

Doktori (PhD) értekezés

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari 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 PANNÓNIA NYÁR FAANYAG GŐZÖLÉSI TULAJDONSÁGAINAK
VIZSGÁLATA**

Készítette:

Banadics Endre Antal

Témavezetők:

Dr. Varga Dénes egyetemi docens

Prof. Dr. Tolvaj László egyetemi tanár

Sopron

2024

**A PANNÓNIA NYÁR FAANYAG GŐZÖLÉSI TULAJDONSÁGAINAK
VIZSGÁLATA**

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

Írta:
Banadics Endre Antal

Készült a Soproni Egyetem Cziráki József Doktori Iskola Faanyagtudomány programja keretében

Témavezetők: Prof. Dr. Tolvaj László egyetemi tanár

Elfogadásra javaslom (igen / nem)
(aláírás)

Dr. Varga Dénes egyetemi docens

Elfogadásra javaslom (igen / nem)
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton 93,3%-ot ért el,

Sopron, 2020. szeptember 24.

.....
Prof. Dr. Németh Róbert a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen/nem)

Első bíráló (Dr. Németh László) igen /nem
(aláírás)

Második bíráló (Prof. Dr. Németh Róbert) igen /nem
(aláírás)

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

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

Sopron, 2024.

.....
a Bírálóbizottság elnöke

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

.....
Az EDHT elnöke

NYILATKOZAT

Alulírott Banadics Endre Antal jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy „A Pannónia nyár faanyag gőzölési tulajdonságainak vizsgálata” című doktori értekezés önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskolája által előírt, a kutatás készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében¹.

Kijelentem továbbá, hogy a dolgozat készítése során az önálló munka kitétel tekintetében a konzulenseket, illetve a feladatot kiadó oktatókat nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul vessez, hogy amennyiben bizonyítható, hogy a dolgozatot nem saját magam készítettem, vagy a dolgozattal kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja a doktori értekezés befogadását.

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

Sopron, 2024. január 4.

.....
Banadics Endre Antal

doktorandusz

¹ 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.

Tartalom

1. Bevezetés	4
2. Célkitűzés	6
3. Szakirodalmi áttekintés.....	7
3.1. A fa szerkezete, felépítése és tulajdonságai.....	7
3.2. Fa-víz kapcsolatok áttekintő jellemzése	9
3.3. Módosító kezelések, hőkezelések.....	11
3.4. Színmérés a faanyagkutatásban	13
3.5. Gőzölés, mint modifikációs folyamat.....	17
4. A vizsgálatba bevont faanyagok és a vizsgálati módszerek	23
4.1. Felhasznált faanyagok	23
4.1.1. A nemesnyárok általános jellemzői	23
4.1.2. A Pannónia nyár általános jellemzése	24
4.1.4. Az akác általános jellemzése	26
4.1.5. A bükk általános jellemzése	27
4.2 A vizsgálat során felhasznált eszközök és a mérés módja.....	28
4.2.1. Gőzölési kísérletek	28
4.2.2. A gőzölt nyár faanyag UV sugárzással szembeni ellenálló képességének vizsgálata	35
4.2.3. Egyensúlyi fanedvesség meghatározása	36
4.2.4. A vizsgálati módszer kidolgozását segítő előkísérletek	36
5. Eredmények és kiértékelés	38
5.1 Előzetes vizsgálatok eredményei, homogenizáció (előkísérlet)	38
5.2 Segédanyagokkal együtt gőzölt nyár faanyag színváltozása (előkísérlet).....	43
5.3 A nyár faanyag színének változása különböző hőmérsékleteken történt gőzölésnél.	47
5.4 Akác és a bükk segédanyag jelenlétének hatása a nyár faanyag színre 90-120°C-os gőzölésnél	58
5.5 UV besugárzás hatása a gőzölt nyár faanyagra	65
5.6 A gőzölés hatása a nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalmára.....	70
6. Gyakorlati hasznosítás	73
7. Összefoglalás	74
8. Tézisek	79
9. Köszönetnyilvánítás.....	81
10. Irodalomjegyzék	82
11. A szerző publikációi	89
12. Ábrajegyzék.....	91
13. Táblázatjegyzék	93

A Pannónia nyár faanyag gőzölési tulajdonságainak vizsgálata

Kivonat

Jelen tanulmány a nyár faanyag (*Populus x euramericana cv. pannonia*) színének javítására irányuló kutatást mutat be. A kísérletek során a nyár mintákat szijácsra és gesztre szeparálva széles tartományban, 90°C és 120°C közötti hőmérsékleten 20 napig (120°C esetén 9 napig) gőzöltük. Valamint a nyár mintákat akác (*Robinia pseudoacacia*) és bükk (*Fagus sylvatica*) mintákkal egy légtérben gőzöltük, hogy fokozzuk a gőzölés színmódosító hatását. A színváltozásokat objektív módon, a CIE Lab színmérési rendszer segítségével követtük. További vizsgálataink során gőzölt nyár időjárásállóságát vizsgáltuk. A gőzölt mintákat higanygőz lámpa által biztosított 90 órás UV sugárzásnak tettük ki. Végül a gőzölt nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalmát vizsgáltuk. A gőzölés jelentősen csökkent a nyár faanyag világosságát, különösen a 120°C-on, 9 napig tartó kezelés során, ahol a világosság csökkenése 44 egységet ért el. A vörös és sárga színkoordináták értéke nőtt. A vörös színezet legnagyobb értéke 12,3 egység, ami majdnem ötszörösére a kiinduló értéknek, valamint a sárga színezet értéke 33,25 egység, ami 1,9-szerese a kezdeti értéknek. A tanulmány továbbá kimutatta, hogy a gőzölés minden vizsgált hőmérsékleten növeli a nyár színtelítettségét (C^*). A legmagasabb telítettségi érték 35,2 volt, ami kétszerese a kezdeti értéknek. Ezenfelül magas korrelációt (R^2 értéke 0,88 és 0,98 között) találtunk a nyárfa gőzölése során keletkező világosság és színezeti szög értékek között. A legjobb értéket a 100°C -os kezelési hőmérsékleten értük el mind a szijács ($R^2=0,94$), mind a geszt ($R^2=0,98$) esetében. A kutatás eredményei kimutatták, hogy az egy légtérben gőzölt bükk és az akác segédanyagok nincsenek hatással a nyár faanyag világosság változására, viszont 110°C és 120°C-on hatással vannak a sárga és vörös színezetre. Az időjárásállósági tesztek során azt tapasztaltuk, hogy a gőzölt faanyagok kisebb mértékű sötétedést szenvedtek el az UV kezelés során, mint a natúr faanyag. A 120°C-on gőzölt minták esetében, a vörös színezet UV sugárzással szembeni stabilitása kiemelkedő volt. A sárga színezet szintén ezen a kezelési hőmérsékleten mutatta a legnagyobb színtabilitást. Végül megállapításra került, hogy a gőzölés csökkentette a nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalmát, amely a hőmérséklet és a gőzölési idő növekedésével egyre alacsonyabbá vált, ez a hatás 120°C-on maximalizálódik.

Investigation of the Steaming Properties of Poplar Wood

Abstract

This study presents research aimed at improving the colour of poplar wood (*Populus x euramericana* cv. *pannonia*). During the experiments, the Poplar samples were separated into sapwood and heartwood and steamed at temperatures ranging from 90°C to 120°C for 20 days (9 days for 120°C). In addition, poplar samples were steamed together with black locust (*Robinia pseudoacacia*) and beech (*Fagus sylvatica*) samples in the same airspace to enhance the colour-modifying effect. The colour changes were objectively monitored using the CIE Lab colour coordinate system. Further investigations included examining the weather resistance of steamed poplar. The steamed samples were irradiated to 90 hours of UV emitter mercury lamp. Lastly, the equilibrium moisture content of the steamed poplar wood was studied. Steaming significantly reduced the lightness of poplar wood, especially during the 9-day treatment at 120°C, where the decrease in lightness reached 44 units. The values of the red and yellow colour coordinates increased. The maximum increase in the red colour was 12.3 units, nearly five times the initial value, and the yellow colour increased to 33.25 units, 1.9 times the initial value. The study also showed that steaming increased the colour saturation (C^*) of poplar at all tested temperatures, with the highest saturation value being 35.2, twice the initial value. Additionally, a high correlation (R^2 values between 0.88 and 0.98) was found between the lightness and colour hue angle values during the steaming of poplar. The best results were achieved at a steaming temperature of 100°C, both for the sapwood ($R^2=0.94$) and heartwood ($R^2=0.98$). The research results indicated that steaming together with beech and black locust had no effect on the lightness of poplar wood, but did affect the yellow and red colours at 110°C and 120°C. The weather resistance tests revealed that steamed wood showed less darkening under UV treatment than untreated wood. Particularly at 120°C, the red colour showed outstanding stability against UV radiation. The yellow colour also demonstrated the greatest colour stability at this treatment temperature. Finally, it was determined that steaming reduced the equilibrium moisture content of poplar wood, which became progressively lower with increasing temperature and steaming duration, reaching its maximum effect at 120°C.

*„A gyors gyalu csak jár - röpi, a sok göcs elsimul
És göndörödvé száll a forgács, firtje földre hull.
Csak vések én, csak fúrok én, míg minden egybe áll
És rám kacag, mint szép leány, szöke deszkaszál.”*

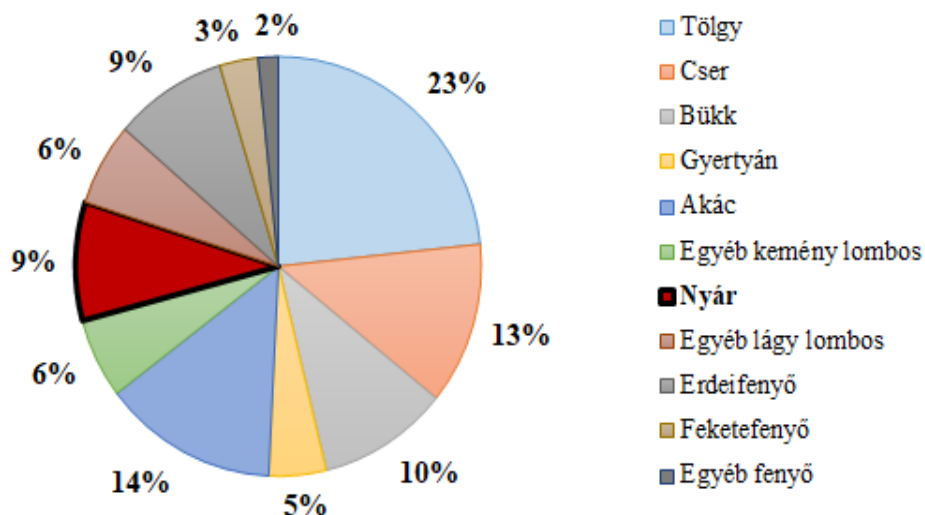
Idézet a Szöke deszkaszál című nótából

1. Bevezetés

A fa, mint megújuló nyersanyagforrás, újratermelő jellege miatt azon kevés alapanyagok közé tartozik, ami szerkezeti elemmé válás után is „lélegzik”, környezetébe nedvességet ad le, vagy onnét nedvességet vesz fel. A faanyag, a sűrűségéhez képest, kimagasló mechanikai és fizikai tulajdonságokkal rendelkezik. Az egyes felhasználási területek különböző faanyag jellemzőket igényelnek, de nem minden faanyag fizikai vagy mechanikai tulajdonsága felel meg az adott célnak. Azok a tulajdonságok, amelyek először kedvezőtlennek tűnhetnek, gyakran javíthatók és módosítások után könnyen megmunkálhatóvá vagy esztétikusabbá tehetők. Az utóbbi évtizedekben a minőségi, ipari felhasználásra alkalmas faanyagok eddigi zavartalan, folyamatos utánpótlásának folyamatát veszélyeztetni kezdték a kiszámíthatatlan időjárási körülmények. Napjainkban számos nemzetközi és hazai kutatás foglalkozik a várható éghajlatváltozással, a hőmérséklet és csapadék szélsőségek vizsgálatával. A regionális klímamodell eredmények azt mutatják, hogy a század közepére a gyertyános-tölgyes klíma cseres-kocsánytalan tölgyes klímává változhat, majd pedig az erdőssztyepp klíma lehet uralkodó (Gálos és Vig 2014). Az éghajlati átlagokban mutatkozó tendenciákat súlyosbítja az extrém időjárási események gyakoriságának növekedése, amely alapvetően határozza meg fafajaink elterjedését, egészségi állapotát, valamint minőségét is.

Ezek ismeretében egyre szükségesebb a másodlagos faanyagok felhasználásának elősegítése, melyek modifikációval érhetőek el. A modifikáció során a faanyagok kemikáliákkal, magas hőmérséklettel vagy különböző hullámhosszúságú fényvel történő besugárzással alakíthatók át. A gőzölés, mint modifikáló, hidrotermikus kezelés során a faanyagot légnemű halmazállapotú víz segítségével hő hatásának tesszük ki. A kezelés során a gőz által közölt hő hatására a természetes állapotú faanyagok szerkezete és alkotórészei fizikai és kémiai átalakuláson mennek keresztül, a faanyag egyes tulajdonságai átmenetileg vagy végleg megváltoznak. Az átmeneti tulajdonság változások inkább a könnyebb megmunkálást, míg a maradandó változások a faanyag nemesítését szolgálják.

A magyarországi viszonyokat tekintve az erdőknek a gyeppekhez és mezőgazdasági növényekhez képest nagyobb a levélfelülete, mélyebb a gyökérzete, ezáltal intenzívebb transpirációt folytatnak, mely hűvösebb-nedvesebb klimatikus viszonyokat eredményez (Jackson et al. 2008). A trópusi esőerdők területének csökkenésével ez a globális léptékű éghajlati hatás gyengül, mely tovább fokozhatja a felmelegedés mértékét (Banadics et al. 2015). A faanyagok modifikációjának témája ezért nagyon aktuális, hiszen Magyarország erdő takarójának (az ország területének ~22%-a) összetételében is változás várható a klímaváltozás hatására. A KSH 2019-es felmérése szerint az erdőterületeinek 86%-át a lombos fajok (kemény lombos 71%, lágy lombos 15%), 13%-át a fenyőfélék alkották, ebből a lágy lombos fafajok ~40%-át a főleg az energetikai hasznosításra használt nemesnyár alkotta (1. ábra).



1. ábra: A magyarországi élőfakészlet fafajok százalékos megoszlása alapján (KSH 2019)

2. Célkitűzés

A disszertáció a nemesnyár (*Populus x euramericana*), ezen belül is a Pannonia nyár (*Populus x euramericana* cv. Pannonia) modifikációval elősegített felhasználási körének bővítési lehetőségeivel foglalkozik. Jelen munka hiánypótló jellegű, mivel nem állnak rendelkezésre a nyár gőzölésével foglalkozó szakirodalmak sem hazai, sem nemzetközi szinten, illetve nincs tapasztalat a faanyag viselkedéséről. Ez a gyors növéssű, ültetvényes fafaj viszonylag nagy mennyiségben áll rendelkezésre magyarországi viszonylatban, ennek ellenére csak a másodlagos faipari felhasználásban (raklap, ládagyártás) illetve az energetikai hasznosításban van szerepe. A modifikációs eljárások okozta előnyös színváltozás a másodlagos alkalmazási kört elsődlegessé változtathatja. A gőzölt nyár anyag például alkalmas lehet lambéria vagy szauna burkolatnak is. Mivel más fafajok ipari felhasználása sokkal széleskörűbb, így érdemes vizsgálni, hogy ezen faanyagok (pl. bükk vagy akác) növelik-e a nyár előnyös tulajdonságainak számát a modifikációs eljárások alkalmazása során. Összefoglalva a disszertáció fő kutatási kérdése: Alkalmas-e a gőzölés, mint modifikációs eljárás a nyár faanyag ipari célú feljavítására és ha igen milyen feltételek mellett?

A disszertáció főbb célkitűzései, hipotézisei a következők:

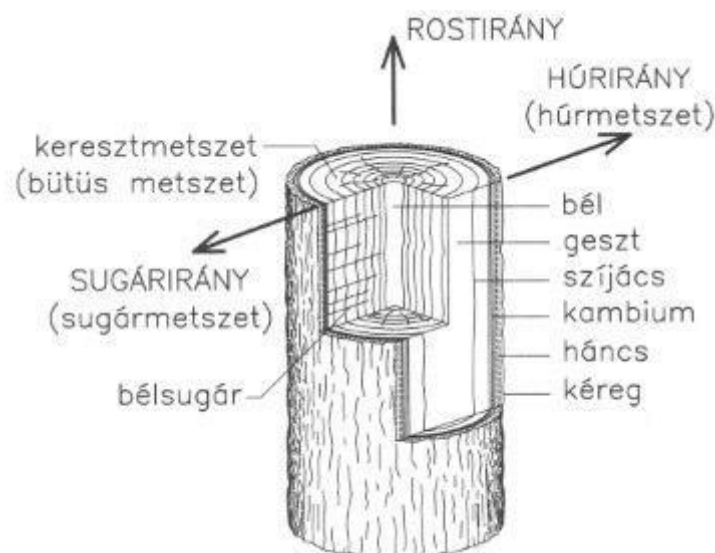
- H1. A másodlagos felhasználású Pannonia-nyár színe gőzöléssel javítható, sötétebb, barnább szín állítható elő, ami az emberi szem számára kellemesebb, mint a nyár faanyag eredeti színe.
- H2. A megfelelő gőzölési hőmérséklet-tartomány és időtartam megállapítható az optimális szín eléréséhez.
- H3. A gőzölt próbatestek szíjácsának és gesztjének színekülönözősége gőzöléssel homogenizálható.
- H4. Bükk és akác segédanyagokkal történő együtt gőzölés hatása javítja a nyár faanyag színét. A gőz, mint hordozó közeg extrakt anyagokat szállíthat a nyárfába, ami jelentős színváltozást eredményez.
- H5. Gőzöléssel növelhető a nyár faanyag időjárással szembeni ellenállóképessége.

A hipotézisek mellett a disszertáció célja következtetések levonása az eredményekből, valamint költséghatékony alkalmazás, javaslattétel gyakorlati felhasználáshoz.

3. Szakirodalmi áttekintés

3.1. A fa szerkezete, felépítése és tulajdonságai

A fa természetes eredetű, élő, szerves anyag, amely három jól elkülöníthető részből áll: gyökérszektől, törzsből, ágakból és levelekből. A gyökérszekt rögzíti a fát a talajhoz, segítségével szívja fel a nedvességet és a tápanyagokat. A fatörzs a fa legértékesebb része, ami a föld felett helyezkedik el, amely az ágas, leveles lombkoronát tartja. A fatörzs szövetei szállítják a tápanyagot a gyökérszekt és a lombkorona között. A 2. ábra szemlélteti a fa szerkezeti felépítését. A hossztengetyre merőleges metszetet keresztmetszetnek vagy bütös metszetnek nevezzük. A hosszirányú metszetet vagy a bélén keresztül (sugárirány), vagy azzal párhuzamosan vesszük fel (húrirány).



2. ábra: A fa szerkezeti felépítése (Varga 2012)

A fa fejlődése során először a bél fejlődik ki. Körülötte helyezkedik el az életműködésben részt nem vevő geszt. A gesztet körülvevő évgyűrűket szíjácsnak nevezik, ez a rész anyagszállítást látja el. A szíjácsot vékony kambiumréteg veszi körül, ami a szélességi növekedésért felel. A kambium után a háncs és a fa kérge következik.

Az elemek atomjainak különféle kapcsolódása hozza létre a fát alkotó vegyületeket, amelyeket 3 csoportba sorolhatunk: poliszacharidok, lignin és kísérő anyagok. A poliszacharidok egyszerű cukorból álló óriásmolekulájú szénhidrátok. A legfontosabb

poliszacharid a cellulóz, amiből a fát alkotó sejtfa épül fel, fafajtól függően 40-50%-ban van jelen. A cellulózzrost legkisebb alkotóeleme a szőlőcukor molekula (D-glükóz molekula). A hatoldalú gyűrűs molekulát 1 oxigén- és 5 szénatom alkotja. Minden glükóz molekulához egy elsődleges és két másodlagos hidroxil-(OH) csoport kapcsolódik. A hidroxil-csoport a kristályos cellulóz régióban a molekulák közötti kötést biztosítja, míg a nem kristályos régióban a vízmolekulákat köti meg. Az egymás után következő glükóz-egységek egymáshoz képest 180°-kal elfordult állapotban vannak, és hosszú egyenes molekula láncot alkotnak. A polimerizáció fokától függően a cellulózmolekula 8000-10000 cukor molekulából épül fel (Németh 1997).

A fában lévő cellulóz mintegy 70 %-a kristályos formában van jelen. Itt a cellulóz molekulák meghatározott sík rétegben helyezkednek el, és a rétegeken belül erős hidrogénkötések vannak. A kristályos régió a víz számára átjárhatatlan. A cellulózmolekula a nem kristályos zónában is megtartja nagyfokú hosszanti rendezettségét (Németh 1997).

A poliszacharidokhoz tartozik továbbá a hemicellulózok csoportja, ami szintén szénhidrát. Ezek az elemek kapcsolatot létesítenek a cellulóz és a lignin között. A hemicellulózok a fának 25-35%-át adják, ami fafaj függő. A hemicellulóz különböző poliszacharidok keveréke, melyeknek alkotó monomer elemei a glükózok, mannózok, galaktózok, xilózok, arabinózok, metil-glükuronsavak és galakturonsavak. Ezeknek a keverékeknek a kristályosodási foka alacsony és a polimerizáció foka is csak 150-200 közötti. A molekulaláncok rendezettsége messze elmarad a cellulózmolekula rendezettségétől.

A cellulóz és a hemicellulózok mellett a következő fontos alkotóelem a lignin, ami a növényvilág legjelentősebb szerves polimere, a fa vázát, szilárdságát adja, 25-35% jelenléttel rendelkezik az előző összetevők mellett. A lignin makromolekulák keletkezése a növényekben bonyolult folyamat, elemi összetétele nem adható meg pontosan, szerkezete, összetétele fafaj függő. A lignin alapvető szerkezeti egysége a fenil-propán vegyületcsoport, a p-kumarilalkohol (I), a koniferil alkohol (II) és a szinapil alkohol (III). A lignin bioszintézis során a képződő három alkoholból gyökös mechanizmusú polimerizációs folyamatban szintetizálódik.

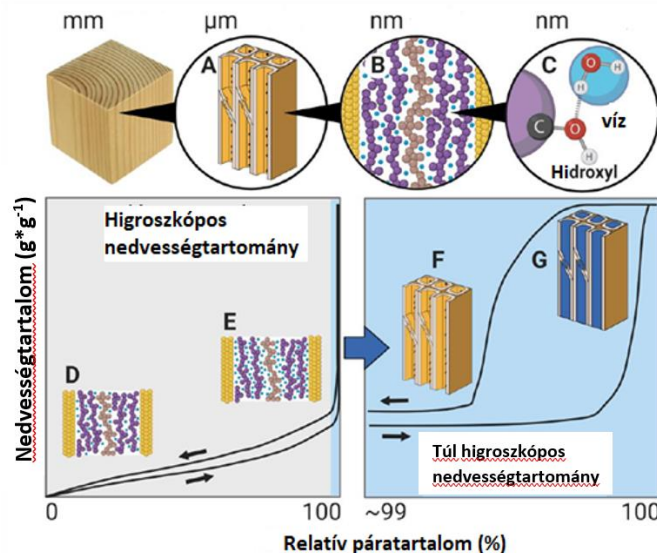
Az előbbieken felsorolt alkotórészekon kívül a fa más anyagokat is tartalmaz, amelyek mennyisége kicsi 1-10%, de kis mennyiségük ellenére meghatározzák a fa színét, illatát, ellenálló képességét, felületkezelhetőségét, ragaszthatóságát. Ezeket az anyagokat járulékos anyagoknak nevezzük. Jellemzően ezek az anyagok vízben, vagy szerves oldószerben oldódó vegyületek, tehát kivonhatók a fából, ezért nevezik extrakt anyagoknak is. A járulékos anyagok a következőképpen csoportosíthatók:

- Egyszerű fenolok és polifenolok, amelyek tovább osztályozhatók lignánokra és flavanoidokra.
- Terpének és gyanták.
- Cukrok, ciklitek, zsírok, viaszok és alkaloidok.

A járulékos anyagok mennyisége, valamint összetétele is változó fafajonként. A járulékos anyagok jelentős része később, a gesztesedés során kerülnek a sejtfalba, miután a sejtek felhagynak a víz szállításával és az élettevékenységgel. A járulékos anyagok fafajokhoz kötődhetnek, mint például a kvercetin és kempferol jelenléte egyaránt általános, mind a lombos fák (pl. *Quercus robur*, *Castanea sativa*, *Juglans regia*), mind a fenyőfélék (pl. *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii*) faszöveti részeiben. A fizetin és a robinetin a fehérakác (*Robinia pseudoacacia*) jellegzetes flavonolja, a miricetin pedig a vörösfenyőben (*Larix decidua*) található jelentős mennyiségben. A glikozidok közül a rutin elsősorban a japánakácra (*Sophora japonica*) jellemző.

3.2. Fa-víz kapcsolatok áttekintő jellemzése

Az anyagátviteli folyamatokban a vízdoldható anyagok, folyadékok együttes mozgása növényi eredetű anyagokban rendkívül összetett folyamat. A víz többféle kötési állapotban van jelen a sejtek sejtfalában és membránján: egyrészt a hidratációsán kötött víz formájában a hidrofíl makromolekulák felületén, másrészt ozmózissal kötött vízként a sejtekben. Harmadrészt szerkezeti vízként tárolódik a gélszerkezetet mutató makromolekulákban, illetve a mikro- és makrokapillárisokban, pórusokban is elhelyezkedhet (Barta et al. 2007). A 3. ábra szemlélteti a higroszkópos nedvesség-tartományt, amelyet általában 0 és 97-98% relatív páratartalom (RH) közötti tartományként határoznak meg, a nedvesség túlnyomórészt a sejtfalakban található. Túl higroszkópos környezetben, ami legalább 99%-os páratartalom mellett történik, a sejtfaon kívüli kapilláris kondenzáció következik be. (Thybring és Fredriksson 2021). Az ábra szemlélteti, hogy a fa nedvessége megtalálható mind a porózus kapilláris szerkezetben (A), mind a szilárd sejtfal anyagában (B), ahol a vízmolekulák kölcsönhatásba lépnek a sejtfal polimerjein lévő hidroxilokkal (C).



3. ábra: A higroszkópos nedvességtartalom és a relatív páratartalom kapcsolata (Thybring és Fredriksson 2021)

A diagram az egyensúlyi nedvességtartalom és a relatív páratartalom kapcsolatát ábrázolja. Az ábra bal oldalán a higroszkópos nedvesség-tartományban, a jobb oldalán pedig a túl higroszkópos nedvesség-tartományban figyelhetjük meg a függvénykapcsolat jellemzőit a szorpciós izotermák ábrázolásával. A nedvességtartalom változása során a higroszkópos nedvesség-tartományban a sejtfalon belüli vízmozgás (kék gömbök) dominál (D, E), míg túl higroszkópos tartományban a kapilláris szerkezetbeni (kék kitöltés makroüregekben) vízmozgás az elsődleges (F, G). A relatív páratartalom növekedése vagy csökkenése által kiváltott szorpciós izotermák függőségét nyilak jelzik, ahogy az egyensúlyi állapotra törekednek (Thybring és Fredriksson 2021).

A fában lévő szabad víz és a kötött víz átmeneti tartományát rosttelítettségi határnak nevezzük (Tiemann 1906). Ez egy százalékosan kifejezett és az adott fafajra jellemző érték, mely átlagosan 30%, amikor a sejtfalak teljesen telítettek vízzel, viszont a sejtüregekben nem található víz. A rosttelítettségi határ ismeretének kiemelkedő jelentősége van, mivel e határérték felett ugyanis a szabad víz mennyiségének változása nincs hatással a faanyag térfogatára. Ezzel ellentétben a rosttelítettségi határ alatti nedvesség tartalom változása során a kötött víz mennyisége is változik a fában. Ennek hatására a faanyag térfogata is módosul, dagadni vagy zsugorodni fog. Amikor a kötött víz mennyisége növekszik, a sejtfalak micellái távolodnak egymástól, ezáltal a sejtfalak vastagodnak és a faanyag megdagad. Ellenkező esetben, amikor a kötött víz mennyisége csökken, a sejtfalak micellái ismét közelebb kerülnek egymáshoz, ezáltal a sejtfalak vékonyodnak és a faanyag zsugorodik (Kovács 1979). Ezen túlmenően, a

fában lévő víz mennyiségi változásával a faanyag tömege és sűrűsége is változik és még számos tulajdonsága, mint a diffúzió, vezetőképesség, szorpció, szilárdság stb. A faanyag inhomogén és anizotróp, sejtes felépítéséből adódóan porózus anyag. Így más porózus szilárd anyagokhoz hasonlóan képes a levegőből nedvességet felvenni vagy leadni. Ezen tulajdonsága miatt a faanyag a környezetének nedvességtartalmához igazítja a nedvességtartalmát. Amikor a faanyag se nem ad le, se nem vesz fel nedvességet, akkor a nedvességtartalma egyensúlyban van a környezet relatív páratartalmával. Ez utóbbi értéket nevezzük egyensúlyi nedvességtartalomnak. A változó relatív páratartalomnak kitett anyagok folyamatosan vizet vesznek fel, vagy adnak le a levegő relatív páratartalmának és hőmérsékletének ingadozása függvényében. Amennyiben ez a rosttelítettségi határ alatt megy végbe, akkor a korábban említett folyamat játszódik le, a vízfelvétel esetében dagadással, vízleadás esetében pedig zsugorodással jár (Takáts 2000).

3.3. Módosító kezelések, hőkezelések

A faanyag hátrányos anyagi jellemzői korlátozhatják a megvalósítható alkalmazások körét főleg nedves körülmények között, mert méreteiben instabillá válik (Hunter 1995). A faanyag a különböző anatómiai irányokban különböző módon reagál a nedvesség viszonyokra, mivel bétől kifele haladva növekszik a diffúzió (Banadics 2006). A hemicellulóz és cellulózláncok hidroxil (-OH) csoportjai okozzák a fa erős higroszkóposágát (Stamm 1964; Rowell 1983), így a higroszkóposág csökkentése és ezzel együtt a tartósság növelése az -OH csoportok elzárásával (sejtüreg eltömítés), eltávolításával (a sejtfa enyhe roncsolása) valamint blokkolásával (reagáló vegyületekkel). Erre a leggyakrabban alkalmazott módszer a hőkezelés és annak faanyag-módosítási technikái, melyekkel a fa bizonyos tulajdonságainak javítása, méretstabilitás vagy szín érhető el (Rowell 2013; Hill 2006). A hőkezelések hatására a faanyag sötétebbé válik, redukálódik a vízfelvétel és így az -OH csoportok száma, kismértékű sejtfa roncsolódás kíséretében. Jelentősen csökken a zsugorodás-dagadás (akár 40-60%), növekszik a tartósság és az ellenálló képesség a gombakárosítással szemben.

A modifikáció lényege és célja minden esetben, hogy a fa valamilyen eredeti, de nem előnyös tulajdonságát javítsuk. A faanyag modifikációjának értelmezésére több definíció is létezik. Egyrészt Hill (2006) szerint összefoglalható a faanyag tulajdonságainak javulását eredményező és kémiai összetételnek maradandó megváltozásával járó, a környezetet nem terhelő eljárás, mely összetett kémiai, biológiai és fizikai behatásra történik. Másrészt pedig lehet „Olyan módosító eljárás, mely megváltoztatja a faanyag konstitúcióját, azzal a céllal, hogy

a felhasználás szempontjából a fa előnyös tulajdonságait növelje, és új termékeket állítson elő.” (Bosshard 1984; Bak 2012).

