

Doktori (PhD) értekezés

Nyugat-magyarországi Egyetem

Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Tolvaj László egyetemi tanár

Doktori program: Faanyagtudomány

Programvezető: Dr. Molnár Sándor

Tudományág: anyagtudomány és technológiák

CÍM

**A fotodegradációs folyamat színváltoztató hatása a bútoriparban felhasználható
faanyagoknál**

Készítette:

Persze László

Témavezetők:

Dr. Tolvaj László

Dr. Varga Dénes

Sopron

2014

**A fotodegradációs folyamat színváltoztató hatása a bútoriparban felhasználható
faanyagoknál**

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

Faanyagtudomány (F1) programja.

Írta:
Persze László

Készült a Nyugat-Magyarországi Egyetem Cziráki József Doktori Iskola

Faanyagtudomány (F1) programja keretében

Témavezető: Dr. Tolvaj László és Dr. Varga Dénes
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton % -ot ért el,

Sopron:

.....
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

Második bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

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

Sopron,

.....
a Bírálóbizottság elnöke:

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

.....
az EDHT elnöke

Kivonat

A dolgozatban 15, a bútorgyártásban jelentős európai fafaj fotodegradációs tulajdonságait elemeztem. Ezek a fafajok: erdeifenyő, lucfenyő, vörösfenyő, akác, vadcserezsnye, amerikai cserezsnye, közönséges dió, éger, hár, hegyi juhar, magas kőris, pannónia nyár, bibircses nyír, kocsánytalan tölgy, gőzölt bükk. Négyféle vizsgálat történt: 30 és 80°C-on 800W higanygőz lámpás besugárzás; termikus kezelés 80°C-on teljes sötétségben; ablaküveg mögötti természetes besugárzás napfénnel.

A vizsgálatok alapján megállapítást nyert:

- A színváltozás szerint a 15 fafajt 3 jól elkülöníthető csoportba lehet besorolni.
- A fenyő faanyagok színe erőteljesebben változik a fotodegradáció hatására mint a lombos fáké.
- Az első 20 órában a természetes napsugárzás által okozott degradáció jellege jelentősen eltér a higanygőz lámpás besugárzás által okozott degradációtól.
- Kimutattam a hőmérséklet hatását a fotodegradációra. Nagyobb hőmérséklet jóval nagyobb vörös színezet változást okoz.
- A fény és a hőmérséklet egyidejű degradáló hatása nagyobb, mint a fény és a hőmérséklet külön- külön lévő degradáló hatásainak összege.
- Az erdeifenyő kivételével a vizsgált faanyagok színbeli inhomogenitása nőtt a fotodegradáció hatására, különösen igaz ez akác és amerikai cserezsnye esetében.
- Natúr állapotban lévő minták esetén lineáris összefüggés figyelhető meg a színezeti szög és a világosság között. A nagy extraktanyag tartalmú faanyagok kivételével a többi vizsgált fafaj pontjai jól illeszkednek egy pozitív meredekségű egyenesre.

Abstract

Colour change of the most important wood species in the furniture industry, caused by the photodegradation

In this dissertation the photodegradation properties of 15, most important European wood species in the furniture industry was analysed. The species are the following: pine, spruce, larch, black locust, wild cherry, black cherry, walnut, alder, linden, sycamore maple, european ash, pannonia poplar, silver birch, sessile oak, steamed beech. Wood samples were treated with 4 different methods: light irradiation with 800-watt mercury vapor lamp at 30°C and 80°C, thermal treatment at 80°C in total darkness, natural sunshine irradiation through window.

Based on the investigations, the followings can be stated:

- Based on the color changes, the investigated wood species can be classified into 3 different groups.
- The color change of softwoods, during photodegradation, is more intensive, than that of the hardwoods.
- In the first 20 hours of the treatment, the character of the sunlight induced degradation is significantly different from that caused by the mercury vapor lamp.
- The effect of the temperature on the photodegradation was demonstrated. Higher temperature causes more intensive red color change.
- The simultaneous degradation effect of light and temperature is greater than the sum of separate light and heat exposure.
- Except of the pine, the color inhomogeneity of the examined wood species, especially of the black locust and black cherry, increased during the photodegradation.
- Linear relationship was observed between the hue angle and lightness of the untreated samples. Apart from the wood species with high extractive content, values of the investigated species fit well to an upward line.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	7
2	A szakirodalom áttekintése	8
3	Vizsgálati anyagok és módszerek.....	16
3.1	Vizsgált anyagok	16
3.2	A vizsgálatba bevont fafajok asztalos- és bútorigipari felhasználásának bemutatása..	16
3.3	Fénybesugárzás.....	20
3.4	Színmérés.....	21
3.5	A szín fogalma és mérése	22
3.6	Műszeres színmérés.....	25
3.6.1	Tristimulusos színmérés	25
3.6.2	Spektrofotometriás színmérés	26
4	A vizsgálati eredmények értékelése	28
4.1	A színváltozás elemzése higanygőz lámpás és ablaküveg mögötti napfény besugárzás esetén	28
4.1.1	Vörös színezet változás	28
4.1.2	Sárga színezet változás.....	33
4.1.3	Világosság változás	37
4.1.4	Teljes színváltozás.....	40
4.1.5	Összefoglalás.....	45
4.2	A hőmérséklet hatása a faanyag fotodegradációjára	46
4.2.1	Világosság változás	46
4.2.2	Vörös színezet változás	48
4.2.3	Sárga színezet változás.....	51
4.2.4	Teljes színváltozás.....	55
4.2.5	Összefoglalás.....	57
4.3	A színváltozásokat jellemző statisztikai adatok elemzése.....	58
4.3.1	Akác	58
4.3.2	Amerikai cseresznye	60
4.3.3	Bükk	61
4.3.4	Cseresznye.....	62
4.3.5	Dió	63
4.3.6	Éger	63
4.3.7	Erdei fenyő	65
4.3.8	Hárs	66
4.3.9	Juhar	67
4.3.10	Kóris.....	68
4.3.11	Lucfenyő.....	69
4.3.12	Nyír.....	70
4.3.13	Nyár	70
4.3.14	Tölgy	72
4.3.15	Vörösfenyő	72
4.3.16	Összefoglalás.....	74
4.4	A kezeletlen minták színének elemzése	75
4.4.1	Összefoglalás.....	78
5	A kutatási eredmények összefoglalása	79
6	Az eredmények hasznosításának és a vizsgálatok továbbvitelének lehetőségei:	81
7	Az értekezés tézisei:	82
	Irodalomjegyzék.....	84
	A témában megjelent publikációk.....	90

Köszönetnyilvánítás	92
1.számú melléklet: fényképek	93

1 Bevezetés

A faanyag színe, a felhasználás tekintetében, az egyik legfontosabb paraméter. Ez a szín a vörös és a sárga között helyezkedik el, az európai fafajok esetében. A világos árnyalatok inkább sárga színezetűek, míg a sötétebb faanyagok barnás árnyalatúak. Azért kedveljük a fából készült termékeket, mert a barnás árnyalatú színük melegséget sugároz. A fa felületének egyedülálló, dekoratív rajzolata szintén fontos jellemző, és nagyban hozzájárul, hogy fából készült termékekkel vegyük körül magunkat.

A fából készült termékek színe változik, „öregszik” a termék élete során. Beltérben a fotodegradáció és a lassú termikus degradáció okozza a színváltozást. Kültérben ehhez még hozzájárul az esővíz kimosó hatása is. A világos színű faanyagoknál, elsősorban a fenyőkből készült termékeknél a legfeltűnőbb a beltéri színváltozás. A szín az évek során sötétedik, és barnás irányba tolódik el. Az átlátszó felületkezelő anyagok hasonló színváltozást okoznak, de a változás a felületkezeléssel azonnal megtörténik. Kültérben az esővíz kimossa a színeképző, vízben oldódó vegyületeket, és a színes degradációs termékeket egyaránt. A faanyag felülete évek múlva szürkévé válik, és a szín alapján nem lehet megkülönböztetni őket egymástól.

A vásárlói igények megkívánják, hogy a fogyasztókat informáljuk azokról a változásokról, amelyek bekövetkeznek a termék élete során. Bútorok esetében ilyen a színváltozás. Ezért fontos feltárni tudományos igénnyel a fából készült, beltérben használt termékek színmódosulásának időfüggését.

A fent leírtakra tekintettel a doktori munkában azt tűztem ki célul, hogy megvizsgáljam a bútór- és asztalosiparban Magyarországon felhasznált faanyagok színváltozását a degradációt gyorsító eljárás segítségével. Az intenzív fénybesugárzást megemelt (80°C) hőmérsékleten hajtottam végre. Ezen a hőmérsékleten már jelentősen felgyorsulnak azok a termikus folyamatok, melyek szobahőmérsékleten csak évek múlva láthatóak. Az összehasonlítás érdekében a fénybesugárzást elvégeztem 30°C-on, és napsugárzás segítségével ablaküveg mögött is.

2 A szakirodalom áttekintése

A faanyag nagyszerű színe a természet csodálatos alkotása. A trópusi fafajok között előfordul kékes árnyalatú faanyag is. Azért kedveljük a fából készült termékeket magunk körül, mert a barnás árnyalatú színük melegséget sugároz. Nem minden faanyag színe kedvező, mert jellegtelen szürkés árnyalatú, vagy túlságosan tarka. A fa felületének egyedülálló, dekoratív rajzolata szintén növeli a faanyagok beltéri felhasználását (Masuda 2001). A faanyag kellemes rajzolatát a korai és a késői pászta közötti színeltérés, és az évgűrűk „tekergő” de mégis rendezett lefutása adja.

A fából készült termékek színe változik a termék élete során. A legnagyobb változást az ultraibolya (UV) sugárzás okozza (Tolvaj 1994/a, Tolvaj and Faix 1995, Andrady et al. 1998, Müller et al. 2003, Tolvaj and Mitsui 2005). Az UV tartománybeli fotonoknak van olyan nagy energiája, amelyik képes kémiai kötésben lévő elektronok kiszakítására, ezáltal degradálódik a szerkezet. A szabad térbe kitett faanyagot sokféle behatás éri. Ezek közül a napsugárzás hatása a legintenzívebb. A szabadba kitett faanyagok esetében a napsugárzás mellett a csapadéknak van még jelentős szerepe a faanyag felületi degradációjánál. Az esővíz kimossa a degradációs termékeket és ezzel utat nyit a további rétegek fotodegradációjához. A faanyag színét alkotó vegyületek egy éves kitettség alatt szinte teljesen kimosódnak, és a felszín szürkévé válik (Tolvaj and Papp 1999). Beltérben a faanyag színe változik meg az öregedés során. A felszín sötétedik és barnul.

Számos nehezítő körülmény gátolja a szabadban, napsugárzásnak kitett faanyagok felületén lezajló elváltozások vizsgálatát. A napsugárzás intenzitása nemcsak a napszaktól függően változik, de az évszakok során is jelentősen változik a sugárzás intenzitása a napsugarak dőlési szögének megváltozásával. Az előre nem kalkulálható felhős időszakok pedig teljesen ellehetetlenítik a valódi napsugárzási idő kalkulálását. Az eső kimossa a vízdékony vegyületeket. A levegő páratartalma is befolyással van a színváltozásra, de a páratartalom a nap folyamán állandóan változhat. A fentiekre tekintettel a faanyagok fotodegradációját általában mesterséges fényforrások alkalmazásával szokás elemezni.

A besugárzások hatására történt kémiai változásokat az infravörös színek felvételével lehet a legkönnyebben detektálni. Ezt a módszert kezdetben elsősorban a fa egyik fő alkotó elemének a ligninnek a vizsgálatára alkalmazták. (Marton és Sparks 1967, Sarkanen és munkatársai 1967). Marton munkásságának köszönhetően a fa lignintartalmának megállapítására az aromás gyűrű 1510 cm⁻¹-es abszorpciós sávját használják. Marton a teljes visszaverődésen

alapuló módszer alkalmazásával figyelte meg a lignintartalom és a cellulóztartalom alakulását.

Hon és munkatársai (1983) vizsgálták, hogy a mesterséges fényforrások és a napsugárzás hatása mennyiben egyezik meg. Azt tapasztalták, hogy a szabadban elhelyezett - időjárás viszonyosságainak kitett minták - és a beltérben ultraibolya sugárzással kezelt minták közel azonos változásokat szenvedtek.

Dirckx és munkatársai (1987) az UV fény behatolásának mélységét vizsgálták. Kimutatták, amennyiben a minták és a fényforrás közé 25-100 mikrométer vastagságú fametszetet helyezünk, akkor a fametszetek szűrőkként fognak funkcionálni. Azt észlelték, hogy abban az esetben, ha a fametszet vastagsága eléri a 80 mikrométert, akkor az a teljes ultraibolya sugárzást elnyeli. Ez azt jelenti, hogy az UV fény nem hatol 80 mikrométernél mélyebbre a faanyagban. A kutatómunka során megállapították, hogy az ultraibolya fénydegradáló hatását oxidációs folyamatok követik.

Infravörös színeképek segítségével Kataoha és Kiguchi (2001) az UV sugárzás behatolási mélységét tovább árnyalta és kimutatták, ha kellően hosszú ideig éri besugárzás a mintát, 500 mikrométer vastagságon is találhatunk elváltozást xenonlámpás kezelés esetén. Ennek oka, hogy a fény hatására elinduló oxidációs folyamatok a fénynél jóval mélyebbre képesek a fába hatolni. (Müller és munkatársai 2003).

Hon és Feist (1986) kimutatták, hogy lombos fafajok esetében 1510 cm⁻¹-es sávon ugyanolyan degradációs jelenségnek lehetünk tanúi, mint a fenyőknél, azonban jelentős eltérés, hogy a lombos fafajok esetében 1600 cm⁻¹-es sávnál is csökken az abszorpció. Mindkét sáv a lignin aromás gyűrűjének abszorpciós sávja.

