik a sárga színezet, ezt [b]-vel jelöljük. Ebből a három adatból tudjuk meghatározni a fa színét, és annak változását a hőkezelések következtében (1. táblázat).

Zöld juhar

	Kezeletlen	180 °C	200 °C
Világosság [L]	85,228	51,286	30,069
Vörös színezet [a]	3,004	13,237	12,896
Sárga színezet [b]	23,147	34,203	29,485

1. táblázat: A zöld juhar színmérésének eredményei

A 14. ábrán jól látható, hogy a zöld juhar világossága a hőmérséklet emelkedésével csökken. A vörös színezet mértéke a kezeletlen fa és a hőkezelt faanyagok között négyszeres növekedést mutat, azonban a 180 °C és 200 °C-on hőkezelt faanyagok között nincs nagy különbség. A sárga színezetben is következnek be változások. A kezeletlenhez képest mindkét hőkezelté nagyobb, azonban itt a 180 °C-on kezelt faanyag sárga színezetének értéke nagyobb, mint a 200 °C-on kezelté (15. ábra).



15. ábra: A zöld juhar hőkezelt faanyagának színkülönbsége

(jobbaldalt a kezeletlen, középen a 180 °C-on, baloldalt pedig a 180 °C-on kezelt faanyag látható.)

Amerikai kőris

	Kezeletlen	180 °C	200 °C
Világosság [L]	77,15	42,11	21,62
Vörös színezet [a]	4,83	13,79	11,97
Sárga színezet [b]	18,46	32,44	24,65

2. táblázat: Az amerikai kőris színmérésének eredményei

A 16. ábrán látható az amerikai kőris színváltozása, összehasonlítva a kezeletlent a kétfajta kezeléssel ellátott faanyaggal, a 2. táblázat adatai alapján. Az ábrán látható, hogy jelentős színváltozás történt a faanyag kezelése során. A világosság csökken a hőmérséklet növekedésével, a sárga színezet és a vörös színezet értéke pedig 180 °C-os kezelésen a legmagasabb, ezután ugyanis a faanyag jelentősen sötétedik. A 17. ábrán a 180 és a 200 °C közötti színkülönbség látható.



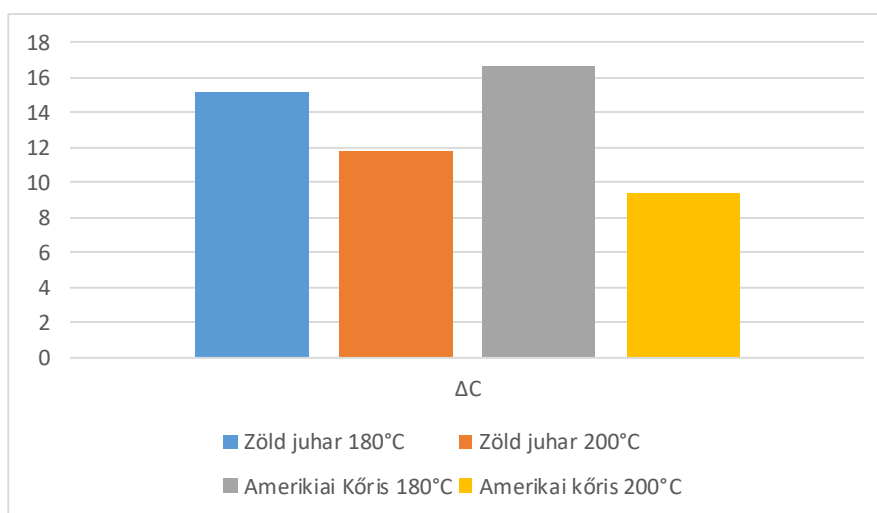
17. ábra: Az amerikai kőris hőkezelt faanyagának színkülönbsége

(jobbaldalt a kezeletlen, középen a 180 °C-on, baloldalt pedig a 180 °C-on kezelt faanyag látható.)

4.2. A színtelítettség és a színinger-különbség meghatározása

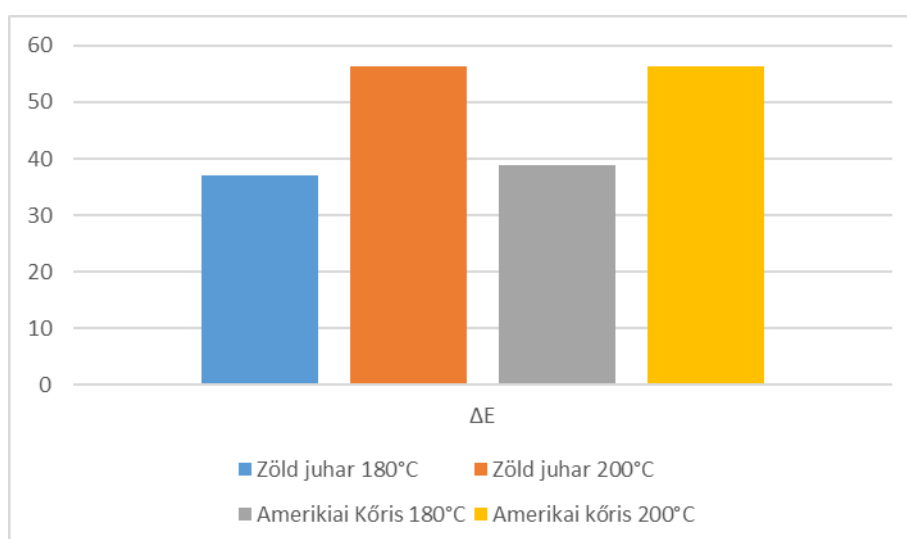
A színtelítettség változása (ΔC^*) megmutatja, hogy a szín változásának mekkora a világosság nélküli komponense. A különbségek összesített hatását fejezi ki a színinger-különbség (ΔE^*) értéke.

$$\Delta C^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$



18. ábra: A színtelítettség változása különböző kezelések hatására

A színtelítettség változása (18. ábra) a két fafajnál kicsit különböző mértékű a kezelések függvényében. 180 °C-os kezelések esetében a kőrisnél körülbelül 2%-kal nagyobb volt a változás. 200 °C esetében viszont a juhar változása volt a nagyobb 3%-al.



19. ábra: A színinger-különbség változása

A színinger-különbség változása (19. ábra) összességében megegyező a két kezelésen mindkét fafajnál. 180 °C-os kezelésnél 1,5% volt nagyobb kőris javára, a 200°C-on történő kezelésnél pedig csak hat század százalék volt a különbség a két fafaj között.

4.3. Tömegveszteség a faanyag hőkezelése során

A hőkezelés során történt tömegveszteség mértéke nagyon fontos, hiszen ez mutat rá arra, hogy milyen folyamatok játszódnak le a modifikáció alatt. A faanyag összetevőinek vizsgálatokor a tömegveszteségen alapuló globálkinetikát alkalmazzák leggyakrabban. Ezt ebben az esetben nem fogjuk alkalmazni, de a később mért tulajdonságok változását megvizsgálhatjuk a tömeg függvényében is.

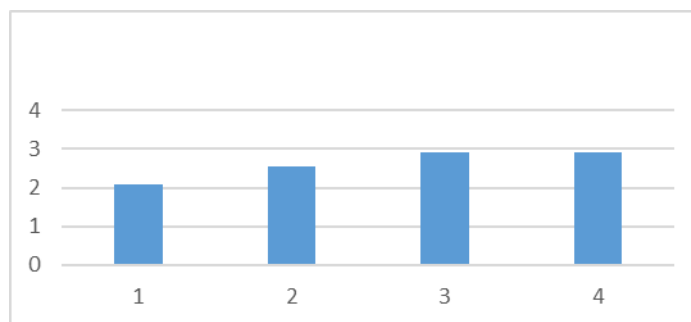
A mintatesteket úgy készítettem elő és jelöltem, hogy figyelemmel lehessen követni a pozíciójukat a bétől nézve, így ebből következtethetünk a faanyagok bizonyos részeinek reakcióira a hőkezelés hatására. Minden egyes minta 2 cm széles, és a bélhez legközelebbi 1-es számmal van jelölve, a számok növekedésével a távolság értelemszerűen nő.