Modifikációt két területre is elkülöníthetjük:

- aktív modifikációra, ahol a faanyag kémiai vagy fizikai szerkezete megváltozik.
 - A kémiai modifikáció (különböző anyagokat juttatnak a faanyagba, a kémiai szerkezet megváltoztatásával), melynek módszerei: az acetilezés, dikarbonsav-anhidrides kezelés, furfurilezés, oxidatív modifikáció, ammóniás kezelés, térhálósítás - DMDHEU (Horváth 2008). A kémiai módosítás blokkolja a hidofil OH-csoportokat, melyek nagyobb hidrofób pl. acetyl csoportokká alakíthatók (Skaar et al. 2009). A fa tartósan megduzzad, így sejtfalán alig vagy egyáltalán nem tud áthatolni a víz (Homan és Jorissen 2004). Leggyakoribb anyagok az ecetsav-anhidrid (acetilezés) és az egyéb anhidridek (pl. maleinsav-anhidrid). Az alkalmazott anhidrid függvényében a reakciók melléktermékeként ecetsav vagy egyéb szerves savak szabadulnak fel (Homan és Jorissen 2004) és savas kémhatása eredményeképpen a faanyag ecetszagú lesz (idővel elmúlik). Ezen kívül ez a kezelés nem változtatja meg jelentősen a fa eredeti színét, csak enyhe sötétedés jellemző és megőrzi a szilárdsági tulajdonságokat (Tarkow et al. 1950; Homan et al. 2000). A nedvességfelvétel jelentősen, valamint a zsugorodás/dagadás is 60-80%-kal csökken. A tartósság jelentősen nő, így a fa acetilezése az egyik leggyakrabban alkalmazott vegyszeres kezelés a fa méretstabilitásának és biológiai tartósságának javítására (Popescu et al. 2013).
 - A fizikai modifikáció általában termikus modifikáció, vagyis hőhatás következtében bekövetkező átalakulások, de a kémiai szerkezet nem változik jelentősen.
- passzív modifikációra, amelynek során a faanyag alapvető szerkezete nem változik meg. Ilyen módosítás az inert anyagokkal történő telítés. Ezek az anyagok lehetnek viaszok, olajok vagy bizonyos polimerek. Olyan anyagok, amelyek stabilak, nem lépnek reakcióba más vegyületekkel.

A modifikációval történő kezelés után az alapanyagok tulajdonságai megváltozhatnak, új előnyös tulajdonságokat nyerhetnek:

- könnyebb megmunkálhatóság;

- zsugorodás mértéke csökken;
- dagadás mértéke csökken;
- ellenálló képesség nő a farontó szervezetekkel szemben;
- a faanyag színe megváltozik.

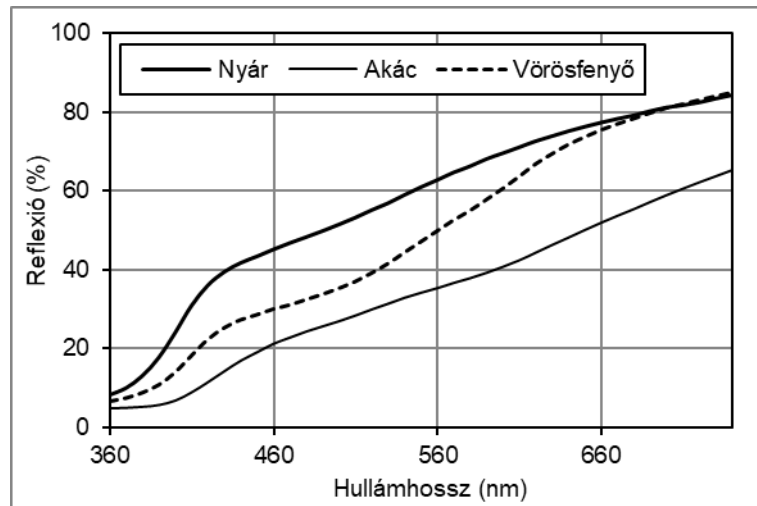
Ezen előnyös új tulajdonságokból következik, hogy a fafajok így nemesítésre alkalmassá válnak, azonban a különböző változások negatív mellékhatásokkal (pl. csökkenő hajlító- és egyéb szilárdság) is kiegészülhetnek (Kollman et al. 1969; Németh 2002; Varga 2008).

3.4. Színmérés a faanyagkutatásban

A szín egy érzet, amit a látásunkkal érzékelünk. A szemünk által érzékelhető fénytartomány a 380 nm és 760 nm közötti hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás, ami a szemünkbe jutva színingert vált ki. A színek tulajdonságai a világosság, színezet és a telítettség. Amennyiben ezek a tulajdonságok megegyeznek akkor két szín azonosnak mondható. A fafajok közötti színeltérésért a benne található extrakt anyagok és a lignin felelősek, amiknek a kémiai szerkezetében konjugált kettős kötések találhatók. A geszt és a szijács között jelentős színeltérés alakulhat ki, mivel az extrakt anyagok jellemzően a gesztésedés során épülnek be a faanyagba.

A tárgyak színét az határozza meg, hogy a rájuk eső látható fényt az egyes hullámhosszokon milyen mértékben verik vissza, vagy nyelik el. Továbbá függ a fényforrás színétől. A faanyag intenzíven elnyeli a fényt, a benne lévő sokféle fényelnyelő kémiai csoportnak köszönhetően. A faanyag fényelnyelése erősen hullámhosszfüggő (Dirckx et al. 1992) Az elnyelési tulajdonságok határozzák meg a faanyag reflexiós színeképét. A faanyag a ráeső fényből a vörös tartomány jelentős részét (70-80%-át) visszaveri, míg a kék tartomány döntő részét (közel 90 %-át) elnyeli (4. ábra).

A faanyag színe a vörös és a sárga közötti tartományba esik, ezek keverékeként alakul ki a meleg barnás szín, ami a szem számára tetszetős, hiányzik belőle a rideg kék szín (Tolvaj 2012).



4. ábra: A vörösfenyő, a nyár és az akác sugárirányú metszeten mért reflexiós színeképe (Tolvaj 2012)

Tolvaj és Faix (1995) az UV besugárzás hatását 200 óráig öt fafajon (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Larix decidua*, *Populus euramericana*, *Robinia pseudoacacia*) követték nyomon színméréssel és diffúz reflektancia alapú infravörös Fourier transzformációs (DRIFT) spektrometriával. A CIE L*a*b* színszámításai a teljes színekülönbség (ΔE) gyors változását mutatták be a besugárzás első 25-50 órájában. Minden minta sárga színezet növekedést mutatott, azonban az akác további eltolódást mutatott a vörös színezet felé. A képződött színes vegyületeket vizes extrakcióval csak mérsékelten tudták eltávolítani. Ebből arra a következtetésre jutottak, hogy a sárga szín elsősorban az oligomer kromoforoknak köszönhető, amelyek valószínűleg leukokromoforokból származnak, vagyis a fa lignin részéből.

Tolvaj és társai (2015) két tűlevelű és két lombos fajt erős UV-sugárzó higanylámpával sugároztak be 160°C-ig emelt hőmérsékleten. Egy másik mintasorozatot ugyanabban a kamrában kezelték ugyanazon a hőmérsékleten, de UV-fény nélkül. Az eredmények azt mutatták, hogy az UV-fény besugárzás sokkal nagyobb elszíneződést okozott 80 °C feletti hőmérsékleten, mint 30°C-os hőmérsékleten. A 160°C-on végzett fénybesugárzás és hőkezelés együttesen sokkal nagyobb elszíneződést eredményezett, mint a 30°C-on történt UV-fénybesugárzás és a 160°C-on végzett tiszta hőkezelés okozta elszíneződési adatok összege. A fotodegradáció során fellépő hőhatás nem csupán két hatás egyszerű összeadása volt, hanem a megemelt hőmérséklet megsokszorozta a fotodegradáció hatását. A legnagyobb különbséget a vörös színezet változása mutatta. Az összes fa színekoordinátájával összefüggő

Arrhenius-diagramjának töréspontja közel 100°C volt, ami azt mutatja, hogy e hőmérséklet felett a kémiai változások-összetettebbek, mint ez alatt az érték alatt.

Tolvaj és Mitsui (2005) tanulmánya a bükk (*Fagus crenata* Blume), az akác (*Robinia pseudoacacia* L.), a japán cédrus (*Cryptomeria japonica* D. Don) és a lucfenyő (*Picea abies* Karst.) faminták besugárzási jellemzőinek vizsgálatát tűzte ki célul napfény, xenon és higanygőz fényforrások jelenlétében. A minták színváltozását CIE L*a*b* és L*h*c* szinkordináta-rendszerrel értékelték. A minták a kezelés kezdeti szakaszában gyors színváltozást mutattak, de a változás mértéke a kezelési idővel csökkent. Megállapították, hogy sem a xenon, sem a higanygőz lámpa fénye nem képes pontosan szimulálni a napfényt, ennek ellenére az alkalmazott fényforrások sokféle színváltozást okoztak. A széles színtartomány ellenére jó lineáris korrelációt találtak a világosság és a színárnyalat között ($R^2=0,70-0,96$). Ennek megfelelően ez a lineáris korreláció lehetőséget ad a fotodegradáció során bekövetkező színváltozás követésére úgy, hogy csak a világosságot mérjük.

Persze és Tolvaj (2012) a tölgyfa fotodegradációs folyamatát vizsgálta a bomlási folyamat során bekövetkező színváltozásokat megemelt hőmérséklet hatására. A famintákat higanygőzlámpával 80 °C-on és 30 °C-on besugározták a fotodegradáció során fellépő hőbomlás hatásának vizsgálatához. Az eredmények azt mutatták, hogy ugyanaz a fénybesugárzás lényegesen nagyobb vörös színezet növekedést eredményezett 80°C-on, mint 30°C-on. A fenyőminták 57%-kal nagyobb vörös színezet változást mutattak 80°C-on, mint 30 °C-on 200 órás megvilágítás alatt. A lucfenyő, a kőris és a nyár megfelelő adatai 33%, 40% és 15% voltak. Az eredmények azt mutatták, hogy az extraktumtartalom fontos szerepet játszik a fotodegradáció során. Az emelkedett környezeti hőmérséklet nem befolyásolta a sárga színezetet.

Németh és kollégái (2016) vizsgálatukhoz magas extrakt anyag tartalmú akác (*Robinia pseudoacacia* L.) és alacsony járulékos anyag tartalmú nyár (*Populus x euramericana* cv. *Pannónia*) mintákat választottak. A mintákat 160 és 200 °C-on napraforgóolajban 2, 4 és 6 órán keresztül hőkezelték, majd erős UV-sugárzó higanygőz lámpával 36 óráig besugározták. A lámpa teljes kibocsátásának 80%-a UV sugárzás volt. A hőkezelés és az UV sugárzás hatásait színmérésekkel követték nyomon. Az eredmények azt mutatták, hogy az extrakciós anyagok fontos szerepet játszanak az olajjal hőkezelt fa fotodegradációjában. A hőkezelések csökkentették a fotodegradáció világosság változásainak hatását. Az olajjal hőkezelt akác minták hasonló fotodegradációs tulajdonságokat mutattak, függetlenül a termikus előkezelési

időtől és hőmérséklettől. Az olajos hőkezelt akác minták vörös színezete alig változott az UV sugárzás hatására, ami bizonyítja a termikusan módosított extraktumok fotostabilitását. A 200 °C-on előkezelt nyár minták vörös színezete meglehetősen stabil volt a fotodegradációval szemben, de a 160 °C-on előkezelt minták ugyanolyan fotodegradációs tulajdonságokat mutattak, mint a természetes nyár minták. A nyárfa minták UV-sugárzás okozta vörös színezet változását részben a hőkezelés hőmérséklete határozta meg. A vizsgált minták sárga színezetének változása azt mutatta, hogy a termikusan módosított fa ligninje hasonló fotodegradáción ment keresztül, mint a kezeletlen természetes fa. A színmérés eredményei szerint az extrakciós anyagok fontos szerepet játszanak a hőkezelés során a világosság csökkenésben. A hődegradációt követően, az oxidációs folyamat világosság csökkentő hatása jelentősebb volt az akác esetében, mint a nyár esetében.

Tolvaj és társszerzői (2016) luc és bükk mintákat nedves (100% levegő páratartalom) és száraz körülmények között UV fényel sugározták be, hogy tisztázzák a gőz fotodegradációra gyakorolt hatását, majd mérték a színváltozást. Az eredmények alapján a nedves állapot lényegesen nagyobb elszíneződést okozott, mint a száraz állapot. A színváltozás intenzitása magasabb hőmérsékleten (53 °C) nagyobb volt, mint 32 °C-on. Az eredmények azt mutatták, hogy a víz gőzként való jelenléte fokozta a lignin lebomlását.

Kánnár és társai (2018) lucfenyő mintákat (*Picea abies Karst.*) erős ultraibolya (UV) fényt kibocsátó higanygőz lámpával kezelték 50 napig. Párhuzamosan pedig egy másik mintasorozatot szintén 50 napig tartó UV sugárzás, valamint vízzel történő kimosódás kombinációjával kezelték, majd a színparamétereket (CIE L*, a*, b*) UV sugárzás és kimosódás után is mérték. A vörös színezet értékének növekedése kétszerese volt a sárga színezet növekedéséhez képest az 50 napos kezelés végén mért kezdeti érték alapján. A kimosódás részben eltávolította az UV sugárzás által generált sárga és vörös kromofor molekulákat. A kombinált mintáinak sárgás és vörös színezete valamivel jobban nőtt az UV sugárzás első 4-6 napjában, mint a száraz sorozaté. A próbatestek felületi érdességének változását diffúz reflexiós infravörös spektroszkópiával követték nyomon, mivel az érdesség változása megváltoztatta a felület fényszórási tulajdonságait. Az UV besugárzás során a minták érdessége nőtt, az érdességváltozás tendenciája pedig a sárga színezet változásának tendenciáját tükrözte. A kimosódás minden vizsgált esetben csökkentette az érdesség értékét. Jó korrelációt találtak a színezeti szög és a világosság között mind a száraz UV-kezelésben, mind a kombinált UV-kezelésben.

A faanyag száraz termikus és a hidrotermikus kezelések hatására megváltozó színét szintén objektív színméréssel lehet követni. Ezek a vizsgálatok a következő fejezetben kerülnek bemutatásra.

3.5. Gőzölés, mint modifikációs folyamat

A továbbiakban a modifikáción belül kiemelten a hidrotermikus kezelés módszerét részletezem, ahol a hőmérséklet és víz által kifejtett hatásokat tudjuk megfigyelni. Láthatjuk, hogy a kezeléseket után milyen mértékben változhatnak meg az egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok. Ennek az eljárásnak az időtartami, hőmérsékleti, nyomási tulajdonságait mindig a kezelésre kerülő faanyag jellemzői (fafaj, méret, nedvességtartalom) és felhasználási céljai határozzák meg. Az alkalmazott hőközvetítő közeg, ebben az esetben a víz, mely kétféle hidrotermikus kezelési eljárást tesz lehetővé: a gőzölést és a főzést. E két eljárás alkalmazhatóságát a faanyag adottságai és gazdaságossági szempontok döntenek el és a kezelendő faanyag állapota és felhasználási területe alapján történik a kedvezőbb eljárás kiválasztása (Németh 1998). Gőzöléssel végrehajtott hőkezelést alkalmaznak bizonyos fafajok nemesítésére, mely során a faanyag a gőzben hőt vesz fel és azt a belső rétegekbe vezeti. Az eljárás lényege, hogy a kémiai átalakulás miatt egyes fafajoknál színváltozás lép fel. A felhasznált gőz hőmérséklete és nyomása szerint a gőzölés történhet:

- 100 °C alatti hőmérsékleten, atmoszférikus nyomás mellett
- 100 °C feletti hőmérsékleten, túlnyomásos gőztérben.

A 100 °C feletti gőzölésnek – az erős hatás miatt – rostosításnál és különleges fanemesítési eljárásoknál van jelentősége. A gőzölés olyan színváltoztató eljárás, mely nem párosul toxikus anyagok felhasználásával, de a magas extraktanyag-tartalmú faanyagoknál jelentős színváltozást lehet elérni vele. A faanyagot vagy a színváltoztatás érdekében, vagy a megmunkálás könnyebbé tételéért gőzölik. A színváltoztatás azoknál a faanyagoknál célszerű, melyeknek a természetes színe nem tetszetős, vagy zavaróan inhomogén.

A modifikáció szakirodalma az 1920-as évekre nyúlik vissza, amikor Tiemann (1920) megállapította, hogy a faanyag dimenzióstabilitása növelhető a szárítási hőmérséklet emelésével. Termikus modifikációval foglalkoztak elsőként Stamm és Hansen (1937), akik a faanyag nedvességtartalmát befolyásoló tényezőnek ítélték. Teichgräber (1966) csekély térfogatváltozást, csökkenő szilárdságot és tömegcsökkenést tapasztalt bükk faanyag 100 órás gőzölése során. Noack (1969) megállapította, hogy hidrotermikus kezelésnél a gőzölés három összetartozó paraméterét (a kezelés hőmérsékletét, idejét és nedvességtartalmát) együttesen kell figyelembe venni, emellett a szilárdsági jellemzők csökkenéséről számolt be és megfigyelte a

zsugorodási és dagadási jellemzők csekély növekedését is. Más kutatók szerint a vastagabb anyagokat hosszabb ideig kell gőzölni (Molnár et al. 1994).

A korábban említett negatív mellékhatások kimutatására végzett gőzölési kísérletei szerint az akác nyírószilárdsága 20-30%-kal, a Krippel-Pallay keménysége 5-9%-kal csökkent (Molnár et al. 1999). Továbbá gombaállósági vizsgálatai is, melyek szerint az atmoszférikus nyomáson 95°C mellett 5 napig gőzölt akác gombaállósága csökken a kezeletlenhez képest (Molnár et al. 1998). Boonstra és munkatársai (2006) a fa hőkezelése 200 °C alatti tartományban hatékony módszernek bizonyult a méretstabilitás és a tartósság javítására a biológiai lebomlás ellen. A tanulmány eredményei hozzájárulnak a jellemző reakciómechanizmusok és a hőkezelésnek a fa tulajdonságaira gyakorolt hatásának jobb megértéséhez. Esteves és kollégái (2008) egy eukaliptusz és egy fenyő anyagot kemencében és autoklávban hőkezelték 170 és 210°C közötti hőmérsékleten. A mintákat diklór-metánnal, etanollal és vízzel előzetesen extrahálták az FTIR elemzés előtt, de az egyidejűleg zajló különböző kémiai reakciók nehezítették a megfigyelést. A hőkezelés jelentős változásokat okozott a fa kémiai összetételében és szerkezetében, a ligninben és a poliszacharidokban. A hemicellulózok voltak az elsők, amelyek lebomlottak. Az eukaliptusz-lignin jobban megváltozott, mint a fenyő-lignin.

Ugyancsak Tolvaj és Faix (1996) szerzőpáros 36 napos kezelési időtartamra beállított gőzölési kísérlete során három fenyő fafajt, nyarat és akácot gőzölt 90°C-on, mely gőzölés jelentős színváltozást okozott és sikerrel változtatták meg az akác kedvezőtlen sárgás színét vörösesbarnára. Az akác vonatkozásában gőzöléssel a zöldessárga színárnyalat jelentősen csökkenthető, és növelhető a barna árnyalat. Szabad szemmel is jól érzékelhető, hogy gőzölés hatására a faanyag világossága jelentősen csökken. A gőzölési paraméterek változtatásával nagyon sokféle színárnyalatot lehet előállítani. (Tolvaj et al. 2004, Varga és van der Zee 2008, Tolvaj et al. 2010) és az akác faanyag inhomogenitása is csökken (Tolvaj et al. 2005). A bükk faanyag jellegtelen szürkésfehér színe melegebb vörös árnyalatot kap a gőzölés hatására (Hrcka 2008), de a fehér és az álgeszt közötti színeltérés is csökken (Tolvaj et al. 2006, Tolvaj et al. 2009). Hasonló a helyzet csertölgy gőzölése esetében is. A világos szijács és a sötét geszt között nagy a színbeli eltérés, ami gőzöléssel jelentősen csökkenthető (Tolvaj és Molnár 2006, Todaro et al. 2012).

Tolvaj és Németh (2008) akác (*Robinia pseudoacacia L.*) faanyagot széles hőmérséklet-tartományban (75-130°C) gőzöltek, hosszú (22 napos) gőzölési időt alkalmazva. A színváltozást a CIE L*a*b* és L*h*c* színkoordináta-rendszerekkel figyelték meg. Széles színtartományt állítottak elő a gőzölési kísérletek során, továbbá lineáris összefüggést találtak

a világosság és a színárnyalat között. Ez a linearitás csak 100°C felett és csak hosszú gőzölési idő esetén mutatott csekély torzulást. A lineáris korreláció lehetővé teszi a gőzölés közbeni színváltozás szabályozását, csak a világosság mérésével, amihez nem szükséges drága színmérő készülék, elegendő egy színszűrő és egy detektor használata.

Kilic (2009) a tanulmányában azt vizsgálta, hogy a keleti bükk (*Fagus orientalis L.*) és a sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) fák gőzölése hogyan befolyásolja egyes laktípusok tapadási szilárdságát. Ezzel a céllal először a bükkből és sapelliből előkészített, tangenciális és radiális felületű, gőzölt és nem gőzölt minták felületi érdességét mérte meg (Kilic et al. 2008), majd cellulóz-, poliuretán- és vízbázisú fényes lakkokat vitt fel a felületekre. Megállapította, hogy a keleti bükk tapadási szilárdsága nagyobb, mint a sapellié. A gőzölt faanyagok tapadási szilárdsága alacsonyabb volt, mint a gőzöletleneké. A radiális felülettel rendelkező minták tapadási szilárdságát nagyobbak találta, mint a tangenciális felülettel rendelkező mintákét, míg a legnagyobb tapadási szilárdságot a poliuretán lakkal mutatta a fa felületen. Összefoglalva a nagy tapadási szilárdságot igénylő munkáknál radiális felülettel rendelkező bükk anyagok felhasználása javasolt. Ezeknek az anyagoknak szükséges az újbóli csiszolása a gőzölés által okozott felszíni érdesség növekedése miatt, valamint poliuretán lakk alkalmazása ajánlott.

A faanyagban lévő nedvességnek a termikus kezelésre gyakorolt hatását vizsgálta Tolvaj és munkatársai (2010) oly módon, hogy két párhuzamos, 36 napig tartó, 90°C-os termikus kezelést végzett el abszolút száraz és telített vízgőzt tartalmazó zárt térben, 5 fafajon. A vizsgált fafajok: akác, nyár, lucfenyő, erdei fenyő, vörösfenyő. Szignifikáns különbségeket mutatott ki az abszolút száraz körülmények és a nedves körülmények között kezelt minták színváltozása között. A világosság esetében csökkenés tapasztalható mindkét kísérletnél, a nedves környezetben a változás intenzívebb és nagyobb mértékű. A vörös színezet esetében hasonló az eredmény az L*-hoz, azzal a különbséggel, hogy növekedés tapasztalható. A sárga színezet változásában volt a legnagyobb eltérés a kétféle kezelés hatása között. A száraz körülmények között kezelt anyagok b* értékei folyamatos növekedést mutattak. Nedves körülmények között a kísérlet első 6 napjában növekedett majd folyamatosan csökkent a sárga színezet. Az akác faanyag eltérő módon viselkedett mindkét környezetben. A többi faanyagtól eltérő viselkedése a magas extrakt anyag-tartalmával magyarázható.

Tolvaj és kollégái (2012) vizsgálták a luc, az erdeifenyő és a vörösfenyő faanyagok hőkezelésének színváltozásait. A kísérlet során a korábban említett fenyőmintákat gőzölték 0-22 napos gőzölési idő mellett 70-100 °C hőmérséklet-tartományban. Az új gőzölt színek hasonlóak az öreg bútorok és a beltéri fa szerkezetek színéhez, tehát alkalmasak lehetnek antik

tárgyak, bútorok javításához. A restaurálás mellett a gőzöléssel módosított faanyagok alkalmasak antik bútorok gyártására, ahol az elöregedett megjelenés esztétikai értékkel bír. Az eredmények azonban azt mutatták, hogy a 90 °C feletti hőmérsékleten történő gőzölésnek fehéritő hatása van, vagyis a mérsékelt gőzölés során keletkező színező kémiai komponensek eltávolíthatók. Ezenkívül lineáris összefüggést figyeltek meg a világosság és a színárnyalat között minden gőzölési idő és hőmérséklet mellett.

Németh és munkatársai (2013) különböző hőmérsékleten és nedvességtartalom esetén vizsgálták a szárítás során bekövetkező színváltozást akác és nyár fafajokon. Megállapították, hogy az akác színe nem változott jelentősen 20 °C-on. Továbbá 40 °C felett csökkent a világosság és a sárga színezet, valamint emelkedett a vörös színezet. A nyárnak a szabad vízvesztés során dominált a színváltozása. Szignifikáns színváltozás 80 °C-nál tapasztalható. Szárítás után a nyár homogénebbé vált és a rajzolat kiemelkedett. Míg az akác veszített világosság értékéből magas hőmérsékleten (80°C), addig a nyár minden vizsgált hőmérsékleten világosodott. Az akácot a nyárral összehasonlítva érzékenyebb a hőre. A víz jelenlétének meghatározó szerepe van a faanyagok termikus kezelésénél, jelentősen felgyorsítja a színváltozást. Nedves légtérben a színeképző vegyületek könnyebben hidrolizálódnak, majd oxidálódnak, kialakítva a gőzölt faanyag színét.

Dzurenda gőzölési kísérleteit 2013-ban kezdte el, mely során a cél a bükkfa színének meghatározása volt CIE-L * a * b * színtérben hőkezelés után - T=125-130 °C hőmérsékletű telített vizes gőz felhasználásával, $\tau = 6,5$ h időtartamig. Tapasztalatai alapján később több elemzést készített a telített gőzzel végzett hőkezelés (színmódosítás) hatásáról például a korai juhar (*Acer platanoides L.*), bükk (*Fagus sylvatica L.*), kocsányos tölgy (*Quercus robur L.*), akác (*Robinia pseudoacacia L.*) faanyaggal (Dzurenda 2014, Dzurenda 2018 a, b, c). A gőzölés paraméterei minden esetben 3. típusba sorolhatók: $T_I = 112,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ hőmérséklet $\tau = 5,5$ óra gőzölési időtartammal, $T_{II} = 127,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ hőmérséklet $\tau = 6,5$ óra gőzölési időtartammal és $T_{III} = 137,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ hőmérséklet $\tau = 7,5$ óra gőzölési időtartammal. A vizsgálatok alapján a szerző arra a következtetésre jutott, hogy ha a hőkezelési folyamatban használt telített gőz hőmérséklete megnő és a fa expozíciós ideje meghosszabbodik, a fa színe sötétebbé válik. Specifikus színárnyalatok érhetők el a CIE-L* a* b* színtérben a piros a* és sárga b * koordináta értékének növekedésével. Például a korai juhar és a kocsányos tölgy színének egyes, telített gőzzel történő módosításai visszafordíthatatlanok, de a változások kiszélesítik az építő- és az asztalosipari felhasználást, valamint a művészet és a dizájn területét (Dzurenda 2018 a, b).

Popescu és munkatársai (2013) a hársfa szerkezetének változásait vizsgálta hőkezelés hatására 140°C hőmérsékleten és 10%-os páratartalom mellett. A fa magas hőmérsékleten történő kezelése során ecetsav képződött, amely katalizálta a szénhidrátok hidrolízisét. Kezdetben magasabb szénhidrát mennyiséget, majd a lignin lebomlásának növekedését figyelték meg.

Ghoreishi és munkatársai (2016) kutatásukban a nyárfa érdességét vizsgálták tangenciális és radiális szakaszokon. Az érdesség csökkentése érdekében 30 és 60 percig 120°C-on gőzölést alkalmaztak. Az eredmények azt mutatták, hogy a 30 percig tartó gőzölés növelte az érdességet, de a 60 perces kezelés csökkentő hatással volt a nyár faanyag érdességére.

Tolvaj és munkatársai (2019) sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) faanyagokat gőzöltek széles tartományában (0-20 nap) 90 és 110 °C-os gőzölési hőmérsékleteken. A színváltozást objektíven CIE Lab színrendszerrel követték nyomon. A kezdeti szín és a világosbarna szín között a gőzölés időtartamától és hőmérsékletétől függően széles színválasztékot hoztak létre. A gőzölés kiváló színhomogenizációt és fokozott telítettséget eredményezett. 9 napos 110 °C-on történő gőzölés során az egyes pászták vörös színezet értékei közeledtek egymáshoz, a sárga komponens értékei folyamatosan nőttek és közeledtek is. A vizsgált szövetek színtelítettsége jelentősen megnőtt, és homogenizálnak is bizonyult, így nehéz volt megkülönböztetni a szijácsot és a gesztet a gőzölési folyamat végén 110°C-on.

Preklet és munkatársai (2019) vörösfenyő (*Larix decidua* L.) faanyagot gőzöltek 20 napig, 90 és 110°C-os hőmérsékleten. A korai pászta és a késői pászta kezdeti színe a szijácsban és gesztben nagyon eltérő értékeket mutatott. Széles színválaszték jött létre a kezelése során a gőzölés idejétől és hőmérsékletétől függően a barna szín felé tolódva. A gőzölés kiváló színhomogenizációt és szín telítettség növekedést eredményezett, ezen belül is a vörös színezet mutatta a legnagyobb homogenizációs hatást. A pászták közötti vörös színezet különbsége a 9 napos 110 °C-os gőzölés hatására hétszer kisebb lett, a kiinduló állapothoz viszonyítva. Az eredmények azt mutatták, hogy a homogenizálás legjobb vizualizációs hatása az a* b* síkon mutatható ki. A 110°C-os gőzölési folyamat végén a színhomogenizálás miatt nehéz volt megkülönböztetni a szijácsot és a gesztet. A színhomogenizálás tényleges gőzölési ideje 5, illetve 2 nap volt 90, illetve 110°C-on.