A XX. század végén a számítógéppel vezérelt diffúz reflexiós infravörös spektrométer alkalmazása jelentősen megkönnyítette a fa kémiai szerkezetváltozásának kutatását, hiszen ezzel képessé váltak a kutatók az egymásra halmozódó abszorpciós sávok jelentős részének szétválasztására és elemzésére. A falignin infravörös színeképek részletes feltérképezésében Faix és Beinhoff (1988) tettek jelentős lépéseket. Vizsgálataikkal az ujjlenyomat tartományban 54 abszorpciós sávot tudtak megkülönböztetni. Megadták az egyes sávok egymáshoz viszonyított relatív intenzitását is.

Mivel a faanyag nem átvilágítható, ezért az abszorpciós színeképet a reflexiós színeképből lehet kiszámítani a Kubelka-Munk elmélet segítségével. Kubelka és Munk az elméletüket gyengén abszorbeáló anyagokra dolgozták ki. Ennek ellenére az elméletet sikeresen alkalmazzák az erősen abszorbeáló faanyagra is. Jones és Heitner (1973) a Kubelka-Munk összefüggés alkalmazhatóságát vizsgálta 456 és 495 nm-es hullámhosszú fénnel tangenciális és radiális

fametszeteken. Arra a következtetésre jutottak, hogy az elmélet radiális fametszetről alkalmazható, míg tangenciális fametszetről nem. Ezzel szemben az eltéréseknek az oka abban keresendő, hogy a tangenciális metszetek eltérő mértékben tartalmaztak korai és késői pásztát, a korai és késői pásztá reflexiós tulajdonságai viszont nagymértékben eltérnek egymástól.

Az objektív, színmérő készülékkel történő színmérés még többnyire a laboratóriumi kutatómunkánál található meg. De az iparban is egyre nagyobb az igény az objektív színmérésre a szemrevételezés helyett. A kezeletlen fafelület objektív színmérésével foglalkozó első leírások Sullivan (1967) nevéhez fűződnek. Németh (1981, 1982, 1984) kezeletlen faanyagra vonatkozó mérései szerint a világossági koordináták (L^*) jól követik a vizuálisan megállapított sorrendet. Megállapította, hogy a kezeletlen faanyagok színezeti szöge (H^*ab) és világossága (L^*) között lineáris összefüggés áll fenn, s emiatt a nagy pontosságot nem igénylő szín összehasonlításokhoz elegendő a világossági értékek figyelembe vétele. A világosságra vonatkozó információt csak az Y színínger-összetevő hordozza, ezért elegendő csak az Y színínger-összetevők összehasonlítása. Phelps et al. (1983) és Phelps and Ginnes (1983) a kezeletlen faanyag felületének színét mérte. A színbeli rajzolatot vizsgálták, mely nagyon fontos a minőségi furnérgyártásnál. A személyi számítógépek megjelenése előtt azért is ritkán alkalmazták az objektív színmérést, mert az egyes színkoordinátákat bonyolult, köbgyökös formulákkal lehet meghatározni. Számítógép nélkül ez fáradságos munka volt.

Az objektív színmérés sokat segített a gőzölés gyakorlati problémáinak megoldásában is. Sokáig gondot okozott az akácgőzölésnél, hogy az egymást követő kezelések nem adtak megegyező színt, sőt jelentős színeltérések is mutatkoztak. A szisztematikus laboratóriumi vizsgálatok az objektív színmérés segítségével kimutatták, hogy az akác faanyag színváltozása nagyon érzékeny a gőzölési hőmérsékletre (Tolvaj et al. 2004). Ezen felismerés után már ipari méretekben is lehetett reprodukálni a kívánt színt az akácgőzölésnél, ha a gőzölési hőmérsékletet konstans szinten tartották.

Hasonló problémát jelentett a fehér és az álgesztes bükk faanyag színének homogenizálása gőzöléssel. Színméréssel állapították meg, hogy milyen hőmérsékleteken és mekkora gőzölési idővel lehet a fehér és az álgesztes bükk faanyag színét egymáshoz legközelebb hozni (Tolvaj et al. (2006). Megállapítást nyert, hogy a színváltozás 95°C alatt alig függött a hőmérséklettől. A színváltozás döntő része 16-20 óra alatt megtörtént. Ezen hőmérsékleti határ fölött viszont a teljes vizsgált időtartamon belül folyamatos volt a színváltozás, de a faanyag kedvezőtlen

szürkés színű lett. A gőzölést alkalmasnak találta a fehér és a színes álgeszt színének homogenizálására. Az optimális gőzölési hőmérséklet 95°C-nak adódott.

A fotodegradáció színváltoztató hatását mesterséges fényforrások felhasználásával szokták vizsgálni. De ezeknek a fényforrásoknak a fénykibocsátása nagyban különbözhet egymástól és a napsugárzástól. A fényforrások fára gyakorolt hatása abban különbözik, hogy milyen mértékben tartalmaznak UV sugárzást, illetve az UV sugárzásnak milyen a hullámhossz eloszlása. Az UV sugárzás hatásai közül a színváltozás az, amelyik leghamarabb észlelhető. A színváltozás mérését az utóbbi két évtizedben kezdték felhasználni a fotodegradáció vizsgálatánál (Taneda et al. 1989, Tolvaj 1994/b, Tolvaj and Faix 1995, Chang and Chang 2001, Ayady et al. 2003, Hansmann et al. 2006, Oltean et al. 2008, 2009, Wang and Ren 2008, Sharratt et al. 2009, Tolvaj and Mitsui 2010). Megállapították, hogy a kezelés elején nagyon intenzív a színváltozás, amely később lassul. A világosság csökken, és a sárga színezet növekszik az UV besugárzás hatására. A sok extrakt anyagot tartalmazó faanyagoknál a vörös színezet is jelentősen növekszik, de a változása számértékieg elmarad az előző kettő koordináta változásától.

A vizsgálatok egy részénél a teljes színváltozást határozták meg, mely egy értéként tartalmazza a világosság, a sárga- és a vörös színezet együttes változását (Chang and Chang 2001, Kamdem and Grelier 2002, Müller et al. 2003, Ayadi et al. 2003, Pandey 2005, Deka and Petric 2008, Oltean et al. 2008, Goktas et al. 2009/a, 2009/b). A teljes színváltozással az a probléma, hogy ebben a világosság változása a domináns, és így a színezet változásának hatása háttérbe szorul. Ellenben a szem számára a színezet változása jobban érzékelhető, mint a világosság változása.

Tolvaj és Faix (1995) három tűlevelű és két lombos fafaj fotodegradációs tulajdonságait vizsgálta 200 órás higanygőz lámpás besugárzásnál. Gyors színváltozást tapasztaltak a kezelés első 50 órájában, majd a változás lelassult. A 200 órás kezelés által okozott színváltozásnak a fele az első 50 órában történt. Intenzív és folyamatos sárgulást tapasztaltak, mely kismértékű vörös irányú színeltolódással párosult. Hasonló eredményeket kaptak Sharratt et al. (2009) lucfenyő xenonlámpás besugárzásánál. George et al. (2005) vancouveri termőhelyen nőtt, jegenyefenyő színváltozását vizsgálták kis teljesítményű (2 mW/cm²) higanygőz lámpás besugárzásnál. Azt találták, hogy a vörös és a sárga színezet egyaránt, kis mértékben csökkent a kezelés első néhány órájában, melyet intenzív színezetváltozás követett. Schnabel et al. (2009) egy évre, a szabadba kitett jegenyefenyő és vörösfenyő mintákat vizsgált. A jegenyefenyő sokkal gyorsabban elszürkült, mint a vörösfenyő. A kezelés végén viszont már csak kis különbség mutatkozott.

Az egyes faanyagok nem egyformán változtatják a színüket. Oltean et al. (2008) 16 fafaj színváltozását vizsgálták mesterséges, beltéri fénybesugárzás mellett. A tölgy mutatta a legkisebb színváltozást, míg a luc a legnagyobbat. Viszont csak a teljes színváltozást vizsgálták, ami nem alkalmas a színváltozás részletes elemzésére. Egy újabb munkában két nyár klón és az akác fotodegradációs színváltozását hasonlították össze (Oltean et al. 2010) ablaküveg mögötti napfény imitáció esetében. Megállapították, hogy a nyár klónok gesztje és szijácsa esetében alig történt vörös irányú színeltolódás a kezelés első 12 órájában. Ezzel szemben az akác esetében a vörös színváltozás döntő része az első 12 órában történt meg a 96 órás kezelés során. Az akácnál viszont alig volt sárga színezetváltozás.

Pandey (2005/a) két fafaj, *Hevea brasiliensis* (gumifa) és *P. roxburghii* (chir fenyő) színváltozását vizsgálta xenonlámpás besugárzás esetén. A két fafaj faanyaga világos volt a kezelés előtt (az L^* értéke 76 és 79 között változott). Megállapította, hogy a sárga színezet sokkal intenzívebben változott a kezelés elején, mint a vörös színezet. A színváltozásokat a lignin és a hemicellulózok degradációjával, illetve a degradálódott kémiai csoportok oxidációs termékeivel, karbonil alapú kromofór csoportok megjelenésével magyarázta. Megállapította, hogy a cellulóz nem vesz részt a fotodegradáció okozta színváltozásban.

Pastore és munkatársai négy trópusi fafaj színváltozását vizsgálta 350 nm hullámhosszú fénnel történt besugárzás hatására. Jelentős különbségeket találtak az egyes fafajok színváltozásai között. Az eltéréseket az extrakt anyagtartalombeli eltérésekkel magyarázták. Az extrakt anyagok jelenléte meghatározó szerepet játszik az egyes faanyagok színének kialakításában. A flavonoidok meghatározzák egy-egy adott fafaj színét. A színes faanyagok extraktanyagának zöme flavonoid, illetve azok származékai. Gyakran a flavonoidok a fában színtelen, leuko formában vannak jelen, ekkor a színt kezeléssel (oxidáció, savaklúgok, fémionok) lehet kialakítani (Sjöström 1993). Az akác sárga színezetért a robinetin, míg a tölgy színéért a kvercetin nevű flavonoid a felelős. Vizsgálták az extrakt anyagok hatását a faanyagok fotodegradációja esetén (Nemeth et al. 1992, Zakri et al. 2007, Chang et al. 2010). Mindegyik vizsgálat arra az eredményre jutott, hogy a kellő mennyiségben jelen lévő extrakt anyagok védik a lignint a rá káros UV sugárzással szemben.

A mesterséges fényforrásokkal történő besugárzásnál lényegesen eltérő hatások jelentkeznek attól függően, hogy a fényforrás milyen mértékben, és mely hullámhosszakon sugároz az UV tartományban. A szakirodalom tanulmányozása során megállapítható, hogy a különböző fényforrásokkal végzett vizsgálatok eredményeinek összehasonlítását kevés kutatás dolgozza fel. A témában kutatásokat végzett Podgorski és munkatársai (1996) akik a felületkezelt faanyagok degradációját kísérték figyelemmel szabadtéri és mesterséges időjárás

imitációkkal. Ota és munkatársai (1997) a császárfu furnér színstabilitását tesztelték napsugárzás és higanygőzlámpás besugárzás esetén. Tolvaj és Mitsui (2005) xenonlámpa, higanygőz lámpa és direkt napsugárzás színváltoztató hatását hasonlította össze. A napsugárzásnak kitett minták csak a napsütéses órákban voltak kint a szabadban, így a kitettségi idő megegyezett a fénybesugárzás idejével. A kitett próbatestek nem kaptak esőt. Megállapították, hogy a higanygőz lámpás kezelés mindegyik színkoordináta esetében lényegesen nagyobb változást okozott, mint a másik két kezelés. Az is kiderült, hogy a xenonlámpás kezelés csak hosszútávon imitálja jól a napsugárzás hatását. A kezelés első 100 órájában számottevő eltérések voltak a xenonlámpa és a napsugárzás hatása között, amit a színváltozás és az infravörös színek elemzése is jól mutatott.

A széles hullámhossz tartományban fényt kibocsátó fényforrások fotonjai sokféle kémiai változást képesek létrehozni a faanyag felszínén. A változások minimalizálása érdekében az utóbbi években egyetlen hullámhosszt kibocsátó lézerek alkalmazását kezdték el a fotodegradáció okozta kémiai változások felderítésére (Barta et al. 1998, 1999, Papp et al. 2004, 2005, Mitsui et al 2005, Pandey and Vuorinen 2008). A szerzők az infravörös színek változásait vizsgálták. A lézer alkalmazása ígéretes technika a fotodegradáció jelenségének részletes feltárására, de a lézer okozta színváltozás vizsgálatára nem találtunk adatokat a szakirodalomban. Csupán a széndioxid lézerrel (melynek hullámhossza az infravörös tartományba esik, 10,6 μm) keltett színváltozásra találtunk adatokat. A legnagyobb változás a világosság csökkenése volt. Megállapították, hogy a hemicellulózok degradálódtak a legnagyobb mértékben (Kacik and Kubovsky 2011).

Míg az elmúlt évtizedekben a színváltozások vizsgálata volt a kutatások fő iránya (mely témakörben Németh munkáinak van kiemelkedő jelentősége - Németh és Faix 1988, Németh 1989, Németh 1998), napjainkban a fotodegradáció és a termikus degradáció kölcsönhatásai elemzésének jut kiemelkedő szerep. Ezen a területen meghatározó szaktekinély Mitsui (Mitsui és munkatársai 2001, 2004/a, 2004/b, Mitsui és Tsuchikawa 2005). Mitsui azt találta, hogy a fotodegradáció és a termikus degradáció együtt sokkal erősebb változást produkál, mint a kétféle hatás külön-külön. A kétféle kezelést egymás után hajtotta végre, és a vizsgálatoknál a fénybesugárzást a hőközlés követte. A hőhatás színváltoztató hatása sokkal intenzívebb volt fénybesugárzás után, mint nélküle. A termikus kezelés a vörös színezet esetében produkált kiugróan magas emelkedést a fénybesugárzást követően.