Zöld juhar

	Tömegveszteség [%]	Tömegveszteség [g]
Átlag	2,597	5,139
Szórás	0,512	1,320
Minimum	1,820	2,890
Maximum	3,554	7,370
Variancia	0,262	1,743

3. táblázat: A zöld juhar 180 °C-on történő hőkezelés hatására bekövetkező tömegvesztesége

Ha a 180°C-on kezelt zöld juhart megfigyeljük (20. ábra), a bétől kifele nő a tömegveszteség százaléka. Ez azt mutatja, hogy ebből a régióból nagyobb mennyiségű anyag degradálódik, mint az idősebb, magasabb járulékos anyag tartalmú belső részokről.



20. ábra: A zöld juhar 180 °C-on történő tömegvesztesége [%] a bétől való távolság szerint

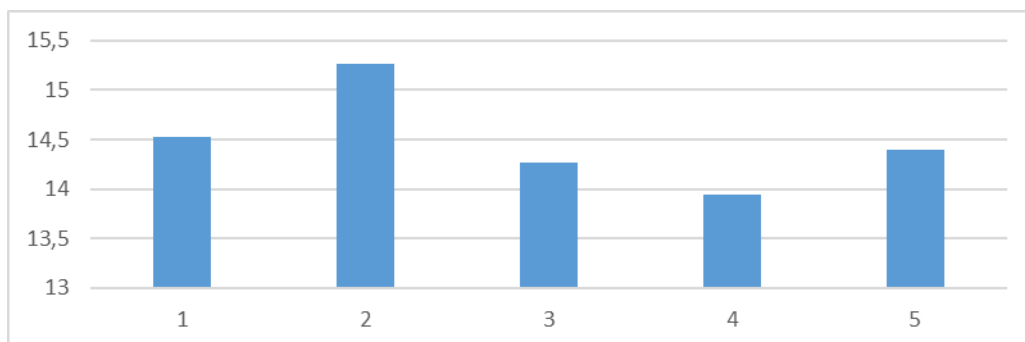
(2 cm mintatestek 1-es a bélhez legközelebb, 4-es legmesszebb)

	Tömegveszteség [%]	Tömegveszteség [g]
Átlag	7,706	14,584
Szórás	0,948	2,244
Minimum	5,510	9,100
Maximum	9,690	18,09
Variancia	0,899	5,039

4. táblázat: A zöld juhar 200 °C-on történő hőkezelés hatására bekövetkező tömegvesztesége

A zöld juhar tömegvesztesége jelentősen megnőtt a magasabb hőmérsékleten történt hőkezelés során. A 180 °C-on történő hőkezelésnél tapasztalt 2,6%-os átlagos hőveszteség helyett (3. táblázat), a 200 °C-on történő hőkezelés esetén a zöld juhar 7,7%-os tömegveszteséget szenved el (4. táblázat). Ez visszatükrözi azon korábbi méréseket, ahol a faanyagok magasabb hőmérsékleten történő kezelése során nagyobb lesz a tömegveszteség (ALÉN et al., 2002; BOURGOIS-GUYONNET, 1988; METSA-KORTELAJNEN et al., 2006; ESTEVES et al., 2008).

Ebben az esetben már nem jelent meg az a bentről kifelé növvő tömegveszteség mintázat (21. ábra), mint a 180 °C-on történő kezelés során, sőt néhány helyen a külső próbatestek tömegvesztesége jelentősen kisebb volt, mint a belsőké. Ennek oka lehet a 180 °C felett bomló poliózok egyenetlen elhelyezkedése a bétől való távolsághoz viszonyítva.



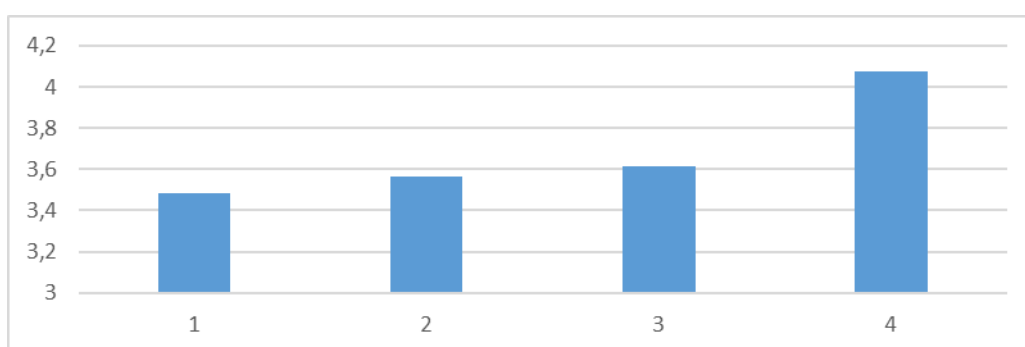
21. ábra: A zöld juhar 200 °C-on történő tömegvesztése [%] bétől való távolság szerint

(2 cm mintatestek 1-es a bélhez legközelebb, 4 es legmesszebb)

Amerikai kőris

	Tömegvesztés [%]	Tömegvesztés [g]
Átlag	3,631	9,440
Szórás	0,734	2,100
Minimum	2,191	5,500
Maximum	5,008	13,32
Variancia	0,539	4,411

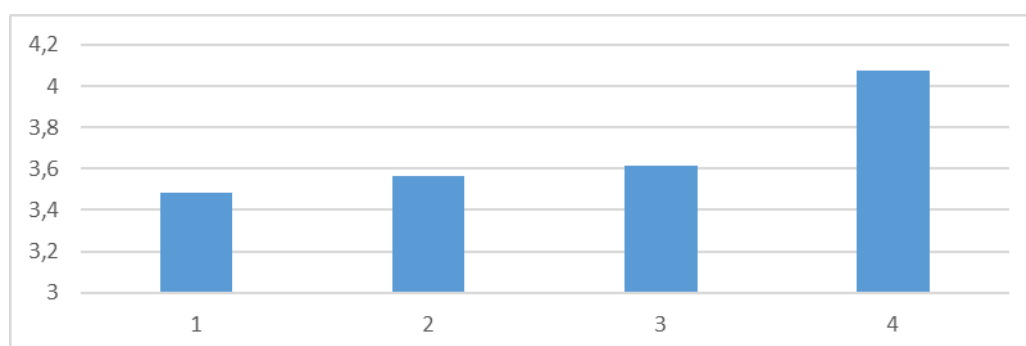
5. táblázat: Az amerikai kőris 180 °C-on történő hőkezelés hatására történő tömegvesztése



22. ábra: Az amerikai kőris 180 °C-on történő tömegvesztése [%] próbatestenként

	Tömegveszteség [%]	Tömegveszteség [g]
Átlag	12,11	26,44
Szórás	1,38	4,09
Minimum	5,912	15,15
Maximum	12,11	36,04
Variancia	1,911	16,79

6. táblázat: Az amerikai kőris 200 °C-on történő hőkezelés hatására történő tömegvesztesége



23. ábra: Az amerikai kőris 200 °C-on történő tömegvesztesége [%] próbatestenként

(2 cm mintatestek 1-es a bélhez legközelebb, 4 es legmesszebb)

Az amerikai kőris esetében is jelentősen megnő a faanyagok tömeg vesztesége (5–6. táblázat), de itt egyik hőkezelés után sem ismerhető fel a zöld juharnál észrevett tömegveszteség változás mintázata (22–23. ábra).

A tömegveszteségek összehasonlítása

A két faanyag hőkezelése során megfigyelhető, hogy különböző fafajok esetében a tömegveszteségek aránya eltér. Megfigyelhető a zöld juhar esetében, hogy a 200°C-on kezelt anyag tömegvesztesége 296%-a a 180°C fokon kezelt anyagénak. Az amerikai kőris esetében is hasonló a helyzet, bár kicsit magasabb eredmény jött ki. Ez 333% volt. Ennek az eltérésnek az okát szintén a faanyag alkotóelemeinek arányára lehet visszavezetni. Ahogy már említésre került, 180°C felett indulnak be a poliózok degradációs folyamatai. Az ilyen anyagok aránya határozza meg a faanyagok közötti tömegveszteség különbségét.