Varga és munkatársai (2021) egy friss publikációban akác (*Robinia pseudoacacia* L.), bükk vörös geszt (*Fagus sylvatica* L.) és lucfenyő (*Picea abies* Karst.) famintákat kezeltek telített gőzben 100, 110 és 120 °C-on, majd UV-sugárzó higanylámpával besugározták a színtabilitás vizsgálatának érdekében (CIE Lab). Az összehasonlítás érdekében kontroll

mintaként kezeletlen akác, bükk és lucfenyő mintákat ugyanazzal a higanylámpával sugározták be. A vörös és a sárga színezet változása egyaránt mutatta a színtabilitás növekedését. A bükk mutatta a legnagyobb színtabilitást mind a gőzkezelés, mind az azt követő UV-kezelés során, míg a lucfenyő volt a legérzékenyebb a fotodegradációra. A gőzölés csak az akác esetében csökkentette a színváltozás intenzitását a fotodegradáció során, de a 120°C-os gőzölés biztosította a legnagyobb védelmet a fotodegradáció okozta színváltozása ellen e faanyag esetében. A vizsgált hőkezelések nem változtattak a bükk és lucfenyő minták fotodegradációs tulajdonságain. A próbatestek színtelítettségének jelentős növekedését a gőzölés eredményezte, és a telítettség értéke tovább nőtt az UV-kezelés során

4. A vizsgálatba bevont faanyagok és a vizsgálati módszerek

4.1. Felhasznált faanyagok

4.1.1. A nemesnyáarak általános jellemzői

A nemes nyáarak alaki jellemzői Bartha (1998) alapján:

- nagytermetű fák (30-35m)
- törzsük egyenes, hengeres vagy sudarlós, kérgük sima, szürkés, a törzs alsó részén rendszerint mélyen repedezett, ágaik vékonyak és sokszor örvösek vagy vastagabbak, felfelé törők.
- fájuk világossárga vagy zöldesszürke, puha és nagyon könnyű.
- vesszejük erőteljes, bordás, gyakran paraléces, rügyeik nagyok, barnák, balzsamosak
- leveleik szórt állásúak, háromszög vagy deltoid alakúak, porcos és pillás szegélyűek, alapjuknál gyakran 1-2 mirigyszemölcsessel
- kétlakiak, porzós virágzataik csüngők, kopaszak, termős virágzataik csüngők, kopaszak
- termésük zömök tojásdad tok, rendszerint kevés fejlett maggal, melyek szőrüstökösek

A nemes nyáarak biológiai és ökológiai jellemzői:

- rövid életű (30-35 év), nagyon gyors növekedésű fajok
- lombfakadás előtt, március második, április első felében virágoznak
- nőivarú klónok termése és magja júniusban érik és hullik
- őszi lombszínük sárgás- vagy zöldesbarna
- töről sarjadnak
- mivel monoklónok, ezért vagy nőivarú, vagy hímivarú fajtáik vannak
- mezofil - mezohigrofil
- kiegyenlített hőigényűek
- neutrofil
- fényigényesek

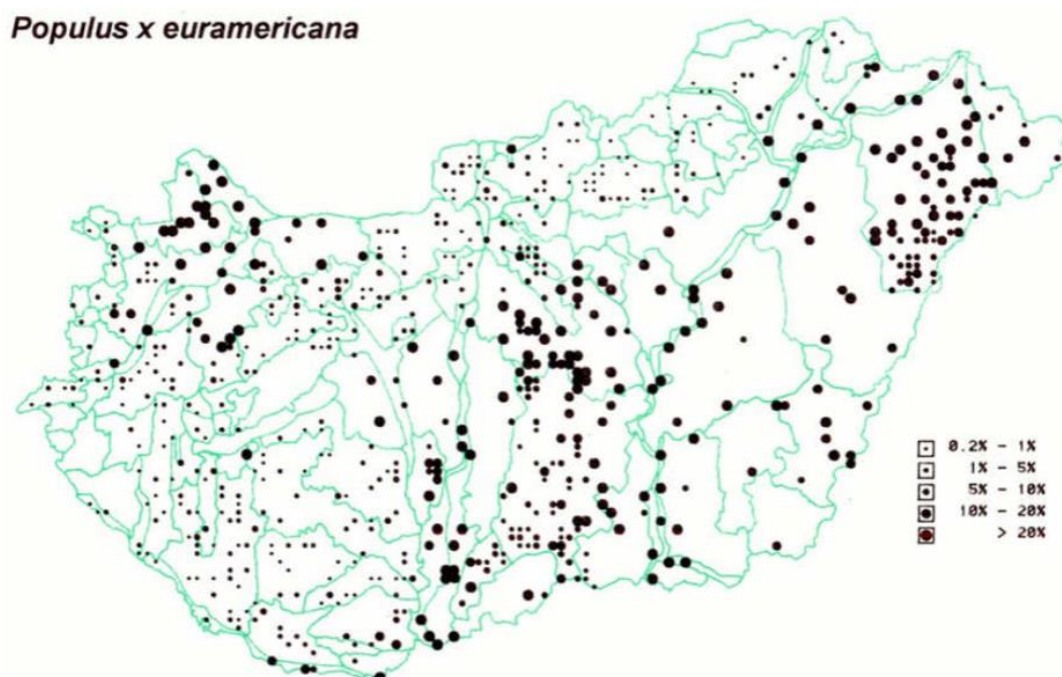
A nemes nyáarak élőhelyének, elterjedésének jellemzői:

- kultúrfaj fajtáit termesztik, ezért csak termesztési területen fordul elő
- nálunk főleg síkvidékeken ültetik őket faültetvényes állomány formájában
- hazánkban közel 20 fajtájukat termesztik

4.1.2. A Pannónia nyár általános jellemzése

Ahogy említésre került, hogy síkvidéki területeken tömeges a megjelenése, így a Kisalföld, Nagyalföld térségében található legnagyobb állományai (5. ábra).

Az általunk vizsgált Pannónia nyár faanyagát tekintve fizikai és mechanikai tulajdonságai közepesek, alacsony a sűrűsége, küllemét sokszor eltorzítják a fahibák, megmunkáláskor könnyen szőrösödik és szálkásodik, rossz időjárásállósága miatt felhasználhatósága pedig korlátozott. A felsorolt okok miatt rendeltetése inkább másodlagos faanyagként jelentős, vagy láda/raklapgyártási alapanyagként vagy energetikai fűtőanyagként használják fel. Hátrányos tulajdonságai miatt régóta keresztezik, hogy előnyösebb tulajdonságú klónokat hozzanak létre. Így léteznek nagyobb sűrűségű és a megmunkálást jobban tűrő fajták is, mint a vizsgálatunk legfontosabb alanyát képviselő *Populus × euramericana* Pannonia, mely a *Populus deltoides* S-1-54♀ és a *Populus nigra* Lébény 211♂ szülők keresztezéséből Kopecky Ferenc által létrehozott mesterséges hibrid, a Pannónia nyár.



5. ábra: Pannónia nyár előfordulása Magyarországon. Forrás: Bartha (2007) Dendrológia

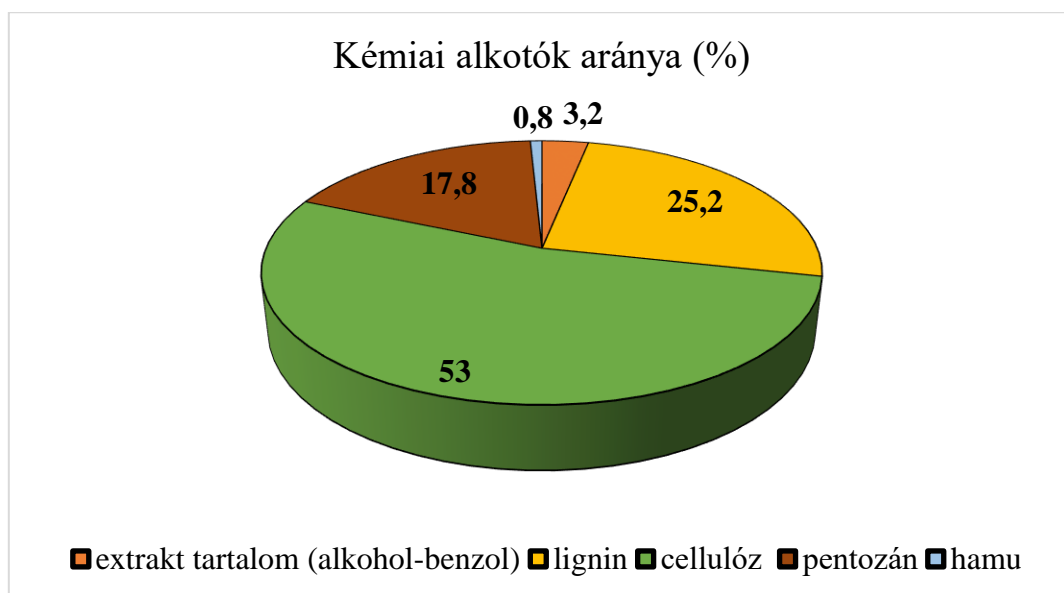
4.1.3. A Pannónia nyár rövid jellemzése Tóth (2006) alapján:

A törzs egyenes, hengeres, erőteljesen növekszik és kevés oldalágat hoz. Az ágak finomak, álgörvekben helyezkednek el, koronája ennek megfelelően keskeny, laza lombozattal. A fatest csúcsának felsőrésze inkább hengeres vörösesbarna, esetleg zöldes színű. Levelei a korona felső részén nagyok, alul feltűnően kisebbek. Lombozata laza. A kéreg a törzs alsó részén durva, sötétszürke. A kéregrepedések jellegzetesen sárgás-rozsdavörösek, hosszirányban futók. A törzs felső részén a kéreg sima, világosszürke. A fagykárosodásra kevésbé érzékeny. A többi nőnemű fajtához képest nagy mennyiségű repítőszőrös magot termel, ezért lakott területen mellőzik az ültetését. Ez a fajta a leggyakoribb nyárfabetegségekkel szemben jó tűrőképességű, de a barna levélfoltosodásra kissé érzékeny. A növekedés 12-15 éves korig kiváló, azonban 18 éves kor környékére jelentősen mérséklődik, ezért termesztésére a közepes időtartam javasolható (16-18 év). Jó termőhelyen fatermése általában megközelíti az „I-214” klónét, a közepes és a gyenge nyárfa termőhelyeken felül is múlhatja azt. Egyenes, a koronában is végig futó törzse, finom ágrendszere gépi fakitermelésre is alkalmassá teszi. A finom ágak megkönnyítik a törzs nyesését (NAK 2019). A kedvező termesztési tapasztalatok miatt a magyarországi nemesnyár-termesztés egyik legkedveltebb fajtájává tették. Tág határok között mozog a termőhelyi tűrőképessége, ezért eltérő hidrológiai viszonyok között, valamint határ nyárfa termőhelyeken is eredményesen termesztethető. Az egyik leggyorsabb növekedésű és az egyik legnagyobb fatömeget adó fafajta (Komán és Molnár 2008). Alkalmos lehet az energetikai rendeltetésű fatermesztésre is. Az „I-273” nyárhoz hasonlóan magasabb sűrűségű faanyagot képez emiatt fája épületszerkezeti és bútorigipari felhasználásra is alkalmas (NAK 2019).

Molnár és Bariska (2006) szerint a Pannónia nyár főbb fizikai, mechanikai tulajdonságai számszerűsített értékeit az alábbi 1. táblázat tartalmazza, míg a kémiai összetevők arányait az 6. ábra mutatja be százalékos megoszlásban.

1. táblázat: A Pannónia nyár faanyag főbb fizikai és mechanikai paramétereit (Molnár és Bariska 2006)

Tulajdonság	Érték	Mértékegység
Sűrűség		kg/m ³
légszárazon (u=12%):	406	
élőnedvesen	700-800	
Hajlító rug. modulusz	6510	N/mm ²
Hajlítószilárdság	67,4	N/mm ²
Ütő-törő munka	4,0-5,0	J/cm ²
Rostirányú nyomószilárdság	32,6	N/mm ²
Brinell keménység	N/mm ²	N/mm ²
büti	20,6	20,6
oldal	10,8	10,8



6. ábra: A Pannónia nyár biomassza összetevőinek aránya

4.1.4. Az akác általános jellemzése

A fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) alaki jellemzői Bartha (2000) alapján:

- nagytermetű fák (35 m);
- törzse nyúlánk, ormos, térgörbe, kérge szürkésbarna, igen vastag, hálózatosan repedezett, koronája magasra tolódó, nagyon laza, ágai vékonyak;
- fája zöldesbarna, kemény, nehéz, tartós, kiváló tűzifa;

- vesszeje zegzugos, bordás, vörösesbarna, a levélripacs két oldalán 1-1 lapos merev, szúrós pálhatóvissal rüggyel rejtettek, rozsdabarnán szőrözöttek;
- levelei szórt állásúak, páratlanul szárnyaltak, 9-19 levélkéből állnak, melyek elliptikusak, 2,5-4,5 cm hosszúak, vékonyak, felül szürkészöldek, fonákuk halvány kékeszöld;
- pillangós virágai, levélhónalji, csüngő fürtökben nyílnak, fehérek, torkuk zöldessárga;
- hüvely termése egyenes, lapos, 6-11 cm hosszú, vörösesbarna, magjai vesealakúak, 3-5 mm hosszúak, feketésbarnák.

Az akác biológiai és ökológiai jellemzői:

- hosszú életű (200-250 év), gyors növekedésű faj, felhasználás szempontjából a 40-50 éves már öregnek számít Magyarországon;
- lombfakadás előtt, május második felében virágzik;
- termése októberben érik, tél végén – tavasszal hullik;
- őszi lombszíne zöldessárga vagy sárga;
- töről és gyökérről is jól sarjad;
- jó mézelő;
- melegigényes, fagyérzékeny;
- xeromezofil;
- neutrofil, nitrofil;
- fényigényes.

Az akác élőhelyének, elterjedésének jellemzői:

- nálunk nem őshonos;
- főleg síkvidéken és az alacsonyabb dombvidéken ültetik, de a középhegységekben is előfordulnak állományai;
- ahol megtelepedett szinte kiirthatatlan, ezért számos természeti értéket veszélyeztet.

4.1.5. A bükk általános jellemzése

A bükk (*Fagus sylvatica*) faanyag jellemzése Bartha (2000) alapján:

- nagytermetű fa (40 m);
- törzse hengeres, nyúlánk, kérge vékony, sima, ezüstszürke, koronája sűrű, ágai meredeken felfelé irányulók;

- fája vörösesfehér, kemény, nehéz, a faszénégetés egyik alapanyaga;
- vesszeje szürkésbarna, fényes, rügyei a szártól erősen elállók, orsó alakúak, nagyok, fahéjbarnák;
- levelei váltakozó állásúak, elliptikusak, 5-8 cm hosszúak, élük hullámos és pillás;
- egylaki, porzós és termős virágai külön fejecskékben nyílnak, a porzós virágzatok hosszú kocsányúak, csüngők, a hajtás alsóbb részein találhatóak, a termős virágzatok kocsánya rövidebb, merevebb, elálló;
- makk termése háromélű, 15-20 mm hosszú, gesztenyebarna, kettesével zárt 2-3 cm hosszú, bozontos felületű kupacsban ülnek, mely éréskor 4 részre hasad.

A bükk biológiai és ökológiai jellemzői:

- hosszabb életű (200 év), lassú növekedésű faj;
- lombfakadás után, májusban virágzik;
- termése októberben érik és hullik;
- őszi lombszíne sárga vagy sárgásbarna;
- töről rosszul sarjad, csak a fiatalabb fák sarjadzása kielégítő;
- közepes hőigényű;
- mezofil;
- acidoklin – baziklin;
- árnytűrő.

A bükk élőhelyének, elterjedésének jellemzői:

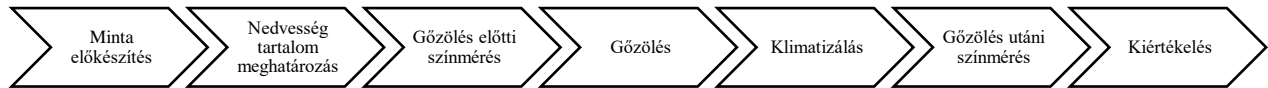
- dombvidéki, középhegységi, magashegységi faj;
- Északi- és Dunántúli-középhegység, Nyugat- és Délnyugat-Dunántúl, Zselic, Mecsek.

4.2 A vizsgálat során felhasznált eszközök és a mérés módja

4.2.1. Gőzölési kísérletek

Vizsgálatainkhoz nyár, akác és bükk faanyagot használtunk fel. A vizsgálatok tárgya a nyár faanyag volt, az akác és a bükk faanyagot segédanyagként használtuk fel.

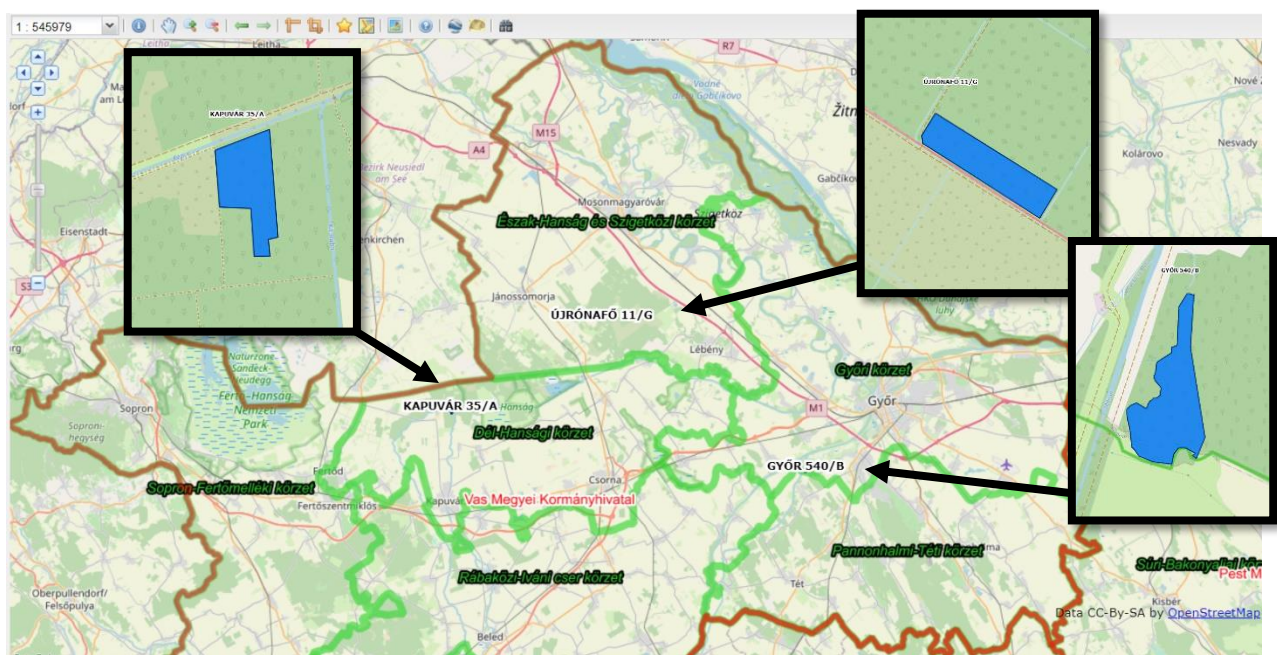
A hipotéziseknek megfelelően gőzölési menetrendek sokaságát futtattuk le a 7. ábrán szemléltetett folyamat alapján. A különbségeket a kísérletek között a gőzölési paraméterek, vagy segédanyagok megjelenése jelentették.



7. ábra: A kísérletek folyamata

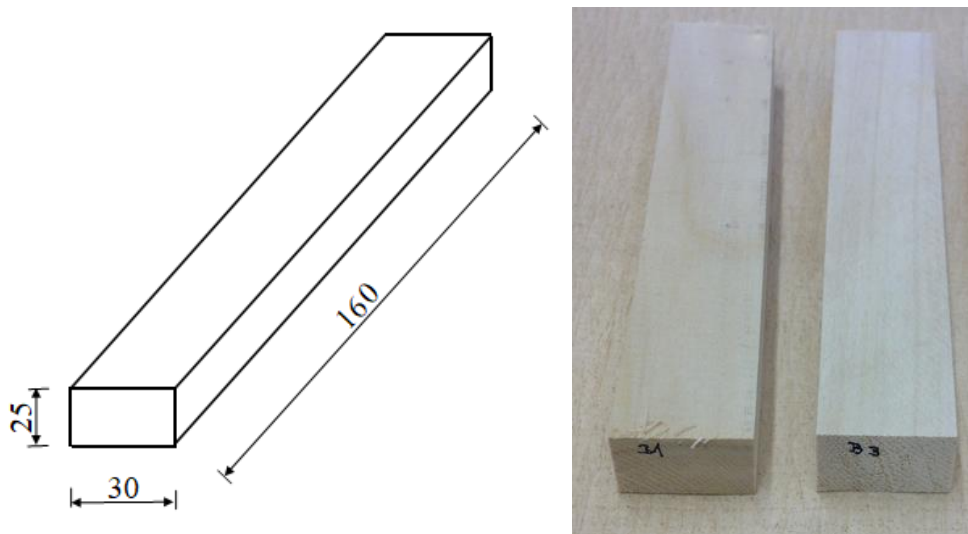
A gőzölési vizsgálatok az OTKA K116216 (Alacsony sűrűségű faanyag fiziko-mechanikai és felületfizikai tulajdonságainak komplex elemzése) projekt keretében történtek. A vizsgálatokhoz szükséges nyár faanyagot a projekt biztosította, amit a Kisalföldi Erdőgazdaságtól szereztünk be. Az erdőgazdaságtól kapott adatok alapján az 8. ábra mutatja, hogy a minták 3 ültetvényről származnak:

- Kapuvár 35/A: átlag kor 26 év, átlagos törzsátmérő 36 cm
- Újrónafő 11/G: átlag életkor 25 év, átlagos törzsátmérő 32 cm
- Győr 540/B: átlag életkor 25 év, átlagos törzsátmérő 27 cm



8. ábra: Vizsgált faanyagok származási helyszínei a KAEZ Zrt. területén (forrás: NÉBIH Erdőtérkép, OpenStreetMap)

A minták mellmagassági átmérőből származtak. A rönkökből 50mm vastagságú pallók készültek, amit szárítás után használtunk fel, így azok 8-12 % nedvességtartalommal rendelkeztek. A szárított faanyag használata azért volt indokolt, mert így az évekig tartó vizsgálatokhoz mindig ugyanaz a minőségű faanyag állt rendelkezésre. A próbatestek keresztmetszete 30x25 mm, a hosszuk pedig 160 mm volt, amelyet a gőzölő edény mérete alapján készítettünk el (9. ábra). Ahhoz, hogy a teljes keresztmetszet változásait követni tudjuk, a mintakészítés során szijácsra és gesztre szortíroztuk a próbatesteket.



9. ábra: A kísérletekhez használt nyár próbatestek

Minden kezelési eljárás előtt meghatároztuk a minták aktuális nedvesség tartalmát, tömegmérési eljárással. Mind a gesztből, mind a szijácsból 5-5 db mintának megmértük a tömegét analitikai mérlegen, ezután szárítószekrényben 100 °C-on tömegállandóságig szárítottuk és ismét megmértük a minták tömegét. A száraz és nedves tömeg arányából számítottuk a minták nedvesség tartalmát.

A kezelési eljárások előtt megmértük a próbatestek színét. A színméréshez KONICA-MINOLTA 2600d típusú színmérő készüléket használtunk (10. ábra).

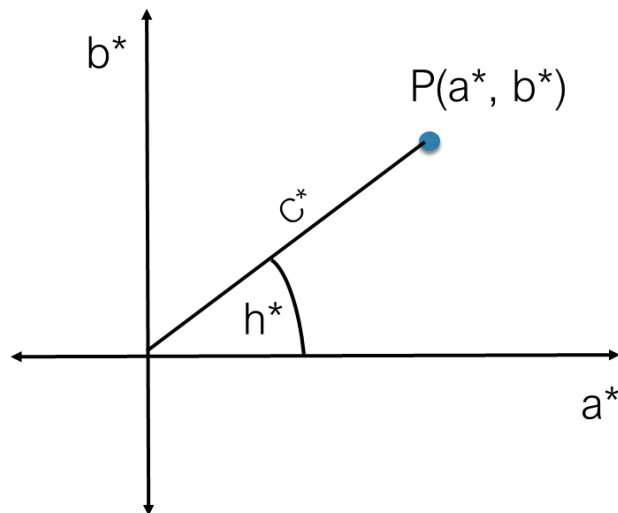


10. ábra: KONICA-MINOLTA 2600d színmérő készülék

Minden gözőlési időhöz 4-4 db minta állt rendelkezésre. A faanyag inhomogenitását figyelembe véve minden próbatesten 10 ponton végeztünk mérést, így az eredmények 40 mérés átlagát reprezentálják. A készülék kiszámolta az L^* , a^* , b^* színkoordinátákat. A színpontokat a háromdimenziós CIELAB színkoordináta rendszerben adtuk meg, amelynek tengelyei a következők (12.ábra):

- világosságot az L^* koordináta adja, ami 0 és 100 között változhat, ahol a 0 az abszolút sötét és a 100 az abszolút világos.
- az a^* koordináta pozitív oldala a vörös színezetet, az ellentétes oldala a zöld színezetet adja.
- a b^* koordináta pozitív értékei a sárga színezetet, a negatív pedig a kék színezetet adja meg.

A derékszögű koordináták mellett a hengerkoordinátákat is meghatároztuk, mert szemléletes jelentésük van. A hengerkoordináta rendszer megtartja az L^* világosság tengelyt. Az a^* és b^* koordináták helyett pedig síkbeli polár koordinátákat használ (Németh 1982). A 11. ábra a síkbeli polár koordinátákat szemlélteti.



11. ábra: Síkbeli polár koordináták ábrázolása

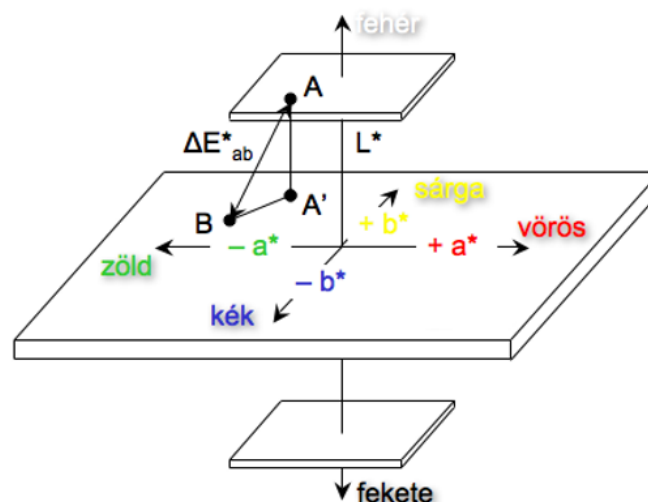
A h^* színezeti szög és a C^* telítettség polár koordinátákat az alábbi összefüggések adják meg:

$$h^* = \arctan(b^*/a^*)$$

$$C^* = \{(a^*)^2 + (b^*)^2\}^{1/2}$$

A ΔE^* teljes színváltozást (két színpont közötti távolságot) a térbeli Pitagorasz tétel segítségével kapjuk meg (12. ábra).

$$\Delta E^* = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$$



12. ábra: Színkoordináták, valamint a ΔE^* színíngert különbség ábrázolása (Varga 2012)

A 2. táblázat mutatja a ΔE^* és a vizuális érzékelés kapcsolatát. Ezt az iparban gyakran használják gyártói környezetben, ahol egy meghatározott színmintának megfelelő terméket kell gyártani. Előnye, hogy gyorsan és egyszerűen kivitelezhető, de figyelembe kell venni, hogy a rajzos vagy tarka felületeken ettől a szemünk érzékelése eltérhet (Tolvaj 2012)

2. táblázat: A vizuális érzékelés és ΔE^* kapcsolata (Tolvaj 2012)

ΔE^*	Szemmel érzékelhető eltérés
$\Delta E^* \leq 0,5$	Nem érzékelhető
$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$	Alig észrevehető
$1,5 < \Delta E^* \leq 3,0$	Észrevehető
$3,0 < \Delta E^* \leq 6,0$	Jól látható
$6,0 < \Delta E^*$	Nagy

A színmérés során D65 fényforrást használtunk, 8 mm átmérőjű megvilágított felület esetén, 10° -os megfigyelés mellett.

Gőzölési menetredekét állítottunk össze, amelyeknél figyelembe vettünk szakmai és szakirodalmi szempontokat (Tolvaj et al. 2004). A tapasztalatok alapján az alkalmazott gőzölési hőmérsékletek 90, 100, 110 és 120°C voltak. A próbatestek mérete 160x30x25 (mm) volt.

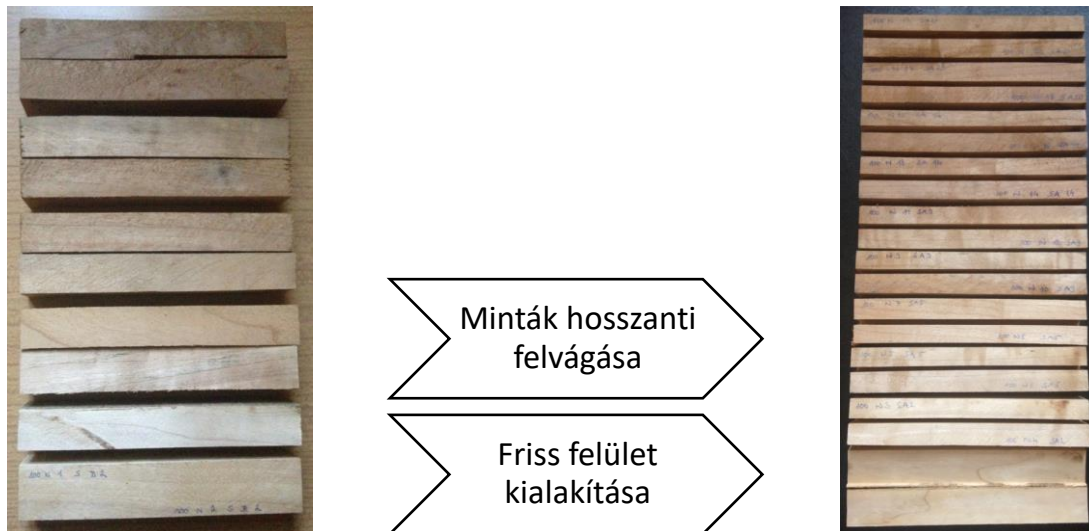
A laboratóriumi gőzölési kísérletek során a nyomástartó edényekben a faanyag alatt desztillált vizet helyeztünk el, ami hő hatására telített vízgőzt képzett a zárt gőzölő térben. A betöltött víz hőmérséklete 90 és 100°C között volt. A gőzölő edényeket 90°C , 100°C , 110°C -on szárítószekrénybe, 120°C esetében nyomástartó hengerbe tettük, amit a 13. ábra mutat. A megadott hőmérséklet elérésére 6 órás felfűtési időt biztosítottunk. A szárítószekrény és a henger a beállított hőmérsékletet $\pm 0,5^\circ\text{C}$ pontossággal tartotta.



13. ábra: A nyomástartó edények 90, 100 és 110 °C -on a szárítószekrényben, 120°C -on nyomástartó hengerben voltak.

A 90, 100 és 110 °C -on kezelt mintákat 2, 5, 9, 14, 20 napos gőzölés után távolítottuk el a gőzölő téréből. A 120 °C-os gőzölési kísérletek során eltértünk ezektől a kezelési időktől a magasabb hőmérséklet miatt. A tapasztalatok alapján feltételeztük, hogy a színváltozások kevesebb idő alatt is végbemennek. Ennek megfelelően arányosan rövidítettük a kezelési időt, így 1, 2, 4, 6, és 9 nap után távolítottuk el a mintákat a gőzölő téréből. Fontos megjegyezni, hogy a gőzölőből kivett minták nem kerültek vissza a gőzölő térbe, tehát mindegyik gőzölési időhöz más-más mintasorozat tartozott. Ezért a grafikonokon látható színpontok nem csak a gőzölés hatását mutatják, hanem a faanyag inhomogenitását is, mivel az egyes mintasorozatoknak kis mértékben eltérők voltak a kiindulási színadatai. Ezért hullámosak a grafikon vonalak. Annak érdekében, hogy a próbatetek légszáraz állapotot vegyenek fel, laboratóriumi környezetben tároltuk őket egy hónapig. A közel azonos nedvességtartalom beállítása a színmérés szempontjából volt fontos. Korábbi kísérletek igazolták, hogy a faanyag színét a nedvességtartalom jelentősen befolyásolja (Tolvaj és Preklet 2015).

A légszáraz próbateteket hosszirányban, középen kettévágtuk, és a frissen kialakított felszínen végeztük el a színmérést a korábban leírt módszer alapján (14. ábra). Ezzel a megoldással azt is láttuk, hogy a faanyag a teljes keresztmetszetében elszíneződött. A kapott eredményeket kiértékeljük.



14. ábra: Frissen kialakított felszín a színméréshez

A fenti menetrendekkel megegyezően párhuzamosan futtattunk kísérleteket a különböző faanyagok együtt gőzölésének vizsgálatára is. Így a nyár faanyag, mint javítandó anyag mellett azonos gőztérben bükk (*Fagus sylvatica*), vagy akác (*Robinia pseudoacacia*) faanyagot, mint segédanyagot helyeztünk el. A térfogat aránya minden esetben megegyezett, így a 100%-nak vett javítandó anyaghoz minden esetben 50% segédanyagot tettünk.