Ahogy a termikusan kezelt faanyag (termofa) egyre nagyobb teret hódít el a kültéri faszerkezetek építésénél, úgy szaporodnak a termofa fotodegradációs tulajdonságait vizsgáló publikációk is. Miklecic és munkatársai (2011) három lomblevelű fafajon (bükk, kőris és

gyertyán) végeztek termikus kezelést 190 és 212°C-on. A fénybesugárzást az UVA tartományban emittáló lámpával végezték 32 nap időtartamig. A besugárzás kezdetén a termikusan nem kezelt faanyagok intenzív színváltozást szenvedtek, míg a hőkezelt minták színe közel azonosan változott a teljes fénybesugárzás során. Nyolc nap után a termikusan nem kezelt minták már alig szenvedtek színváltozást. A fénybesugárzás végén a termikusan kezelt és kezeletlen minták színe közel került egymáshoz. A világos, termikusan kezeletlen minták jelentősen sötétedtek a termikusan kezelték viszont világosodtak a fénybesugárzás során. Hasonlóan ellentétes változás történt a vörös színezet és a sárga színezet esetében is.

Stingl és munkatársai (2012) tölgy furnért hőkezelték 160 és 210°C között, 10°C-os léptékekkel, 90 perces időtartamig. A hőkezelt próbatesteket xenonlámpával sugározták be 125 óra időtartamig. A minták világosságának, telítettségének és színezeti szögének változását mérték. A termikus kezelés során sötétült minták a fénybesugárzás hatására világosodtak. A termikus hatásra vörös irányba eltolódott színezet a fényhatásra a sárga irányába változott. A telítettség is ellentétesen változott a két kezelés hatására. A termikus kezelés növelte, a fénybesugárzás csökkentette a telítettséget.

A nagyon kis extrakt anyagtartalommal rendelkező gumifán végzett termikus kezelést Srinivas és Pandey (2012), 225°C-on, 2; 4 és 6 órás időintervallumon, 400 Hgmm-es (vákuum) nyomáson. A fénybesugárzást 1000 wattos xenonlámpával végezték 300 órás besugárzási idővel. A gumifa a világos faanyagok közé tartozik 80 egység körüli világosság értékekkel. A termikus kezelés első két órájában ez a világosság közel a felére csökkent. A fénybesugárzás hatására a különböző időig termikusan kezelt sötét faanyag közel azonos módon világosodott függetlenül a termikus kezelés időtartamától. A sárga színezet szintén növekedett a fénybesugárzás hatására, de a változások nem voltak egyformák az egyes termikusan kezelt minták esetében. A 6 órás termikus kezelést kapott minták sárga színezete változott a legtöbbet (a 2 órás a legkevesebbet) a 300 órás fénybesugárzás során. Így a minták sárga színezete közelebb került egymáshoz a fénybesugárzás hatására. A szerzők az infravörös színeképeket is elemezve megállapították, hogy a termikus kezelés nem javítja a faanyag fotodegradációs tulajdonságait.

Rosu és munkatársai (2010) borostyánkősav anhidriddel kezelt jegenyefenyő minták fotodegradációs tulajdonságait vizsgálták, és a változásokat összehasonlították a kezeletlen minták változásaival. Megállapították, hogy a kezelt faanyag kis mértékben stabilabb volt higanygőz lámpás besugárzás hatására, mint a kezeletlen faanyag. A felületkezelő anyag koncentrációjának növelése javította a fotodegradációval szembeni ellenálló képességet. A

legnagyobb eltéréseket a kezelt és a kezeletlen faanyag között a teljes színváltozás adatai mutatták.

Régen úgy gondolták, hogy természetes hőmérsékleten (10-60 °C) a fotodegradáció mellett elenyésző jelentősége van a termikus degradáció hatásainak. Mitsui és Tsuchikawa (2005) -40 és 60°C között hőmérsékleteken végeztek fénybesugárzást. Bebizonyították, hogy alacsony hőmérsékleten (-40 °C) a fotodegradáció hatása sokkal kisebb a megszokottnál. Ezen az alacsony hőmérsékleten alig okozott színváltozást a fotodegradáció. A világosság és a vörös színezet változása 0-50°C között volt a legnagyobb, míg a sárga színezetváltozása -40 és -20°C között volt a legnagyobb.

A 60 °C fölötti hőmérsékleteken végzett fénybesugárzásokra nem találtunk példát a szakirodalomban.

Célul tűztük ki a fotodegradációs változások vizsgálatát megemelt hőmérsékleten. A mintákat 80°C hőmérsékleten sugároztuk be higanygőz lámpával. Az összehasonlítás érdekében 30°C-on is végeztünk kezelést ugyanazzal a fényforrással. Azért van jelentősége az emelt hőmérsékleten történő fotodegradáció vizsgálatának, mert a beltérben elhelyezett, fából készült termékek színváltozását a fotodegradáció és a termikus degradáció együtt okozza. A 80°C-ra megemelt hőmérséklettel és az erős ultraibolya fényforrással ezt a kettős hatást kívántuk gyorsított formában vizsgálni. Kontrollként kétrétegű ablaküveg mögötti napsugárzással is végeztünk besugárzást, szobahőmérsékleten.

Jelen vizsgálatok másik célja, hogy azoknak a faanyagoknak vizsgáljuk meg a fotodegradációs tulajdonságait, melyeket a faipar Magyarországon széles körben felhasznál, elsősorban bútortipari illetve belsőépítészeti célokra.

3 Vizsgálati anyagok és módszerek

3.1 Vizsgált anyagok

A vizsgálatokba azokat a fafajokat vontuk be, melyek a bútorigipari felhasználásnál számításba jönnek. A fenyők közül a vizsgálatba bevontuk az erdeifenyőt (*Pinus sylvestris* L.), a lucfenyőt (*Picea abies* Mill.) és a vörösfenyőt (*Larix decidua* L.). A lombos fafajok közül akác (*Robinia pseudoacacia* L.), vadcsereznye (*Prunus avium* L.), kései meggy vagy amerikai csereznye (*Prunus serotina* Ehrh.), közönséges dió (*Juglans regia* L.), éger (*Alnus glutinosa* L.), hárs (*Tilia cordata* Mill.), hegyi juhar (*Acer pseudoplatanus* L.), magas kőris (*Fraxinus excelsior* L.), pannonia nyár (*P. x euramericana Pannonia*), bibircses nyír (*Betula pendula* Roth) és kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) faanyagot vettünk vizsgálat alá. A fenyő minták felszíne világos korai pásztát és sötét késői pásztát egyaránt tartalmazott, sugárirányú metszeteket készítettünk. Vizsgáltuk még gőzölt bükk (gőzölési hőmérséklet: 95°C, gőzölési idő: 24h) faanyag viselkedését is. Azért esett a választás a gőzölt bükkre, mert vele a gőzöléssel elért, módosított színnek a tartósságát tudtuk megfigyelni. A bútorgyártásnál szívesen használják a gőzölt bükköt, mert színe esztétikusabb, mint a szürkésfehér, natúr bükk színe.

3.2 A vizsgálatba bevont fafajok asztalos- és bútorigipari felhasználásának bemutatása

A jó minőségű faanyagok elérhetőségének csökkenése, és a kereslet drasztikus növekedése miatt napjainkban alig-alig készítenek igazi tömörfából készült bútorokat. Aki mégis a valódi fa egyedi szépségére és kellemes tapintására vágyik, az is inkább a valódi fából készült vékony furnérlemez borítású lapanyagból készült bútorokat találhatja meg az üzletek kínálataiban. Mivel a fotodegradáció hatása a furnérlemezre ugyanúgy érvényes mint a tömörfára, így a dolgozatomban szereplő összes fafaj fotodegradációs vizsgálata fontos lehet azok bútorigipari alkalmazását illetően, függetlenül attól hogy a faanyagot mint tömörfa alapanyagot vagy mint vékony furnér borítást alkalmazzák.

A vizsgált fafajokat legjellemzőbb felhasználásuk szerint az alábbiak szerint lehet csoportosítani:

- Furnér- és lemezgyártáshoz leginkább használatos fafajok: Nyír, Nyár, Éger és Hárs
- Bútor- és furnérgyártáshoz egyaránt használt fafajok: Lucfenyő, Borovi fenyő, Juhar, Tölgy, Csereznye, Amerikai csereznye, Dió, Bükk, Kőris
- Főleg kültéri bútorok gyártásához használatos fafajok: Vörösfenyő, Akác

Fenyőfélék: a valódi tömörfa bútorok zöme valamilyen fenyőből készül, ami azonban közületi (nagyobb igénybevételnek kitett közösségi terek) felhasználásra nem alkalmas a fa mechanikai sérülékenységgel szembeni gyenge ellenállósága miatt.

Lucfenyő: közepes tartósságú faanyag, gomba és rovarkárosítókkal szemben nem ellenálló. Világos színű, homogén évgűrű szerkezetű, puha és könnyű faanyag. Nedvesség esetén vetemedésre, szárításkor repedésre hajlamos. Bútorgyártásban az erdeifenyő mellett a legnépszerűbb faanyag, főleg párnafának, vakfának, ajtótoknak, és beltéri bútorok készítésére alkalmazzák.

Erdeifenyő: a lucfenyőnél valamivel sűrűbb szerkezetű, kicsit vöröses árnyalatú faanyag, ami a fény hatására sötétedésre nagyon hajlamos. Könnyű beszerezhetősége miatt népszerű. Főleg lakossági és kültéri bútorok (pl. sörpad) vagy lambéria gyártására használják.

Vörösfenyő: gyantajáratokkal átszőtt vöröses fája rendkívül tartós és szilárd. Érdemes azonban óvni a közvetlen napsugárzástól és esőtől. Színe vöröses árnyalatú, egyenletes évgűrű szerkezetű. Középnéhez fa, ami jól megmunkálható. A fa minőségét a termőhely befolyásolhatja. Az ára miatt kevésbé elterjedt mint pl. a Borovi. Főleg kültéri burkolatok gyártására használatos.

Juhar: sárgásfehér színű, néha vöröses, vagy sárgásbarna tónussal, de jellemzően nagyon világos. A hegyi juhar fája például csaknem fehér. Gyakran látható rajta keresztirányú csíkosság, amit a hullámos rostfutás okoz. Az évgűrűk nem különülnek el egymástól markánsan. A faanyag nagy kopásállóságú, kemény de rugalmas, viszonylag könnyen megmunkálható. Jó műszaki tulajdonságai miatt népszerű fafaj a bútorgyártásnál. Főleg konyhabútor frontok vagy esztergált alkatrészek gyártására alkalmas, de népszerű világos színe miatt a furnérozott bútoroknál is jelentős piaca van. Padlózatra is javasolt a nagy kopásállóság miatt. Kedvező akusztikai tulajdonságai alkalmassá teszik hangszergyártásra is.

Nyír: nem tartós fafaj, a farontó gombákkal és rovarokkal szemben nem ellenálló. Színe tág határok között változik a világossárgától a közép barnáig, sokszor vörösesbarna bélfoltokkal tarkítva. Az évgűrűk nem különülnek el egymástól markánsan. Fája lágy, de szívós. A fő

erénye a rugalmassága, aminek köszönhetően jól hajlítható, így a rétegelt lemezgyártás egyik fő alapanyaga. Könnyen megmunkálható faanyag, azonban csak beltéri használatra javasolt.

Tölgy: a geszt és a szijács élesen elkülönül. A geszt sötétbarna, a szijács világosbarna színű. A szijács tartóssága alacsony, de a geszt tartós. Kemény, sűrű, de rugalmas faanyag ami jól megmunkálható, azaz könnyen fűrészselhető, gyalulható, marható, esztergályozható, csiszolható. Szilárd és nagyon tartós faanyag még víz alatt is. Időjárásálló, azonban a fémek a magas csersav tartalma miatt elszínezhetik (a csersav reakcióba léphet pl. a vassal). A faanyagot óvatosan kell szárítani, hiszen jelentős esztétikai károk keletkezhetnek az oxidációs elszíneződések, foltosodás által. Furnérozáskor előfordulhat enyvátütés. A világ bútoriparának egyik legnépszerűbb fája köszönhetően szép színének és rajzolatának, jó mechanikai tulajdonságainak, magas ellenállóságának és jó színezhetőségének. Bútoriparban jelentős a furnér alapanyag, de tömörfa alkatrészek (pl. T lécz, esztergált és faragott elemek) is készülnek belőle. Parketta és nyílászáró alapanyagként is kedvelt, a hajógyártásban még most is nélkülözhetetlen.

Éger: a fa rajzolatára nagyon jellemző a bélfoltok okozta tarkaság, és a határozottan futó évgyűrű szerkezet. Széles színskála jellemzi, hiszen a vörös fehértől a narancsig számos árnyalat fellelhető, ami idővel sárgás- vörösbarnára sötétedik. Könnyen megmunkálható faanyag, mely jól pácolható. Sajnos szárításkor könnyen reped, ráadásul tárolásnál a faanyag gyorsan fülled. A bútoriparban ezt a fafajt leginkább furnér és rétegelt lemez gyártásban használják. Minden mesterember egyformán szereti könnyű súlya, és jó megmunkálhatósága miatt, azonban kültéri célokra alkalmatlan.

Kőris: a kőris szijács részére, mely vöröses fehér vagy sárgás lehet kifejezetten jellemző a sárgulás. A geszt rész - mely a vöröses- fehértől a világosbarna színig számos árnyalatot mutathat - jellemzője a hosszú, finom rostok, a keménység és a szilárdság. A fa egészére elmondható hogy jól megmunkálható, rugalmas és tartós alapanyag, mely gőzölve hajlítható. Mint a legtöbb fafajnak azonban a kőrisnek is megvan a maga gyengesége. A szabadban például nem annyira tartós, gombákkal és rovarokkal szemben kevésbé ellenálló. Gyakori az oxidatív elszíneződés is. A kőrisből készült furnér, mutatós rajzolata miatt nagyon kedvelt. A bútoripar mellett számos ágazat használja ezt a fajta faanyagot keménysége és rugalmassága miatt. Többek között a sportszergyártók kedvelt anyaga. Készítenek belőle a téli sportok

szერelmesei számára szánkót és sílécet is. Az épületasztalos ipar parkettaagyártásra használja ezt a fafajt.