4.4. A faanyag sűrűségének meghatározása

Zöld juhar

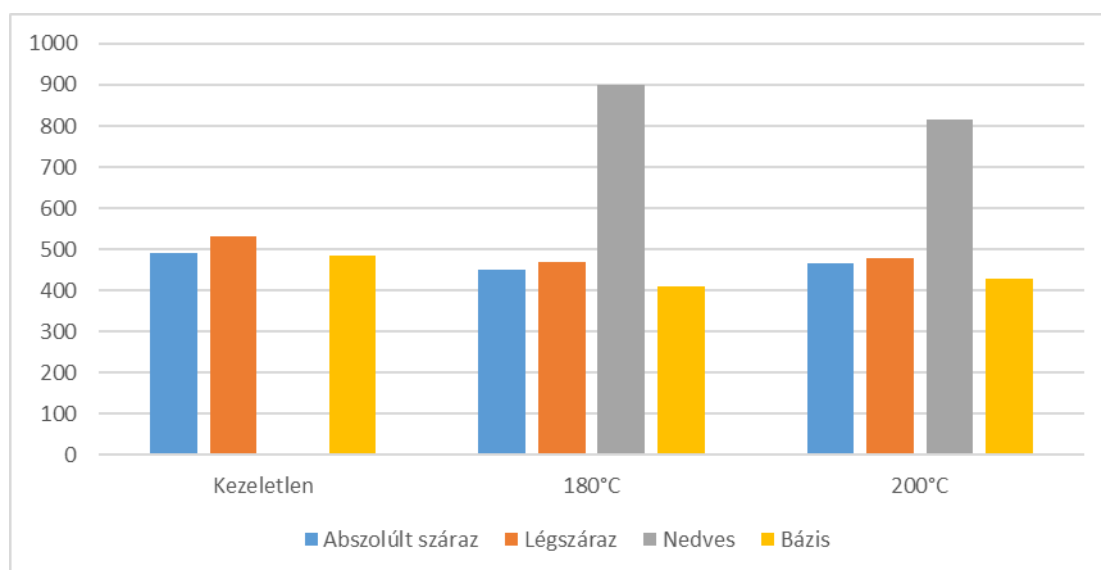
A zöld juhar sűrűségének mérésére 25 db 180°C-on kezelt és 28db 200°C-on kezelt mintatestet használtam (7–8. táblázat). Az összehasonlításhoz a kezeletlen faanyag adatai az amerikai kőrishez hasonlóan TOLNAI (2018) méréseiből származnak (24. ábra).

Sűrűség (kg/m ³)				
	Abszolút száraz	Légszáraz	Nedves	Bázis
Átlag	450	468	900	410
Minimum	418	435	798	383
Maximum	501	519	951	451
Szórás	20	20	29	16

7. táblázat: A 180°C-on kezelt zöld juhar sűrűsége

Sűrűség (kg/m ³)				
	Abszolút száraz	Légszáraz	Nedves	Bázis
Átlag	465	478	816	428
Minimum	430	446	764	394
Maximum	506	517	896	463
Szórás	22	21	38	17

8. táblázat: A 200°C-on kezelt zöld juhar sűrűsége



24. ábra: A zöld juhar sűrűségének változása hőkezelés hatására
(kezeletlen faanyag: TOLNAI, 2018)

Amerikai kőris

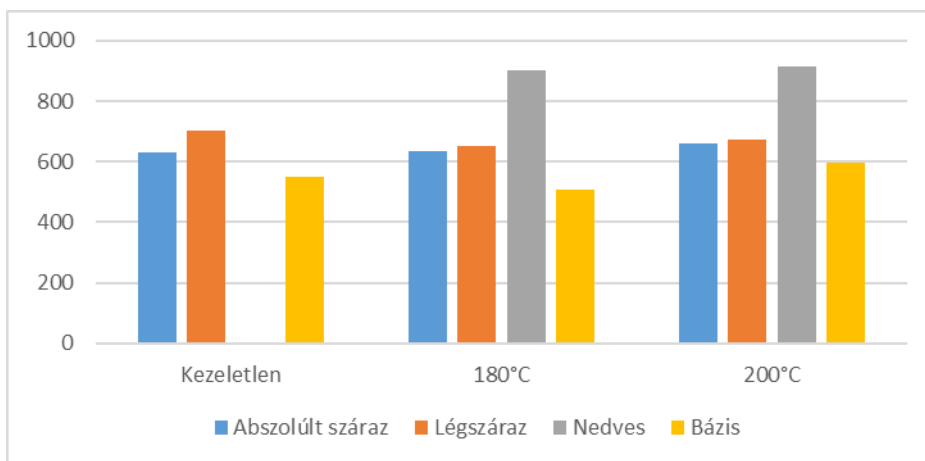
Az amerikai kőris sűrűségének meghatározására 23 db 180°C-on kezelt és 34 db 200°C-on kezelt mintatestet használtam (9–10. táblázat). Összehasonlítási alapnak szintén TOLNAI (2018) kezeletlen mintatestjeinek mérési adatait vettem (25. ábra).

Sűrűség (kg/m ³)				
	Abszolút száraz	Légszáraz	Nedves	Bázis
Átlag	634	653	901	509
Minimum	516	560	829	455
Maximum	690	707	984	599
Szórás	42	38	40	36

9. táblázat: A 180°C-on kezelt amerikai kőris sűrűsége

Sűrűség (kg/m ³)				
	Abszolút száraz	Légszáraz	Nedves	Bázis
Átlag	660	673	913	597
Minimum	579	596	873	535
Maximum	769	736	1000	689
Szórás	48	43	26	40

10. táblázat: A 200°C-on kezelt amerikai kőris sűrűsége



25. ábra: Az amerikai kőris sűrűségének változása hőkezelés hatására

(kezeletlen faanyag: TOLNAI, 2018)

Mindkét esetben elhanyagolható növekedés látható a légszáraz sűrűséghez képest. Ennek oka lehet, hogy a hőkezelés hatására történő térfogatvesztés miatt a sejtfalak aránya nagyobb a hőkezelt faanyagban, mint a kezeletlenben.

4.5. Zsugorodási-dagadási jellemzők

Zöld juhar

	Zöld juhar dagadási jellemzői				Zöld juhar zsugorodási jellemzői			
	Vonalas			Térfogati [%]	Vonalas			Térfogati [%]
	Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]		Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]	
Átlag	0,42	2,99	7,87	11,56	0,42	2,89	7,29	10,35
Minimum	-	1,27	6,20	8,95	-	1,25	5,83	8,22
Maximum	1,29	6,56	9,85	14,54	1,28	6,15	8,97	12,69
Szórás	0,28	0,90	0,91	1,33	0,27	0,84	0,78	1,07
Variancia	0,65	0,30	0,12	0,12	0,65	0,29	0,11	0,10
Irodalmi érték						3,9 ^a	7,4 ^a	14,8 ^a
Hegyi juhar					0,5 ^b	3,0 ^b	8,0 ^b	11,5-11,8 ^b

11. táblázat: A kezeletlen zöld juhar dagadási és zsugorodási jellemzői (TOLNAI, 2018)