4.2.2. A gőzölt nyár faanyag UV sugárzással szembeni ellenálló képességének vizsgálata

A gőzölt nyár faanyag UV sugárzással szembeni ellenálló képességének vizsgálatát egy higanygőz lámpával felszerelt klímakamrában végeztük el. A vizsgálatokhoz 100, 110 és 120°C-on, 5 napig gőzölt geszt faanyagot használtunk. Kontrollként gőzöletlen nyár faanyagot is elhelyeztünk a kamrában. A minták 67 cm távolságban voltak a 800 wattos (felvett elektromos teljesítmény) fényforrástól. A kamrában a hőmérsékletet 70°C-on tartottuk az UV kezelés során. A higanygőz lámpa által kibocsátott sugárzás 80%-a az ultraibolya (UV) tartományba esett. Ezen belül a sugárzás 31%-a az UV-A, 24%-a az UV-B és 25%-a az UV-C tartományban volt. A kezelést 7, 16, 36, 60 és 90 órás besugárzás után megszakítottuk a színmérés érdekében.

4.2.3. Egyensúlyi fanedvesség meghatározása

A gőzölt nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalmának vizsgálata a tartósság és az ellenállóképesség szempontjából fontos tényező. Ezeket a kísérleteket a kezelés után 3 év elteltével végeztük annak érdekében, hogy meggyőződjünk róla hosszú távon milyen egyensúlyi fanedvességre állnak be a kezelt minták. Ebben a 3 évben a gőzölt minták szobaszáraz körülmények között voltak tárolva. A gőzölt minták nedvességtartalmának meghatározását tömegmérési módszerrel végeztük, akárcsak a gőzölési kísérletek előtt. Minden kezelési hőmérséklet és kezelési idő szerinti mintának megmértük a tömegét analitikai mérlegen. A gesztből és a szijácsból 4-4 db minta állt rendelkezésre. Ezután szárítószekrényben 100 °C-on tömegállandóságig szárítottuk a mintákat és ismét megmértük azok tömegét. A száraz és nedves tömeg arányából számítottuk a minták nedvesség tartalmát.

4.2.4. A vizsgálati módszer kidolgozását segítő előkísérletek

A kísérleteink kidolgozását előkísérletek segítették, amiket 100 °C-on végeztünk. Ezek az előkísérletek a segédanyagok gőzölő térben való elhelyezésére vonatkoztak.

A segédanyag nedvességtartalom fontosságának meghatározásánál, valamint a segédanyagok gőzölő térben való elhelyezésével kapcsolatban a korábban említett gőzölési hőmérséklethez több kísérletet indítottunk, hogy lássuk azonos hőmérsékleten befolyásolják-e a szint ezek a különbözőségek. A segéd faanyagok:

- száraz bükk (nedvesség tartalom 12%)
- nedves bükk (nedvesség tartalom 36,2%)
- vízben lévő bükk (a gőzért felelős desztillált vízbe helyezve),
- száraz akác, (nedvesség tartalom 8,4%)
- vízben lévő akác (a gőzért felelős desztillált vízbe helyezve).

Az előkísérleteknél a nyár minták vegyesen szerepeltek a szijácsból és gesztből a gőzölés során. A fenti különbségeken kívül minden paraméter és folyamat megegyezik a szériakísérletekkel, úgy mint a próbatestek mérete, száma, a gőzölési idő, vagy a színérés folyamata. A színérések eredményének kiértékelésekor látható volt, hogy az anyag homogenizálódik - ezek az adatok az eredmények fejezetben láthatók - viszont nem tudtuk pontosan követni a

gőzölésnek a szijácsra vagy a gesztre irányuló hatását. Ezért a széria kísérleteknél a szijácsot és a gesztet külön légtérben kezeltük annak érdekében, hogy pontos képet kapjunk a kezelés hatásáról.

5. Eredmények és kiértékelés

5.1 Előzetes vizsgálatok eredményei, homogenizáció (előkísérlet)

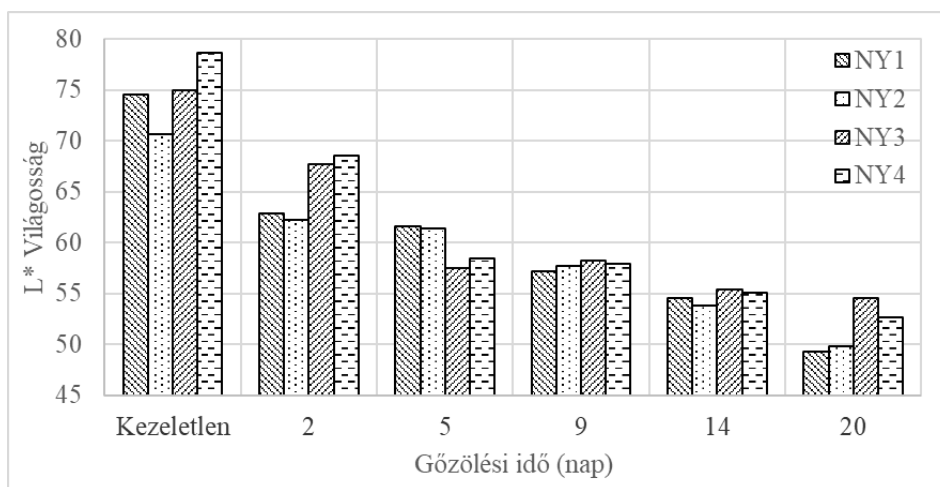
A kísérleteink során a nyár eredeti, nem tetszetős, szürkésfehér és jellegtelen színét kívántuk módosítani annak érdekében, hogy vonzóbb legyen, az elsődleges faanyagokhoz hasonlóan melegebb barnás színt érjünk el. Szemmel láthatólag a nyár színe a gőzölés hatására vesztett a világosság értékéből, továbbá a faanyag rajzolata kiemelkedett, láthatóbbá vált, amit a 15. ábra szemléltet.



15. ábra: 100°C-on, 2;5;9;14 és 20 napig gőzölt nyár minták

A gőzöléssel kialakított színváltozást az egyes szinkordináták változásának bemutatásával adjuk meg, mindegyik gőzölésnél 4 mintát használva. A 16. ábrán látható a nyár minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében. Jól látható a világosságbeli

inhomogenitás a kezeletlen minták esetében (3. táblázat). Ez a színbeli inhomogenitás a többi színkoordináta esetében is megfigyelhető (4; 5. táblázat). Elmondható, hogy a nagyobb mértékű változások zajlottak le világosság tekintetében a gőzölési idő első felében, mint a második felében, ahol a folyamat lassult. A homogenizálódás esetében szintén különbség látható a gőzölési idő első és második fele között. Az első felében homogenizálódott a nyár faanyag, és az azonos minták mért értékei között a különbség egyre csökkent. A 9. nap mért értékei mutatták a legkisebb eltérést egymáshoz képest, ezután ismét nőtt az eltérés, vagyis a nyár faanyag inhomogenizálódott.



16. ábra: A 100°C-on gőzölt nyár (NY) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében

A 3. táblázat a világosság homogenizációját támasztja alá a mért értékek elemzésével. A táblázat az idő függvényében mutatja be az egyes minták (10 mérés/minta) világosságértékeinek szórását (NY1; NY2; NY3; NY4 sorok), továbbá a négy minta L* értékeinek együttes (40 mérés) szórását az utolsó sorban. A kezeletlen minták inhomogenitását a hozzá tartozó szórásértékek mutatják. Ezek az értékek a kezdeti állapothoz képest csökkennek, az 5 és 9 napig gőzölt minták világosságértékei mutatják a legkisebb szórást, ami azt jelzi, hogy ebben az állapotban a leghomogénebb az anyag. Ezt követően a gőzölés második szakaszában ismét nő a szórásértékeket mértéke.

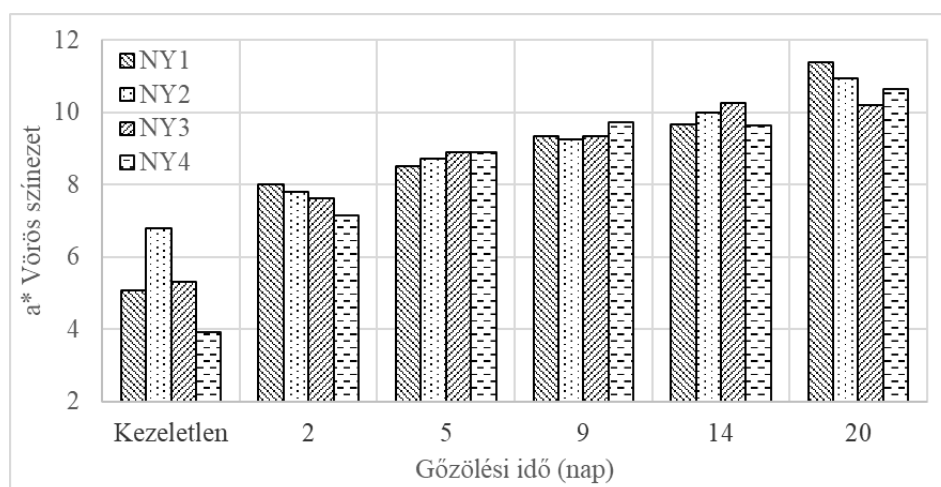
A négy minta L* értékének összehasonlításakor a kezeletlen állapotban a legnagyobb a szórás. Ez összhangban van a 16. ábrával, amely a 9. napon a legkisebb szórásértéket mutatja,

amikor a négy minta világosságértékei a legközelebb állnak egymáshoz. Ezután a szórás ismét növekszik.

3. táblázat: A minták világosság értékeinek szórása

Gőzölési idő (nap)	Kezeletlen	2	5	9	14	20
NY1 L* értékeineknek szórása	2,55	1,40	0,36	0,98	0,59	0,79
NY2 L* értékeineknek szórása	2,09	1,69	0,53	0,85	1,05	1,59
NY3 L* értékeineknek szórása	1,47	1,38	1,17	0,96	2,19	0,58
NY4 L* értékeineknek szórása	1,33	1,31	0,59	0,65	1,33	1,82
NY1; NY2; NY3; NY4 L* értékeineknek szórása	3,29	3,23	2,04	0,44	0,69	2,48

A nyár minták vörös színezetének (a^*) változását a 17. ábra szemlélteti, amin érzékelhető az értékek emelkedése. A változás végbemenetele hasonló az L^* változásához csak ellentétes irányban, tehát a gőzölési idő első felében nagyobb mértékű változás történt, mint a második felében. A homogenizálódás jelentős része már a gőzölés első két napján megtörtént. Az a^* színkoordináta értékei az 5. nap után voltak a legközelebb egymáshoz. Ezt követően a minták vörös színezetei fokozatosan távolodtak egymástól.



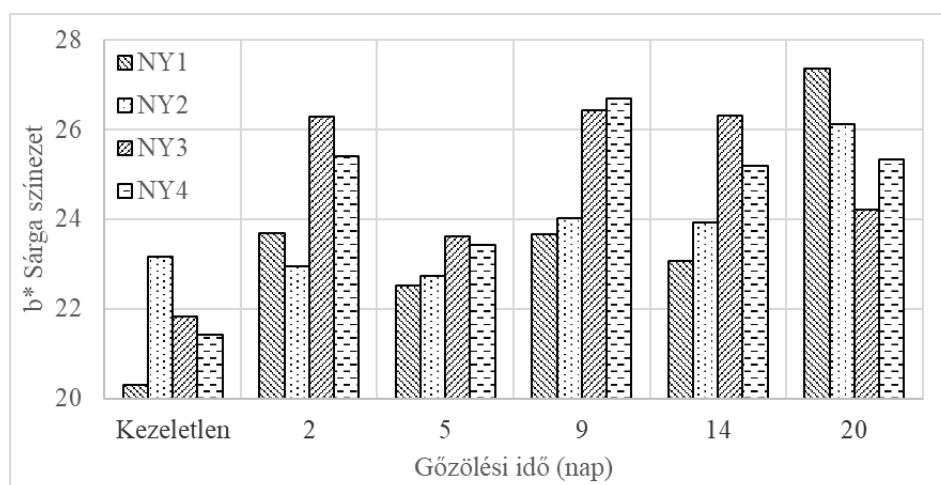
17. ábra: A 100°C-on gőzölt nyár minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében

A 4. táblázat a vörös színezet szórásértékeit mutatja be, a 3. táblázatnál leírt elven. Az elemzés megerősíti a 17. ábrán bemutatott megfigyeléseket. A kezdeti szórásértékekhez képest az 5 napig gőzölt minták mutatják a legkisebb szórást legyen szó az egyes minták vizsgálatáról, vagy a négy mintán mért értékeket összehasonlításáról. Ezt követően a szórás értékek növekedését figyelhetjük meg.

4. táblázat: A minták vörös színezet értékeinek szórása

Gőzölési idő (nap)	Kezeletlen	2	5	9	14	20
NY1 a* értékeineknek szórása	0,45	0,19	0,10	0,25	0,15	0,19
NY2 a* értékeineknek szórása	0,86	0,34	0,12	0,37	0,24	0,51
NY3 a* értékeineknek szórása	0,51	0,17	0,17	0,32	0,65	0,37
NY4 a* értékeineknek szórása	0,37	0,38	0,13	0,18	0,42	0,19
NY1; NY2; NY3; NY4 a* értékeineknek szórása	1,18	0,37	0,18	0,22	0,29	0,50

A nyár minták sárga színezetének (b*) változása az a* értékeihez hasonlóan szintén emelkedést mutatott, mely értékek a 18. ábrán láthatók. A kezeletlen minták sárga színezete hasonlóan inhomogén, mint a vörös színezete. De feltűnő, hogy a gőzölés a vörös színezetet jelentősen homogenizálta, míg a sárga színezetnél ez alig történt meg. Csupán az 5 napos gőzölésnél látható homogenizálódás.



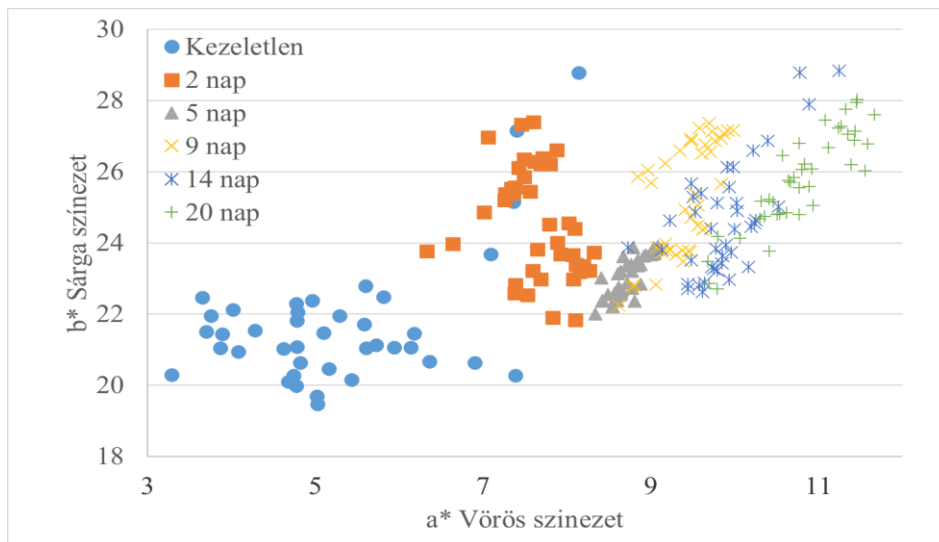
18. ábra: A 100°C-on gőzölt nyár minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében

Az 5. táblázat a sárga színezet szórásértékeit mutatja be, a 3. táblázatnál leírt elven. Ez a megközelítés alátámasztja a 18. ábrán látható megállapításokat. Az öt napon át gőzölt minták a kezdeti adatokhoz képest a legalacsonyabb szórásértékeket mutatják, akár az egyes mintákat elemezzük, akár a négy minta összehasonlító értékeit vizsgáljuk. Ezen minták vizsgálata után megfigyelhető a szórásértékek emelkedése, tehát az inhomogenizálódás.

5. táblázat: A minták sárga színezet értékeinek szórása

Gőzölési idő (nap)	Kezeletlen	2	5	9	14	20
NY1 b* értékeineknek szórása	0,53	0,51	0,35	0,54	0,34	0,48
NY2 b* értékeineknek szórása	2,97	0,82	0,43	1,02	0,57	0,92
NY3 b* értékeineknek szórása	0,57	0,70	0,23	0,45	1,73	0,89
NY4 b* értékeineknek szórása	0,64	1,01	0,36	0,84	0,80	0,67
NY1; NY2; NY3; NY4 b* értékeineknek szórása	1,19	1,53	0,52	1,58	1,41	1,32

A nyárgőzölés vonatkozásában egyértelműen látszik a gőzölés színhomogenizáló hatása. A nyár minták teljes színváltozásának homogenizálódását követhetjük nyomon egy másik megközelítésben a 19. ábrán, ahol a színpontokat az a* és b* színsíkon ábrázoltuk. Látható, hogy a gőzöletlen minták színpontjai nagy területen helyezkednek el. Ez a terület az 5. napra minimalizálódik, majd ismét növekedésnek indul. A 4. és 5. táblázat utolsó sorai szintén megerősítik ezt a megfigyelést: mind a vörös, mind a sárga színezet esetében az öt napig gőzölt minták mutatják a legalacsonyabb szórásértékeket. Ezt követően a mérési eredmények magasabb szórást mutatnak. Az 5 nap utáni inhomogenizálódás annak köszönhető, hogy ezen a hőmérsékleten a színeképző vegyületek már nem stabilak, 5 nap után már megjelenik a színeképző vegyületek bomlása is.



19. ábra: A színpontok elhelyezkedése az a^* - b^* síkon a gőzölési idő függvényében a 100°C -on gőzölt nyár faanyagra vonatkozóan

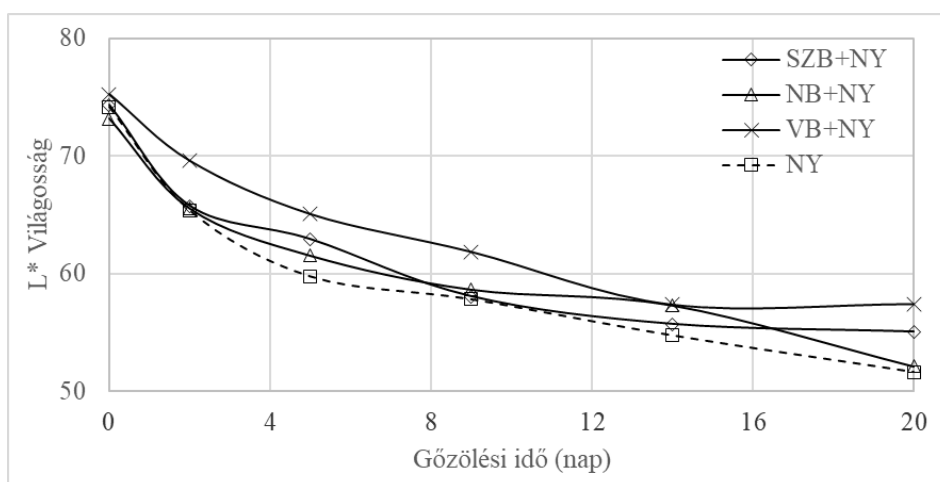
Az előző ábrák jól szemléltetik, hogy a nyár faanyag gőzölés hatására homogenizálódik viszont nem egyértelmű, hogy milyen hatása van a szijácsra és a gesztre külön-külön. Ezért a további kísérleteknél a szijácsot és a gesztet külön légtérben kezeltük annak érdekében, hogy pontos képet kapjunk a kezelés hatásáról.

5.2 Segédanyagokkal együtt gőzölt nyár faanyag színváltozása (előkísérlet)

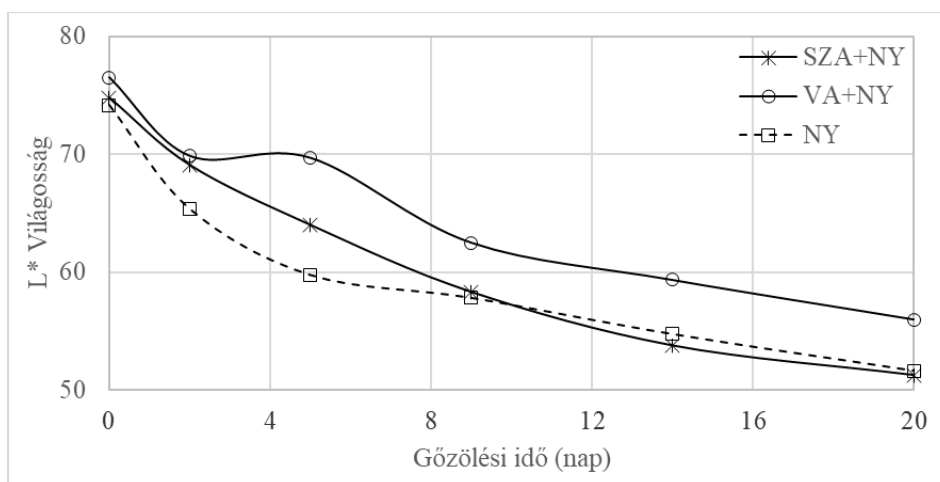
Ezeknél a kísérleteknél a száraz (nedvesség tartalom 12%) és nedves (nedvesség tartalom 36,2%) bükk segédanyagok a nyár mintákkal egy légtérben gőzöltük. A harmadik verzió a vízben lévő bükk, ahol a segédanyagot a gőzért felelős desztillált vízbe helyeztük és így módon gőzöltük a nyár faanyagot. Az akác esetében száraz (nedvesség tartalom 8,4%) és a vízben lévő segédanyaggal való kezeléseket valósítottunk meg. Nedves akác faanyag nem állt rendelkezésre.

Az L^* időbeni változását figyelhetjük meg a 20. és 21. ábrán. A 20. ábrán a bükk különböző változataival egy térben kezelt nyár minták világosságának változását figyelhetjük meg összehasonlítva az önmagában gőzölt nyár minták eredményeivel. A 21. ábrán szintén a világosság változását láthatjuk, de ebben az esetben az akác által okozott hatás eredményeit összehasonlítva az egyedül gőzölt nyár mintákkal.

A világosság értéke valamennyi esetben hasonló módon csökkent. A csökkenés az első két napon valamivel intenzívebb volt, mint a későbbi időszakban. Szembetűnő, hogy a világosság tekintetében a segédanyagok nem segítik elő a faanyag sötétedését, inkább hátráltatják. Mindkét segédanyagnál hasonló, vagy jobb értékeket értünk el a nyár segédanyag nélküli gőzölésekor. A legkisebb világosság csökkenést mind az akác, mind a bükk tekintetében akkor értük el, mikor a segédanyag desztillált vízben volt.

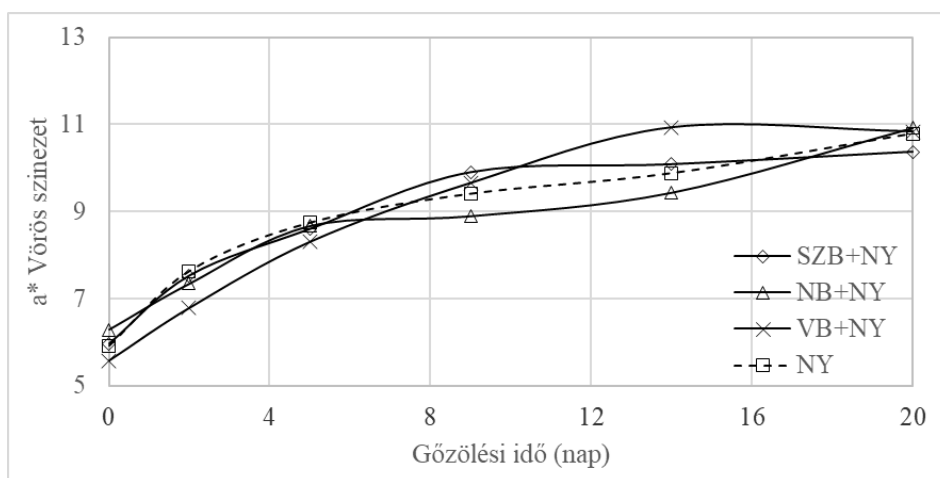


20. ábra: A 100°C-on bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; N=nedves; V=vízbe helyezett)

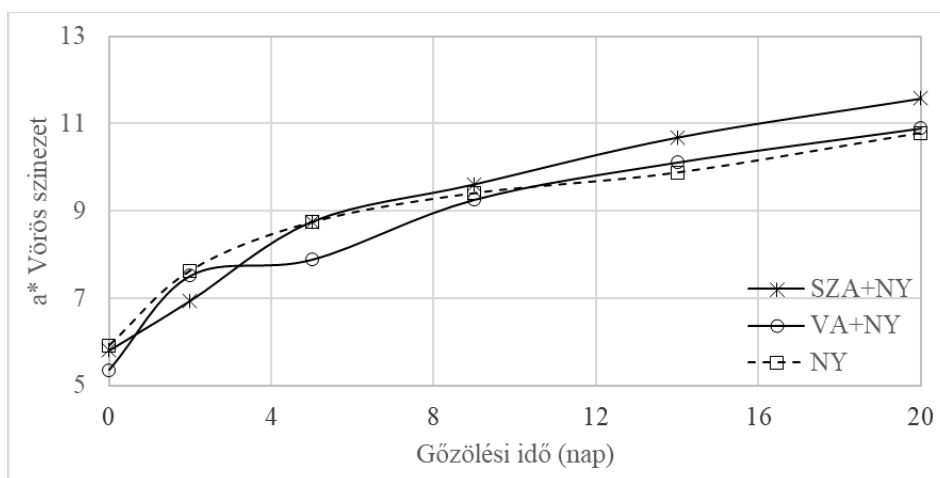


21. ábra: A 100°C-on akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; V=vízbe helyezett)

A 22. és 23. ábrán a segédanyaggal együtt gőzölt minták mért vörös színezet értékei hasonló eredményt mutattak, mint a nyár minta vörös színezetének változása. Az értékek emelkedtek, de hasonlóan az L^* változásához, itt is kijelenthetjük, hogy a segédanyag nem befolyásolja jelentősen a folyamatot. Egyedül a száraz akáccal gőzölt nyár a^* értékei növekedtek nagyobb mértékben a gőzölési periódus második felében, mint az egyedül gőzölt mintáké, de ez szabad szemmel nem, vagy alig érzékelhető. A vörös színezet erősödése elsősorban az extrakt anyagok degradációjával magyarázható, de az alkalmazott gőzölési hőmérsékleten már a hemicellulózok degradációja is szerepet játszik a vörös színkoordináta növekedésében (Csanády et al. 2015).



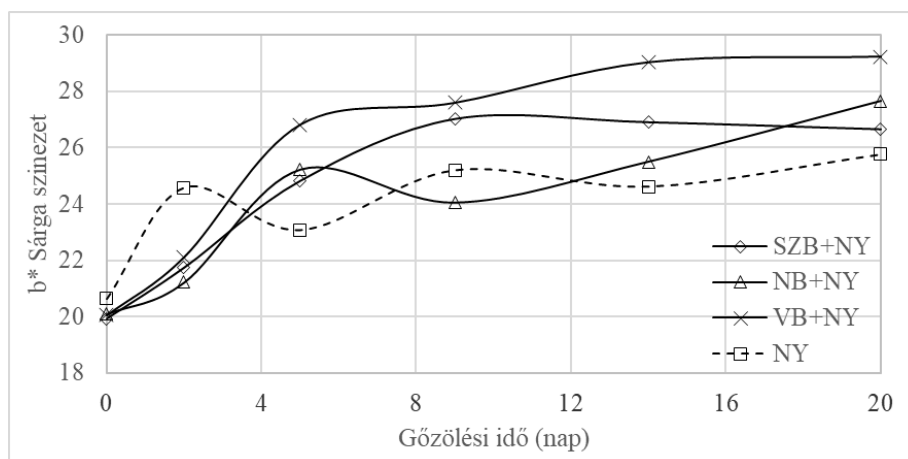
22. ábra: A 100°C-on bükkkel (B) együtt gőzölt nyár (NY) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; N=nedves; V=vízbe helyezett)



23. ábra: A 100°C-on akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; V=vízbe helyezett)

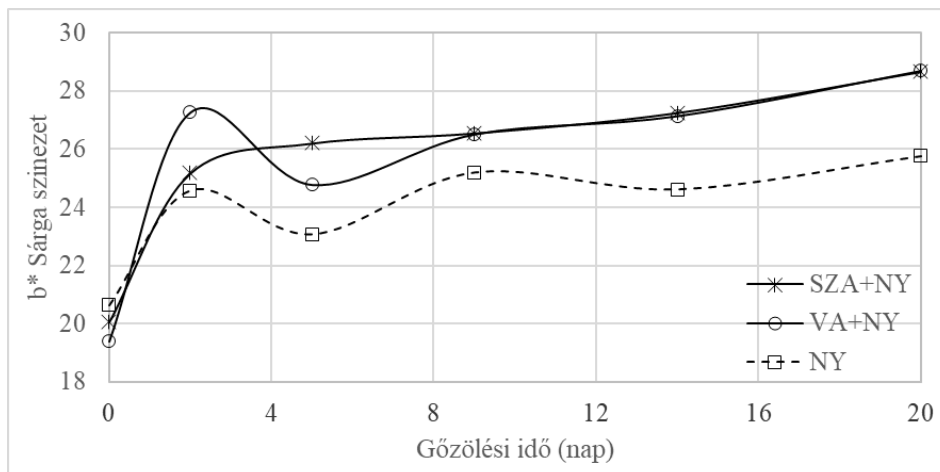
Az a* színekoordináta viselkedésétől teljesen eltérő eredményeket mutatott a bükkal és akáccal kezelt nyár minták b* (sárga) színekoordináta értékei, amiket a 24. és 25. ábra szemléltet. A görbék hullámzását a minták eredeti sárga színezetében lévő eltérések okozták. Itt bármelyik kísérletet nézve minden esetben nagyobb változást láthatunk az együtt gőzölt mintáknál, az egyedül gőzölt nyár minták értékeihez képest. Mind közül a legnagyobb változást a vízben lévő bükk anyaggal kezelt mintán értük el. Továbbá látható, hogy a száraz bükkal kezelt minták b* értékei, a kísérlet második felében közeledtek az önmagában gőzölt nyár minták értékeihez.

A bükkal kezelt minták esete jó példa arra, hogy a különbözőképpen elhelyezett segédanyagok milyen hatással vannak a színezetekre. Mivel bükk esetén minden egyes kísérlet különböző végértékkel zárult, ezért kijelenthetjük, hogy az együtt gőzölés a sárga színezetre volt a legnagyobb hatással.



24. ábra: A 100°C-on bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; N=nedves; V=vízbe helyezett)

Az akáccal együtt gőzölt nyár minták sárga színezete a gőzölés teljes időtartamán nagyobb értékeket mutatott, mint az egyedül gőzölt nyár minták sárga színezete. Úgy tűnik, hogy a robinetin a gőz segítségével át tud jutni az akác faanyagból a nyár faanyagba. Ezt a feltételezést támasztják alá azok a korábbi akácgőzölési tapasztalatok, hogy gőzöléskor a gőz kihozza a robinetint a faanyagból, és a sárga robinetin lerakódik a faanyag felszínére és a gőzölő kamra oldalfalára.