Cseresznye: ezt a faanyagot különleges színvilág jellemzi. Színe lehet vörösbarna, sárgászöld, de jellemző rá a csíkosodás, melynek színe általában zöld. Igen kemény, durva rostú, szolid anyag, mely jól megmunkálható és könnyen pácolható. A tölgy, bükk és juhar mellett a legkedveltebb bútorigari alapanyag, melyet furnérként alkalmaznak. A bútorigar mellett alapanyagként használja a cseresznyefát a hangszeragyártás, és számos iparművészeti alkotás is. Hátránya, hogy amennyiben fémmel kerül érintkezésbe, hajlamos az elszíneződésre.

Hárs: színvilága sárgától vörösbarnáig terjed, de mindig világos ami idővel kissé sötétedik. Az évgyűrűi kifejezetten markánsak, a textúrája mégis jellegtelen. A többi vizsgált faanyaghoz viszonyítva, zsugorodása jelentősnek tekinthető, de nem vetemedik. Ez a típusú faanyag nagyon lágy, kellően rugalmas éppen ezért jól megmunkálható. Mivel egyenletes a szövetszerkezete ezért minden irányban jól vágható és esztergályozható. Ez a fajta faanyag jellemzője hogy kb 3%-a viasz, ami a gyenge tartóssággal együtt a felhasználhatóságának körét szűkíti. Így csak vakfurnérnak vagy vakfának használható a bútorigarban. Emellett jelentős a felhasználása a faszobor- és hangszerkészítésben.

Dió: Ennek a fának a színét nagyban befolyásolja az, hogy hol terem. Általánosságban a geszt színe barna-sötétbarna, míg a szíjács színe szürkésfehér és barna árnyalatok között mozog. A geszt magas gomba és rovar ellenállósága miatt nagy a tartóssága. A faanyag eléggé kemény, szívós és jól hajlítható ez által könnyen megmunkálható. Nagyon népszerű bútorigari alapanyag. Szép szövetszerkezete esztétikus, így akár furnérként akár tömőrfaként nagyon népszerű, bár az ára miatt ritkábban használják. Megemlítenő, hogy nem csak a faanyag értékes, mivel a fa gyökeréből exkluzív furnér készíthető, melyet például az autóipar is használ a luxusautók belső terének díszítésére.

Nyár: nem tartós fafaj, a farontó gombákkal és rovarokkal szemben nem ellenálló. Fája nem túl jó minőségű puhafa, ami könnyen megmunkálható és hasítható. Mivel gyorsan növvő, magas fahozamú fáról beszélünk az utóbbi időben az ipari felhasználásuk egyre nő. Régebben főleg használati eszközöket, dobozokat, gyufát készítettek belőle, ma a papír- és farostlemez gyártás fő alapanyaga. Jellemzője hogy szárításkor kevésbé zsugorodik.

Amerikai cseresznye: színe narancsos-vörös, meglehetősen fényes felületű, amely a feldolgozás során még szembetűnőbbé válik. Jellemző rá a mézga táska, mely a mézga túlzott felhalmozódása miatt alakul ki, illetve a mézgafolyás. Fontos hogy színe az európai cseresznyéhez képest lassabban sötétedik. Maga a fa nem igazán tartós, azonban átlagos megmunkálhatósága és szép felülete miatt a belsőépítészetben mégis igen elterjedt. A furnérgyártásban jelentős alapanyag, hiszen kedveltsége mellett jól felületkezelhető. Megfelelő felületkezelő anyagokkal a fa fotodegradációja hosszú időre megelőzhető. Szilárdsági mutatói jók, csavarállósága magas.

Akác: könnyű beszerezhetősége, és érdekes színvilága (a szíjács világosságra, míg a geszt sárgásbarnától világoszöldig terjedő árnyalatú lehet) alkalmassá tenné a faanyagot a bútortipari felhasználásra, azonban a nagy keménysége, nehéz megmunkálhatósága, pácolhatósága és telíthetősége miatt kevésbé kedvelt alapanyag. Nagyon magas ellenállósága és extra magas keménysége miatt kiválóan használható kültéri fatermékek gyártására, pl. kerti bútor, kültéri burkolat, és kerítés gyártására, de fontos alapanyaga a jármű- és gépgyártásnak. A fával történő munka során figyelni kell a keletkező porra, mivel az irritációt okozhat a nyálkahártyán.

Bükk: színe sárgás - világosbarna, amely a gőzölés során vöröses tónust kap. Sokszor nagyon tarka, ami főleg az álgesztesedéssel áll kapcsolatban, ez azonban gőzöléssel kiküszöbölhető. A faanyag nagyméretű bélsugarai a húrmetszeten a bükkre oly jellemző „orsók” formájában láthatók. A faanyag keménysége szignifikáns, nem kifejezetten rugalmas alapanyag. Nem tartós fafaj, a farontó gombákkal és rovarokkal szemben nem ellenálló. Mivel nagyon jól megmunkálható és sűrű szövetszerkezete miatt könnyen pácolható, valamint könnyen beszerezhető, ezért a bútortiparban az egyik legnépszerűbb alapanyag mind furnérként mind tömőfaként. Gőzölve jól hajlítható, a vetemedésre hajlamos alapanyag vetemedése csökken míg ellenálló képessége megnő, ezért a gőzölt bükk faanyag a székgyártás egyik fő alapanyaga. Nagyon jellemző felhasználási helye a rétegelt lemezgyártás. Kültéri felhasználásra csak teljes telítés után használható.

3.3 Fénybesugárzás

A fénnel történt besugárzást egy szabályozható hőmérsékletű klímakamrában végeztük el. Fényforrásként két higanygőz lámpát használtunk. A két lámpa együttes elektromos teljesítményfelvétele 800 watt volt, és a minták 64 centiméterre helyezkedtek el a

fényforrásoktól. A higanygőz lámpa emissziójának 80%-a az ultraibolya (UV) tartományba esett. A kibocsátott UV fény 31%-a az UV-A (380-315 nm) tartományba, 24%-a az UV-B (315-280 nm) tartományba és 25%-a az UV-C (> 280 nm) tartományba esik. A kamra hőmérsékletét 80°C-on stabilizáltuk.

Gőzölési tapasztalatok alapján 95°C környékén a degradáció minősége megváltozik, ezt valószínűleg a 100°C-on lebomló hemixelulózok okozzák. Azért választottuk a 80°C-os hőmérsékletet, mert feltételeztük hogy 95°C alatt a degradáció minősége még nem változik, azonban alkalmazva Arrhenius törvényét, miszerint a hőmérséklet emelkedésével a kémiai reakciók sebessége exponenciálisan nő, ez a hőmérséklet jó lehetőségnek tűnt hogy a fotodegradáció mellett a termikus degradációs folyamatok is kellően felgyorsuljanak. Így kívántuk felgyorsítva imitálni azt a lassú színváltozást, amelyik a bútorok esetében megtörténik az évek során a fény- és hőhatás eredményeként. A termikus degradáció és a fotodegradáció hatásának szétválasztása érdekében, ugyanabban a kamrában kezeltünk próbatesteket 80°C-on a fényforrások bekapcsolása nélkül, teljes sötétségben. Továbbá 30°C hőmérsékleten is sugároztunk be mintákat higanygőz lámpával. A vizsgálatokhoz fafajonként 20-20 mintadarabot készítettünk 100x30x10 (mm) méretekkkel. A mintadarabok és a klímakamra fotói az 1. mellékletben találhatóak.

Kontrollként mintákat helyeztünk kétrétegű ablaküveg mögé az egyetem laboratóriumában. Az ablak délnyugat felé nézett, és a minták felülete 45°-os szöget zárt be a vízszintessel. A faanyag csak napsütéses időben voltak az ablak mögött 9-16 óra között, 2010. május és szeptember időintervallumban. Az ablaküveg a napsugárzásban lévő ultraibolya fény döntő részét elnyeli. Így ezzel a vizsgálattal elsősorban a látható fény hatását lehet demonstrálni. A besugárzások között a próbatesteket teljes sötétségben tároltuk.

3.4 Színmérés

A színváltozást egy Konica-Minolta 2600d típusú színmérő készülékkel követtük. A színmérő készülékről fotó az 1. mellékletben található. A színmérést a kezelési idő megszakításával, 0; 8; 20; 40; 90 és 200 órás kezelés után végeztük el, mindegyik kezelés esetén. Próbatestenként 10 ponton végeztünk mérést, így az eredményeink 200 mérési adat átlagaként adódtak. Az adatokat a CIE $L^*a^*b^*$ színekoordináta rendszerben adtuk meg. A mérési eredmények a D_{65} fényforrásra vonatkoznak, 8 mm átmérőjű mérési felület esetén, 10°-os megfigyelés mellett.

3.5 A szín fogalma és mérése (Tolvaj 2013 alapján)

Szín: a szembe hatoló sugárzás által kiváltott tudattartalmat jelöli. A színingert az emberi szembe jutó 380 nm és 760 nm közötti hullámhosszúságú látható fény váltja ki. Az emberi szemben a csapok a színlátás receptorai, az általuk érzékelt színek a vörös, a zöld és a kék. E három szín adja a trikromatikus színelmélet alapját.

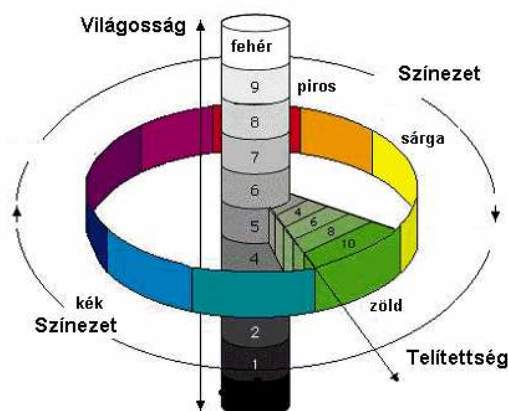
A szín lehet: fizikai, fiziológiai és pszichológiai fogalom.

- Fizikailag, a szín 380-760 nm hullámhosszúságú elektromágneses sugárzást jelent.
- Fiziológiailag, a szín a fény által szemünkben kiváltott inger.
- Pszichológiailag pedig a szín, a fény által szemünkben kiváltott inger hatására keletkező érzet.

A színeknek három alapvető tulajdonsága van (1. kép):

- Színezet (színesség): egy adott szín fő jellemzője, amely lehet vörös, narancs, sárga, kék és bíbor, vagy ezek kombinációi. A színezetek folyamatosan mennek át egymásba.
- Telítettség (króma): egy megadott szín erőssége, tisztasága, egy felület saját világosságához viszonyított színezetdúsága. A telített (vagy tiszta, élénk) szín és a teljesen telítetlen, semleges színek (fekete, fehér, szürke) között változhat az árnyalat. Egy szín annál telítettebb, minél kevesebb szürkét tartalmaz.
- Világosság (tónus): egy felület több vagy kevesebb fényt bocsát ki, enged át vagy ver vissza.

Abban az esetben tekinthető azonosnak két szín, ha ez a három tulajdonságuk megegyezik.



1.kép A színek három tulajdonsága a színinger-térben ábrázolva.

A színingerek számokkal való leírását az egyes színmérő rendszerek eltérő módszerek alapján végzik. Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE: Commision Internationale de l'Eclairage) 1931-ben elfogadta az additív színkeverésen alapuló színmérő rendszert. A színingerek additív keverése olyan eljárás, melynek során az eltérő színű fények ugyanakkor

vagy egymás után hamar következve lépnek a szembe és a retinának ugyanarra a pontjára vagy olyan mozaikalakban helyezkednek el, hogy az észlelő nem tudja őket szétválasztani.

Grassmann által 1853-ban feltárt törvények tették lehetővé az objektív színmérést. Ezek a törvények írják le a színingerek keverésének tulajdonságait:

- A színinger jellemzők meghatározására három egymástól független változó szükséges és elegendő.
- Az additív színinger keverés szempontjából a színingerek színinger jellemzői számítanak és nem a színingerek spektrális összetétele.
- Ha a színingerek additív színinger keverésben egy vagy több összetevőt folyamatosan változtatnak, az eredményül kapott színinger jellemzők is folyamatosan változnak.

Összességében tehát az additív színkeveréssel két szín keverékéből egy új, harmadik színt állíthatunk elő.

Ezek alapján bevezették:

- az X, Y, Z trikromatikus mérőszámokat,
- a CIE standard fényforrásokat,
- a CIE színinger megfelelő függvényeket.

A színmérés alapvető feltétele olyan színinger-tér kidolgozása, amelyben minden színt egy önálló pont jelöl, így 1931-ben létrehozták a nemzetközileg elfogadott CIE XYZ színmérő rendszert. A színinger-tér három koordinátával jellemzi a színeket. Az X a vörös, az Y a zöld és a Z a kék tartalmát jelenti az adott színnek.

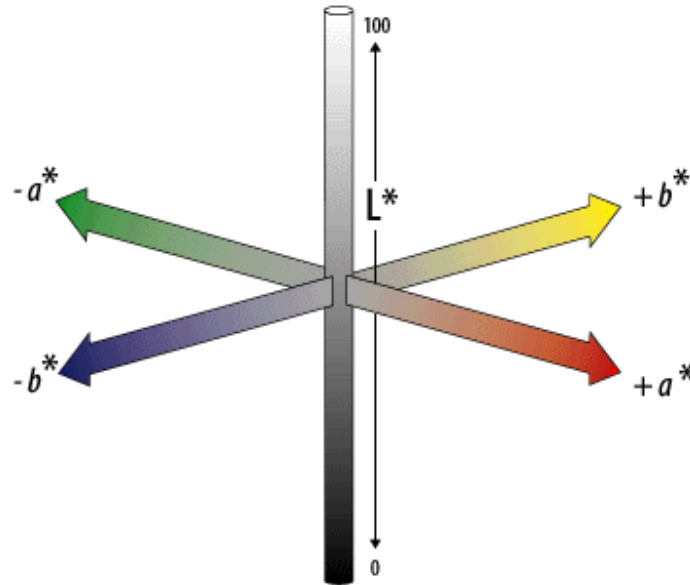
A színmérés elterjedésével fontossá vált a színdifferenciák precíz meghatározása. Mivel kiderült, hogy a nemzetközileg elfogadott színinger-tér nem egyenletes, ezért a CIE kidolgozta és bevezette a CIELAB színinger-teret, ami már csaknem egyenletes eloszlású.