^a-<https://www.wood-database.com/box-elder/>

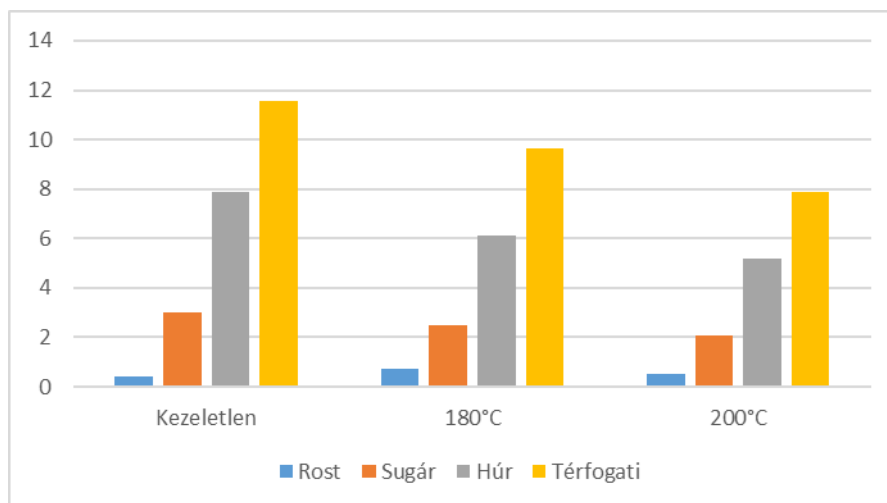
^b-MOLNÁR et al. (2016)

180°C-on kezelt zöld juhar								
	Dagadási jellemzők				Zsugorodási jellemzők			
	Vonalas			Térfogati [%]	Vonalas			Térfogati [%]
	Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]		Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]	
Átlag	0,75	2,51	6,14	9,63	0,74	2,45	5,77	9,91
Minimum	0,31	1,67	2,66	6,16	0,31	1,64	2,59	6,00
Maximum	1,14	4,79	7,13	1,14	1,13	4,58	6,65	10,97
Szórás	0,16	0,69	1,05	0,16	0,16	0,65	0,95	1,05

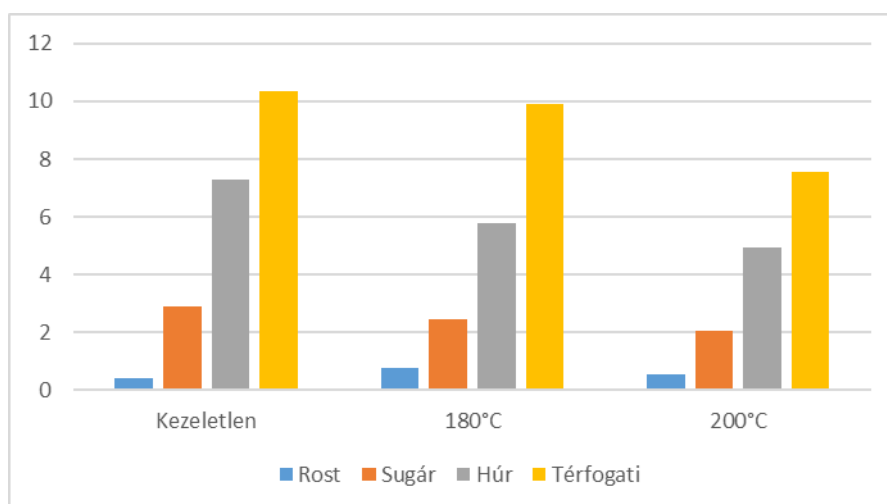
12. táblázat: A 180°C-on kezelt zöld juhar dagadási és zsugorodási jellemzői

200°C-on kezelt zöld juhar								
	Dagadási jellemzők				Zsugorodási jellemzők			
	Vonalas			Térfogati [%]	Vonalas			Térfogati [%]
	Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]		Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]	
Átlag	0,52	2,07	5,18	7,89	0,52	2,03	4,92	7,57
Minimum	0,29	1,32	3,83	6,48	0,29	1,30	3,69	6,24
Maximum	1,30	2,80	7,44	9,80	1,28	2,73	6,92	9,24
Szórás	0,24	0,32	0,72	0,81	0,24	0,31	0,64	0,74

13. táblázat: A 200°C-on kezelt zöld juhar dagadási és zsugorodási jellemzői



26. ábra: A zöld juhar dagadási tulajdonságainak változása a hőkezelés hatására (kezeletlen faanyag: TOLNAI, 2018)



27. ábra: A zöld juhar zsugorodási tulajdonságainak változása a hőkezelés hatására (kezeletlen faanyag: TOLNAI, 2018)

A zöld juharnál a kezeletlen faanyag adatait a 11. táblázatból lehet leolvasni, amit TOLNAI (2018) készített. A 12. és 13. táblázatban található a 180°C-on és 200°C-on kezelt faanyagok adatai. A 26. és 27. ábrán pedig az előző három táblázat adatainak összehasonlítása. 180°C-on megfigyelhető a rost irányban nagyobb mértékű zsugorodás, ez a faanyag torzulására vezethető vissza. Emiatt ezen adatok jelentéktelennek tekinthetők. Ami meglepő, hogy 200°C-on is észrevehető a rostirányú zsugorodás és dagadás növekedése. A juharnál a többi anatómiai irányban viszont mindkét esetben csökkenés figyelhető meg. Tehát itt mindkét hőmérsékleten jelentősebb dimenzióstabilitás érhető el.

Így mindkét kezelés esetében kijelenthető, hogy a dimenzióstabilitás jelentősen csak 200°C-os kezelés során növekszik. Tehát ha az anyag felhasználása során szempont a dimenzióstabilitás növelése, a 200°C-os eljárás javasolt. A húr és sugár irányú zsugorodás és dagadás húr és sugár irányú aránya egyik esetben sem éri el a 2-t, így nem kell aggódnunk a túlzottan nagy belső feszültségek miatt.

A dimenzióstabilitás növekedését az ASE segítségével tudjuk meghatározni.

	180°C	200°C
Sugár	15,22	29,75
Húr	20,85	32,51
Térfogat	4,25	26,85

14. táblázat: Zöld juhar ASE [%]

Amerikai kőris

	Amerikai kőris dagadási jellemzői				Amerikai kőris zsugorodási jellemzői			
	Vonalas			Térfogati [%]	Vonalas			Térfogati [%]
	Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]		Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]	
Átlag	0,63	5,17	8,15	14,46	0,63	4,91	7,53	12,62
Minimum	0,19	3,64	6,30	11,03	0,19	3,51	5,93	9,93
Maximum	1,98	7,18	9,41	17,86	1,94	6,70	8,60	15,15
Szórás	0,46	1,04	0,93	1,79	0,46	0,94	0,80	0,11
Variancia	0,73	0,20	0,11	0,12	0,73	0,12	0,11	0,11
Irodalmi érték						4,6 ^a	7,1 ^a	12,5 ^a
Magas kőris					0,2 ^b	4,6-5 ^b	8,0-8,4 ^b	12,8-13,6 ^b

15. táblázat: A kezeletlen amerikai kőris dagadási és zsugorodási jellemzői (TOLNAI , 2018)

^a-<https://www.wood-database.com/green-ash/>

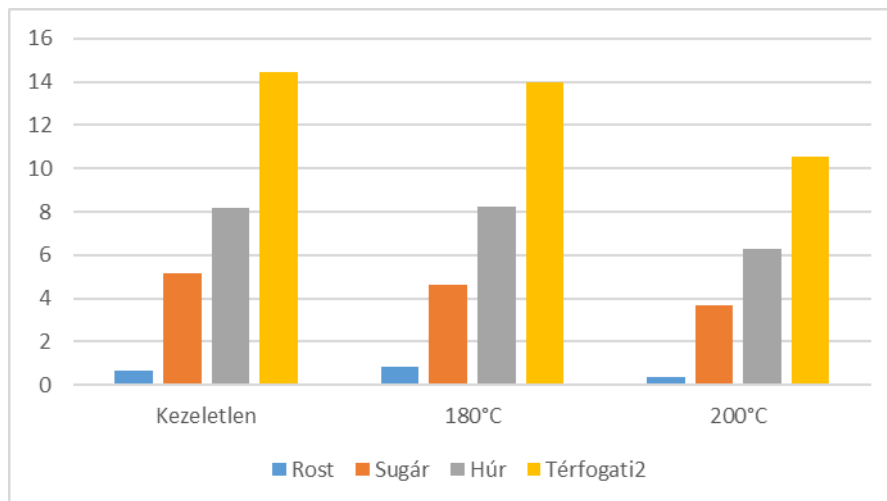
^b-MOLNÁR et al. (2016)