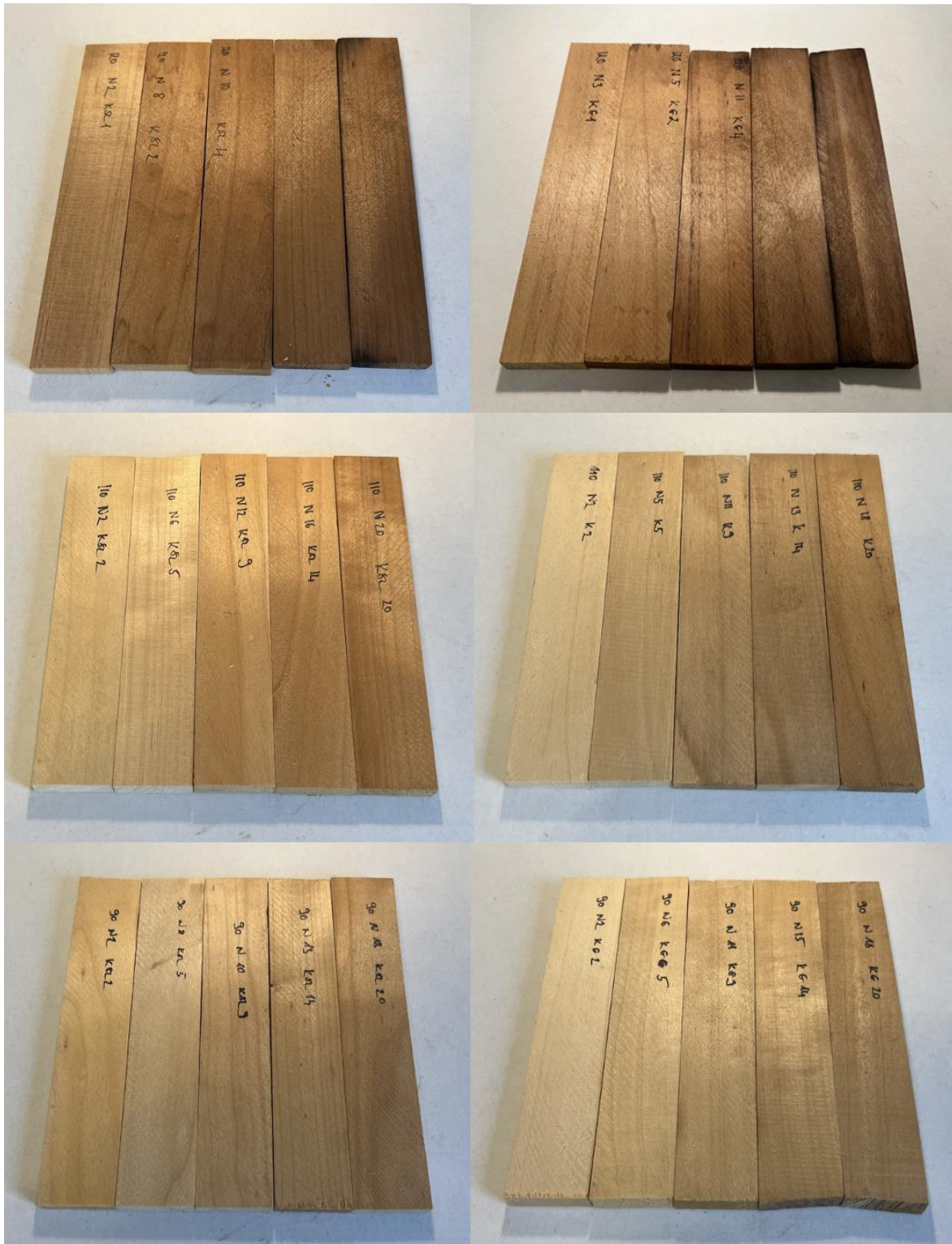
25. ábra: A 100°C-on akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) minták sárgea színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; V=vízbe helyezett)

A színkoordináták tekintetében elmondható, hogy a színkoordináták görbéi 100°C-os hőmérsékleten még nem minden esetben mutatnak telítődést. Úgy véltük - illetve korábbi tanulmányokra hivatkozva (Tolvaj et al. 2010) - valószínűleg kimutatható lesz, hogy magasabb hőmérsékleten hol telítődnek az értékek. A nyár faanyag gőzölés, valamint az együtt gőzölés törvényszerűségeinek a feltárása érdekében szükséges volt az itt bemutatott kísérleteket 100°C feletti és alatti hőmérsékleteken is elvégezni.

A vízben lévő segédanyagok nem mutattak szemmel érzékelhető szignifikáns hatást, ezért a továbbiakban ezeket a vizsgálatokat nem folytattuk. Az egy légtérben gőzölésre koncentráltunk, mert ennek kivitelezhetősége könnyen megoldható ipari környezetben is.

5.3 A nyár faanyag színének változása különböző hőmérsékleteken történt gőzölésnél.

Az előzetes kísérletek tanulságait levonva, a széria kísérleteket szisztematikusan végeztük el 90°C - 120°C-os tartományban. A vizuális vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a nyár színe a gőzölés következtében sötétedett és barnábbá vált, ahogy ez az előzetes kísérleteknél is megfigyelhető volt. A 26. ábra szemlélteti ahogy ez a színváltozás fokozható a hőmérséklet növelésével (az ábrán letről felfelé) és a gőzölési idő hosszabbításával (az ábrán balról jobbra).



26. ábra: Gőzölt nyár minták színváltozásai. Bal oldalon a geszt, jobb oldalon a szíjács változásai. Lentről felfelé nő a gőzölési hőmérséklet (90°C; 110°C; 120°C), balról jobbra pedig a gőzölési idő (2;5;9;14;20 nap. 120°C esetében: 1;2;4;6;9 nap)

Továbbá megfigyelhető a 27. ábrán, hogy a rajzolat markánsabbá és könnyebben észlelhetővé vált. Az ábra bal oldalán a kezeletlen mintákon nehezen észrevehető rajzolat, míg jobb oldalon, ugyanazon a mintákon gőzölés után a rajzolat jól láthatóvá vált.

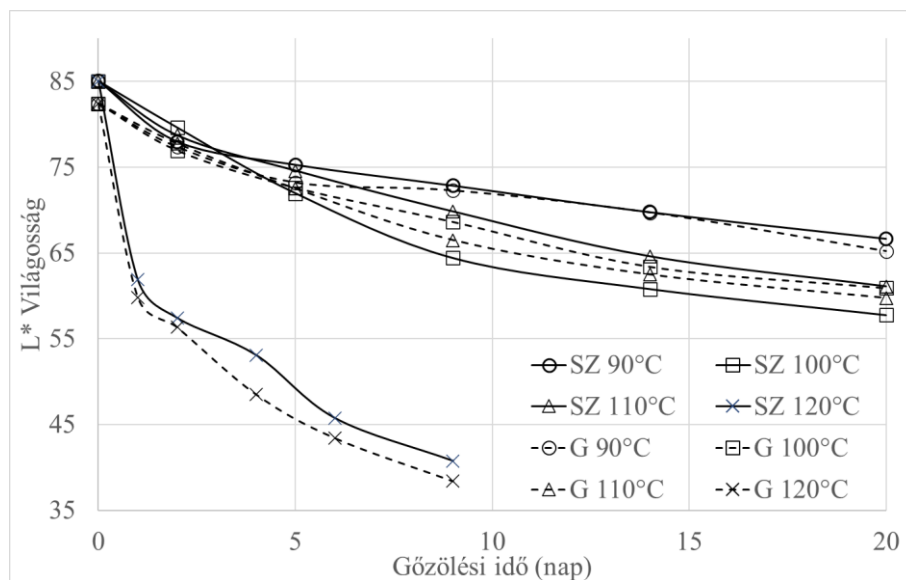


27. ábra: Bal oldalon kezeletlen minták, jobb oldalon ugyanazok a minták láthatók 90°C-os és 14 napos kezelés után

A vizuális vizsgálatok után a színmérés segítségével sokkal részletesebb információt kapunk a gőzöléssel kialakított színváltozásról, amit az egyes színkoordináták változásának bemutatásával adunk meg. Az ábrákon a szijács és a geszt értékei külön-külön követhetők.

A 28. ábrán a világosság csökkenését figyelhetjük meg a kezelés során, mindegyik beállított hőmérsékleten. Az L^* értéke jelentős mértékben csökkent az összes beállított hőmérsékleten. A kezeletlen minták esetében a geszt sötétebb volt szijácsnál 3 egységgel. A 100°C és 110°C-os gőzölés első 5 napjában a szijács és a geszt értékei közel maradtak egymáshoz, majd a kezelés hátralévő részében eltávolodtak egymástól. Hasonlót tapasztaltunk a 120°C-os gőzölésnél is, de a színváltozás sokkal intenzívebb volt, valamint a folyamat sokkal gyorsabban játszódott le, már a második nap után kezdtek távolodni az értékek egymástól. Az egyetlen kivétel a 90 °C volt, ahol a szijács és a geszt világossági értékei szinte egyformán változtak a gőzölési időszak alatt. A legnagyobb világosság csökkenés 44 egység volt, amit 9

napos 120°C-os gőzöléssel értünk el, ezt követte a 28 egységnyi csökkenés, 20 napos 100°C-os gőzöléssel. Az eredmények megerősítették azt a hipotézisünket, hogy a gőzölés a megfelelő módszer a nyárfa sötét színének előállítására. Megállapítottuk, hogy a 90-110°C -os tartományban a nyár faanyag világosságának változása nem függ a hőmérséklettől az első 5 napos gőzölés során. Három különböző folyamat generálta a világosság változását. Az extrakt anyagok és hemicellulózok bomlástermékei csökkentik a világosság értékét. A magas hőmérsékletű gőz kilúgozó hatása pedig növelik a világosság értékét. Ezek a folyamatok különböző módon hőmérsékletfüggőek. Ezért a görbék sorrendje szijács esetében nem követi a hőmérsékleti lépéseket, a geszt esetében viszont igen. A világosság azonban nem a megfelelő paraméter a folyamatban lévő kémiai változások nyomon követésére. A színkoordináták (a* és b*) sokkal nagyobb „kémiai érzékkel” bírnak, mint a világosság, bár ez utóbbi ipari szempontból fontos paraméter.

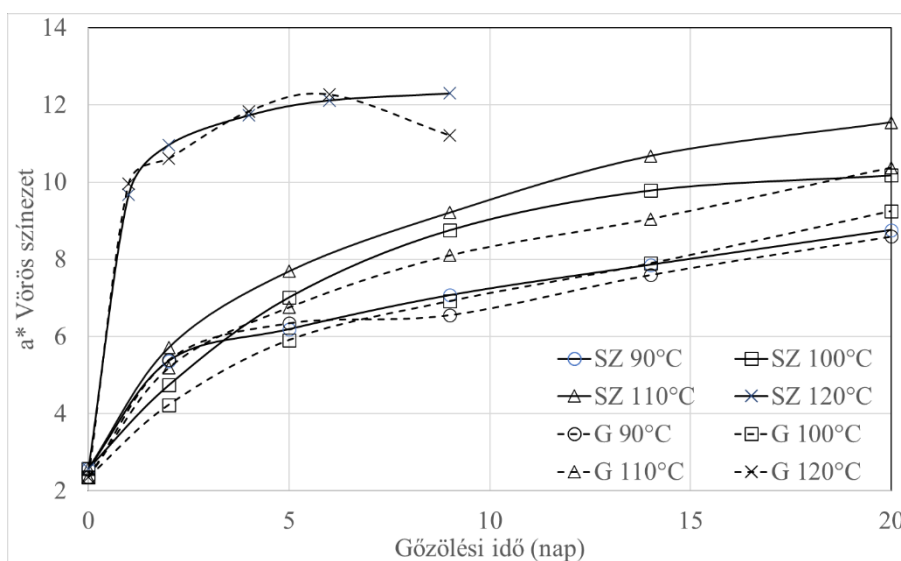


28. ábra: A világosság változása a gőzölési idő függvényében

A 29. ábra mutatja a vörös színezet (a*) változását a gőzölés hatására minden hőmérsékleti tartományban. Leginkább az extrakt anyagok járulnak hozzá a fa hőmérséklet-indukálta színváltozásaihoz különféle konjugált kettős kötések, karbonil-funkciós csoportok és kinoid szerkezetek kialakításával (Xin et al. 2017). A minták kezdeti vörös színezete alacsony volt, 2,36 és 2,58 geszt és szijács esetében. Ennek oka, hogy a nyár extrakt anyag tartalma alacsony. Ez azt jelenti, hogy nem az extrakt anyagok a fő indikátorai a vörös színezet növekedésének.

A 90°C, 100°C és 110°C-os kezelések esetén a vörös színezet értéke minden esetben folyamatosan nőtt a gőzölési idő előrehaladtával. Ez a növekedés intenzív volt a gőzölés első 5 napjában. A kezdeti értékekhez viszonyítva 2,5-3-szorosát emelkedtek ebben az időintervallumban, majd ezt a változást mérsékelt növekedés követte. A 120°C-os gőzölés esetében, ahol sokkal gyorsabban zajlottak le a változások, megfigyelhető volt, hogy a geszt és a szijács a* értéke már az első nap után a kezdeti érték 4-szeresére emelkedtek, ezután lassult a változás. A geszt vörös színezet értéke a hatodik napon elérte maximumát, majd csökkenést mutatott a gőzölés végéig.

Összehasonlítva a szakirodalomból ismert bükk faanyag a gőzölés első 2 napján 90°C feletti hőmérsékleten nagy mértékű növekedést mutatott a vörös színezet tekintetében. A maximum elérése után a vörös színezet értéke folyamatosan csökkent. Ennek az az oka, hogy az extrakt anyagok újonnan keletkező kromofor bomlástermékei nem elég stabilak. A magas hőmérsékletű gőz lebonthatja őket, ami a vörös színezet jelentős csökkenését okozza (Tolvaj et al. 2009, Csanády et al. 2015). Esetünkben a vörös színezet közel lineáris növekedése az 5. nap után egyértelműen mutatja, hogy a hemicellulózok bomlástermékei domináns szerepet játszanak a nyár gőzölés közbeni vörös színezet változásában.

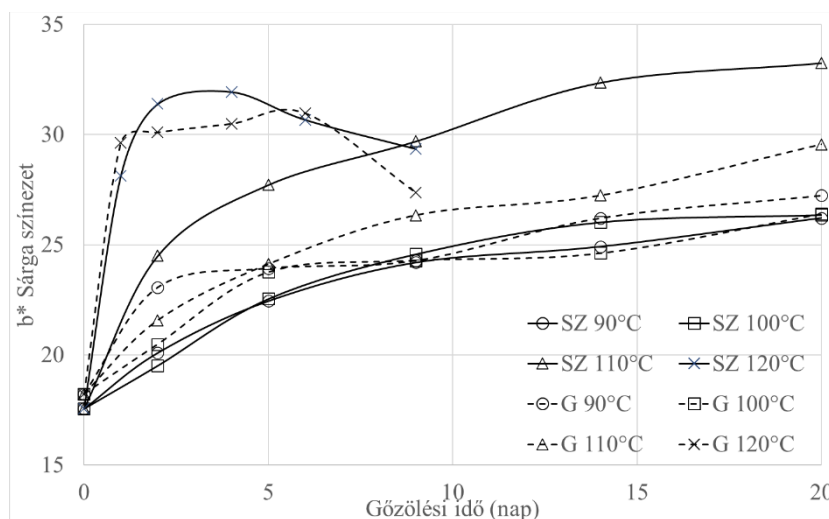


29. ábra: A vörös színezet változása a gőzölési idő függvényében

A 30. ábra a 90, 100, 110 és 120 °C-os gőzölés okozta sárga színezet változását mutatja. A sárga színkoordináta (b*) növekedése hasonló volt az a* érték növekedéséhez. A sárga színezet változása azonban kevésbé volt hőmérsékletfüggő, mint a vörös színezet változása. A minták hasonló viselkedést mutattak 90 és 100°C-os hőmérsékleten, a szijács és a geszt görbéi a gőzölési hőmérséklettől függetlenül közel kerültek egymáshoz. A 110°C-os kezelés az

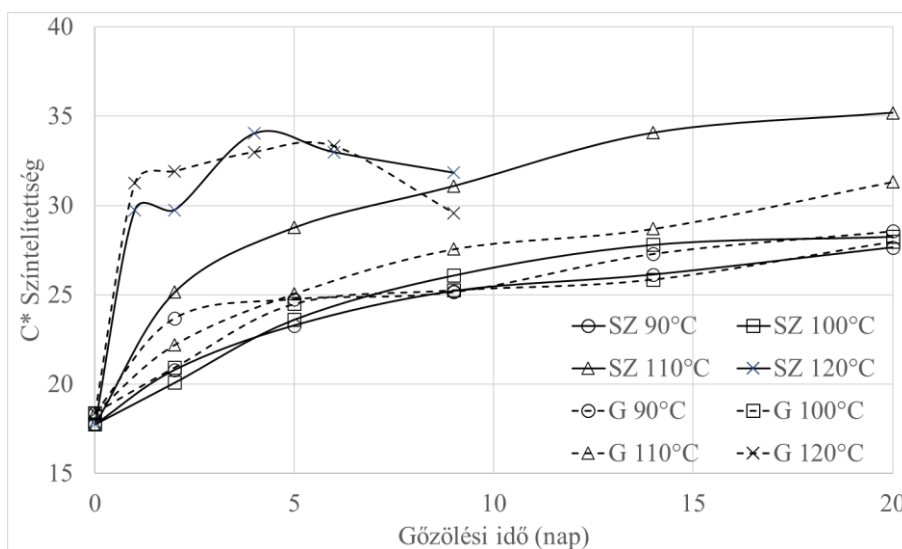
alkalmazott alacsonyabb hőmérsékletekhez képest a szijácsnál jelentős, a gesztnél kismértékű sárga színezet növekedést eredményezett. A legintenzívebb növekedés a gőzölés első 5 napjában következett be. A kezdeti b^* értékeknél 1,3-szor, illetve 1,57-szer magasabb értéket értünk el ebben az időszakban a geszt és a szijács esetében 110°C -on. Ezt a változást mérsékelt sárga színezet növekedés követte. A vörös színezethez hasonlóan, 120°C -on az első nap jelentős emelkedést hozott a sárga színezet tekintetében és ezidő alatt a szijács és geszt értékei közel maradtak egymáshoz. Ezután lassulás következett be, viszont a szijács értéke nagyobb mértékben növekedett, mint a geszté. Mind a szijács, mind a geszt értéke elérte a maximumot, az előbbi a negyedik az utóbbi a hatodik napon, ahol az értékeik ismét közeledtek egymáshoz. Ezután a kezelés végéig csökkenést mutatott a b^* színkoordináta, a gesztnél nagyobb mértékben.

A 120°C -on tapasztalható rendkívül nagy és intenzív színváltozást részben a hemicellulózok bomlástermékei okozták. Ez a hőmérséklet elég magas volt ahhoz, hogy módosítsa a hemicellulózok kémiai szerkezetét, ecetsavat képezve (Tjeerdsma és Militz 2005). A 20 napos gőzöléssel 110°C -on generálható legmagasabb sárga színezet érték 33,25 egység. Ez 1,9-szerese a kezdeti sárga színezet értéknek. Ezzel szemben a legmagasabb vörös színezet érték (12,3 egység) közel 5-ször nagyobb volt, mint a kezdeti érték. Eszerint a megközelítés szerint, százalékos értékben a vörös színváltozás a nagyobb. Azonban, ha a generált változás nagyságát vizsgáljuk a színkoordináták egységében kifejezve, akkor a vörös színezet 9,7 egységnyi növekedést okozott, ellenben a sárga színezet 15,7 egységnyi növekedést ért el. Így a sárga színezet növekedése jelentősebb, amit tovább fokoznak az eltérő kezdeti értékek. A 110°C -os gőzölés nagyobb sárga színezeti növekedést eredményezett a szijácsnál, mint a gesztnél, ami látható színkülönbséget eredményezett.



30. ábra: A sárga színezet változás a gőzölési idő függvényében

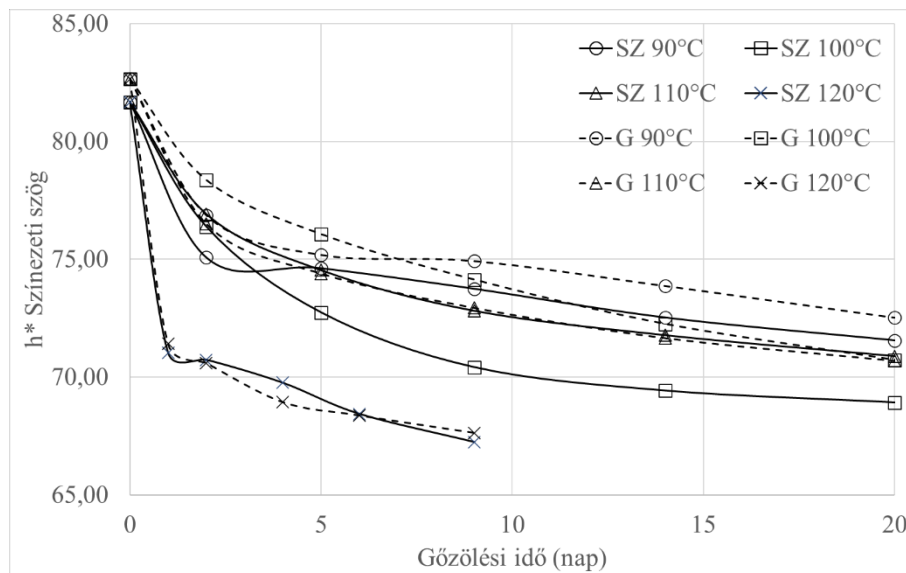
A színtelítettség fontos paraméter, ami a tárgy színének intenzitását jelenti. A telítettség növekedése azt mutatja, hogy a halvány és szürkés színárnyalat hogyan válik tisztává. A gőzölés minden vizsgált hőmérsékleten fokozza a nyár telítettségét (31. ábra). A telítettség növekedése hasonló volt a 90 és 110°C-on az alkalmazott kezelésnél. Ez alól kivételt képeznek a szíjács értékei 110°C-on. Ebben az esetben a gőzölt minták barna színe intenzívebbé vált, mint más esetekben. A legmagasabb telítettségi érték kétszer akkora, mint a kezdeti érték. A C* értéke 120°C-on intenzíven növekedett az első napon, majd kezelési időszak közepéig mérsékeltén növekedett, itt elérte a maximumát a geszt és a szíjács esetében is. Az előbbi a 4. napon az utóbbi a kezelés 5. napján. Ezután a kezelés végéig mérsékelt csökkenést mutatott minkét érték. Esztétikus szín elérésénél fontos követelmény, hogy a létrehozott szín a lehető legnagyobb mértékben telített legyen. A maximális színtelítettség elérése céljából a 110°C-os gőzölés javasolható, illetve 120°C-on maximum 4 napos gőzölési idő alkalmazása.



31. ábra: Színtelítettség (C*) változása a gőzölési idő függvényében

A színezetet a polárszög ábrázolja az a*-b* síkon a 11. ábrán. A nyár faanyag színezeti szögének gőzölés hatására bekövetkező változását a 32. ábra szemlélteti. A fa színe 50° (barna) és 90° (sárga) között helyezkedik el. Az európai fafajok inkább sárgák, mint vörösek. Ezen fafajok színárnyalatai 56° és 83° között vannak. A legmagasabb érték a világos fafajták (luc, nyár) és a természetes akác, legalacsonyabb érték pedig a gőzölt akácé (csokoládébarna). A 90-110°C-os kezelés során a nyár színezeti szöge a gőzölés első 5 napjában gyorsan csökkent, majd mérsékelt csökkenés következett be. A legmagasabb és legalacsonyabb szög közötti

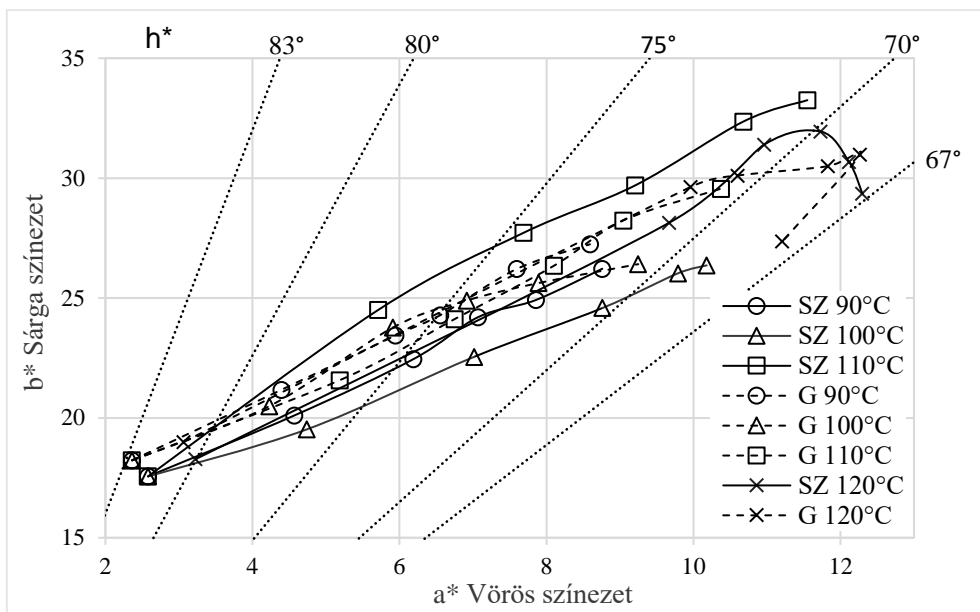
távolság $4,6^\circ$ volt 9 napos gőzölés után 90° és 100°C esetében. Ez a távolság egy kicsit csökkent (egy egység) a következő 11 napos gőzölés során. A 120°C -os kezelés során 2 nap alatt szinte egyforma intenzitással 70° -ra csökkent a szíjács és a geszt színezeti szögének értéke. A gőzölés hátralévő részében mérsékelten tovább csökkent ez az érték. A 70° körüli színezeti szög kellemes világosbarna színt képvisel.



32. ábra: Színezeti szög (h^*) változása az idő függvényében

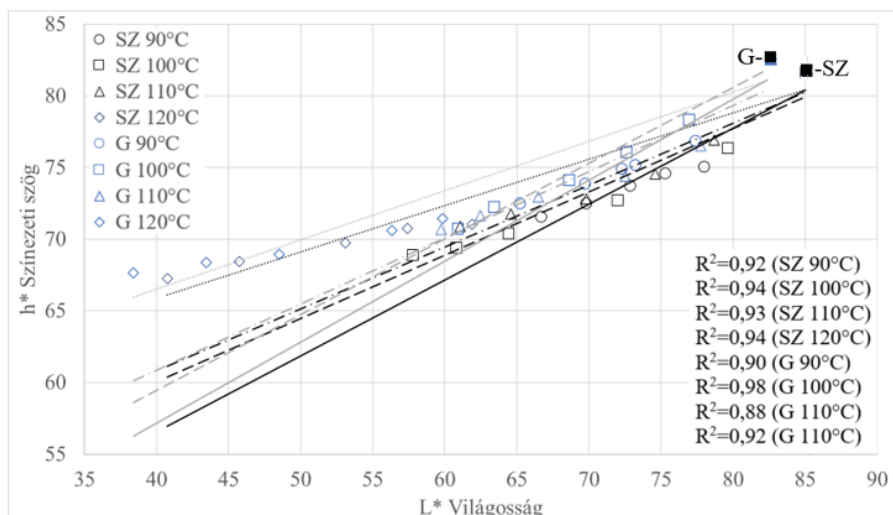
A teljes színezetváltozást (a^* és b^* koordináták változása) és a színtelítettség változását egyazon ábrán szemléltethetjük, ha a gőzölés által létrehozott színpontokat az a^* - b^* színsíkon ábrázoljuk (33. ábra). Az ábra jól mutatja, hogy a gőzölés által képzett trendvonalak egyenesek (a 120°C -os vonalak végét kivéve). Ez a tendencia arra utal, hogy a színezet változását döntő mértékben egy kémiai folyamat generálja. Ez a folyamat pedig a hemicellulózok degradációja. Az extrahálható anyagok a folyamat elején mutatnak gyors színváltozást, mert erősen érzékenyek a hidrotermikus kezelésre (Csanády et al. 2015).

Az ábrán jól látszik a színezeti szög csökkenése a gőzölés során, ahogyan a kis telítettségű szürkésfehér árnyalat halad egy lényegesen nagyobb telítettségű barna árnyalat felé. (A telítettség mértékét az ábrán az adott színpontnak a koordináta rendszer origójától mért távolsága adja meg.)



33. ábra: A színpontok vándorlása az a^* - b^* síkon a gőzölés során. (Az ábra az azonos színezeti szöghöz tartozó egyeneseket is mutatja pontozott vonalakkal. Az ábra bal alsó sarkában található a gőzöletlen minták színpontjai, és ezeket követik a gőzölt állapotok színpontjai növekvő gőzölési idővel.)

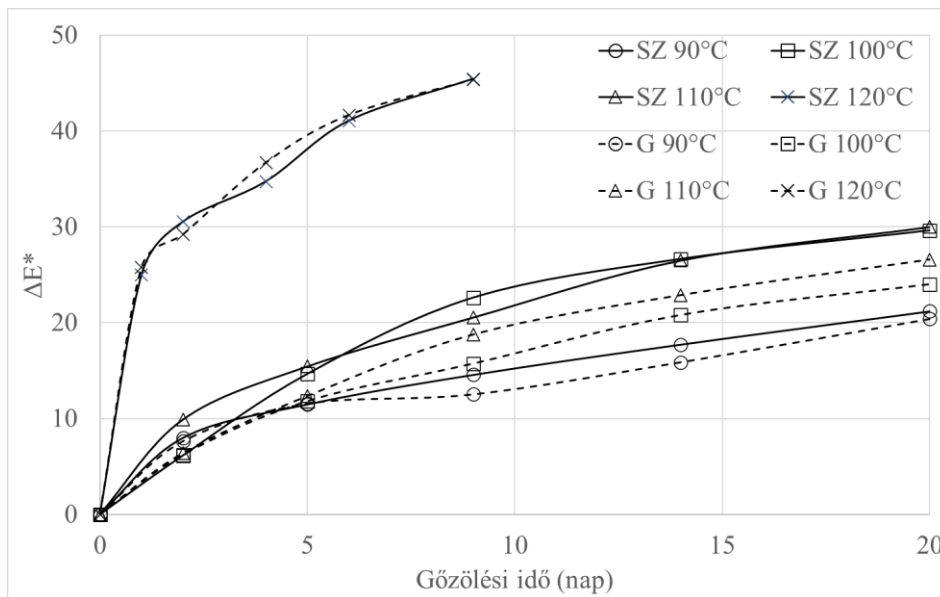
Korábbi vizsgálatok lineáris korrelációt igazoltak a gőzölt akác világossága és színárnyalata között (Tolvaj és Németh 2008), valamint túlevelűek gőzölése során (Tolvaj et al. 2012). Továbbá Tolvaj és Mitsui (2010) hasonló összefüggésekről számoltak be, amikor a fotodegradáció elszíneződési hatásait vizsgálták. A kutatás során ezt a jelenséget is vizsgáltuk, és szoros lineáris korrelációt találtunk a színezet (h^*) és a világosság (L^*) között, függetlenül a kezelési hőmérséklettől a geszt és a szijács esetében. A 34. ábra a világosság és a színezet szögének tipikus regressziós elemzését mutatja. Az ábrán a teli szimbólumok a kezdeti színezetet és világosságot képviselik. Az üres szimbólumok a gőzölt mintákhoz tartoznak a jobbról balra növekvő kezelési idő függvényében. A determinációs együtthatók (R^2) magas értéke 0,88 és 0,98 között jó korrelációt mutat a világosság és a színezet értékek között. A 100°C-os gőzölés hozta létre a legjobb korrelációt mind a szijács, mind a geszt esetében.



34. ábra: Korreláció a világosság (L^*) és a színezeti szög (h^*) között az idő függvényében

A teljes színváltozást (ΔE^*) mutatja be a 35. ábra. A viszonyítás alapja minden esetben a kiinduló (kezeletlen minták) színkoordináták voltak. Ezt vettük az egyik színpontnak és ehhez hasonlítottuk a gőzölési idő elteltével mért új színkoordinátákat, majd ezekből számítottuk a teljes színváltozást. A hőmérséklet és az idő növelésével egyre nagyobb ΔE^* -ot számítottunk a kezeletlen mintákhoz képest az összes kezelési hőmérsékleten. 100°C -os, két napos kezeléssel 6 egységnyi változást értük el mind a geszt, mind a szijács esetében. A szakirodalom szerint 6 egységnél nagyobb ΔE^* a szabad szemmel is nagyon jól látható kategóriába tartozik. Az összes többi érték legalább 10 egységnyi felett volt, tehát minden alkalommal szemmel jól látható színváltozást generáltunk. A legnagyobb értéket a 120°C -os 9 napos kezelés mutatta, 45 egységnyi értékkel a szijács és a geszt esetében is. Továbbá látható az ábrán, hogy az előző gőzölési állapothoz képest is mindig előfordult növekedés. Ezeknek a mértéke is a szemmel jól látható tartományban maradt. A szijács színváltozása a teljes kezelési idő alatt nagyobb vagy megegyező volt a geszténél 90 °C, 100°C és 110°C -on, viszont 120°C -on, közel a teljes gőzölési idő alatt a geszt mutatta a nagyobb színváltozást.