Ebben a rendszerben a színpontokat az L^* , a^* , b^* értékekkel jellemezzük. A mérésakor mindig egy etalont (általában fehér etalont) kell alkalmazni. A vizsgálatoknál mi is fehér etalont alkalmaztunk. A mért színkoordináták eredményét befolyásolja az alkalmazott sugárelosztás és látómező. Méréseinknél D_{65} fényforrást és 10° -os megfigyelést alkalmaztunk.

A CIELAB színtér alapja az ellentétes színpárok rendszere. A lényege, hogy a receptorok által kibocsátott jelek világos vagy sötét, piros vagy zöld és kék vagy sárga kategóriába sorolhatók. Tehát nem lehetséges az, hogy egy szín egyszerre piros és zöld, kék és sárga is legyen. Így egyetlen koordinátával, az „a”-val mérhető a pirosság vagy a zöldesség mértéke, a „b” koordinátával a kékség vagy sárgaság és végül az „L” koordinátával a szín világossága.

A színpontokat az L^* , a^* , b^* térbeli derékszögű koordináta-rendszerben ábrázoljuk (2. kép).

A 2. kép jól szemlélteti, hogy a függőleges tengelyen lévő L^* számértéke 0 és 100 között alakulhat. A 0 az abszolút sötétet, vagyis a feketét, míg a 100 a világosat, fehéret jelenti. A két vízszintes, egymásra merőleges tengelyen lévő $+a^*$ jelentése a piros, $-a^*$ a zöld, $+b^*$ a sárga és végül a $-b^*$ a kékét jelenti.



2. kép A CIELAB színtér térbeli ábrázolása.

Két színpont távolságát színínger különbségnek nevezzük; jele az $E^*_{1,2}$, ami megadja a két minta közötti vizuális különbség mértékét. Értéke a térbeli Pithagorasz-tétel segítségével kiszámítható:

$$E^*_{1,2} = ((L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2)^{1/2}$$

ahol a kettes index a mérendő minta színpontjának koordinátáit, míg az egyes a viszonyítási pont, vagy az etalon koordinátáit jelenti. A színínger különbséget egyazon színpont színének változására is értelmezhetjük, ekkor teljes színeltérésről vagy teljes színváltozásról beszélünk.

A CIELAB króma a telítettség jellemzője, a színpontnak az L^* tengelytől való távolsága:

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

H^*_{ab} színezeti szög az a^* és b^* szíinkoordinátákból határozható meg:

$$H^* = \arctan b^*/a^*$$

Lényeges kérdés az, hogy milyen kapcsolat van az E^* színínger különbség értéke és a vizuális érzékelés között. A szemünk, színkülönbség-észlelő adottságunk nincsen „skálázva”, de az eltérés mértékét szavakkal ki tudjuk fejezni. Abban az esetben, ha szemünkkel nem érzékelünk eltérést két színpont között, akkor meg kell állapítani, hogy milyen értékhatár között mozog a színínger különbségük. Ezt befolyásolják például a felület tulajdonságai, amit

színpontokkal jellemzünk. Az 1. táblázatban összefoglalt értékhatárokat gyakran használják. Ezt eredetileg egy angol papíripari előírás tartalmazza, amit papíripari termékek minősítésére dolgoztak ki és használtak.

1.táblázat A vizuális érzékelés és E^* színínger különbség kapcsolata

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

A rajzoltos és tarka felületek esetén a fenti táblázatban megadott adatok nem mérhetőek. Ilyen esetekben kevésbé érzékeljük a különbségeket. Ez mondható el a faanyagokra vonatkozóan is.

3.6 Műszeres színmérés

A színmérők olyan készülékek, amelyek a színes tárgy, mérendő felületéről valamilyen optikai eszköz segítségével számszerűsített értékeket adnak. A színmérő készülékeket mérési alapelvük alapján két csoportba sorolhatjuk:

- színmérésre kifejlesztett spektrofotométerek
- tristimulusos színmérő készülékek.

A műszeres színmérés alkalmazása egyre szélesebb körben terjed el. Az ipari felhasználás során elsősorban színellenőrzés, szín-összehasonlítás vizsgálatokat folytatnak, amelynek folyamán főként a színkülönbség számítását használják fel.

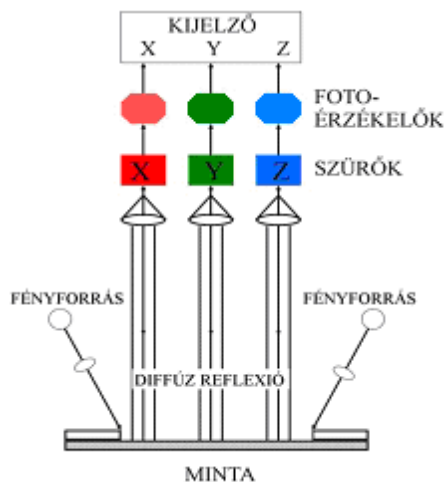
3.6.1 Tristimulusos színmérés

A 60-as évek végén 26 fajta tristimulusos színmérő volt ismert (Hammond 1969). Körülbelül a 70-es évek végére már csak 18 készüléktípusról számoltak be, de ezeknek a fele elsősorban csak tájékoztatásra, a színkülönbség jelzésére alkalmasak.

A tristimulusos színmérő készülékek az emberi szemet modellezik, így működési elvük teljesen eltér a spektrofotométeres berendezésektől. A berendezésben a minta megvilágítása valamilyen CIE fényforrás segítségével történik. Három optikai szűrőt építenek be a

rendszerbe, melyek segítségével megvalósítható, hogy három meghatározott hullámsávban mérjenek (piros, zöld, kék). A berendezés precizitása függ a szűrők minőségétől és a spektrális megfeleltetésük pontosságától (3. kép).

Mérés előtt ezeket a színmérőket ismert színjellemzőjű etalonnal kalibrálni kell.

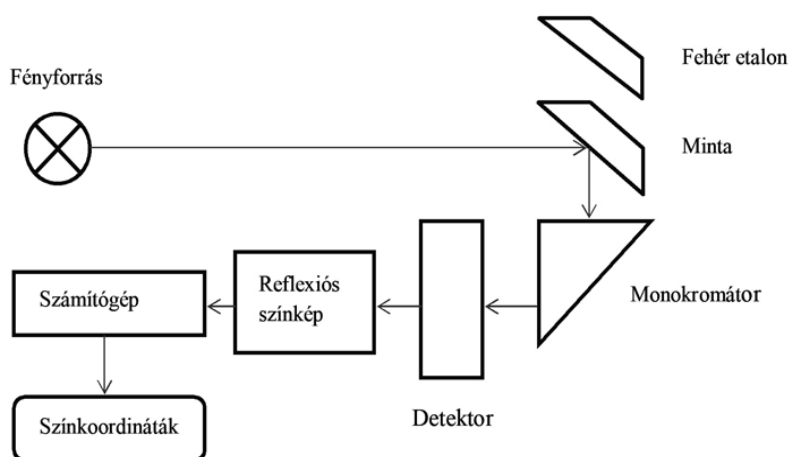


3. kép A tristimulusos színmérők sematikus elve

3.6.2 Spektrofotometriás színmérés

Az első ipari spektrofotométer gyártását az amerikai Beckman-cég kezdte el 1941-ben. A készülékeknek szigorú elvárásoknak kell megfelelni. Ilyen követelmény, hogy a mérési geometriának meg kell egyeznie valamelyik CIE előírással, illetve a színmérési ismétlőképességnek is meg kell, hogy feleljen. A spektrofotometriás színmérő berendezések a CIE által szabványosított fényforrás és mérőgeometria alkalmazásával állapítják meg a mérendő felület spektrális reflektancia értékét.

A spektrofotometriás színmérő berendezések felépítésének egyik lehetséges elrendezését mutatja a 4. kép.



4. kép A spektrofotométeres színmérő készülék felépítése

A detektorokból egy egész sort raknak egymás mellé. Mindegyik egy 10 nanométeres tartományra érzékeny, és úgy helyezik el őket, hogy éppen az érzékenységüknek megfelelő hullámhosszak essenek rájuk. A készülék mindig a reflexiós színeképet határozza meg, és ebből kalkulálja ki a beállított adatokat (esetünkben az L^* , a^* , b^* színkoordinátákat). Az általunk használt Konica-Minolta 2600d típusú színmérő készülék is ezen az elven működik.

A színmérést a kezelési idő megszakításával, 0; 8; 20; 40; 90 és 200 órás kezelés után végeztük el, mindegyik kezelés esetén. Próbatestenként 10 ponton végeztünk mérést, így az eredményeink 200 mérési adat átlagaként adódtak. Az adatokat a CIE $L^*a^*b^*$ színkoordináta rendszerben adtuk meg. A mérési eredmények a D_{65} fényforrásra vonatkoznak, 8 mm átmérőjű mérési felület esetén, 10° -os megfigyelés mellett.

4 A vizsgálati eredmények értékelése

4.1 A színváltozás elemzése higanygőz lámpás és ablaküveg mögötti napfény besugárzás esetén

4.1.1 Vörös színezet változás

A színmérés eredményeit összehasonlítva megállapítottuk, hogy a fafajok között a legnagyobb eltérések az a^* , vörös színezetben mutatkoztak (1-6. ábrák). Az eltéréseket a 80°C-on történt fénybesugárzás adatainak részletes elemzésével mutatjuk be. Az egyforma változókat tartalmazó grafikonok tengelyeire egyforma osztásközt és azonos intervallumot vittünk föl a korrekt összehasonlítás érdekében. A vörös színezet változása alapján a vizsgált fafajokat 3 csoportba oszthatjuk be. A többi színkoordináta elemzése is hasonló csoportosítást mutat, csupán az eltérések voltak kisebbek.

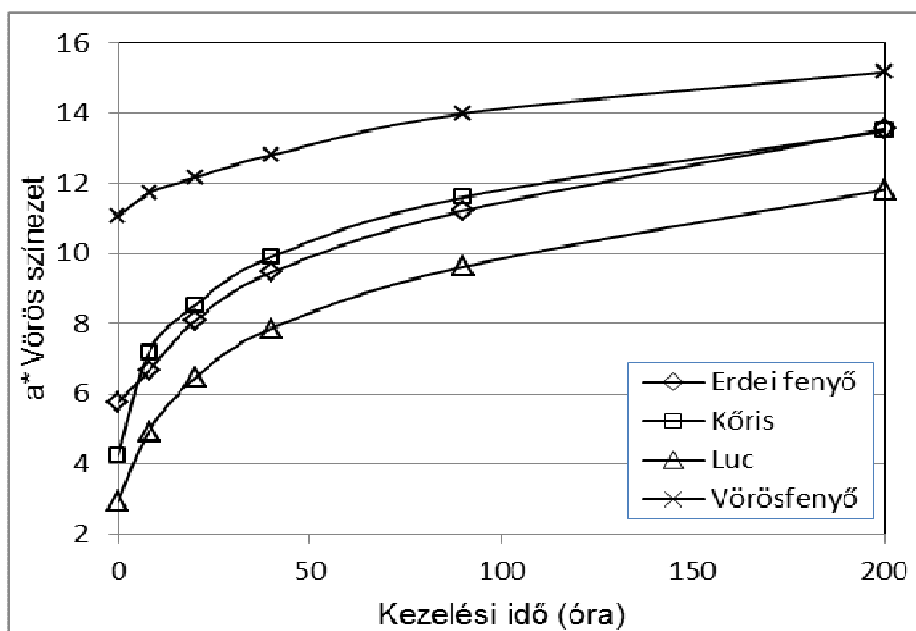
Az **első csoportba** a fenyőféléket és a kőrist soroltuk (1. ábra). A higanygőz lámpás besugárzás során folyamatosan emelkedett a vörös színezet értéke ennél a csoportnál. A növekedés az első 40 órában intenzívebb volt, mint a kezelés további részében. A besugárzás utolsó 140 órájában a vörös színezet gyakorlatilag lineárisan növekedet a kezelési idővel.

A **második csoportba** az akácot, az amerikai cseresznyét, a vadcserezsnjét, az éget, a hársat és a diót soroltuk (2. ábra). Ezeknél a fafajoknál nagyon intenzív vörös irányú színeltolódást figyeltünk meg a kezelés első 8 órájában. Ezt követően a változás lelassult, és 40 óra után a vörös színezet már nem változott számottevően. A csoportban kitűnik az akác erőteljes vörös színezet-növekedése. Ez a változás az akácnál közel háromszor akkora volt, mint a többi fafajnál. Az akác színváltozását a legkisebb változást a dió mutatta, és az egyetlen fafaj volt a csoportban, amelyik a 8 órás kezelést követően, végig kismértékű vörös színezet emelkedést mutatott.