180°C-on kezelt amerikai kőris								
	Dagadási jellemzők				Zsugorodási jellemzők			
	Vonalas			Térfogati [%]	Vonalas			Térfogati [%]
	Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]		Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]	
Átlag	0,86	4,61	8,22	14,00	0,85	4,41	7,59	13,08
Minimum	0,04	3,71	5,34	11,33	0,04	3,57	5,07	10,86
Maximum	2,35	6,21	10,88	17,86	2,30	5,85	9,81	16,46
Szórás	0,71	0,75	1,361	2,06	0,70	0,68	1,16	1,81

16. táblázat: A 180°C-on kezelt amerikai kőris dagadási és zsugorodási jellemzői

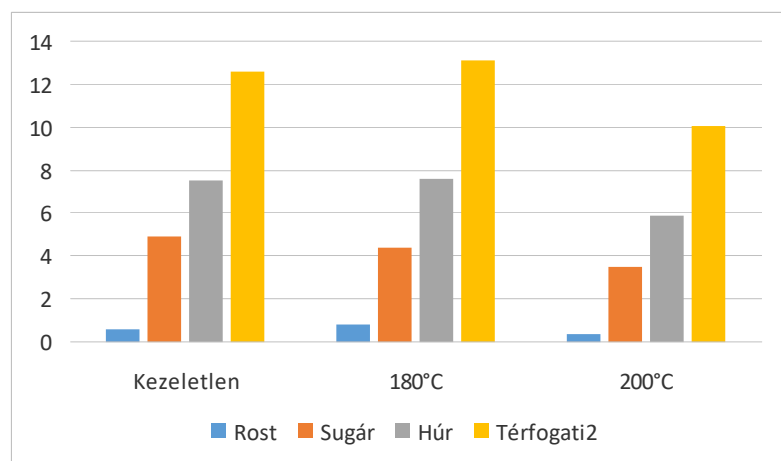
200°C-on kezelt amerikai kőris								
	Dagadási jellemzők				Zsugorodási jellemzők			
	Vonalas			Térfogati [%]	Vonalas			Térfogati [%]
	Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]		Rost [%]	Sugár [%]	Húr [%]	
Átlag	0,37	3,65	6,27	10,55	0,37	3,52	5,90	10,02
Minimum	0,01	2,38	5,11	9,96	0,01	2,32	4,86	7,79
Maximum	0,85	5,19	7,11	10,55	0,85	4,93	6,64	11,47
Szórás	0,15	0,57	0,46	0,95	0,15	0,52	0,40	0,88

17. táblázat: A 200°C-on kezelt amerikai kőris dagadási és zsugorodási jellemzői



28. ábra: Az amerikai kőris dagadási tulajdonságainak változása a hőkezelés hatására [%]

(kezeletlen faanyag: TOLNAI, 2018)



29. ábra: Az amerikai kőris zsugorodási tulajdonságainak változása a hőkezelés hatására [%]

(kezeletlen faanyag: TOLNAI , 2018)

A dagadási és zsugorodási jellemzők meghatározása során a sűrűségmérés adatait használtam fel. A 15. táblázatban láthatók a TOLNAI (2018) által mért adatok, majd a 16. és 17. táblázatokban a 180 és 200°C-on hőkezelt faanyagok dagadási és zsugorodási jellemzői. A 28. és 29. ábrán összevethetjük a hőkezelés során történt változásokat. Megfigyelhető, hogy rost és húr irányban a 180°C-os kezelés hatására enyhe növekedés látható a zsugorodásban és a dagadásban is. Ennek oka a faanyag torzulása, de mivel minden esetben csak néhány század százalékról van szó, ez jelentéktelen. A sugár irányban már csökkenés figyelhető meg.

A 200°C-on hőkezelt faanyagok már jelentősebb csökkenést mutatnak. A rost irányú zsugorodás-dagadás a 60%-ára csökken az eredetinek. A sugár irányú a 70%-ára, a húr irányú pedig a 75%-ára. A térfogati változások is ebben az esetben lesznek jelentősebbek. Ez zsugorodás esetében 79%, dagadás esetében pedig 73%. Tehát kijelenthető, hogy az általunk alkalmazott 10 órás kezelés során csak a 200°C-on kezelt amerikai kőris esetében jelentősebb a dimenzióstabilitás növekedése. A húr és sugár irányú zsugorodás és dagadás húr és sugár irányú aránya egyik esetben sem éri el a 2-t, így itt sem kell aggódnunk a túlzottan nagy belső feszültségek miatt.

	180°C	200°C
Sugár	10,18	28,30
Húr	-0,79	21,64
Térfogat	-3,64	20,61

18. táblázat: Amerikai kőris ASE [%]

Az amerikai kőris esetében a 180°C-on kezelt faanyag húr és térfogati irányban is ASE növekedést mutat (18. táblázat). Ez a sűrűségnél már leírt sejtfalak nagyobb arányára következtethető.

4.6. A hajlítószilárdság és a rugalmassági modulusz vizsgálatának eredményei

A vizsgálat során 26 db 180 C°-on kezelt kőris, 30 db 180 C° kezelt juhar, 25 db 200 C°-on kezelt kőris, 29 db 200 C°-on kezelt juhar próbatestet vizsgáltam.

Zöld juhar

	Hajlítószilárdság [N/mm ²]			
	Kezeletlen ^a	Irodalmi érték ^b	180 C°-on hőkezelt	200 C°-on hőkezelt
Átlag	79	55	55,44	34,12
Minimum	10	-	41,47	18,67
Maximum	94	-	76,61	50,22
Szórás	14	-	9,61	9,68

19. táblázat: A hőkezelt zöld juhar hajlítószilárdság-mérési adatai

a-TOLNAI (2018)

b-<https://www.wood-database.com/box-elder/>

A 19. táblázatban a zöld juhar hajlítószilárdsági mérés adatai láthatók. Itt az irodalmi érték nagyban eltér a TOLNAI (2018) által meghatározott hajlítószilárdsághoz képest. Mivel a faanyagok termőhelye nagyban befolyásolhatja a faanyag minőségét, ezért arra következtettem, hogy a Wood Database által vizsgált faanyag más éghajlat, vagy termőhelyi környezetben növekedett, mint a másik kezeletlen faanyag. Ezért a TOLNAI (2018) által mért adatokat hasonlítottam össze a sajátommal. A 180 C°-on kezelt anyag hajlítószilárdsága a 70%-a a kezeletlenének. Azonban a 200 C°-os kezelés hatására a szilárdság 43%-ra csökken a kezeletlen faanyaghoz képest.

Amerikai kőris

	Hajlítószilárdság [N/mm ²]			
	Kezeletlen ^a	Irodalmi érték ^b	180 C°-on hőkezelt	200 C°-on hőkezelt
Átlag	105	97	77,58	54,55
Minimum	88	-	57,48	41,94
Maximum	118	-	103,00	91,37
Szórás	9	-	14,15	12,79

20. táblázat: A hőkezelt amerikai kőris hajlítószilárdság-mérési adatai

a-TOLNAI (2018)

b-<https://www.wood-database.com/green-ash/>

Az 20. táblázat az amerikai kőris mintatestek hajlítószilárdság mérésének eredményeit tartalmazza. A 26 db próbatestből 3 db mérési adatait fahiba miatt el kellett távolítani, mert ezek vagy göcs, vagy drasztikus szálfifutás miatt nagyon eltérő eredménnyel rendelkeztek. A kőris esetében a részleges szálfifutás sok esetben előfordult, ugyanis erre a fajra jellemző a csavarodás. Az adatokon látható, hogy a Wood Database honlapján lévő irodalmi érték, és a TOLNAI (2018) által mért értékhez képest a 180 C°-on történt hőkezelés hatására az eredeti 74%-ra redukálódik, míg a 200 C°-on kezelt anyag nagyjából felére csökken.