Esetünkben a teljes színváltozás, a jelentős világosság csökkenés miatt nem ad többlet információt, mivel a ΔE^* számításánál az L^* dominál. Ez azt eredményezi, hogy nem mutatja ki a kisebb számértékű, viszont a szemünk számára jelentősen érezhető vörös színezet változását, valamint a rajzolat általi hatásokat.



35. ábra: ΔE^* változása az idő függvényében

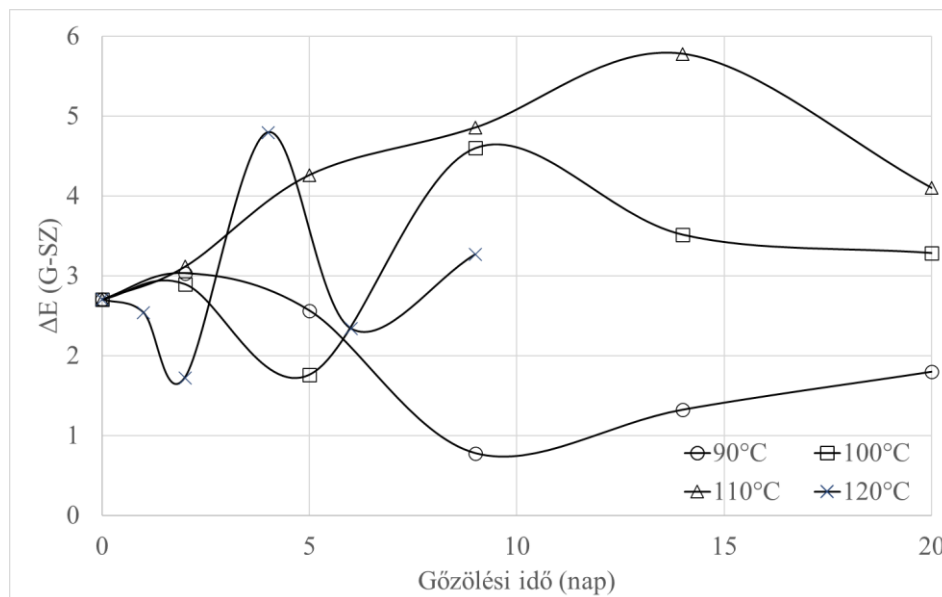
Az ipar számára viszont fontos információ a geszt és a szijács színbeli eltérése, ami gőzöléssel homogenizálható. Itt a ΔE irányadó lehet, figyelembe véve azt a tényt, hogy a fa rajzolata befolyásolhatja a szemünk számára az eredményt. A 36. ábra geszt és a szijács egymáshoz viszonyított teljes színváltozását mutatja meg az idő függvényében. Tehát az ábráról leolvasható, hogy az adott kezelési hőmérsékleten melyik napon vannak legközelebb egymáshoz a geszt és a szijács színkoordinátái, vagyis azok az értékek, ahol minimális a szemünk által érzékelhető különbség. Ezt tekintjük az adott hőmérsékletre tartozó optimális gőzölési idő a homogenizálódás szempontjából. Ez alapján 90°C esetében 9. napon legkisebb a ΔE , ami az egyetlen 1 egység alatti érték (0,78) valamint az összes kezelési hőmérsékleten megállapított minimum érték. Ez az érték már nagyon közel van a szemmel nem érzékelhető kategóriához. A 100°C-os gőzölés esetében az 5. napon vannak egymáshoz legközelebb a geszt és a szijács értékei (1,76). Az előkísérletek során, ami szintén 100°C-os kezeléssel járt, ugyanezt az eredményt kaptuk, miszerint a színpontok az 5. napon voltak egymáshoz a legközelebb, ami igazolja az előkísérleteknél megállapított homogenizálódási állapotot, valamint azt is, hogy ezután inhomogenizálódik a faanyag. A 110°C-os a kezelés hatására nem csökken a ΔE , nincs jobb érték a kiinduló állapothoz. Ennek oka, hogy 110°C-os gőzölés során a sárga színezet szijácsra gyakorolt hatása jóval nagyobb, mint a gesztre gyakorolt hatása, ami itt is igazolódik. Az is leolvasható az ábráról, hogy ezen a hőmérsékleten kaptuk a legnagyobb eltérést, ami a 14 napon állt fenn 5,78 értékkel. Ezek alapján ezt a hőmérsékletet nem javaslom

gőzölési beállításnak, ha homogenizálás a cél. A 120°C-os gőzölés során a 2. napon kapjuk a legkisebb ΔE értéket, ami 1,72. Ezután nő a távolság a geszt és a szijács színkoordinátái között.

Összefoglalva a homogenizálódás szempontjából optimális kezelési idők a következők:

- 90°C-on 9 nap (amennyiben energetikailag és az idő szempontjából megengedhető)
- 100°C-on 5 nap
- 110°C-on nem javasolt
- 120°C-on 2 nap

A 100°C-os 5 napos gőzölés és a 120°C-os kétnapos kezelés nagyon hasonló ΔE értéket mutat a szijács és a geszt színkoordinátáit vizsgálva. Ezek az értékek a szemmel alig érzékelhető kategóriába tartoznak (Tolvaj 2013). Természetesen a 120°C-os kezelés 2 nap alatt sokkal sötétebb színt eredményez.



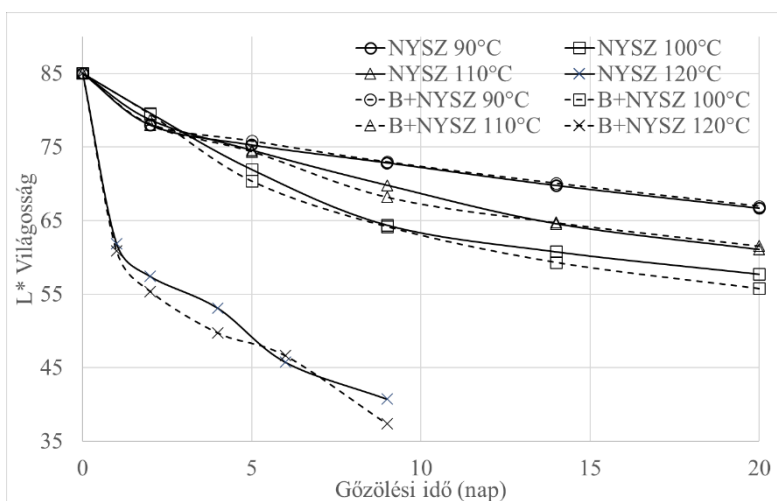
36. ábra: A geszt (G) és a szijács (SZ) egymáshoz viszonyított teljes színváltozása az idő függvényében

5.4 Akác és a bükk segédanyag jelenlétének hatása a nyár faanyag színre 90-120°C-os gőzölésnél

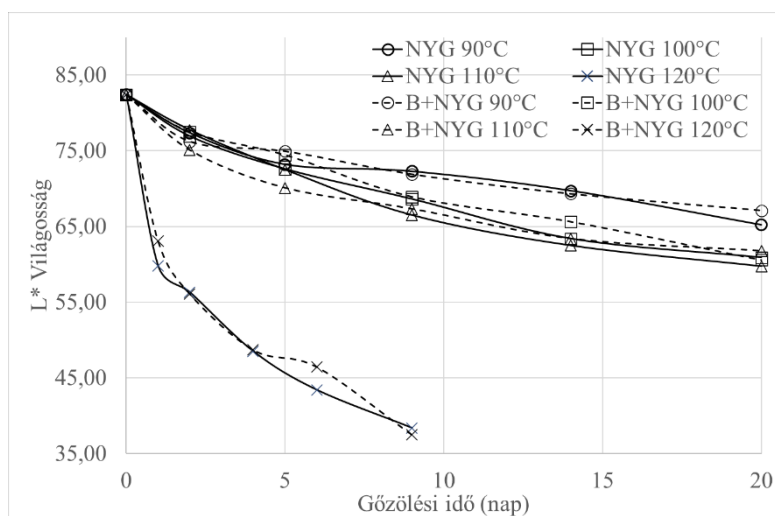
Az előző fejezetben a megfigyelés azt mutatta, hogy a nyárfa színe a gőzölési hőmérséklet és a gőzölési idő növekedésével egyre intenzívebben a barna szín felé tolódik el. Ebben a fejezetben a segédanyaggal együtt gőzölés eredményeit mutatjuk be, hogy milyen hatást gyakorol a nyárfa színére, ha vele egy gőztérben másik anyag is jelen van. Az

eredményeket a szijácsra és a gesztre külön, segédanyagként mutatjuk be, annak érdekében, hogy átláthatóak legyenek az ábrák. Általánosságban elmondható, hogy az indikátorok (akác vagy bükk) jelenléte 100°C felett erősítették a színváltozást.

A nyár világosságának változását mutatja be bükk segédanyaggal együtt gőzölve a 37. és 38. ábra, valamint akác segédanyaggal együtt gőzölve a 39. és 40. ábra. A minták a gőzölési idő előrehaladásával folyamatosan sötétedtek. A bükk, mint segédanyag a nyárfára mind a szijács, mind a geszt esetében 110°C-ig szinte semmilyen hatással nincs, 120°C -on enyhén módosítja a világossági paramétereket.

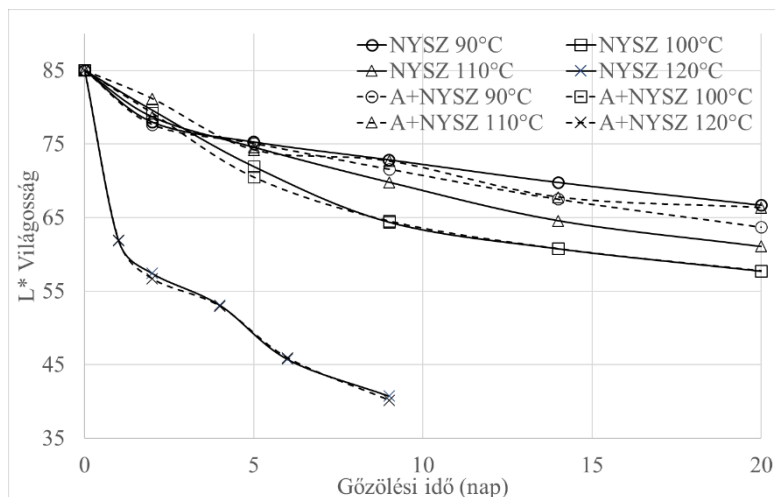


37. ábra: A bükkel (B) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében

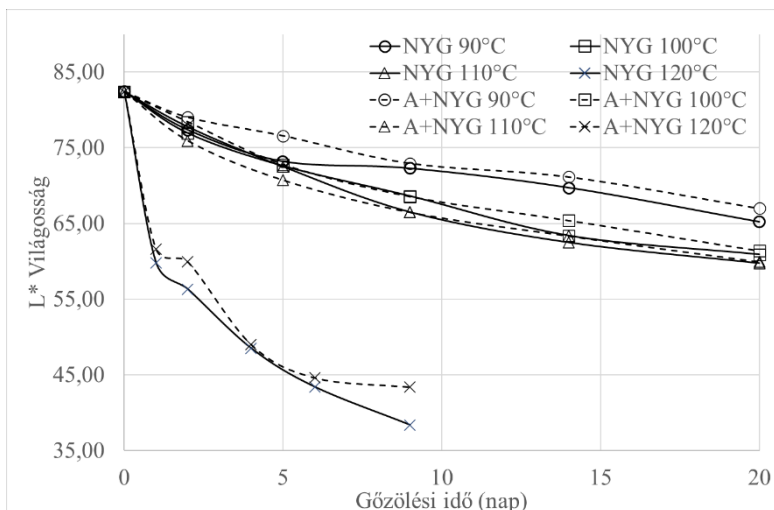


38. ábra: A bükkel (B) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében

Az akác, mint indikátor hasonlóan viselkedett, mint a bükk, ennél fogva nem változtatta meg a nyár világosságának változását. Egyedül a geszt (39. ábra) esetében látható némi eltérés az egyedül gőzölt nyárhoz képest. Megállapítottuk, hogy az egy légtérben gőzölt bükk és az akác segédanyagok nincsenek hatással a nyár faanyag világosság változására.



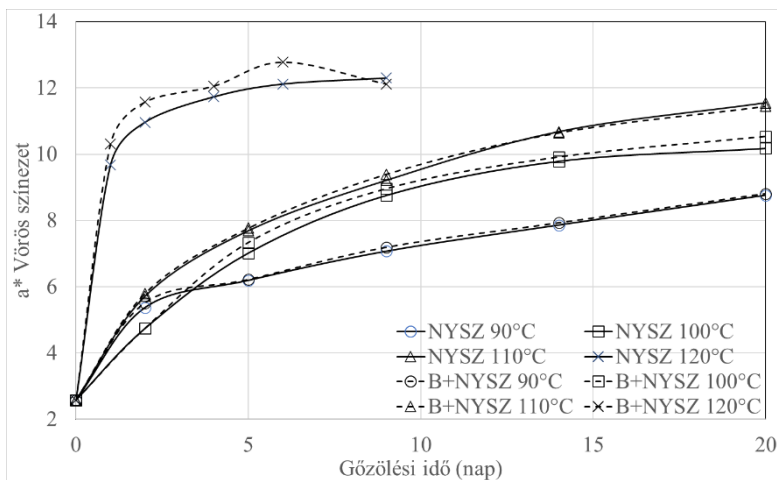
39. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében



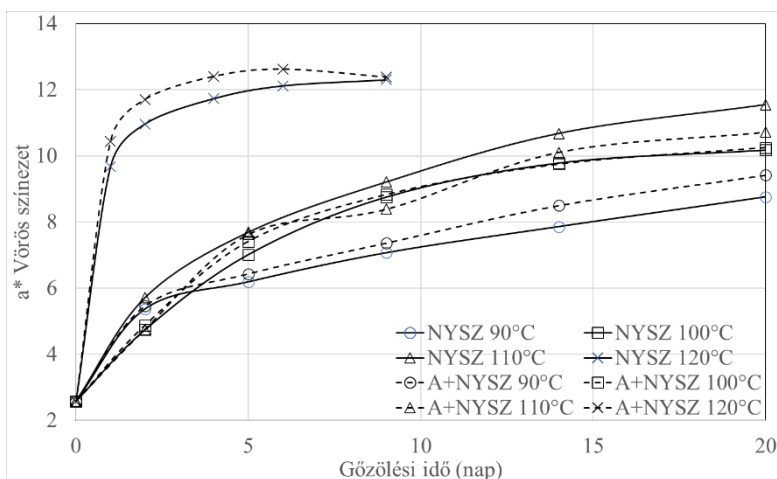
40. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében

A nyárfa vörös színváltozását a 41-44. ábra mutatja. A vörös színkoordináta értéke az eltelt gőzölési idővel és a hőmérséklet emelkedésével nőtt. Az indikátorok hatása csak 120°C-

on volt látható szíjács esetében (41-42. ábra). Mindkét indikátor jelenléte enyhe vörös színezet növekedést okozott a nyár szíjácsnál az önmagában gőzölt nyárral összehasonlítva.



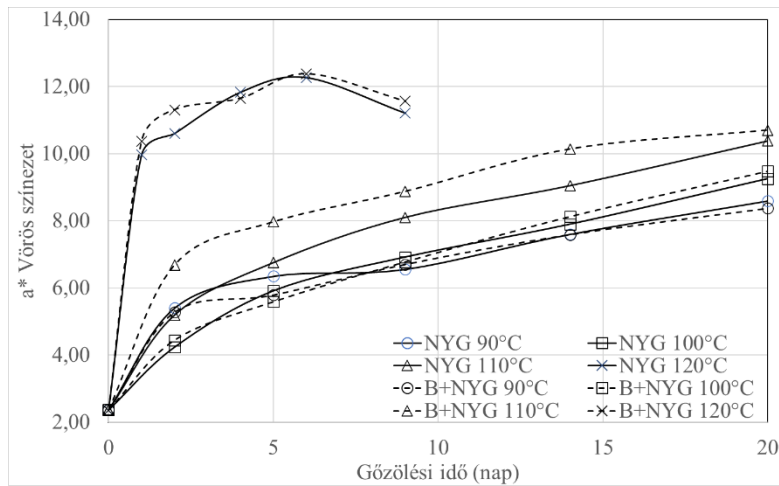
41. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) szíjács (SZ) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében



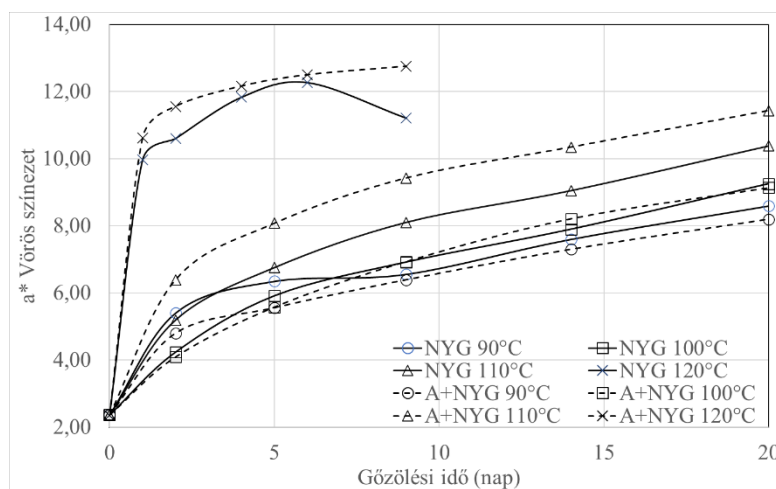
42. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) szíjács (SZ) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében

A vörös színezetre 100°C felett volt hatása a segédanyagoknak a nyár geszt esetében (43-44. ábra). Az akác jelenléte nagyobb vörös színezet változást okozott, mint a bükk jelenléte, ami az akác magasabb extraktanyag tartalmával magyarázható. Ez a jelenség a 110°C-os gőzölésnél jól látható geszt esetében. A 120°C-s gőzölésnél az első két napon jelentkezik az együtt gőzölés hatása, amit később leront a gőz kimosó hatása. Ez a megállapítás a gesztre és a

szijácsra egyaránt érvényes. Az eredmények azt mutatják, hogy 120°C-on az optimális gőzlési idő 2 nap. Eddig az időpontig még alig jelentkeznek a gőz kimosó hatása.



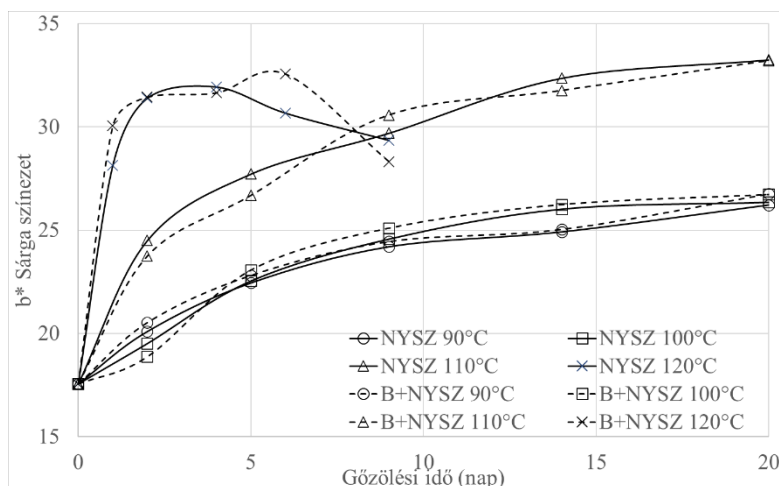
43. ábra: A bükkkel (B) együtt gőzlött nyár (NY) geszt (G) minták vörös színezetének változása a gőzlési idő függvényében



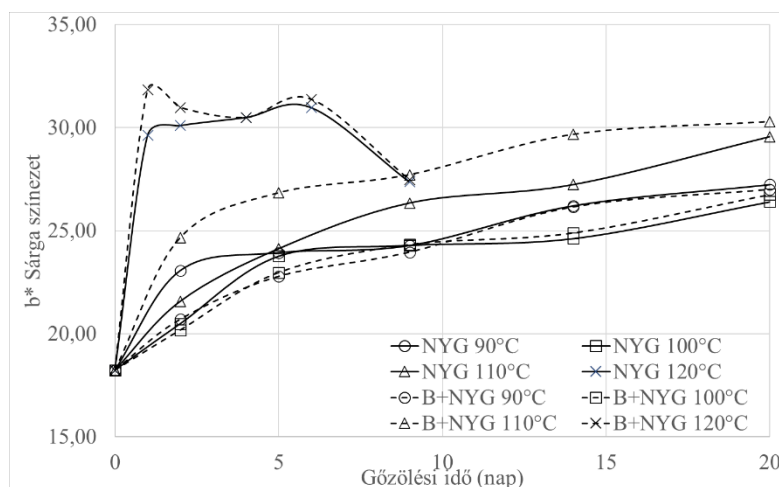
44. ábra: Akáccal (A) együtt gőzlött nyár (NY) geszt (G) minták vörös színezetének változása a gőzlési idő függvényében

A nyár sárga színezet értéke a hőmérséklet emelkedésével nőtt (45-48. ábra) a szijács és a geszt esetében. A b^* változásának viselkedése hasonló volt a vörös színezet viselkedéséhez a segédanyagok összefüggésében. A bükk segédanyagának 100°C felett van enyhe hatása a nyár

szijácsra (45. ábra) és jelentősebb hatása a nyár gesztre (46. ábra). A legnagyobb eltérést a 110°C -os kezelés hatására értük el.

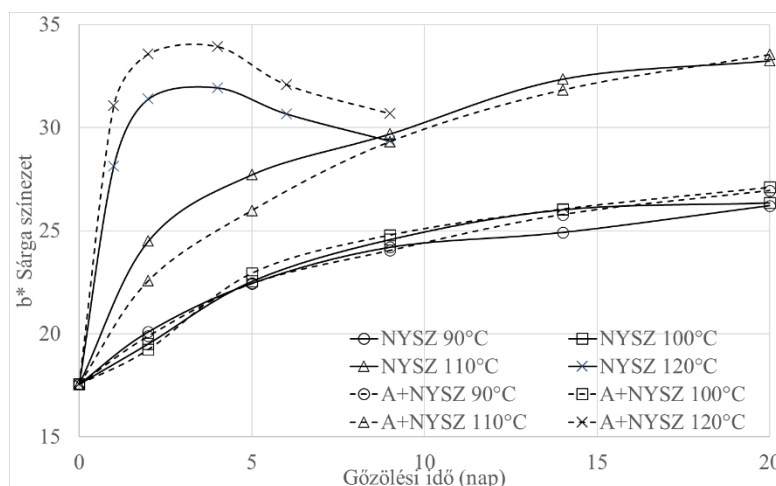


45. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták sárge színzetének változása a gőzölési idő függvényében

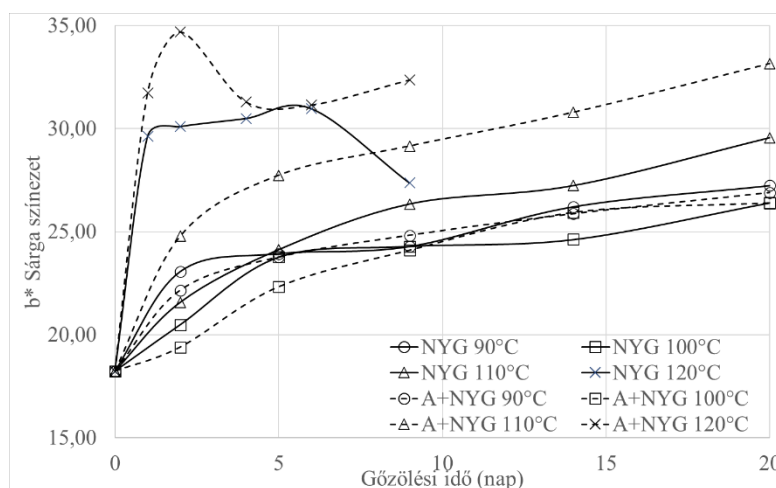


46. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták sárge színzetének változása a gőzölési idő függvényében

Az akác jelenléte (47-48. ábra) nagyobb hatást gyakorolt a sárge színzetre, mint a bükk jelenléte. Az akác szijácsra gyakorolt hatása 120°C-on érzékelhető, amit a 47. ábrán láthatunk. Az akác a nyár gesztre 100°C alatt enyhe változást 100°C felett viszont jelentős változást idézett elő, amit a 48. ábra szemléltet. Az akác jelenléte a nyár faanyag gőzölésénél a sárge színzetben okozta a legnagyobb eltérést. Ez az eltérés geszt esetében 110°C-on 4 egység, míg 120°C-on közel 5 egység. A jelenség az akác faanyag magas robinetin tartalmával magyarázható.



47. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (Sz) minták sárge színének változása a gőzölési idő függvényében



48. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták sárge színének változása a gőzölési idő függvényében

Összességében megállapíthatjuk, hogy a segéd faanyagok színváltozást segítő hatása 110 és 120°C-on jelentkezik. Ez azt jelent, hogy a gőzmolekulák mozgása ezeken a hőmérsékleteken (illetve még magasabb hőmérsékleteken) képes az extrakt anyagok átvitelére a nyár faanyagba.

A vörös és a sárge szín 120°C-on mért csökkenése azt mutatta, hogy az újonnan létrehozott kromofor molekulák nem elég stabilak. Ez a hőmérséklet elég magas ahhoz, hogy másodlagos degradációt okozzon, ami csökkenti mind a vörös, mind a sárge szín értékét is. Ezért nem

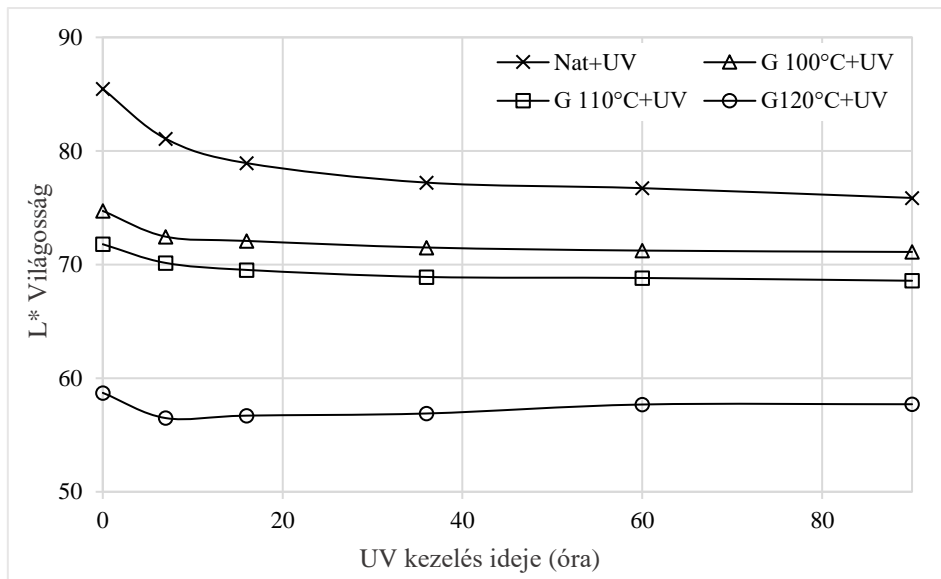
érdeemes a nyár faanyagot 120°C-on 2 napnál tovább gőzölni. A szijács és a geszt indikátorainak hatékonyságbeli különbsége e szövetek kismértékű eltérő kémiai természetével értelmezhető. A geszt stabilabb módon képes megkötni a kivonható molekulákat, mint a szijács. Ezért a geszt általában sötétebb, mint a szijács. A geszt ezen jellege miatt a gőzmozgással szállított indikátorok extraktumait stabilan tudta összekapcsolni a nyár geszttel. A bükk kevésbé volt hatékony indikátor, mint az akác. Ez azt jelenti, hogy az akác gőzzel extrahálható molekulái jobban köthetők nyárfához, mint a bükk hasonló molekulái.

A nyár geszt akác jelenléte által okozott sárga színezet növekedése stabilabb volt a másodlagos degradációval szemben, mint a bükk által okozott sárga színezet. Ezt a különbséget a sárga robinetin jelenléte hozta létre, amely a bükkfában nem fordul elő. A gőzzel történő extrakciós szállítás pontos kémiai természete további kémiai vizsgálatokat igényel.

5.5 UV besugárzás hatása a gőzölt nyár faanyagra

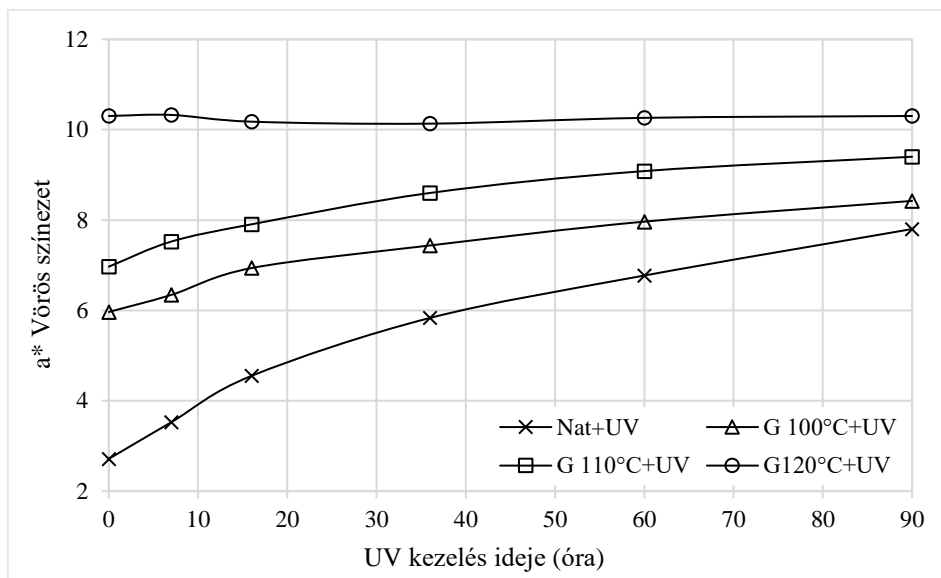
A gőzölés kellemes barnás színárnyalatokat hoz létre a nyár faanyagon. Fontos megvizsgálni, hogy mennyire tartós ez az új szín. Faanyag esetében a leggyakrabban előforduló színkárosító hatás az ultraibolya (UV) sugárzás. A vizsgálatokhoz öt napig, megszakítás nélkül, 100, 110 és 120°C fokon gőzölt nyár faanyagot használtunk. Az UV sugárzást higanygőz lámpa biztosította, mely döntő mértékben (80%) UV fényt bocsát ki. A kezelés színváltoztató hatását 7, 16, 36, 60 és 90 órás besugárzás után mértük meg.

A 49. ábra a világosság időbeli változását szemlélteti. A kezdőpontok (0 idő) a gőzölés hatására létrejött világosságokat mutatják annak megfelelően, hogy az emelkedő gőzölési hőmérséklet egyre sötétebb faanyagot eredményezett. Az 5 napig tartó gőzölés 120°C-on 31%-os világosság csökkenést produkált. Jól látható, hogy a gőzölt faanyagok kisebb világosság csökkenést (sötétedést) szenvedtek el, mint a natúr faanyag. A besugárzás első 7 órájában intenzívebb világosság csökkenést mértünk az összes faanyagnál, mint a kezelés további részében. A gőzölt faanyagoknál a második szakasz alig mutatott világosság csökkenést. A 120°C-on gőzölt mintáknál kismértékű világosság növekedés volt megfigyelhető a kezdeti csökkenés után. Az eredmények azt mutatják, hogy a gőzölt faanyagok kisebb mértékű sötétedést szenvedtek el az UV kezelés során, mint a natúr faanyag.