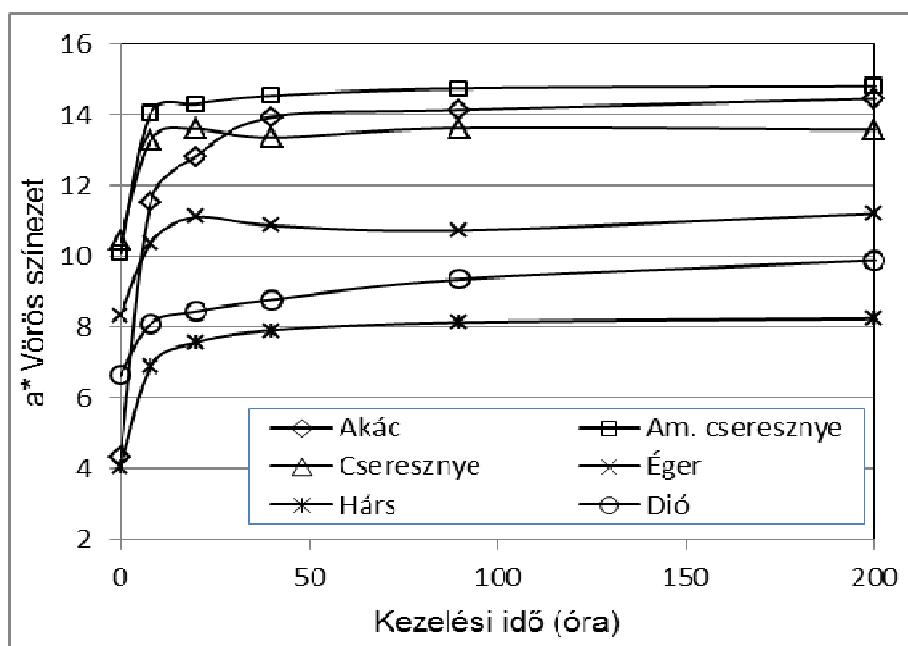
A **harmadik csoportba** (3. ábra) azok a faanyagok kerültek, melyek az első 8 órás kezelés során végbement lényeges vörös irányú elszíneződés után további és folyamatos, de kismértékű vörös irányú eltolódást mutattak (gőzölt bükk; juhar; nyár; nyír; tölgy). A nyír és a gőzölt bükk minták kismértékű eltérést mutattak a csoport többi tagjához képest. Náluk nem volt intenzív változás a kezelés első 8 órájában, és a vörös színkoordináta változása közel lineáris volt az egész 200 órás kezelés során.

A higanygőz lámpás besugárzás nagyon intenzív fényhatást jelentett a minták számára. Ezért is használják a változások gyorsított imitálására. A valóságban a lakásunk bútorait ennél lényegesen kisebb fényteljesítmény éri. Ezért végeztünk napfénnel történő besugárzást

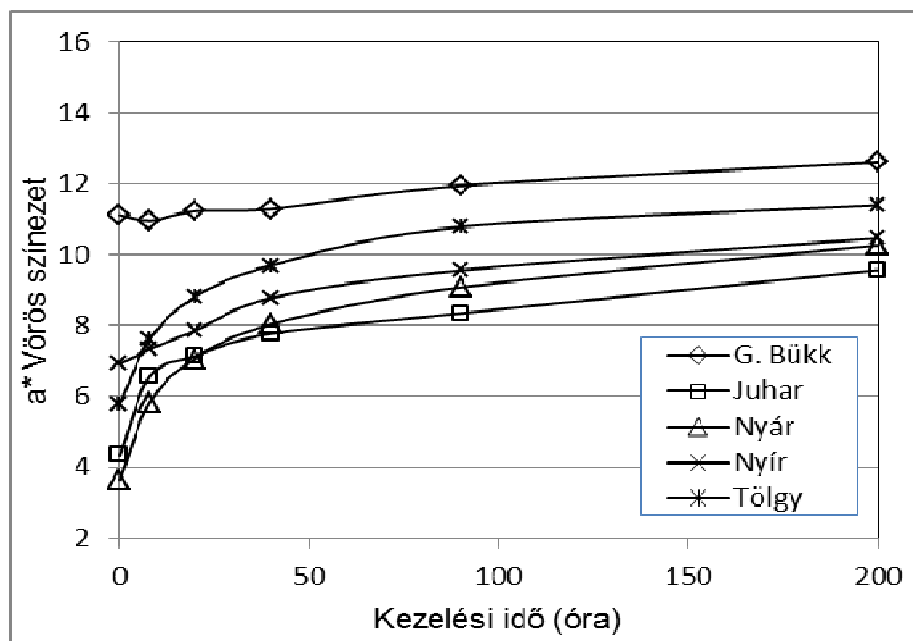
kétrétegű ablaküvegen keresztül. A kisebb fényintenzitásnak köszönhetően, a színekoordinátáknál is kisebb mértékű változások voltak várhatók.



1. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő vörös színezetének változása higanygőz lámpás besugárzásnál.



2. ábra Az akác, a kései meggy, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió vörös színezetének változása higanygőz lámpás besugárzásnál



3. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy vörös színezetének változása higanygőz lámpás besugárzásnál

Meg kell jegyezni, hogy ez a kezelés is lényegesen intenzívebb volt annál, mint amennyi fény a bútorokat általában éri, mert a mintáink közvetlenül az ablaküveg mögött helyezkedtek el a besugárzás során. Ezért az általunk alkalmazott napfénybesugárzás az ablaküveg mögött egy gyorsított változást produkált a beltéri bútorok fotodegradációjához képest. A bútorok többségét nem éri direkt napfény, vagy csak rövid ideig naponta.

A hosszú távú változások imitálásához a higanygőz lámpákat célszerű alkalmazni, mert rövid idő alatt jelentős változást produkálnak. A rövidtávú napfény imitációra viszont a higanygőz lámpák nem alkalmasak (Tolvaj és Mitsui 2010).

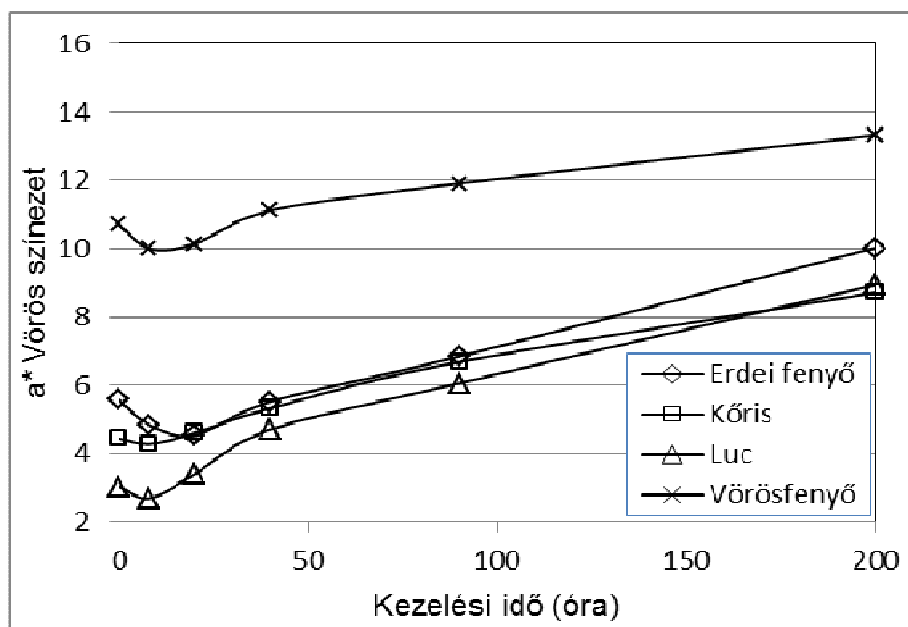
A 200 órás ablaküveg mögötti napsugárzás hatására a színváltozás mindegyik koordináta esetében kisebb mértékű volt, mint a higanygőz lámpás besugárzás hatására. A vörös színezet változása alapján a fajokot ugyanazokba a csoportokba lehetett besorolni a napfénybesugárzásnál, mint a higanygőz lámpás besugárzásnál (4-6. ábrák). A változások jellege viszont más volt, különösen a kezelés első 8 órájában. Tapasztalható volt az a korábbi megfigyelés (Tolvaj és Mitsui 2005), hogy a napsugárzás hatására a vörös színezet nem változott, illetve csökkent a kezelés első néhány órájában.

Az **első csoportba** sorolt faanyagok mindegyikének csökkent a vörös színezete a besugárzás első 8 órájában (4. ábra). Egyetlen kivétel az erdei fenyő volt, mert a csökkenés itt 20 óráig tartott. Ezt követte a vörös színezet értékének folyamatos növekedése. Az utolsó 160 órában

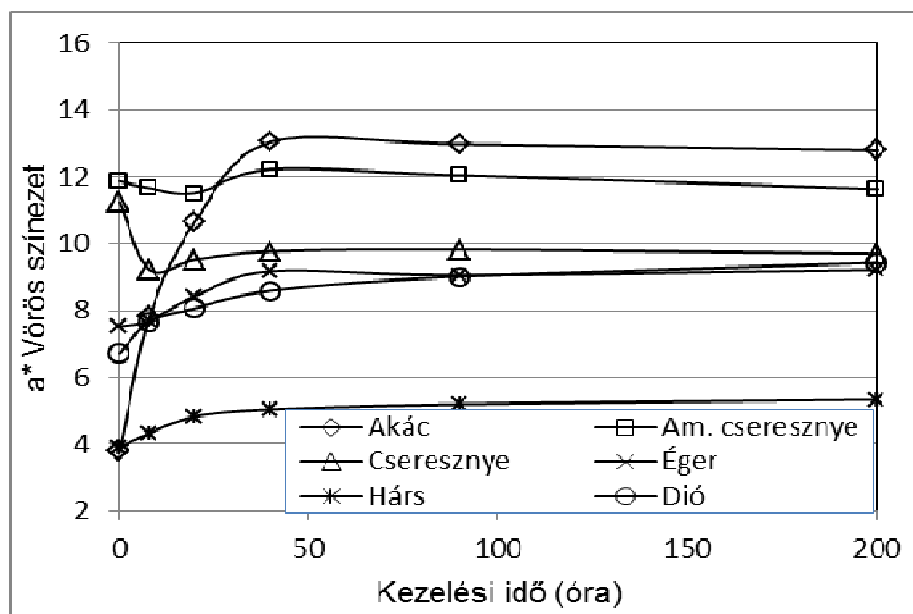
viszont már ugyanakkora változás történt a napsugárzás hatására, mint a higanygőz lámpás kezelésnél.

A **második csoportba** sorolt fajoknál (5. ábra) csupán a kétféle cseresznye faanyagánál csökkent a vörös színezet az első 8 órás ablaküveg mögötti besugárzásnál. A többi minta esetében az első 8 órában növekedést tapasztaltunk, de a változás üteme lényegesen gyengébb volt, mint higanygőz lámpás besugárzás esetében. Ennél a kezelésnél az akác jelentette az egyetlen kivételt, melynek vörös színezete a napsugárzás hatására is közel ugyanúgy változott a teljes időtartományban, mint a higanygőz lámpás besugárzásnál (2. és 5. ábra). A kezelés utolsó 160 órájában a vörös színezet a csoport faanyagainak egyikénél sem változott.

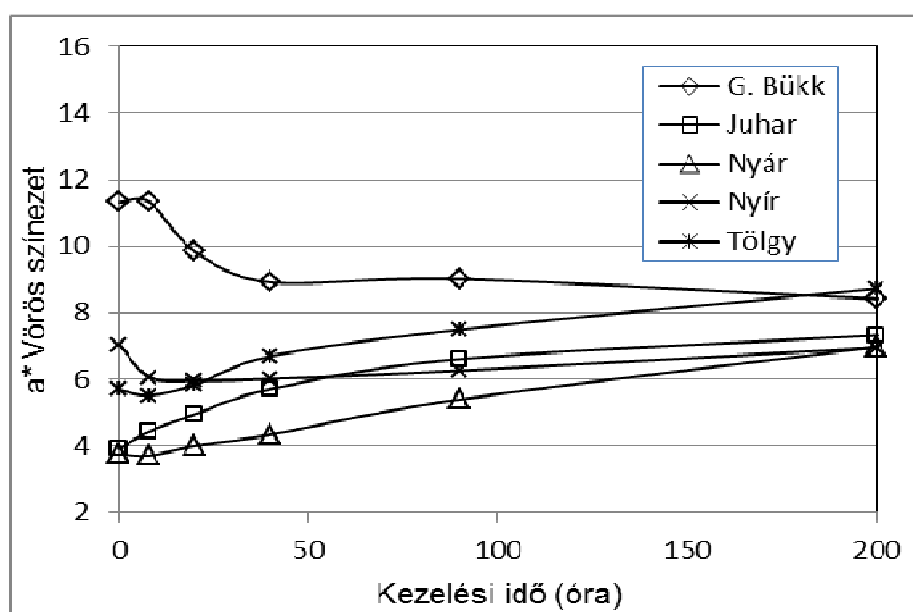
A **harmadik csoportnál** (6. ábra) a gőzölt bükk vörös színezete másként változott az ablaküveg mögötti napfénybesugárzás hatására, mint a csoport többi tagjáié. Az első 8 órában nem történt változás, majd jelentős csökkenés mutatkozott, egészen a 40 órás kezelésig. A kezelés további részében minimális a^* koordináta csökkenés volt megfigyelhető. Az intenzív besugárzást produkáló higanygőz lámpa esetében is csak minimális vörös színezet növekedést produkált a gőzölt bükk (3. ábra). A jelenséget azzal magyarázhatjuk, hogy a gőzölés közben képződnek olyan kromofór csoportok, melyek a gőzölt bükk kellemes rózsaszínes árnyalatát adják (Tolvaj and Molnar 2006). Ezek a kromofór vegyületek a fotodegradáció során elbomlanak, de az ultraibolya sugárzás is produkál kromofór csoportokat.



4. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő vörös színezetének változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



5. ábra Az akác, a kései meggy, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió vörös színezetének változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



6. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy vörös színezetének változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.

Az ablaküveg mögötti napfénybesugárzás esetében a bomlás intenzívebb, mint az új kromofór csoportok keletkezése. A higanygőz lámpás besugárzásnál viszont az intenzív UV sugárzás

hatására a fotodegradációt követő oxidációs folyamatok által keltett kromofór csoportok száma meghaladja a lebomló kromofór csoportok számát. A nyír jelentős, a tölgy és a nyár jelentéktelen vörös színezet csökkenést, a juhar viszont kismértékű vörös színezet növekedést mutatott a napfénybesugárzás első 8 órájában. A kezelés utolsó 160 órájában közel akkora vörös irányú eltolódást mértünk ennél a 4 fafajnál, mint a higanygőz lámpás besugárzásnál.