Hajlítószilárdsági mérés összegzés

A hőmérséklet nagyságából ítélve összességében főleg a poliózok bomlása okozza a faanyag hajlítószilárdságának csökkenését, mivel a poliózok bomlása kb. 190 C°-on kezdődik meg. Ez magyarázza a 180 C°-os és 200 C°-os kezelés közötti drasztikus szilárdságcsökkenést. Mindkét faanyag majdnem minden esetben a ridegtörés képét mutatta. A múlt félév során mértem a hőkezeléssel járó tömegvesztést is. Ezért szeretném a tömegvesztést és a hajlítószilárdság csökkenését összehasonlítani, hogy megfigyelhető-e valamilyen arányos összefüggés a két érték között.

	Zöld juhar		Amerikai kőris	
Kezelési hőmérséklet [C°]	180	200	180	200
Tömegvesztés [%]	2,59	7,7	3,63	12,11
Hajlítószilárdság csökkenés [%]	12,65	37,46	8,24	29,53

21. táblázat: A hajlítószilárdság változása a tömegvesztéshez képest

A 21. táblázatban látható, hogy a tömegveszteség és a hajlítószilárdság csökkenés mértéke fafajonként eltérő mértékű. Míg a zöld juharnál alacsonyabb volt a tömegveszteség, magasabb hajlítószilárdság-vesztés figyelhető meg. Az amerikai kőris esetében egy magasabb arányú tömegveszteség esetén nem csökkent annyival a szilárdság, mint a juharnál. Az ok a faanyag összetételében és szerkezetében keresendő. Valószínűnek tartom, hogy a kőrisben több járulékos anyag volt, illetve olyan szerkezete van, hogy a 200C° környékén bomló poliózok nem befolyásolják annyira a fizikai tulajdonságait, mint a juhar esetében.

	Rugalmassági modulusz [N/mm ²]			
	Kezeletlen ^a	Irodalmi érték ^b	180 C°-on hőkezelt	200 C°-on hőkezelt
Átlag	7179	7240	7100	6949
Minimum	2153	-	5094	4096
Maximum	9614	-	9730	10348
Szórás	1314	-	1470	1820
Variaiancia	0,18	-		

22. táblázat: A hőkezelt zöld juhar rugalmassági modulusza

a-TOLNAI (2018)

b-<https://www.wood-database.com/box-elder/>

A zöld juhar rugalmassági moduluszának változása hőkezelés hatására a 22. táblázatban látható. A rugalmassági modulusz kis mértékben csökken. Az irodalmi és a hőkezelt anyagok között 2-4% eltérés mutatkozik. Itt is ki kellett vennem néhány próbatest adatait fahibák miatt. Ez arra enged következtetni, hogy a rugalmas alakváltozási fázisban, amit a gép 10-40% közé tesz, a hasonló erők hatására hasonló alakváltozások mennek végbe.

	Rugalmassági modulusz [N/mm ²]			
	Kezeletlen ^a	Irodalmi érték ^b	180 C°-on hőkezelt	200 C°-on hőkezelt
Átlag	9733	11400	10501	11622
Minimum	6920	-	8241	7740
Maximum	12146	-	12442	16275
Szórás	1598	-	1183	2383
Variaiancia	0,16	-		

23. táblázat: A hőkezelt amerikai kőris rugalmassági modulusza

a-TOLNAI (2018)

b-<https://www.wood-database.com/green-ash/>

Hasonlóan alacsony a rugalmassági modulusz változása a kőrisnél, mint a juharnál (23. táblázat). A rugalmas alakváltozási fázisban hasonló értékeket produkálnak. A 200 C°-os kezelés átlaga magasabb az irodalmi átlagnál is.

4.7. Az ütés-hajlítószilárdság vizsgálat eredményei

Az ütés-hajlító szilárdság mérési eredményeimet TOLNAI (2018) által mért értékekhez fogom hasonlítani, így megfigyelhetjük, hogy a tömegveszteség és a hőkezelés milyen hatással van a szilárdságra (24. táblázat). Jelentős csökkenést tapasztaltam. Minden próbatest a ridegtörést mutatta (30. ábra). A konklúzió, hogy már a 180 C°-on történő kezelés esetén nagyban csökken az ütés-hajlító szilárdság, tehát már ez a hőmérséklet is nagyban befolyásolja a faanyag szerkezetét.

	Amerikai kőris			Zöld juhar		
	Ütés-hajlító szilárdság [J/cm ²]			Ütés-hajlító szilárdság [J/cm ²]		
	Kezeletlen ^a	180C°	200C°	Kezeletlen ^a	180C°	200C°
Átlag	8,04	2,56	1,80	3,19	2,11	1,20
Minimum	3,74	1,41	7,32	1,46	1,39	0,54
Maximum	15,38	3,85	3,03	6,93	2,99	2,73
Szórás	2,65	0,81	0,80	1,26	0,41	0,48

24. táblázat: Az ütés-hajlítószilárdság mérési adatai

a-TOLNAI (2018)



30. ábra: Az amerikai kőris 180 °C-on kezelt faanyagának törési képe

4.8. A nyomószilárdság-mérés eredményei

A nyomószilárdságot a mérések ismertetésében leírtak szerint vizsgáltam. A klímahelyiségből vettem ki a faanyagot. Ezt követően történt meg a mérés, majd a maximális erő értékéből és a keresztmetszetből kiszámoltam a nyomóerőt, majd a tömeg leszáritás utáni visszaméréséből meghatároztam a 12%-os nedvességtartalomra vonatkozó értékeket. Az itt mért adatokat szintén TOLNAI (2018) adataival fogom összehasonlítani.

Zöld juhar

Eljárás	Kezeletlen ^a		180°C	200°C
	Nedves ^a	Légszáraz ^a	σ	σ
Átlag	37,81	36,28	45,09	49,23
Minimum	29,17	27,00	31,46	26,38
Maximum	42,60	41,21	49,57	58,33
Szórás	2,82	2,70	3,37	5,12

25. táblázat: A zöld juhar nyomószilárdsága [MPa]

a-TOLNAI (2018)

σ - nyomószilárdság

A nyomószilárdság a zöld juhar esetben növekedés figyelhető meg mindkét hőmérséklet esetében, ez a térfogatcsökkenéssel járó sejtfalarány növekedésre, illetve az egyensúlyi fanedvesség csökkenésére vezethető vissza (25. táblázat). Így elmondható, hogy a hőkezelés gyakorlatilag növeli a zöld juhar statikus nyomószilárdságán.

Amerikai kőris

Eljárás	Kezeletlen ^a		180°C	200°C
	Nedves ^a	Légszáraz ^a	σ	σ
Átlag	47,53	45,96	64,22	69,85
Minimum	43,19	40,63	52,45	55,04
Maximum	53,37	51,18	76,33	87,69
Szórás	2,86	2,87	7,42	9,28

26. táblázat: Az amerikai kőris nyomószilárdsága [MPa]

a-TOLNAI (2018)

σ - nyomószilárdság

Az amerikai kőrisnél a hőkezelés hatására a nyomószilárdság nő (26. táblázat). Ez mindkét hőmérsékletre igaz. A növekedés oka lehet, az hogy a hőkezelés során történő térfogat csökkenés hatása miatt a mintatestben nagyobb részben van jelen a sejtfal anyaga, így a szilárdság is nagyobb lesz. A tönkremenetel nagyon hasonló, de a 200°C kezelt mintatestek között található néhány szálasan szétváló darab is. Ez mutatja a faanyag rideggé válását.

A nyomószilárdság meghatározása közben a mért adatokból megfigyelhető, hogy azonos környezetben lévő hőkezelt faanyagok egyensúlyi nedvességtartalma változó. A 27. táblázatban látható hogy a hőkezelés hatására csökken az egyensúlyi fanedvesség.