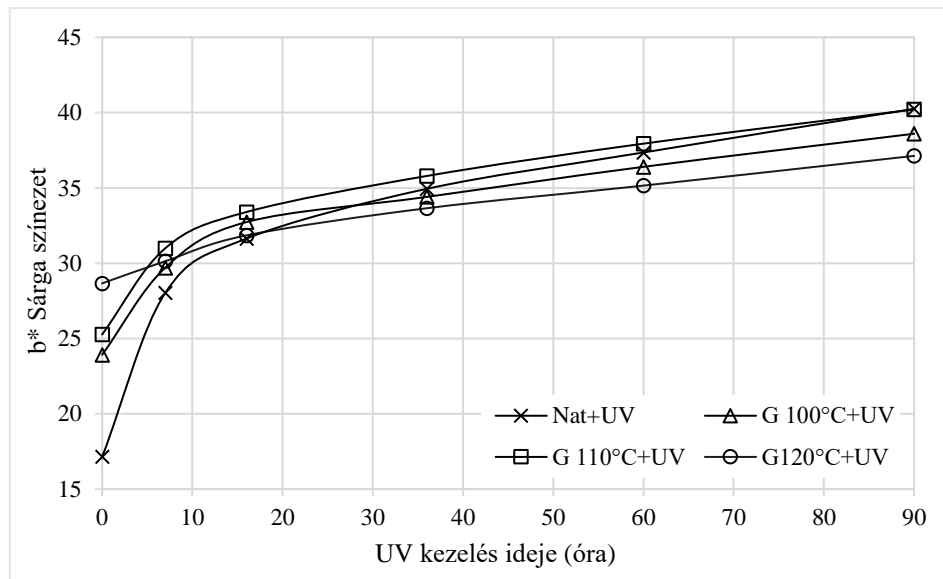
49. ábra: Natúr és gőzölt nyár faanyag világosságának változása UV besugárzás hatására

A vörös színezet változását a 50. ábra szemlélteti. A gőzölés nagyon erős vörös színezet növekedést produkált. Ezt a növekedést a függőleges tengelyen lévő színpontok demonstrálják. A natúr faanyag vörös színezetéhez képest a 100°C-on gőzölt faanyag 2,2-szeres, a 110°C-on gőzölt 2,6-szeres és a 120°C-on gőzölt 3,8-szeres vörös színezet növekedést mutatott. Az UV besugárzás ezeket a nagy eltéréseket csökkentette. A 120°C-on gőzölt minták nem változtatták a vörös színezetüket az UV kezelés során. A többi trendvonal aszimptotikusan közeledett a 120°C-on gőzölt minták által kijelölt vízszintes egyeneshez. Ez azt vetíti előre, hogy a vörös színezetek értéke a maximálisan elérhető 10,3-es értékhez közeledik hosszú UV kezelés során. A fentiekből az következik, hogy a 120°C-on 5 napig tartó gőzölés során az összes olyan kémiai változás megtörtént, melyek a vörös színezet növekedését okozzák. Az alacsonyabb gőzölési hőmérsékleteknél ez a változás csak részben történt meg, így az UV besugárzásnak maradt lehetősége a vörös színezet értékének növelésére. Ha a színtartósság szempontjából vizsgáljuk a változásokat, akkor a 120°C-os gőzöléssel előállított vörös színezet stabil maradt az UV sugárzással szemben. De a többi hőmérsékleten gőzölt nyár faanyag is jobban ellenállt az UV besugárzásnak, mint a gőzöletlen faanyag.



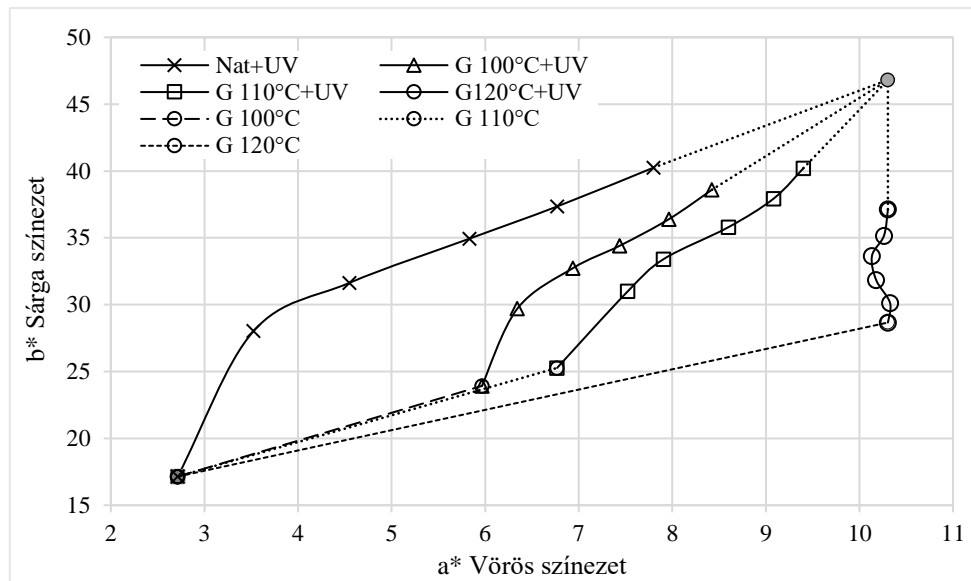
50. ábra: Natúr és gőzölt nyár faanyag vörös színezetének változása UV besugárzás hatására.

A 51. ábra a sárga színezet változását mutatja az UV besugárzás során. Itt a változások sokkal homogénebbek voltak, mint a vörös színezet esetében. Valamennyi vizsgált mintasorozat folyamatos sárga színezetnövekedést mutatott. A natúr faanyag mindegyik gőzölt faanyagnál intenzívebb sárga színezetnövekedést produkált. Itt is a 120°C-on gőzölt próbatestek mutatták a legnagyobb színstabilitást. Míg a natúr faanyag sárga színezete 2,3-szeresére növekedett addig a 120°C-on gőzölt faanyag sárga színezete csupán 1,3-szeresére emelkedett a 90 órás UV besugárzás hatására. A többi gőzölt minta színváltozása a fenti két érték között volt. A 120°C-on gőzölt minták mutatkoztak a legstabilabbnak a sárga színezet változása tekintetében, de nem olyan mértékben, mint a vörös színezet esetében. A sárga színezet értékének növekedését elsősorban a lignin UV degradációs termékei okozzák, de kis mértékben egyes extrakt anyagok is felelősek érte. Nagy valószínűséggel az 5 napos, 120°C-os gőzölés során megtörtént az extrakt anyagok termikus bomlása, így ezeknél a mintáknál a közel lineáris sárga színezet növekedést a lignin degradációs termékei produkálták. A jelenség pontos feltérképezéséhez kémiai vizsgálatok szükségesek. A színstabilitás tekintetében a natúr faanyaghoz képest csak a 120°C-on gőzölt minták mutattak számottevő ellenálló képesség növekedést az UV kezelés során.



51. ábra: Natúr és gőzölt nyár faanyag sárge színezetének változása UV besugárzás hatására

A 52. ábra a színpontok vándorlását mutatja gőzölés és UV sugárzás hatására az a^* - b^* síkon. A bal alsó sarokban található a natúr faanyag színpontja, melyet időrendben követnek a kezelések hatására létrejött színpontok. Az ábra jobb felső sarkában lévő szaggatott vonalak extrapolálás eredményei. A színpontoknak az origótól mért távolsága a színtelítettséget adja meg. Minél távolabb van egy színpont az origótól, annál telítettebb színt jellemez. Esetünkben a gőzölés és az UV sugárzás is távolította a színpontokat az origótól jelezve, hogy mindkét kezelés növelte a színtelítettséget. A gőzölés, az alkalmazott hőmérséklettől függetlenül, azonos irányban módosította a színpontok helyzetét. Ez azt jelenti, hogy a színezeti szög nem változott a gőzölés során. A hőmérséklet növelése a minták színtelítettségének növekedését eredményezte. Az UV sugárzás viszont egyértelműen a sárge színezet irányába tolta el a színpontokat, növelve a színezeti szöget. Az UV kezelés kezdetekor jelentős különbségek voltak az egyes minták (gőzöltlen és gőzölt) sárge színezetének értékében. Ezek az értékek a gőzölési hőmérséklet növelésével egyre nagyobbak voltak. Az UV kezelés végén viszont a színpontok közel azonos szinten helyezkedtek el. Ez azt jelenti, hogy a gőzölt mintáknál a lignin degradációja egyre kisebb mértékű volt a gőzölési hőmérséklet emelkedésével.



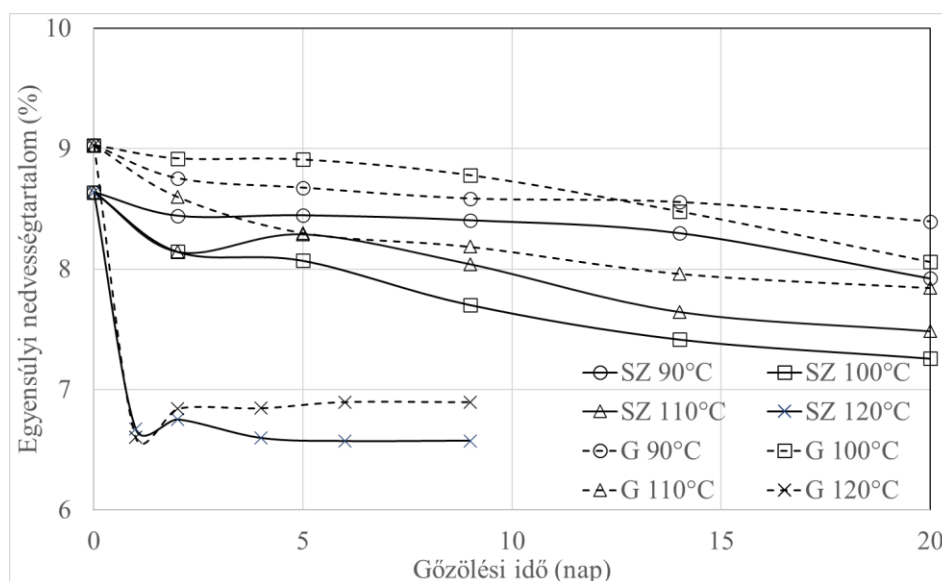
52. ábra: A színpontok vándorlása az a^* - b^* síkon 5 napos gőzölés és 7, 16, 36, 60 és 90 órás UV besugárzás hatására. (A bal alsó sarokban található a natúr faanyag színpontja, melyet időrendben követnek a kezelésekre létrejött színpontok. A jobb felső sarokban lévő pontot a függvényvonalak meghosszabbítása jelölte ki.)

Az UV kezelés hatását mutató görbék lefutása azt vetíti előre, hogy a trendvonalak egy közös pont felé tartanak az a^* - b^* síkon. A gőzöletlen minták utolsó négy pontja egy egyenesen helyezkedik el. A 120°C-on gőzölt minták viszont nem szenvedtek számottevő vörös színváltozást az UV kezelés során, ezért egy függőleges egyenest határoznak meg. (A kis eltérések a próbatesteken random módon kiválasztott mérési pontok színeltéréséből származnak.) Ezen két egyenes metszéspontja határozza meg a közös pontot. Jól látható, hogy a másik két trendvonal is ehhez a közös ponthoz tart. Ez azt jelenti, hogy a gőzölés és az UV kezelés együtt ugyanazt a színváltozást eredményezi, függetlenül a gőzölési hőmérséklettől. Tehát a két folyamatban ugyanazok a kromofor kémiai csoportok vesznek részt. A vörös irányú színeltolásban az extrakt anyagok és a hemicellulózok degradációs termékei vesznek részt. A sárga irányú színeltolódást viszont elsősorban a lignin fotodegradációja okozza, de részt vesznek benne az extrakt anyagok is. Az ábra azt mutatja, hogy azokat a degradációs lehetőségeket, melyeket a gőzölés meghagyott az UV sugárzás előbb-utóbb elvégzi. Az 5 napos 120°C-os gőzölés degradálta az összes olyan molekulát melyeknek módosulása a vörös irányú színeltolódást okozza. Ezért az UV sugárzásnak csak a lignin degradációja maradt. (Meg kell jegyezni, hogy a lignin molekulák kellően stabilak a termikus degradációval szemben. A 120°C-os gőzölés nem okoz lignin-degradációt.)

5.6 A gőzölés hatása a nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalmára

Az előző fejezetben megvizsgáltuk, hogy a gőzölés által elért szín mennyire maradandó. A továbbiakban fontosnak tartottuk megvizsgálni, hogy a kezelések hatására milyen egyensúlyi fanedvességre állnak be a kezelt minták, mert ez a tényező fontos a tartósság és az ellenállóképesség szempontjából. Ehhez a vizsgálatához a gőzölt mintákat szobahőmérsékleten tároltuk 3 éven keresztül és ezután végeztük el a méréseket.

Az 53. ábrán szembe tűnik, hogy az összes kezelés hatására csökken az egyensúlyi nedvességtartalom. Folyamatos mérsékelt csökkenés tapasztalható az egyensúlyi nedvességtartalom terén a 90-110°C-on kezelt minták esetében. Megfigyelhető, hogy a hőmérséklet emelésével a hatás fokozható. A 90°C-on végzett 20 napos gőzölés után a nyár minták egyensúlyi nedvességtartalma az eredeti 9%-ról 8,5%-ra áll be. Ezzel szemben, ha 100°C vagy 110°C-on kezeljük a mintákat ugyanennyi ideig, a nedvességtartalom 1%-kal csökken az eredeti értékhez képest, így 8%-os egyensúlyi nedvességtartalom szintet érünk el. Más eredményeket kapunk 120°C-on végzett gőzölés esetén. Itt a legnagyobb, 2%-os csökkenést tapasztalhatjuk az első két nap alatt, ami 7%-os egyensúlyi nedvességtartalmat eredményez. Ebben az esetben az első két napos gőzölés jelentősen csökkenti a felvehető víztartalmat, ezután viszont stagnáló értékeket láthattunk, ami kitartott a kezelés végéig. A két nap utáni változatlan eredményekből arra következtethetünk, hogy sem a hőmérsékletet, sem az időt nem érdemes növelni ennek a hatásnak a fokozása érdekében, mert már nincs hatással a minták egyensúlyi nedvességtartalmára.



53. ábra: A gőzölés hatása a nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalmára

Érdekes megfigyelés, hogy a szijács esetében a 100°C-os gőzölés nagyobb egyensúlyi nedvességtartalom csökkenést produkált, mint a 110°C-os gőzölés. Ugyanez az anomália volt megfigyelhető a világosság csökkenésének esetében is a szijácsnál. A két jelenség hasonlósága azt sugallja, hogy a szijács anatómiai és/vagy kémiai szerkezete adhat magyarázatot erre.

Azon nullhipotézis eldöntésére, hogy a gőzölés nincs hatással a nedvességtartalmak változására szignifikancia vizsgálatot végeztünk. A 6. táblázat mutatja be az elvégzett egymintás t-próba alapján az egyes napok átlagait, szórását, t-értékeit és p-értékeit. Mivel az eredmények kivétel nélkül a 95%-os szignifikancia intervallumba estek, ($p \leq 0,05$), így szignifikánsnak tekintettük őket, azaz a nullhipotézist elvetettük.

6. táblázat: A gőzölés nedvességtartalomra gyakorolt hatásának szignifikancia vizsgálata

Nedvességtartalom (%)											
$\mu=8,64$	gőzölési idő (nap)	átlag (%)	szórás	t-érték	p-érték	$\mu=9,03$	gőzölési idő (nap)	átlag (%)	szórás	t-érték	p-érték
nyár szijács 90°C n=4	2	8,44	0,07	-5,80	0,005	nyár geszt 90°C n=4	2	8,75	0,09	-6,19	0,004
	5	8,45	0,12	-3,10	0,027		5	8,68	0,08	-8,93	0,001
	9	8,41	0,07	-6,68	0,003		9	8,59	0,11	-7,91	0,002
	14	8,30	0,12	-5,78	0,005		14	8,56	0,17	-5,41	0,006
	20	7,92	0,24	-5,88	0,005		20	8,40	0,10	-12,17	0,001
nyár szijács 100°C n=4	2	8,14	0,0642	-15,46	2,9E-04	nyár geszt 100°C n=4	2	8,92	0,07	-3,18	0,025
	5	8,07	0,1629	-7,024	3,0E-03		5	8,91	0,07	-3,43	0,021
	9	7,70	0,1127	-16,63	2,4E-04		9	8,78	0,11	-4,37	0,011
	14	7,42	0,1305	-18,74	1,7E-04		14	8,48	0,06	-18,96	0,0002
	20	7,26	0,0997	-27,72	5,2E-05		20	8,06	0,18	-13,62	0,0004
nyár szijács 110°C n=4	2	8,14	0,1441	-6,94	0,003	nyár geszt 110°C n=4	2	8,60	0,0337	-25,73	6E-05
	5	8,29	0,0364	-19,21	0,0002		5	8,30	0,0723	-41,86	1E-05
	9	8,04	0,0641	-18,66	0,0002		9	8,19	0,1057	-15,97	0,0003
	14	7,65	0,3976	-5,00	0,0077		14	7,96	0,0866	-24,66	7E-05
	20	7,49	0,0386	-59,71	0,00001		20	7,84	0,0295	-80,21	2E-06
nyár szijács 120°C n=4	1	6,67	0,0809	-48,64	0,00001	nyár geszt 120°C n=4	1	6,60	0,0973	-49,9	9E-06
	2	6,75	0,0577	-65,47	0,000004		2	6,84	0,0648	-67,62	4E-06
	4	6,60	0,2079	-19,65	0,0001		4	6,84	0,0992	-44,04	1E-05
	6	6,57	0,095	-43,53	0,00001		6	6,90	0,4016	-10,63	0,0009
	9	6,58	0,0487	-84,72	1,8E-06		9	6,90	0,208	-20,52	0,0001

Hasonló eredményre jutottak Mahdiyanti és munkatársai (2020). Vizsgálatuk során sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) mintákat gőzöltek 90 és 110°C-on. A faanyag nedvességtartalmának változását mérték a közeli infravörös színekép (NIR) segítségével. Megállapították, hogy az egyensúlyi nedvesség 90°C-on kis mértékben, de folyamatosan csökkent a gőzölés 20 napja alatt. Intenzívebb egyensúlyi nedvességtartalom csökkenést tapasztaltak a 110°C-on gőzölt mintáknál, mint a 90°C-os gőzölteknél, de a változás 5 nap után stagnált, majd növekedést mutatott.

Németh (2002) szintén hasonló következtetésekre jutott. Kutatása során fehérakác (*Robinia pseudoacacia*) faanyagot gőzölt 14 napig 98°C-on, és a nedvességtartalmának viselkedését vizsgálta különböző páratartalmi körülmények között. Vizsgálatai kimutatták, hogy a gőzölési folyamat hatással van a faanyag egyensúlyi nedvességtartalmára. Megállapította, hogy 81%-os relatív páratartalom értékig a gőzölési eljárás csökkenti a faanyag egyensúlyi nedvességtartalmát, míg ennél magasabb páratartalmi értékeknél a gőzölés növeli az egyensúlyi nedvességtartalmat.

6. Gyakorlati hasznosítás

A kutatómunka során az ipar számára hasznos információkat tártunk fel azzal, hogy széles hőmérsékleti és időtartományban gőzöltük a nyár faanyagot és a kiinduló állapothoz képest sötétebb, barnább, a rajzolat megjelenésével vonzóbb anyagot hoztunk létre. A kapott eredmények alapul szolgálhatnak ipari gőzölési menetrendek összeállításához a nyár faanyag modifikálása során, mivel a megadott kezelési hőmérsékleten prognosztizálható az idő előrehaladtával, a színkoordináták változása. A hőkezelés kedvező színmódosító hatása, valamint a szíjács és a geszt különbségének a homogenizációja módosíthatja a nyár faanyag másodlagos felhasználási területét, szélesebb körű felhasználást teszi lehetővé. A felhasználási területek lehetnek például különböző falburkolati elemek, fapanelek, dekorációs lécek, lambériák, mennyezeti burkolatok vagy térelválasztó panelek. A gőzölés kedvező hatása, hogy növeli a nyár faanyag időjárásállóságát, ami szintén növelheti a felhasználási területét. Az egy légtérben bükkal és akáccal végzett kezelések során szerzett tapasztalatok segíthetnek a gőzölő berendezések hatékonyságának javításában. Megállapítottuk, hogy 100°C-ig az idegen faanyagok nem befolyásolják érdemben a gőzölési folyamatot, így ezeket biztonságosan összekeverhetjük a gőzölőben, hogy maximálisan kiaknázzuk annak kapacitását. Továbbá azt is megállapítottuk, hogy a 100°C feletti kezelési tartományban, azonos légtérben lévő magas extrakt anyag tartalommal rendelkező idegen faanyag hatással lesz gőzölési eredményre, még intenzívebb szín érhető el. Fontos szempont, hogy a gőzölt nyár színtelítettsége folyamatosan növelhető a gőzölési idővel mindegyik vizsgált hőmérsékleten. A színtelítettségnek esztétikai jelentősége van. Minél magasabb egy szín telítettsége, annál kellemesebb színérzetet kelt a megfigyelőben. Faanyag esetében a „meleg” barna árnyalat élénkülését jelenti a telítettség növekedése.

Bízunk benne, hogy a kutatásunk eredményei hozzájárulnak a nyár faanyag felhasználási területeinek bővítéséhez, valamint az eredmények gyakorlati hasznosításához.

7. Összefoglalás

A kutatás során a nyár jellegtelen színét kívántuk javítani oly módon, hogy gőzölési eljárásnak vetettük alá annak érdekében, hogy a kiinduló világos, szürkésfehér állapotból egy sötétebb barnább, emberi szem számára melegebb, kellemesebb színt érzünk el. A modifikációs eljárás a nyár faanyag jelenlegi másodlagos felhasználási körét (raklapgyártás, energetika) bővítheti vagy elsődlegessé változtathatja.

A nyárfa mintákat szijácsra és gesztre szeparálva 90 °C - 120 °C -os hőmérsékleti tartományban gőzöltük 20 napig (120 °C -on a kezelés 9 napig tartott). Mind a szijács, mind a geszt színváltozását objektív színméréssel követtük CIE L*a*b* rendszerrel. Az eredmények azt mutatják, hogy a gőzölés ésszerű alternatíva lehet a nyárfa színének javítására. A gőzölt fa teljes keresztmetszetben egyformán elszíneződött.

A világosság értéke jelentős mértékben csökkent az összes beállított hőmérsékleten. A legnagyobb világosság csökkenés 44 egység volt, amit 9 napos 120°C-os gőzöléssel értünk el. Az eredmények megerősítették azt a hipotézisünket, hogy a gőzölés a megfelelő módszer a nyárfa sötét színének előállítására. Megállapítottuk, hogy a 90-110°C -os tartományban a nyár faanyag világosságának változása nem függ a hőmérséklettől az első 5 napos gőzölés során. Ennek az eredménynek az a gyakorlati jelentősége, hogy ezeken a hőmérsékleteken nem kell szigorúan tartani egy állandó hőmérsékletet, tehát a gőzölő berendezés nem igényel precíz hőmérséklet szabályozó rendszert.

A vörös színezet értéke minden esetben folyamatosan nőtt a gőzölési idő előrehaladtával 90°C, 100°C és 110°C-os kezeléseknél. A növekedés a gőzölés első 5 napjában a kezdeti értékek 2,5-3-szorosát érték el, majd ezt a változást mérsékelt növekedés követte. A 120°C-os kezelés esetében, ahol sokkal gyorsabban zajlottak le a változások, megfigyelhető volt, hogy mind a geszt, mind a szijács a* értéke már az első nap után a kezdeti érték 4-szeresére emelkedett, majd ezután lassult a változás. A szijács esetében ez a lassú változás folytatódott a kezelés végéig, a geszt pedig a hatodik napon elérte maximális a* értéket és ezt követően csökkenést mutatott a gőzölés végéig.

A sárga színkoordináta növekedése hasonló volt az a* érték növekedéséhez. 90 °C és 100 °C hőmérsékleten a szijács és a geszt görbéi közel kerültek egymáshoz. A 110°C-os kezelés a szijácsnál jelentős, a gesztnél kismértékű sárga színezet növekedést eredményezett. A legintenzívebb növekedés a gőzölés első 5 napjában következett be. Ezt a változást mérsékelt

növekedés követte a gőzölés végéig. Hasonlóan a vörös színezethez, 120°C-on az első nap jelentős emelkedést hozott a sárga színezet tekintetében, majd lassulás következett be. Mind a szijács, mind a geszt sárga színezetének értéke elérte a maximumot, az előbbi a negyedik az utóbbi a hatodik napon. Ezután a b^* értékei a szijács és a geszt esetében is a kezelés végéig csökkenést mutattak.

A 20 napos, 110°C-os gőzölés eredményeként a sárga színezet értéke 33,25 egység, ami 1,9-szerese a kezdeti értéknek. Ugyanakkor a vörös színezet legnagyobb értéke 12,3 egység, ami majdnem 5-szörösére nőtt a kezdeti értéknek. Így százalékos értékben a vörös színváltozás nagyobb. Viszont, a színkoordináták egységében mért változások alapján a vörös színezet 9,7 egységnyi növekedést, míg a sárga színezet 15,7 egységnyi növekedést mutatott. Tehát abszolút értékben a sárga színezet növekedése jelentősebb, amit még tovább fokoznak az eltérő kezdeti értékek.

A szín intenzitásának vizsgálatánál megállapítottuk, hogy a gőzölés minden vizsgált hőmérsékleten fokozza a nyár színtelítettségét (C^*). A legmagasabb telítettségi érték 35,2 volt, ami kétszer akkora, mint a kezdeti érték.

Magas korrelációt állapítottunk meg a nyárfa gőzölése során keletkező világosság és színezeti szög értékek között, ami mind a szijács, mind a gesztre vonatkozik. A determinációs együtthatók (R^2) magas értéke 0,88 és 0,98 között volt, ami jó lineáris korrelációt mutat. A legmagasabb értéket 100°C -os kezelési hőmérsékleten értük el.

A teljes színváltozás tekintetében a hőmérséklet és az idő növelésével egyre nagyobb ΔE^* -ot számítottunk a kezeletlen mintákhoz képest az összes kezelési hőmérsékleten. 100°C -os, két napos kezeléssel már 6 egységnyi változást értük el, ami szabad szemmel is nagyon jól látható. A legnagyobb értéket a 120°C -os 9 napos kezelés mutatta, 45 egységnyi értékkel a szijács és a geszt esetében is. Esetünkben a teljes színváltozás, a jelentős világosság csökkenés miatt nem ad többlet információt, mivel a ΔE^* számításánál az L^* dominál. Ez azt eredményezi, hogy nem mutatja ki a kisebb számértékű, viszont a szemünk számára jelentősen érezhető vörös színezet változását, valamint a rajzolat általi hatásokat. A teljes színváltozás hasznos lehet a geszt és a szijács színbeli eltéréseinek mérésére, ami a faipar számára fontos információ. Figyelembe kell venni, hogy a fa rajzolata befolyásolhatja a szemünk számára az eredményt. A geszt és szijács homogenizálódása szempontjából optimális kezelési idők a következők:

- 90°C-on 9 nap. $\Delta E^*=0,78$. Az összes kezelési hőmérsékleten tapasztalt legkisebb érték, ami közel van a nem érzékelhető színkülönbséghez. Hátránya a hosszú gőzölési idő.

- 100°C-on 5 nap. $\Delta E^*=1,78$. Az előkísérletek során, ami szintén 100°C-os kezeléssel járt, ugyanezt az eredményt kaptuk, miszerint a színpontok az 5. napon voltak egymáshoz a legközelebb.
- 110°C-on nem javasolt, mert nem volt kisebb érték a kiinduló állapotnál. Tehet ezen a hőmérsékleten inhomogenizálódik az anyag. Ezen a hőmérsékleten kaptuk a legnagyobb eltérést is 5,78 értékkel.
- 120°C-on 2 nap. $\Delta E^*=1,72$

További kísérleteink során a nyár mintákat magas extraktanyag tartalommal rendelkező akác és bükk mintákkal egy légtérben gőzöltük, hogy fokozzuk a gőzölés színmódosító hatását. A segédanyagoktól azt vártuk, hogy a gőz, mint hordozó közeg extrakt anyagokat szállíthat a nyárfába, ami jelentős színváltozást eredményez. Az alkalmazott kezelési hőmérséklet 90-120 °C volt, míg a gőzölés maximális időtartama 20 nap volt (120 °C-on csak 9 nap), ami megegyezik a korábbi vizsgálatok paramétereivel. Az objektív színmérés alapján megállapítottuk, hogy a segédanyagok jelenléte nincs hatással a világosság változására egyik hőmérsékleten sem, továbbá a nyár színezetének változását csak 100°C feletti hőmérséklet tartományban fokozta. Mindkét iniciátor jelenléte enyhe vörös színezet növekedést okozott a nyár szijácsnál az önmagában gőzölt nyárral összehasonlítva. Az akác jelenléte nagyobb vörös színezet változást okozott, mint a bükk jelenléte, ami az akác magasabb extraktanyag tartalmával magyarázható. A 120°C-s gőzölésnél az első két napon jelentkezik az együtt gőzölés hatása, amit később leront a gőz kimosó hatása. Ez a megállapítás a gesztre és a szijácsra egyaránt érvényes. A b^* változásának viselkedése hasonló volt a vörös színezet viselkedéséhez a segédanyagok összefüggésében. A bükk segédanyagának 100°C felett van enyhe hatása a nyár szijácsra és jelentősebb hatása a nyár gesztjére. A legnagyobb eltérést a 110°C -os kezelés hatására értük el. Az akác jelenléte, hasonlóan a vörös színezethez, nagyobb hatást gyakorolt a sárga színezetre, mint a bükk jelenléte. Az akác szijácsra gyakorolt hatása 120 °C -on érzékelhető, viszont a gesztre már 100 °C alatt enyhe változást 100 felett viszont jelentős változást idézett elő.

Összességében megállapíthatjuk, hogy a segéd faanyagok színváltozást segítő hatása 110 és 120°C-on jelentkezik. Ez azt jelent, hogy a gőzmolekulák mozgása ezeken a hőmérsékleteken (illetve még magasabb hőmérsékleteken) képes az extrakt anyagok átvitelére a nyár faanyagba. A vörös és a sárga színezet 120°C-on mért csökkenése azt mutatta, hogy az újonnan létrehozott kromofor molekulák nem elég stabilak. Ez a hőmérséklet elég magas ahhoz, hogy másodlagos degradációt okozzon, ami csökkenti mind a vörös, mind a sárga színezet értékét is. A geszt stabilabb módon képes megkötni a kivonható molekulákat, mint a szijács, ezért a gőzmozgással

szállított indikátorok extraktumait stabilan tudta összekapcsolni a nyár gesztben. A segédanyagok tekintetében az akác gőzzel extrahálható molekulái jobban köthetők nyárfához, mint a bükk hasonló molekulái. Továbbá az akácnak köszönhető sárga színezet növekedése stabilabb volt a másodlagos degradációval szemben, mint a bükk által okozott sárga színezet. Ezt a különbséget a sárga robinetin jelenléte hozta létre, amely a bükk faanyagban nem fordul elő.