A 15 fafajt magában foglaló mintasorozat alkalmas volt arra, hogy a natúr állapotban jelentősen eltérő vörös színezetű minták viselkedését tanulmányozzuk. A kezeletlen minták vörös színezete, a fafajtól függően, a 2,9 és a 11,1-es érték közötti tartományt közel egyenletesen kitöltötte. Megfigyelhető volt az a tendencia, hogy az eredendően vörösebb minták nagyobb színezetcsökkenést szenvedtek a napsugárzás hatására az első 8 órában, mint az eredendően kis vörös színezettel rendelkező minták. Ennek magyarázata is a gőzölt bükknél leírt kettős folyamatban keresendő.

4.1.2 Sárga színezet változás

A sárga színezet változása nem mutatott olyan változatos képet, mint a vörös színezeté, de a három csoport itt is jól láthatóan elkülönült. A 7-9. ábrákon a higanygőz lámpával történt besugárzás hatását mutatjuk be.

A legkisebb sárga színezetváltozást az akác produkálta (8. ábra). Ennek oka, hogy itt volt a legnagyobb a kezelés előtti sárga színezet. Valamennyi mintánál intenzív sárga színezet növekedést figyeltünk meg a kezelés első 8 órájáig. A változás intenzitása a további kezelés során fokozatosan csökkent. Az egyes csoportok közötti eltérések éppen a változásnak az ütemében mutatkoztak meg.

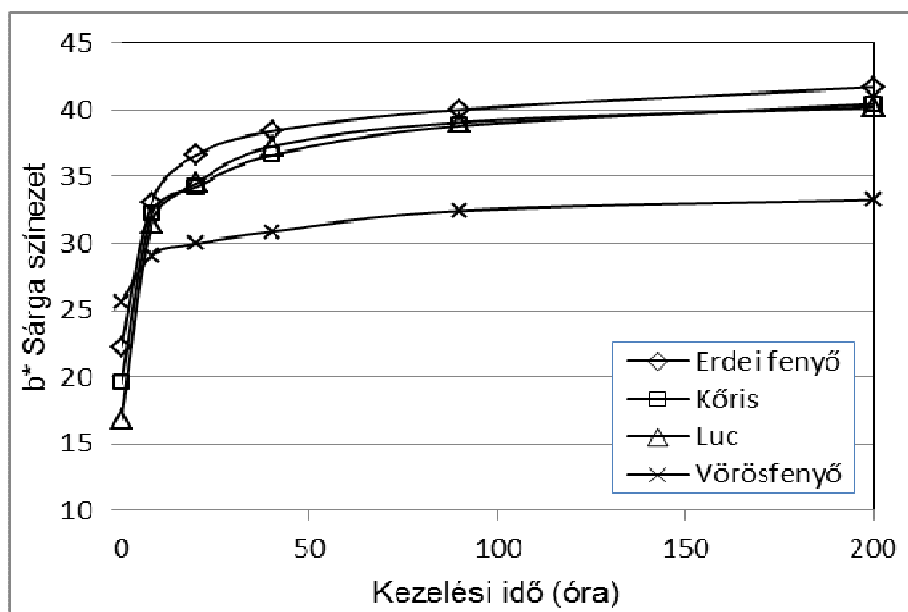
*Az **első csoport** mintáinál volt a legintenzívebb változás a kezelés első 20 órájában (7. ábra). Csupán a vörösfenyő nem illeszkedett ebbe a sorba, de ez azzal magyarázható, hogy az eredeti sárga színezete majdnem olyan magas volt, mint az akácé.*

*A **harmadik csoport** fafajai csak annyiban különböztek az első csoportétól, hogy az első 20 óra b^* koordináta növekedése mérsékeltebb volt (9. ábra).*

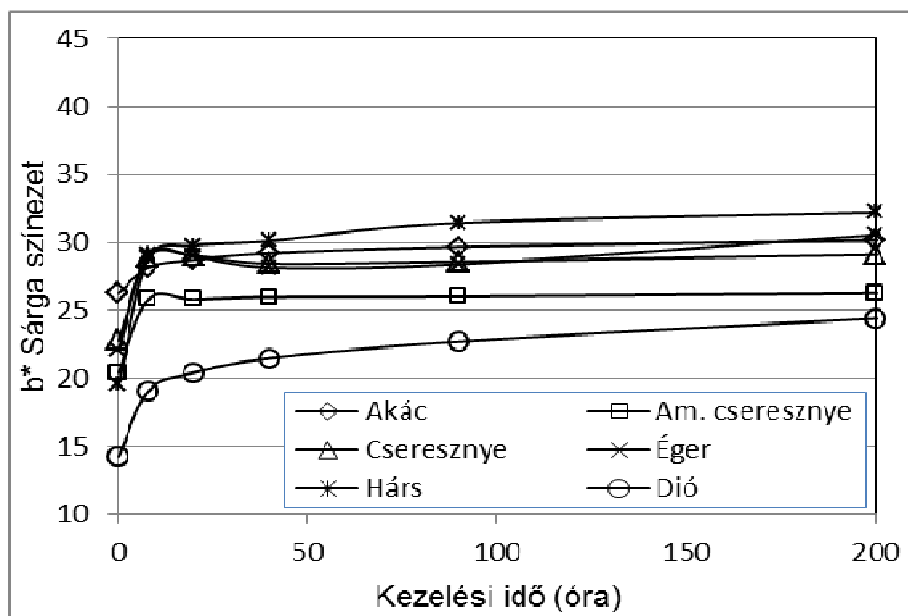
*A **második csoport** fafajainál volt a legkisebb sárga színezet növekedés a kezelés első 8 órájában. Ezt a változást a sárga színezet stagnálása követte a kezelés további részében, hasonlóan, mint a vörös színezet változásánál.*

Az ablaküveg mögötti napsugárzás hatására bekövetkezett sárga színezet változás alig különbözött a három csoport esetében (10-12 ábrák). Az egyes csoportokon belül a fafajok viselkedése alig tért el egymástól. A változást mutató görbék nagyon közel haladtak

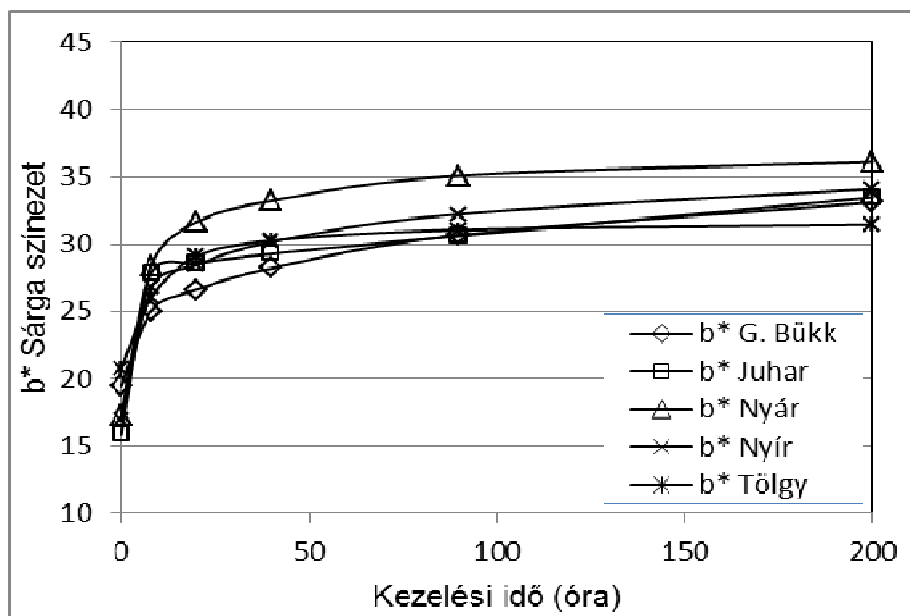
egymáshoz. Az egyetlen eltérés a teljes időtartamra vonatkozó változás mértékében volt. Az *első csoport* fajtái szenvedték el a legnagyobb változást (10. ábra).



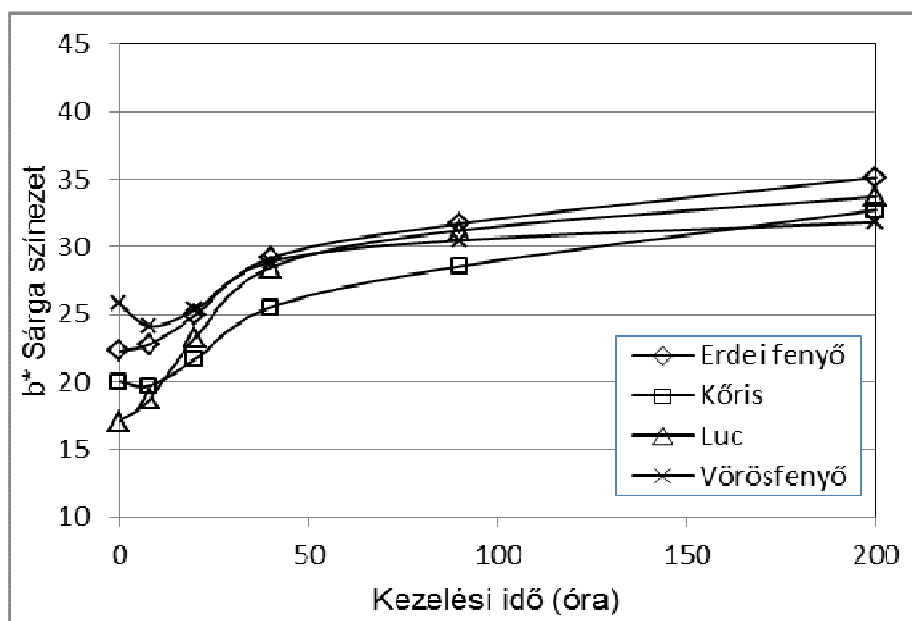
7. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő sárga színezetének változása higanygőz lámpás besugárzásnál.



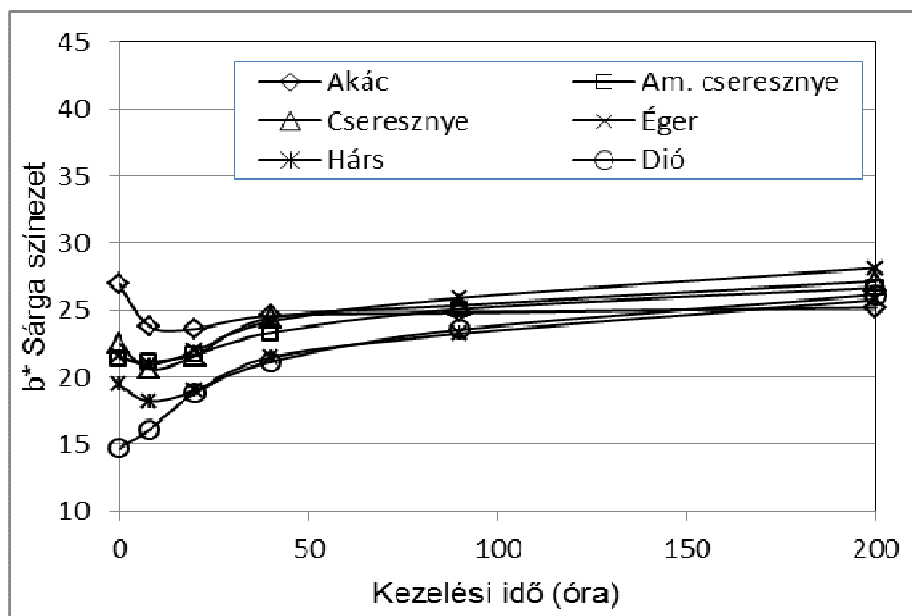
8. ábra Az akác, a kései meggy, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió sárga színezetének változása higanygőz lámpás besugárzásnál.



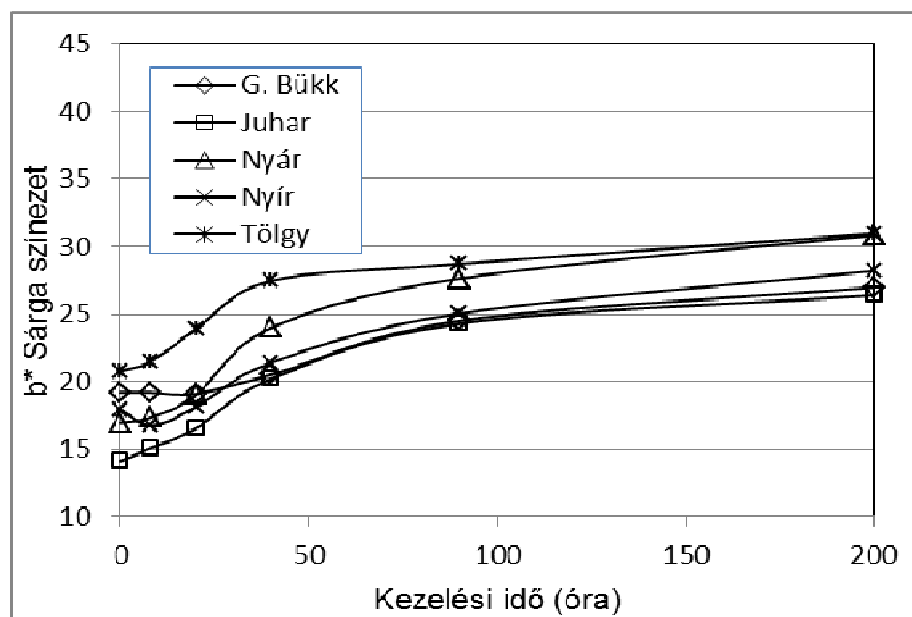
9. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy sárga színezetének változása higanygőz lámpás besugárzásnál.



10. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő sárga színezetének változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



11. ábra Az akác, a kései meggy, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió sárga színezetének változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



12. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy sárga színezetének változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.