	Egyensúlyi fanedvesség [%]			
Fafaj	Amerikai kőris		Zöld juhar	
Kezelés	180°C	200°C	180°C	200°C
Nedvesség	7,13	5,43	6,87	5,14

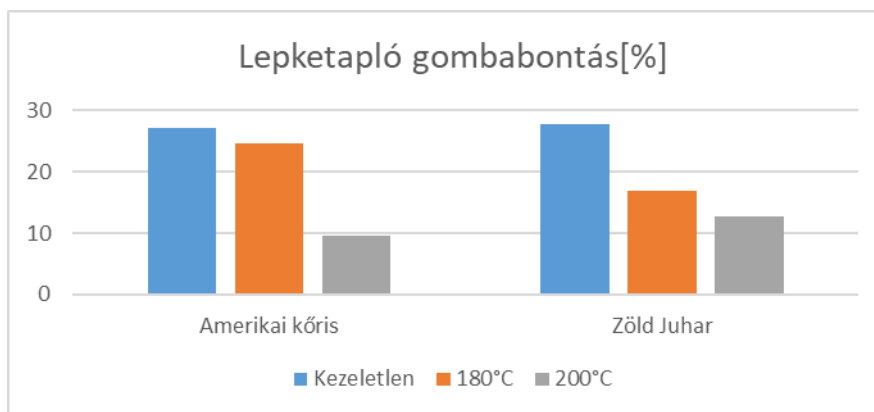
27. táblázat: Egyensúlyi fanedvesség a klímaszobából kivett mintatestekben

4.9. A gombaállósági vizsgálat eredményei

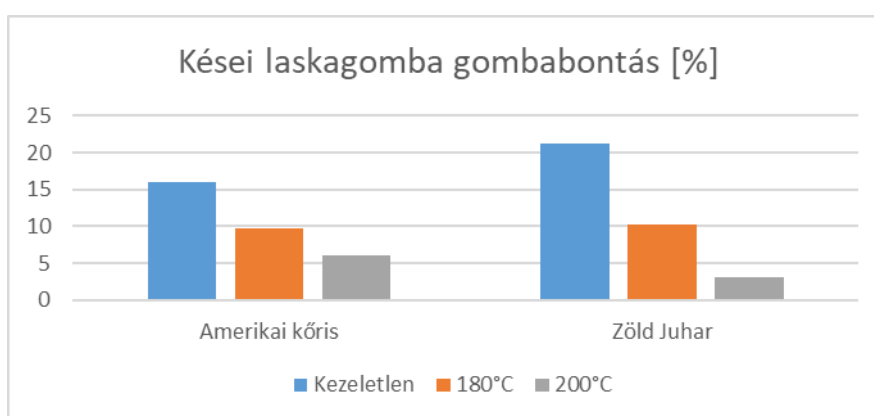
A lepketaplóval (*Coriolus versicolor*) végzett kísérlet eredményei a 31. ábrán láthatók. Az amerikai kőrisnél a 180°C-os kezelés nem hozott nagymértékű csökkenést, azonban a 200°C-on kezelt anyagok már jelentősebb ellenállást tanúsítottak a károsítóval szemben. A zöld juhar esetében már 180°C-on is jelentősebb csökkenés figyelhető meg a gombabontásban, azonban ennél a fafajnál 200°C-on nem érhető el olyan jelentős csökkenés, mint az amerikai kőris esetében.

A kései laskagombával (*Pleurotus ostreatus*) elvégzett mérések a 32. ábrán láthatóak. Ezen gombafaj esetében jól látható a 180°C-os és a 200°C-os minták közötti különbség. Azonban ennél a fajnál megfigyelhető, hogy a hőkezelt zöld juhart kevésbé bontja, mint a hőkezelt amerikai kőrist.

A 29. táblázatban láthatók a pontos adatok, és itt össze lehet hasonlítani a két gombafaj által végzett bontás mértékét. A szabvány szerinti értékeket a 28. táblázat mutatja.



31. ábra: Gombabontás mértéke lepketapló (*Coriolus versicolor*) használata esetén



32. ábra: Gombabontás mértéke kései laskagomba (*Pleurotus ostreatus*) használata esetén

Ahhoz, hogy megállapíthassuk a hőkezelés sikerességét, az MSZ EN 350 szabványban leírt besoroláshoz kell hasonlítanunk az általunk mért értékeket.

Tartóssági osztály	Név	Tömegcsökkenés (ML) [%]
TO1	Nagyon tartós	$ML \leq 5$
TO2	Tartós	$5 < ML \leq 10$
TO3	Közepesen tartós	$10 < ML \leq 15$
TO4	Mérsékelten tartós	$15 < ML \leq 30$
TO5	Nem tartós	$30 < ML$

28. táblázat: Gombaállósági osztályok (MSZ EN 350: 2016)

	Kezelési típusok	Gombaontás mértéke [%]			
		Lepketapló (<i>Coriolus versicolor</i>)		Kései laskagomba (<i>Pleurotus ostreatus</i>)	
		Tömegveszteség [%]	Tartóssági osztály	Tömegveszteség [%]	Tartóssági osztály
Amerikai kőris	Kezletlen	27,23	TO4	15,97	TO3
	180°C	24,61	TO4	9,80	TO2
	200°C	9,51	TO2	6,00	TO2
Zöld juhar	Kezletlen	27,78	TO4	21,22	TO4
	180°C	16,81	TO4	10,24	TO3
	200°C	12,69	TO3	3,08	TO1

29. táblázat: A gombabontás mértéke

A 29. táblázatban látható adatokhoz hozzárendelt osztályok szerint csak az amerikai kőrisnél sikerült elérni a TO1-et, de ott is csak az egyik gombafajnál. Mivel a szabvány értelmében a faanyagnak minden gombafajra nézve 5% alatti értéket kellene kapnia a TO1 minősítéshez, a méréseim alapján a gombaállóság feltétele csak korlátozottan teljesül. Ennek oka az, hogy a lepketaplónál már közel 13%-os bontásról beszélhetünk. Így csak az állítható meg, hogy a 200 °C-os ilyen jellegű kezelés minimum egy tartóssági osztállyal növeli a gombaállóságot. A 180°C-nál nem értünk el minden esetben tartóssági osztály növekedést.

Fontos megemlíteni, hogy a faanyaghoz társított tartóssági értékek csak szemléltetésre szolgálnak. Mivel nem végeztünk nullpróbát a mintatesteken így ez nem tekinthető hitelesnek.



33. ábra: Mintatestek a beoltott táptalajon

5. Összefoglalás

A céloom két adventív invazív fafaj hőkezelt faanyaga tulajdonságainak vizsgálata, és az erről szóló szakirodalom bővítése volt. Az amerikai kőris és a zöld juhar esetében is jelentős, és szemnek kellemes színezet jött létre a hőkezelés hatására. A faanyagok szilárdsága hőkezelés után is lehetővé teszi azt, hogy bútorok, borítások és járófelületek készüljenek belőlük. A gombaállósági vizsgálat eredményeiből kiderült, hogy a faanyag alkalmas fedett kültéri helyeken való alkalmazásra. A szilárdsági és sűrűségi vizsgálat során alkalmazott újítás, hogy azonos anyagból származó mintatestek segítségével pontosabb összefüggéseket állapíthatunk meg a kettő között. A hőkezelés egy környezetbarát eljárás, ugyanis csak energiaigénye van. Nem keletkezik semmilyen veszélyes hulladék, és az anyag is képes a biodegradációra, így utána nem marad vissza semmilyen hulladék. Összeségében mindkét faanyag dimenzióstabilitása, és gombaállósága kedvezően változtak az eljárás során, illetve a fizikai tulajdonságok sem degradálódtak jelentős mértékben így a hőkezelés olyan alternatíva lehet más anyagokra, mely olcsóbb és környezetbarát módon helyettesítheti elődjait.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani Dr. Komán Szabolcsnak és Dr. Bak Miklósnak, hogy tudásukkal és tapasztalatukkal segítették munkámat. Köszönöm a Soproni Egyetem Faipari Mérnöki és Kézműipari Kar Faipari és Műszaki Intézetének, hogy rendelkezésemre bocsátották a munkámhoz szükséges laboratóriumokat. Köszönetet szeretnék mondani professzoraimnak, tanárainknak, gyakorlati oktatóimnak a tőlük kapott tudásért, valamint mérnöki szemléletem formálásáért. Hálával tartozom családomnak és hallgatótársaimnak, akik segítettek és bátorítottak tanulmányaim során.