Miután változtattunk a nyár faanyag vizuális megjelenésén, megvizsgáltuk a gőzölés által létrehozott új szín tartósságát. A vizsgálatokhoz öt napig, 100, 110 és 120°C-on gőzölt nyár faanyagot használtunk, amit higanygőz lámpa által biztosított UV sugárzásnak tettük ki. A kezelés színváltoztató hatását 7, 16, 36, 60 és 90 órás besugárzás után mértük meg. Az UV sugárzás hatása a nyár faanyag világosságára azt mutatja, hogy a gőzölt faanyagok kisebb mértékű sötétedést szenvedtek el az UV kezelés során, mint a natúr faanyag. A vörös színezet tartóssága szempontjából a 120°C-os gőzöléssel előállított vörös színezet stabil maradt az UV sugárzással szemben. Továbbá a többi hőmérsékleten gőzölt nyár faanyag is jobban ellenállt az UV besugárzásnak, mint a gőzöletlen faanyag. A sárga színezet esetében is a 120°C-on gőzölt próbatestek mutatták a legnagyobb színestabilitást, de nem olyan mértékben, mint az a* esetében. Míg a natúr faanyag sárga színezete 2,3 szeresére növekedett addig a 120°C-on gőzölt faanyag sárga színezete csupán 1,3 szeresére emelkedett a 90 órás UV besugárzás hatására. A többi gőzölt minta színváltozása a fenti két érték között volt.

Végül a gőzölt nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalmát vizsgáltuk, ami a tartósság és az ellenállóképesség szempontjából fontos tényező. Ezeket a kísérleteket a kezelés után 3 év elteltével végeztük annak érdekében, hogy meggyőződjünk róla hosszú távon milyen egyensúlyi fanedvességre állnak be a kezelt minták. Ebben a 3 évben a gőzölt minták szobaszáraz körülmények között voltak tárolva. A gőzölt minták nedvességtartalmának meghatározását tömegmérési módszerrel végeztük. A mérési eredmények azt mutatták, hogy az összes kezelés hatására csökken az egyensúlyi nedvességtartalom. Folyamatos, mérsékelt csökkenés tapasztalható nedvességfelvétel terén a 90-110°C-on kezelt minták esetében. A 120°C-os gőzölés hatására, az előzőektől eltérően, az első két napos kezelés jelentősen csökkenti a felvehető víztartalmat, ezután viszont már nincs hatással a minták egyensúlyi nedvességtartalmára a további gőzölés. Az eredmények alapján kijelenthetjük, hogy a kezelési idő vagy a hőmérséklet növelésével egyre alacsonyabb egyensúlyi fanedvességre áll be a nyár faanyag. A 20 napos gőzölés hatása 90°C-on 0,5%-kal, 110°C-on pedig 1% alacsonyabb egyensúlyi fanedvességet eredményezett. A 120°C-os kezelés esetében az első két nap alatt 2%-os egyensúlyi fanedvesség csökkenést tapasztaltunk. A 2 nap utáni stagnáló eredményekből

arra következtettünk, hogy sem a hőmérsékletet, sem az időt nem érdemes növelni ennek a hatásnak a fokozása érdekében.

8. Tézisek

1. Tézis: Megállapítottam, hogy a Pannónia-nyár jellegtelen szürkésfehér színe gőzöléssel javítható. Gőzölésével sötétebb, barnább szín állítható elő, ami az emberi szem számára kellemesebb, valamint a rajzolat kiemelkedik, láthatóvá válik.

Kimutattam, hogy a megfelelő gőzölési hőmérséklet tartomány és időtartam meghatározható az elérni kívánt optimális szín eléréséhez.

A 90-110°C-os tartományban a nyár faanyag világosságának változása nem függ a hőmérséklettől az első 5 napos gőzölés során.

2. Tézis: Megállapítottam, hogy a gőzölés minden vizsgált hőmérsékleten fokozza a nyár színtelítettségét, ami a létrehozott szín esztétikai értékét növeli.

3. Tézis: Kimutattam, hogy lineáris korreláció van a gőzölés során létrehozott színpontok világossága és színezeti szöge között.

A 100°C-os gőzölés hozza létre a legjobb korrelációs együtthatót a színezeti szög és a világosság között, mind a szijács ($R^2=0,94$), mind a geszt ($R^2=0,98$) esetében.

4. Tézis: Megállapítottam, hogy nyár faanyag szijácsának és a gesztjének a színkülönbözősége homogenizálható. Ez a gőzölési hőmérsékleteknek megfelelően 90°C-on 9 nap, 100°C-on 5 nap, 120°C-on 2 nap. Ezt követően viszont a színek távolodnak egymástól. Kimutattam, hogy a 110°C-os kezelés nem alkalmas a homogenizálásra, mert a teljes gőzölési idő alatt inhomogenizálódott az anyag.

5. Tézis: Bükk és akác segédanyagokkal történő együtt gőzölés hatása javítja a nyár faanyag színét.

Feltártam, hogy az egy légtérben gőzölt bükk és az akác segédanyagok nincsenek hatással a nyár faanyag világosság változására, viszont hatással vannak a sárga és vörös színezetre.

Megállapítottam, hogy a segéd faanyagok sárga és vörös színváltozást segítő hatása 110 és 120°C-on jelentkezik.

6. Tézis: Gőzöléssel növelhető a nyár faanyag ultraibolya sugárzással szembeni ellenállóképessége.

A gőzölés növeli a nyár faanyag UV sugárzással szembeni színtartósságát a gőzöletlen faanyaghoz képest. Az ellenálló képesség a gőzölési hőmérséklet növelésével emelkedett.

A 90 órás UV besugárzás hatásainak összehasonlítása a kezeletlen és a 120°C-on gőzölt minták szinkordinátáira vonatkozóan a következő eredményeket hozta:

A világosság csökkenés értéke a kezeletlen minta esetében 10 egység volt, míg a gőzölt minta esetében 1 egység.

A vörös színezet értéke a kezeletlen minta esetében 2,9 szerezére növekedett, míg a gőzölt minta esetében nem növekedett.

A sárga színezet értéke a kezeletlen minta esetében 2,3 szorosára növekedett, míg a gőzölt minta esetében 1,3 szorosára.

7. Tézis: Bizonyítottam, hogy a gőzölés hatására csökken a nyár faanyag egyensúlyi nedvességtartalma. A gőzölési idő és a hőmérséklet növelésével egyre alacsonyabb egyensúlyi fanedvességre áll be a nyár faanyag, aminek a hatása 120°C-on maximalizálódik.

A 20 napos 90°C-os gőzölés után a nyár minták egyensúlyi nedvességtartalma 9%-ról 8,5%-ra csökken, míg 100-110°C-on ez az érték 8%-ra esik vissza, ami 1%-os csökkenést jelent. 120°C-os kezelésnél azonban már az első két napban 2%-os csökkenést mutat, így a faanyag egyensúlyi nedvességtartalma 7%-ra áll be.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni Prof. Dr. Tolvaj László és Dr. Varga Dénes témavezetőimnek az évek során nyújtott rengeteg segítségért, támogatásért, melyekkel a dolgozat sikeres elkészüléséhez hozzájárultak. Kiemelt köszönet illeti Prof. Dr. Tolvaj Lászlót, akinek személyisége és szakmai tudása ösztönző volt számomra. Továbbá köszönöm az egyetem munkatársainak, akik bármilyen módon segítettek a munkámat. Több tanszéken is megfordultam laborvizsgálat vagy mérőeszköz igénybevételéért. Mindenhol segítőkészen fogadtak és szakmai tudásukkal támogatást adtak. Nem utolsó sorban pedig köszönöm a családomnak, hogy szeretettel, türelemmel támogattak az elmúlt években.

10. Irodalomjegyzék

- Bak, M. (2012): Növényi olajokban hőkezelt nyár faanyag tulajdonságainak vizsgálata. Doktori értekezés. Nyugat-magyarországi Egyetem. p. 247.
- Banadics, E. (2006): Faanyagok diffúziós tulajdonságai a gesztesedés, a hőmérséklet és az anatómiai irány függvényében. Szakdolgozat. Nyugat-magyarországi Egyetem. p. 95.
- Banadics, E., Gulyás, K. (2015): A faipari felhasználásra szánt faanyagok jövője a klímaváltozás tükrében. In: Bidló, A., Facskó, F. (szerk.) V. Kari Tudományos Konferencia - Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar konferencia előadásainak és posztereinek kivonatai. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó. p. 29.
- Bartha, D. (1998): Dendrológia. Kézirat. p. 98.
- Bartha, D. (2007): Dendrológia. Előadás anyag.
- Barta, J., Biacs, P., Deák, T., Hidegkuti, Gy., Körmendy, I., Monspartné Sényi, J., Rák, I., Stégerné Máté, M., Vatai, Gy., Vukov, K. (2007): Növényi nyersanyagok feldolgozástechnológiai műveletei. p. 248.
- Boonstra, M., Tjeerdsma, B. (2006): Chemical analysis of heat treated softwoods. Holz Roh Werkst 64:204-211. DOI:10.1007/s00107-005-0078-4
- Bosshard, H. (1984): Holzkunde Bd.3, Aspekte der Holzbearbeitung és Holzverwertung. Birkhäuser Verlag, Basel. p. 286.
- Csanády, E., Magoss, E., Tolvaj, L. (2015): Quality of Machined Wood Surfaces. Springer. p. 257.
- Csonkáné Rákosa, R. (2005): A flavonoidok szerepe a faanyag hőhatás okozta átalakulásaiban. Faipar 53(2):23-27.
- Dirckx, O., Triboulot-Trouy, M.C., Merlin, A., Deglise, X. (1992): Modifications de la couleur du bois d'Abies grandis exposé à la lumière solaire. Annual Forest Science 49(5):425-447. DOI: 10.1051/forest:19920501
- Dzurenda, L. (2013): Modification of wood colour of Fagus sylvatica L. to a brown-pink shade caused by thermal treatment. Wood Resources 58(3):475-482.

- Dzurenda, L. (2014): Colouring of beech wood during thermal treatment using saturated water steams. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen* 56(1):13-22.
- Dzurenda, L. (2018a): Hues of *Acer platanoides* L. resulting from processes of thermal treatment with saturated steam. *Drewno* 61(202):165-176.
- Dzurenda, L. (2018b): Colour modification of *Robinia pseudoacacia* L. during the processes of heat treatment with saturated water steam. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen* 60(1):61-70.
- Dzurenda, L. (2018c): The effect of moisture content of Black locust wood on the heating in the saturated water steam during the process of colour modification. In: *MATEC Web of Conferences* 168(181):06004.
- Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I., Pereira, H. (2008): Heat induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science Technology* 42(5):369-384.
- Gálos, B., Vig, P. (2014): Éghajlati tendenciák a Kárpát medencében és Zala megyében. In: Bidló A., Király A., Mátyás Cs. (szerk.) *Agrárklíma: Az előrevetített klímaváltozás hatáselemzése és az alkalmazkodás lehetősége*. Nyugat-Magyarországi Egyetem Kiadó. pp. 7-16.
- Ghoreishi S., Tarmian, A., Karimi, A., Oladi, R. (2016): The effect of tension wood on roughness of poplar wood and its modification by steaming. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries* 7(3):323-333.
- Hill, C. A. S. (2006): *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley and Sons. DOI: 10.1002/0470021748
- Horváth, N. (2008): A termikus kezelés hatása a faanyag tulajdonságaira, különös tekintettel a gombaállóságra. Doktori értekezés. Nyugat-Magyarországi Egyetem. p. 145.
- Hrcka, R. (2008): Identification of discoloration of beech wood in CIElab space. *Wood Research* 53(1):119-124.
- Homan, W. J., Tjeerdsma, B., Beckers, E., and Jorissen, A. J. (2000): Structural and other properties of modified wood. In *Proceedings: World Conference on Timber Engineering*. British Columbia. Whistler Ressort. Paper 1.

- Homan, W. J., Jorissen, A. J. M. (2004): Wood modification developments. *Heron* 49(4):361-386.
- Hunter, A. J. (1995): Equilibrium moisture content and the movement of water through wood above fibre saturation. *Wood Science and Technology* 29:129-135. DOI: 10.1007/bf00229342
- Jackson, R. B., Randerson, J. T., Canadell, J. G., Anderson, R. G., Avissar, R., Baldocchi, D. D., Bonan, G. B., Caldeira, K., Diffenbaugh, N. S., Field, C. B., Hungate, B. A., Jobbágy, E. G., Kueppers, L. M., Nosetto, M. D., Pataki, D. E. (2008): Protecting climate with forests. *Environmental Research Letters* 3 044006. p. 5. DOI: 10.1088/1748-9326/3/4/044006
- Kánnár, A., Tolvaj, L., Magoss, E. (2018): Colour change of photodegraded spruce wood by water leaching. *Wood Research* 63(6):935-946.
- Kiliç, M., Hiziroglu, S., Güllü, G., Sezgin, Z. (2008): Influence of steaming on surface roughness of beech and sapele flooring material. *Journal of Material Processing Technology* 199:448-451. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.008
- Kılıç, M. (2009): The effects of steaming of beech (*Fagus orientalis* L.) and sapele (*Entandrophragma cylindricum*) woods on the adhesion strength of varnish. *Journal of Applied Polymer Science* 113(6):3492-3497. DOI: 10.1002/app.30180
- Kollman F., Schmidt E., Kufler M., Fengel D. & Schneider A. (1969): Gefüge- und Eigenschaftsänderungen im Holz durch mechanische und thermische Beanspruchung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 27:407-425. DOI: 10.1007/BF02604735
- Komán, Sz., Molnár, S. (2008): A nyárfajták faminőségi és fatechnológiai tulajdonságai és felhasználásuk. In: Tóth B. (szerk.) *Nemesnyár-fajták ismertetője*. Agroinform Kiadó. pp. 83-90.
- Kovács, I. (1979): *Faanyagismerettan*. Mezőgazdasági Kiadó. p. 382.
- KSH (2021): *Magyarország számokban 2021*. pp. 52-53.
- Mahdiyanti, S.H., Tsuchikawa, S., Mitsui, K., Tolvaj, L. (2020): Steaming-caused chemical changes of sugi (*Cryptomeria japonica*) wood monitored by NIR spectroscopy. *Asian Journal of Forestry* 4(1):6-9. DOI: 10.13057/asianjfor/r040102
- Molnár, S., Komoróczy, I., Peszlen, I., Varga, F-né, Szóják, P-né, Horváth, L., Fehér, S., Horváth, I. (1994): Az akácfa hidrotermikus nemesítése atmoszférikus

- könnyűszerkezetes gőzölő kamrában. Kutatási jelentés. EFE Faanyagismeret Tanszék. p. 106.
- Molnár, S., Peszlen, I., Richter, H.G., Tolvaj, L., Varga, F. (1998): Influence of steaming on selected wood properties of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Environment and Wood Science. Acta facultatis Ligniensis.* pp. 38-45.
- Molnár, S. (1999): Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. p. 467.
- Molnár, S., Bariska, M. (2006): Magyarország ipari fái. Szaktudás Kiadó Ház. pp. 71- 82, pp. 142-149.
- NAK (2019): Erdészeti nemesített fajták erdősítésekhez, fásításokhoz. p. 86.
- Németh, K. (1982): A fa színének értékelése a CIELAB-rendszerben. *Az Erdészeti és Faipari Egyetem Tudományos Közleményei* 2:125-135.
- Németh, K. (1997): Faanyagkémia. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. p. 123.
- Németh, K. (1998): A faanyag degradációja. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. p. 106.
- Németh, R. (2002): A Hunter-modell alkalmazása az akác szorpciós izotermáinak jellemzésére. *Faipar* 50(1):10-14.
- Németh, R. (2002): A hidrotermikus kezelés hatása az akác faanyagának szorpciós tulajdonságaira. *Doktori értekezés. Nyugat-Magyarországi Egyetem.* p. 105.
- Németh R. (2009): Faanyag modifikáció alapjai. *Előadás jegyzet.* p. 36.
- Németh, R., Molnár, S., Csupor, K., Ábrahám, J., Komán, Sz., Csordós, D., Fehér, S., Szeles, P., Bak, M., Bariska, M. (2014): Akáckutatások a Faanyagtudományi Intézetben. In: Lipák László (szerk.) *Alföldi Erdőkért Egyesület Kutatói Nap XXII: Tudományos eredmények a gyakorlatban.* Lakitelek, 2014.11.11 pp. 89-95.
- Németh, R., Tolvaj, L., Bak, M., Alpár, T. (2016): Colour stability of oil-heat treated black locust and poplar wood during short-term UV radiation. *Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 329:287-292. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2016.07.017 1010-6030/
- Noack, D. (1969): Über die Heißwasserbehandlung von Rotbuchenholz im Temperaturbereich von 100 bis 180°C. *Holzforschung Holzverwertung* 21:118-124.
- Persze, L. (2011): Magyarországi fafajok fotodegradációjának összehasonlítása: Színváltozás. *Faipar* 59(2-3):35-46.

- Persze, L., Tolvaj, L. (2012): Photodegradation of wood at elevated temperature: Colour change. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 108:44-47 DOI: 10.1016/j.jphotobiol. 2011.12.008
- Popescu, C. M., Hill, C. A. S., Curling, S. F., Ormondroyd, G., and Xie, Y. (2013): The water vapour sorption behaviour of acetylated birch wood How acetylation affects the sorption isotherm and accessible hydroxyl content. *Journal of Materials Science* 49(5):2362-2371. DOI: 10.1007/s10853-013-7937-x
- Preklet, E., Tolvaj, L., Bejó, L., Varga, D. (2018): Temperature dependence of wood photodegradation. Part 2: Evaluation by Arrhenius law. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 356:329-333.
- Preklet, E., Tolvaj, L., Banadiacs, E.A., Alpár, T., Varga, D. (2019): Colour modification and homogenisation of larch wood by steaming. *Wood Research* 64:811-820.
- Rowell, R.M. (1983): Chemical modification of wood. *Forest Products* 6:363-382.
- Rowell, R.M. (2013): *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2nd Edition. CRC Press. Boca Raton. Florida. USA.
- Skaar, C. (1988): *Wood-Water Relations*. Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-736834_4
- Stamm, A.J., Hansen, L.A. (1937): Minimizing wood shrinkage and swelling: Effect of heating in various gases. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 29(7):831-833.
- Stamm, A.J. (1964): *Wood and Cellulose Science*. Ronald Press Co. New York. USA. p. 549.
- Takáts, P. (2000): *Szárítás és Gőzölés*. Egyetemi jegyzet. Sopron. p. 121.
- Tarkow, H., Stamm, A. J., Erickson, E. C. O. (1950): Acetylated wood. USDA Forest Service Report No. 1593. Forest Products Laboratory. Madison. Wisconsin. USA.
- Teichgräber, R. (1966): Beitrag zur Kenntnis der Eigenschaftsänderungen des Holzes beim Dämpfen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 24:548-551.
- Thybring, E.E., Fredriksson, M. (2021): Wood Modification as a Tool to Understand Moisture in Wood. *Forests* 12:372. DOI: 10.3390/f12030372
- Tiemann, H.D. (1906): *Effect of Moisture upon the Strength and Stiffness of Wood*. US Department of Agriculture. Forest Service: Washington. DC. USA.

- 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. pp. 256-264.
- Tjeerdsma, B.F., Militz, H. (2005): Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz Roh Werkst* 63:102-111. DOI 10.1007/s00107-004-0532-8
- Todaro, L., Zuccaro, L., Marra, M., Basso, B., Scopa, A. (2012): Steaming effects on selected wood properties of Turkey oak by spectral analysis. *Wood Science and Technology* 46(1-3):89-100. DOI: 10.1007/s00226-010-0377-8.
- 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. DOI: 10.1515/hfsg.1995.49.5.397
- Tolvaj, L., Faix, O. (1996): Modification of Wood Colour by Steaming. In: Proceedings of the ICWSF '96 Conference. Sopron, Hungary. pp. 10-19.
- Tolvaj, L., Molnár, S., Takáts, P., Varga, D. (2004): Az akác (*Robinia pseudoacacia* L.) faanyag színének változása a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében. *Faipar* 52(4):9-14.
- Tolvaj, L., Molnár, S., Takáts, P., Varga, D. (2005): Az akác (*Robinia pseudoacacia* L.) faanyag színének homogenizálása gőzöléssel. *Faipar* 53(1):13-15.
- Tolvaj, L., Molnár, S., Takáts, P., Németh, R. (2006): A bükk (*Fagus Silvatica* L.) faanyag fehér- és színes gesztje színének változása a gőzölési idő és hőmérséklet függvényében. *Faipar* 54(2-3):15-20.
- Tolvaj, L., Molnár, S. (2006): Colour homogenisation of hardwood species by steaming. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 2:105-112.
- Tolvaj, L., Németh, K. (2008): Correlation between hue-angle and colour lightness of steamed black locust wood. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 4:55-59.
- Tolvaj, L., Németh, R., Varga, D., Molnár, S. (2009): Colour homogenisation of beech wood by steam treatment. *Drewno-Wood* 52(8):5-17.
- Tolvaj, L., Molnár, S., Németh, R., Varga, D. (2010): Colour modification of black locust depending on the steaming parameters. *Wood Research* 55(2):81-88.

- Tolvaj, L., Mitsui, K. (2010): Correlation between hue angle and lightness of light irradiated wood. *Polymer Degradation and Stability* 95:638-642.
- Tolvaj, L., Papp, G., Varga, D., Lang, E. (2012): Effect of steaming on the colour change of softwoods. *BioRes* 7(3):2799-2808.
- Tolvaj, L. (2013): *A faanyag optikai tulajdonságai*. University of West Hungary Press. p. 122.
- Tolvaj, L., Preklet, E. (2015): A faanyag színváltozása nedvesítés hatására *Faipar* 63(1):41-46.
- Tolvaj, L., Tsuchikawa, S., Inagaki, T., Varga, D. (2015): Combined effects of UV light and elevated temperatures on wood discolouration. *Wood Science Technology* 49:1225-1237. DOI 10.1007/s00226-015-0749-1
- Tolvaj, L., Popescu, C-M., Molnár, Zs., Preklet, E. (2016): Effects of Air Relative Humidity and Temperature on Photodegradation Processes in Beech and Spruce Wood. *Wood Photodegradation. BioResources* 11(1):296-305.
- Tolvaj, L., Banadiacs, E.A., Tsuchikawa, S., Mitsui, K., Preklet, E. (2019): Color modification and homogenization of sugi wood by steaming. *Asian Journal of Forestry* 3(1):20-24.
- Tóth, B. (2006): *Nemesnyár-fajták ismertetője*. Agroinform Kiadó. Budapest.
- Varga, D., Van der Zee, M.E. (2008): Influence of steaming on selected wood properties of four hardwood species. *Holz als Roh- und Werkstoff* 66(1):11-18.
- Varga, D. (2012): A gőzölés modifikáló hatásának vizsgálata két európai és két trópusi fafaj egyes fizikaimechanikai tulajdonságainak tükrében. Tankönyv. p. 138.
- Varga, D., Tolvaj, L., Preklet, E. (2021): Colour stability of steamed black locust, beech and spruce timbers during short-term photodegradation wood research. 66(4):544-555. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/66.4.544555
- Xin, Y.L., Timar, M.C., Varodi, A.M., Sawyer, G. (2017): An investigation of accelerated temperature-induced ageing of four wood species: colour and FTIR, *Wood Science Technology* 51:357-378.

11. A szerző publikációi

Folyóiratcikk:

- Banadics, E., Gálos, B., Tolvaj, L. (2016): A sötét egzóta faanyagok helyettesítése gőzölt akác faanyaggal. *Faipar* 64(1):22-28. DOI: 10.14602/WOODSCI.2016.1.58.
- Banadics, E.A., Tolvaj, L. (2019): Colour modification of poplar wood by steaming for brown colour. *European Journal of Wood and Wood Products* 77:717-719. DOI: 10.1007/s00107-019-01397-9
- Banadics, E.A., Tolvaj, L., Varga, D. (2019): Colour stability of steamed poplar wood during short-term photodegradation. *BioResources* 14(4):8250-8256. DOI: 10.15376/biores.14.4.8250-8256
- Banadics, E.A., Tolvaj, L., Varga, D. (2022): Steaming of poplar, black locust and beech timbers simultaneously to investigate colour modification effect of extractive transport. *Drewno* 65(209):41-51. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.368.04
- Preklet, E., Tolvaj, L., Banadics, E.A., Alpár, T., Varga, D. (2019): Colour modification and homogenisation of larch wood by steaming. *Wood Research* 64(5):811-820.
- Tolvaj, L., Banadics, E., Tsuchikawa, S., Mitsui, K., Preklet, E. (2019): Color modification and homogenization of sugi wood by steaming. *Asian Journal of Forestry* 3(1):20-24 DOI: 10.13057/asianjfor/r030103

Konferenciakiadvány - cikk:

- Banadics, E. (2018): Nyár faanyag modifikálása segédanyagokkal. In: Keresztes, G., Szabó, Cs. (szerk.) *Tavaszi Szél Konferencia III. kötet. Doktoranduszok Országos Szövetsége Kiadó. Budapest.* p. 39-48. DOI: 10.23715/TSZ.2018.3
- Banadics, E. (2018): Colour modification of poplar wood by steaming. In: Németh, R., Teischinger, A., Rademacher, P., Bak, M. (szerk). *8th Hardwood Conference, With special focus on „new aspect of hardwood utilisation – from science to technology”.* p 40-42. ISBN 978-963-359-095-9

Poszter:

Banadics, E., Gulyás, K. (2015): A faipari felhasználásra szánt faanyagok jövője a klímaváltozás tükrében. V. Kari tudományos konferencia, Sopron.

Banadics, E. (2018): Colour modification of poplar wood by steaming. 8th Hardwood Conference, With special focus on „new aspect of hardwood utilisation – from science to technology” Sopron.

Konferenciakiadvány - Absztrakt/kivonat:

Banadics, E., Gulyás, K. (2015): A faipari felhasználásra szánt faanyagok jövője a klímaváltozás tükrében. In: Bidló, A., Facskó, F. (szerk.) V. Kari Tudományos Konferencia - Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar konferencia előadásainak és posztereinek kivonatai. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó. p. 29.

Banadics, E. (2018): Nyár faanyag modifikálása segédanyagokkal. In: Keresztes, G. (szerk.) Tavasz Szél Konferencia Absztraktkötet. Doktoranduszok Országos Szövetsége Kiadó Budapest. p. 335. ISBN 978-615-5586-26-2

Tolvaj, L., Banadics, E., Tsuchikawa, S., Inagaki, T., Varga, D., Preklet, E. (2018): Colour modification of conifer timbers by steaming for getting attractive braun colour. SWST/JWRS International Convention: Era of a Sustainable World - Tradition and Innovation for Wood Science and Technology.

12. Ábrajegyzék

1. ábra: A magyarországi élőfakészlet fafajok százalékos megoszlása alapján (KSH 2019)	5
2. ábra: A fa szerkezeti felépítése (Varga 2012)	7
3. ábra: A higroszkópos nedvességtartalom és a relatív páratartalom kapcsolata (Thybring és Fredriksson 2021).....	10
4. ábra: A vörösfenyő, a nyár és az akác sugárirányú metszeten mért reflexiós szinképe (Tolvaj 2012).....	14
5. ábra: Pannónia nyár előfordulása Magyarországon. Forrás: Bartha (2007) Dendrológia....	24
6. ábra: A Pannónia nyár biomassza összetevőinek aránya	26
7. ábra: A kísérletek folyamata	29
8. ábra: Vizsgált faanyagok származási helyszínei a KAEG Zrt. területén (forrás: NÉBIH Erdőtérkép, OpenStreetMap)	29
9. ábra: A kísérletekhez használt nyár próbatestek	30
10. ábra: KONICA-MINOLTA 2600d színmérő készülék	31
11. ábra: Síkbeli polár koordináták ábrázolása	32
12. ábra: Színkoordináták, valamint a ΔE^* színínger különbség ábrázolása (Varga 2012)	32
13. ábra: A nyomástartó edények 90, 100 és 110 °C -on a szárítószekrényben, 120°C -on nyomástartó hengerben voltak.	34
14. ábra: Frissen kialakított felszín a színméréshez	35
15. ábra: 100°C-on, 2;5;9;14 és 20 napig gőzölt nyár minták.....	38
16. ábra: A 100°C-on gőzölt nyár (NY) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében	39
17. ábra: A 100°C-on gőzölt nyár minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében	40
18. ábra: A 100°C-on gőzölt nyár minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében	41
19. ábra: A színpontok elhelyezkedése az a*-b* síkon a gőzölési idő függvényében a 100°C-on gőzölt nyár faanyagra vonatkozóan.....	43
20. ábra: A 100°C-on bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; N=nedves; V=vízbe helyezett).....	44
21. ábra: A 100°C-on akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; V=vízbe helyezett).....	44
22. ábra: A 100°C-on bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; N=nedves; V=vízbe helyezett).....	45
23. ábra: A 100°C-on akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; V=vízbe helyezett)	45
24. ábra: A 100°C-on bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; N=nedves; V=vízbe helyezett).....	46
25. ábra: A 100°C-on akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében (SZ=száraz; V=vízbe helyezett)	47
26. ábra: Gőzölt nyár minták színváltozásai. Bal oldalon a geszt, jobb oldalon a szijács változásai. Lentől felfelé nő a gőzölési hőmérséklet (90°C; 110°C; 120°C), balról jobbra pedig a gőzölési idő (2;5;9;14;20 nap. 120°C esetében: 1;2;4;6;9 nap).....	48
27. ábra: Bal oldalon kezeletlen minták, jobb oldalon ugyanazok a minták láthatók 90°C-os és 14 napos kezelés után	49
28. ábra: A világosság változása a gőzölési idő függvényében	50

29. ábra: A vörös színezet változása a gőzölési idő függvényében	51
30. ábra: A sárga színezet változás a gőzölési idő függvényében.....	52
31. ábra: Szintelitettség (C^*) változása a gőzölési idő függvényében	53
32. ábra: Színezeti szög (h^*) változása az idő függvényében	54
33. ábra: A színpontok vándorlása az a^*-b^* síkon a gőzölés során. (Az ábra az azonos színezeti szöghöz tartozó egyeneseket is mutatja pontozott vonalakkal. Az ábra bal alsó sarkában található a gőzöletlen minták színpontjai, és ezeket követik a gőzölt állapotok színpontjai növekvő gőzölési idővel.).....	55
34. ábra: Korreláció a világosság (L^*) és a színezeti szög (h^*) között az idő függvényében..	56
35. ábra: ΔE^* változása az idő függvényében.....	57
36. ábra: A geszt (G) és a szijács (SZ) egymáshoz viszonyított teljes színváltozása az idő függvényében	58
37. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében	59
38. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében.....	59
39. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében.....	60
40. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták világosságának változása a gőzölési idő függvényében.....	60
41. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében	61
42. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében	61
43. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében	62
44. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták vörös színezetének változása a gőzölési idő függvényében	62
45. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (SZ) minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében	63
46. ábra: A bükkal (B) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében	63
47. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) szijács (Sz) minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében	64
48. ábra: Akáccal (A) együtt gőzölt nyár (NY) geszt (G) minták sárga színezetének változása a gőzölési idő függvényében	64
49. ábra: Natúr és gőzölt nyár faanyag világosságának változása UV besugárzás hatására	66
50. ábra: Natúr és gőzölt nyár faanyag vörös színezetének változása UV besugárzás hatására.	67
51. ábra: Natúr és gőzölt nyár faanyag sárga színezetének változása UV besugárzás hatására	68
52. ábra: A színpontok vándorlása az a^*-b^* síkon 5 napos gőzölés és 7, 16, 36, 60 és 90 órás UV besugárzás hatására. (A bal alsó sarokban található a natúr faanyag színpontja, melyet időrendben követnek a kezelésekre hatással létrejött színpontok. A jobb felső sarokban lévő pontot a függvényvonalak meghosszabbítása jelölte ki.).....	69
53. ábra: A gőzölés hatása a nyár faanyag egyensúlyi nedvességartalmára	70

13. Táblázatjegyzék

1. táblázat: A Pannónia nyár faanyag főbb fizikai és mechanikai paraméterei (Molnár és Bariska 2006)	26
2. táblázat: A vizuális érzékelés és ΔE^* kapcsolata (Tolvaj 2012).....	33
3. táblázat: A minták világosság értékeinek szórása	40
4. táblázat: A minták vörös színezet értékeinek szórása	41
5. táblázat: A minták sárga színezet értékeinek szórása.....	42
6. táblázat: A gőzölés nedvességtartalomra gyakorolt hatásának szignifikancia vizsgálata	71