7. Irodalomjegyzék

- Akyildiz, M. H. – Ates, S. – Özdemir, H. (2009): Technological and chemical properties of heat-treated Anatolian black pine wood. *African Journal of Biotechnology* 8(11): 2565–2572.
- Bak M. (2013): Növényi olajokban hőkezelt nyár faanyag tulajdonságainak vizsgálata. Dok-tori (PhD) értekezés. Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 247 pp.
- Bartha D. – Csiszár Á. (2012): Amerikai kőris (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.). In: Csiszár Á. (szerk.): Inváziós növényfajok Magyarországon. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 195-199.
- Boonstra, M. – Van Acker, J. – Tjeerdsma, B. – Kegel, E. (2007): Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science* 64: 679–690.
- Cseh B. J. (2020): Ülőbútor előállítására szánt natúr és hőkezelt Pannónia nyár faanyagok fizikai és mechanikai vizsgálatai. Szakdolgozat, Soproni Egyetem, Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar, Sopron.
- Diószegi S. – Fazekas M. (1807): Magyar Fűvész Könyv. Melly a két magyar hazábann található növényeknek megismerésére vezet, a Linné Alkotmánya szerent. Csáthy György, Debreczen, 608 pp.
- Dirol, D. – Guyonnet, R. (1993): Durability by rectification process. In: International Research Group on Wood Preservation, IRG/WP 93-40015.
- Esteves, B. – Domingos, L – Pereira, H. (2008): Pine wood modification by heat treatment in air. *BioResources* 3(1): 142–154.
- Esteves, B. – Velez Marques, A. – Domingos, L – Pereira, H. (2007): Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood science and technology* 41(2): 193–207.
- Gencsi L. – Vancsura R. (1992): Dendrológia. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 728 pp.
- Gyarmati B. – Igmándy Z. - Pagony H. (1964): Faanyagvédelem. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 345 pp.
- Horváth N. (2008): A termikus kezelés hatása a faanyag tulajdonságaira, különös tekintettel a gombaállóságra. Doktori (PhD) értekezés. Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Sopron, 139 pp.
- Kim, G. – Yun, K. – Kim, J. (1998): Effect of heat treatment on the decay resistance and the bending properties of radiata pine sapwood. *Material und Organismen* 32(2): 101–108.
- Korda M. – Kézdy P. – Csiszár Á. (2017): Idegenhonos, inváziós fajok hazánk védett területein. – *Erdészeti Lapok* 152(4): 107–109.
- Korkut, D. – Akgü, M. – DüNDAR, T. (2008): The effects of heat treatment on some technological properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Bioresource Technology* 99: 1861–1868.

- Mazela, B. – Zakrzewski, R. – Grzeskowiak, W. – Cofta, G. – Bartkowiak, M. (2003): Preliminary research on the biological resistance of thermally modified wood. In: First European Conference on Wood Modification (Konferenciakiadvány), Ghent, Belgium, pp. 113–120.
- Molnár S. (1999): Faanyagismerettan. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 467 pp.
- Nagy L. (2016): A kőrisek új betegsége, a *Hymenoscyphus fraxineus* által okozott hajtáspusztulás terjedésének, növekedésének, patogenitásának vizsgálata. Doktori (PhD) értekezés Tézisei, Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Sopron, 7 pp.
- Nagy N. – Fehér S. – Dufla F. (2016): A kései meggy és a turkesztáni szil faanyaga és felhasználhatósága. – Erdészeti Lapok 151(2): 42–45.
- Nassar, M. M. – MacKay, G. D. M. (1983): Mechanism of thermal decomposition of lignin. Wood and Fiber Science 16(3): 441–453.
- Németh K. (1998): A faanyag degradációja. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 101 pp.
- Pausinger J. (1877): A tölgyekről. – Erdészeti Lapok 16(7): 412–416.
- Péch D. (1896): Az amerikai kőrisfa. – Erdészeti Lapok 35(11): 956–957.
- Rezayati Charani, P. – Mohammadi Rovshandeh, J. – Mohebbi, B. – Ramezani, O. (2007): Influence of hydrothermal treatment on the dimensional stability of beech wood. Caspian Journal of Environmental Sciences 5(2): 125–131.
- Sahin, H. I. (2017): Heat treatment application methods and effects of heat treatment on some wood properties. In: Çınar, Ö. (ed.): Book of Proceedings (III. International Conference of Engineering and Natural Science), Budapest, pp. 540–546.
- Takáts P. (2014): Faanyag szárítás. Egyetemi jegyzet, Soproni Egyetem, Sopron.
- Tiemann, H. D. (1920): Effect of different method of drying on the strength and hygroscopicity of wood, 3rd ed. The kiln drying of lumber. J.P. Lippincott Co., Philadelphia, PA.
- Tjeerdsma, B. – Boonstra M. – Militz, H. (1998): Thermal modification of nondurable wood species. Part 2. Improved wood properties of thermally treated wood. In: International Research Group on Wood Preservation, IRG/WP 98-40124.
- Tjeerdsma, B. – Stevens, M. – Militz, H. – Van Acker, J. (2002): Effect of process conditions on moisture content and decay resistance of hydrothermally treated wood. Holzforschung und Holzverwertung 5: 94–99.
- Tolnai D. (2018): Inváziós fafajok (*Acer negundo*, *Fraxinus pennsylvanica*) műszaki tulajdonságainak feltárása. Szakdolgozat, Soproni Egyetem, Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar, Sopron.
- Udvardy L. – Nótári K. (2012): Zöld juhar (*Acer negundo* L.) In: Csiszár Á. (szerk.): Inváziós növényfajok Magyarországon. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 145–149.
- Veres R. (2008): Faipari anyag és gyártásismeret. Szega Books Kft., Pécs 204 pp.

Weiland, J. – Guyonnet, R. (2003): Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. Holz als Roh- und Werkstoff 61(3): 216–220.

Winandy, J. – Lebow, P. (2001): Modeling strength loss in wood by chemical composition. Part I. An individual component model for southern pine. Wood And Fiber Science, 33(2): 239–254.

Yun, K.-E. – Kim, G.-H. – Kim, J.-J. (1999): Effect of heat treatment on the dimensional stability and bending properties of radiata pine sapwood. Journal of Korean Wood Science and Technology 27(4): 30–37.

Szabványok:

MSZ 6786: 1998 Faanyagvizsgálatok. Nedvességtartalom meghatározása

MSZ 6786-15: 1984 Faanyagvizsgálatok. Rugalmassági együttható meghatározása statikus hajlítással

MSZ 6786-18: 1989 Faanyagvizsgálatok. A zsugorodás meghatározása

MSZ 12865: 1980 Faanyagok hajlítószilárdságának meghatározása

MSZ 6786-3: 1988 Faanyagvizsgálatok. Sűrűség meghatározása

MSZ 6786-5: 1976 Faanyagvizsgálatok. Faanyagok statikus hajlítószilárdságának meghatározása

MSZ 6786-7: 1977 Faanyagvizsgálatok. Faanyagok ütéshajlítószilárdságának meghatározása

MSZ 6786-9: 1989 Faanyagvizsgálatok. A dagadás meghatározása

MSZ 8786-8: 1977 Faanyagvizsgálatok. Faanyagok rostirányú nyomószilárdságának meghatározása

MSZ EN 350: 2016 Fa és a fa alapanyagú termékek tartóssága. A fa és a fa alapanyagú termékek biológiai anyagainak tartóssági vizsgálata és osztályozása

Weboldalak:

<https://www.thermotreatedwood.com/european-wood-modification> (2022.10.23.)

https://www.platowood.com/upload_directory/uploads/the-platowood-process.pdf (2022.10.23.)

<https://www.wood-database.com/green-ash/> (2022.04.12.)

<https://www.wood-database.com/box-elder/> (2022.04.12.)