A **második csoport** esetében viszont alig volt változás (11. ábra). Majdnem mindegyik faanyag sárga színezete csökkent a kezelés első 8 órájában. Kivételt csak néhány fafaj képezett, melyeknek alacsony volt a sárga színezete a kezelés előtt. Ezeknek a fafajoknak az

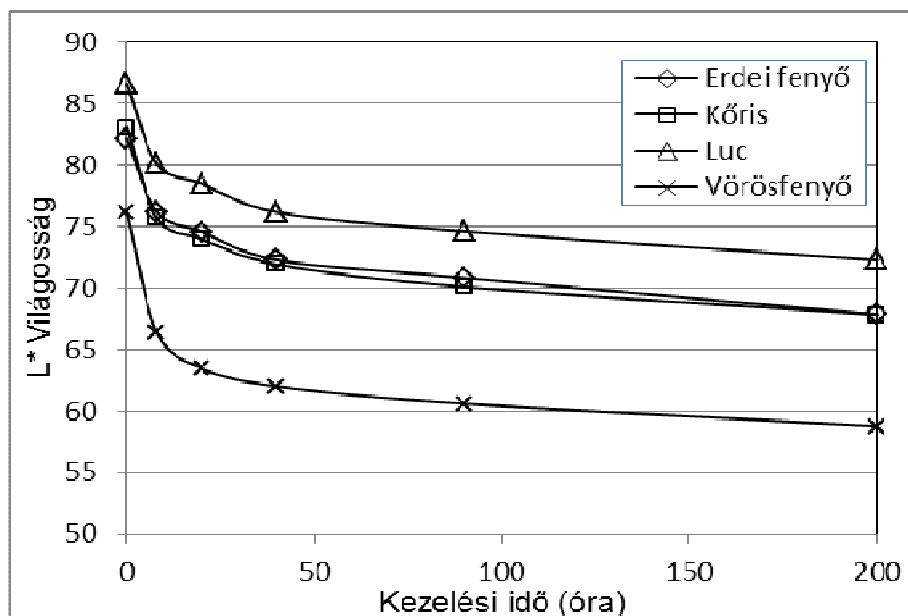
esetében is látszott, hogy az első 8 órában a változás tendenciája jelentősen elmaradt az utána következő időszakétól. Ebből is arra következtethetünk, hogy két folyamat játszódik le egyidőben. A lignin és az extrakt anyagok fotodegradációját követő oxidáció során keletkeznek sárga színeképző vegyületek, a faanyagban eredendően meglévők viszont bomlanak. A vizsgált faanyagok többségénél, a besugárzás kezdetén a bomlás volt a domináns.

4.1.3 Világosság változás

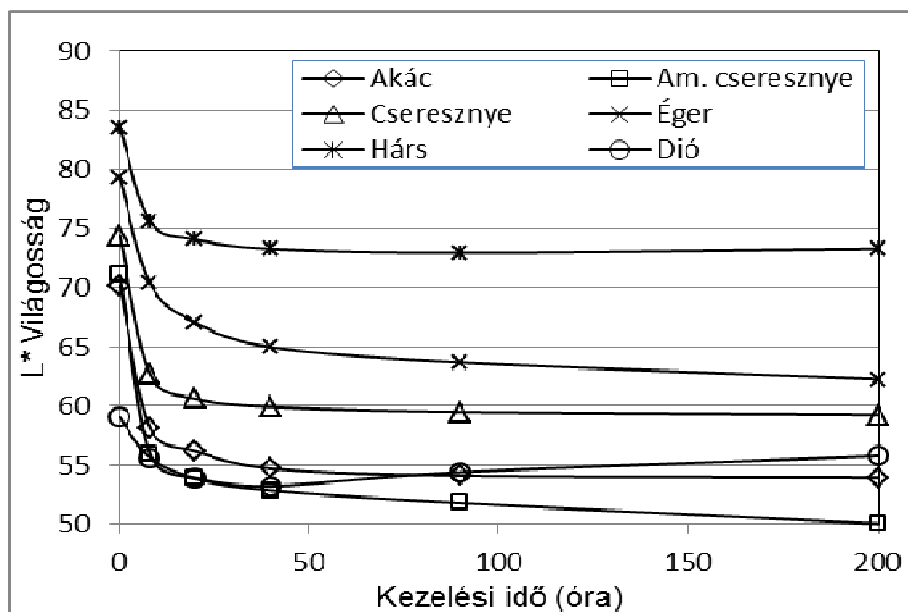
A világosság változása nem mutatott akkora eltéréseket az egyes csoportok között, mint a vörös és a sárga színezet változása, a higanygőz lámpás kezelés esetén (13-15. ábrák). Sőt néhány fafaj a világosság változása alapján másik csoportba tartozónak mutatkozott. Ilyen volt a juhar, amelyik inkább az első csoport fafajainak változását követte (15. ábra). Az amerikai cseresznye viszont az első 20 óra kivételével az első csoportba tartozóan viselkedett (14. ábra). A harmadik csoport (15. ábra) faanyagainak többsége ugyanúgy viselkedett, mint a második csoport fafajai. A kezelés időtartama utolsó négyötöd részében nem mutattak világosság változást. A legegységesebben itt is az első csoport fafajai viselkedtek (13. ábra). A kezdeti intenzív világosság csökkenés után mérsékelt, de folyamatos világosság csökkenést mutattak. A vizsgálatba bevont legsötétebb faanyag, a dió az első 40 órás mérsékelt világosság csökkenés után folyamatos világosság növekedést produkált, de nem világosodott vissza a kezelés előtti szintre.

Az ablaküveg mögötti napfény besugárzásnál a faanyagok világossága hasonlóan változott, mint a higanygőz lámpás besugárzásnál (16-18. ábrák). A leglényegesebb eltérés a kezelés első 20 órájában mutatkozott. Itt a napsugárzás mérsékeltebb változást produkált, mint a higanygőz lámpás besugárzás. Kivételt képezett a gőzölt bükk, amelyik nem produkált sötétedést, hanem a 20. és a 90. óra között világosodott. Az akác is mutatott kismértékű világosodást a kezelés végén. A dió itt is úgy viselkedett, mint a higanygőzlámpás kezelésnél, de a világosodása jelentősen, meghaladta a kezelés előtti értéket (17. ábra).

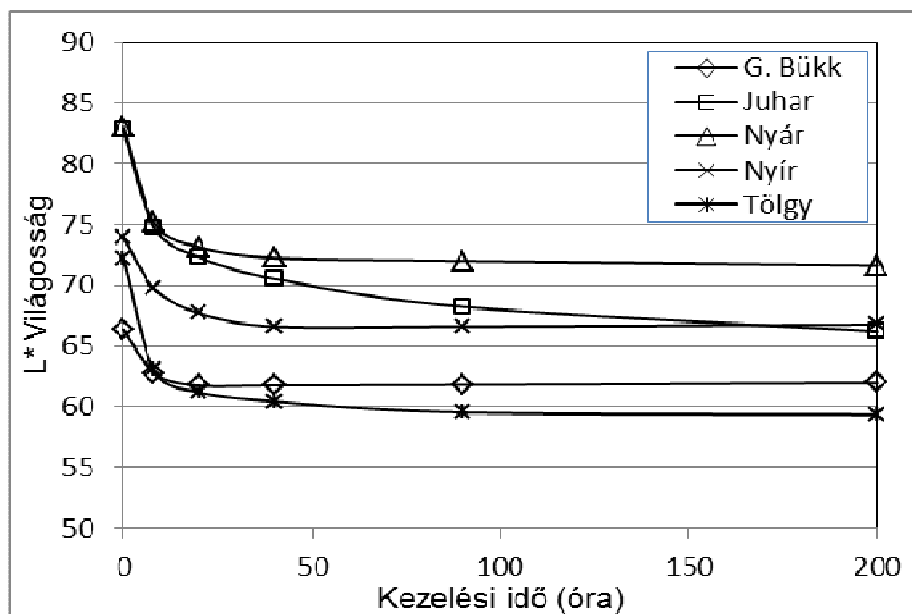
Mindhárom színkoordináta esetében a legstabilabbnak a nyír színe mutatkozott. A napsugárzásos kezelésnél sem a világosságában, sem a vörös színezetében nem volt eltérés a kezdő és a végérték között, és csak kis mértékben sárgult a faanyaga.



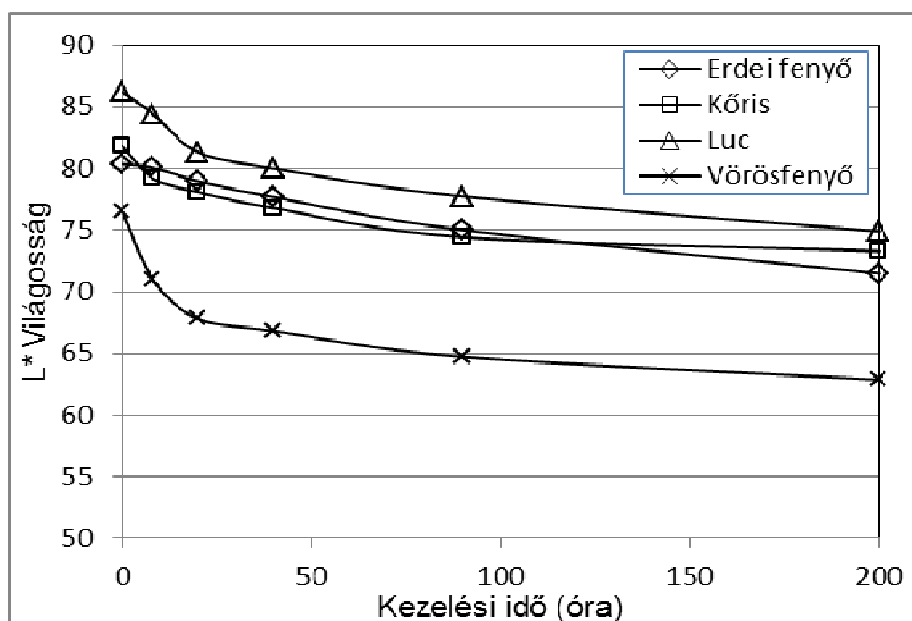
13. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő világosságának változása higanygőz lámpás besugárzásnál.



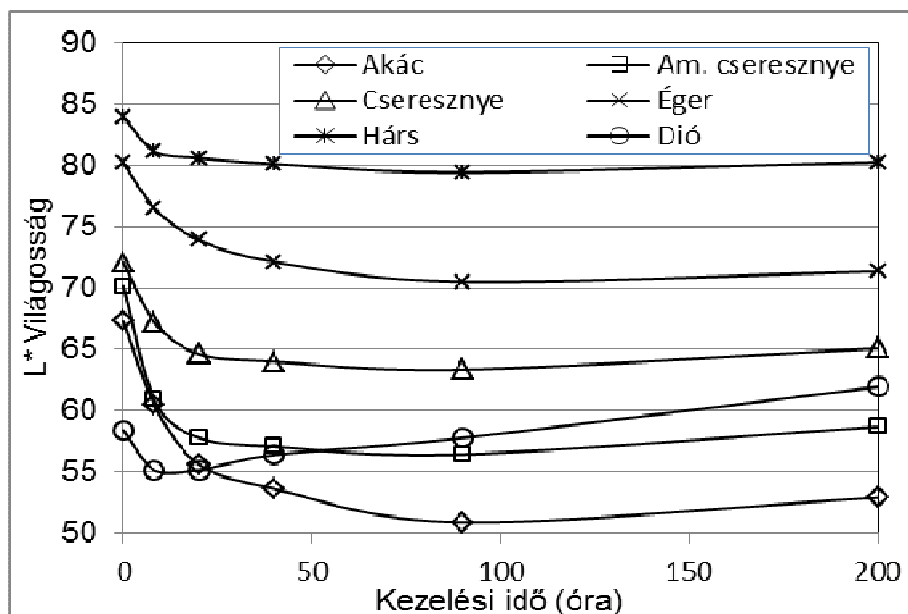
14. ábra Az akác, a kései meggy, a vadcserezsnye, az éger, a hárs és a dió világosságának változása higanygőz lámpás besugárzásnál.



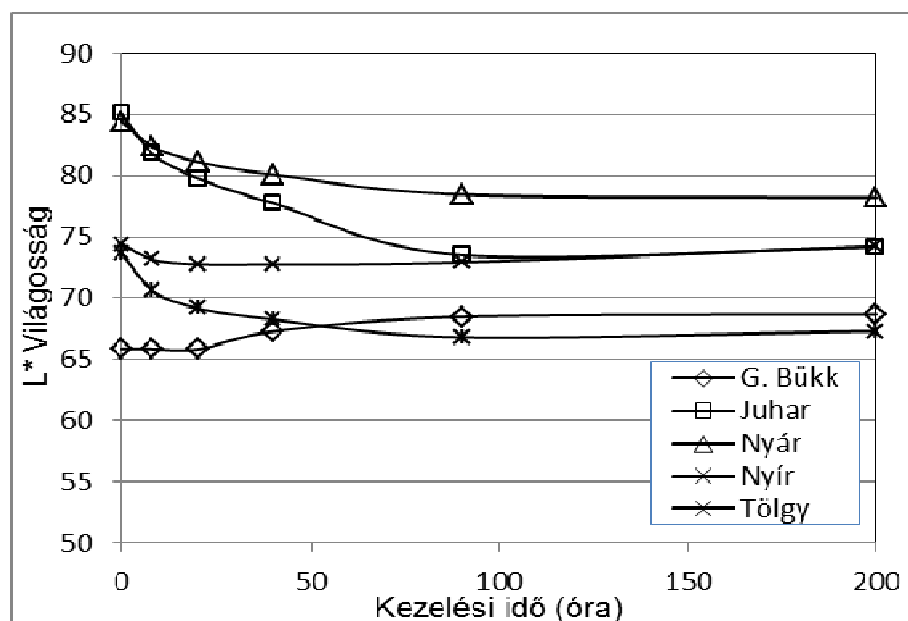
15. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy világosságának változása higanygőz lámpás besugárzásnál.



16. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő világosságának változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



17. ábra Az akác, a kései meggy, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió világosságának változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



18. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy világosságának változása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.

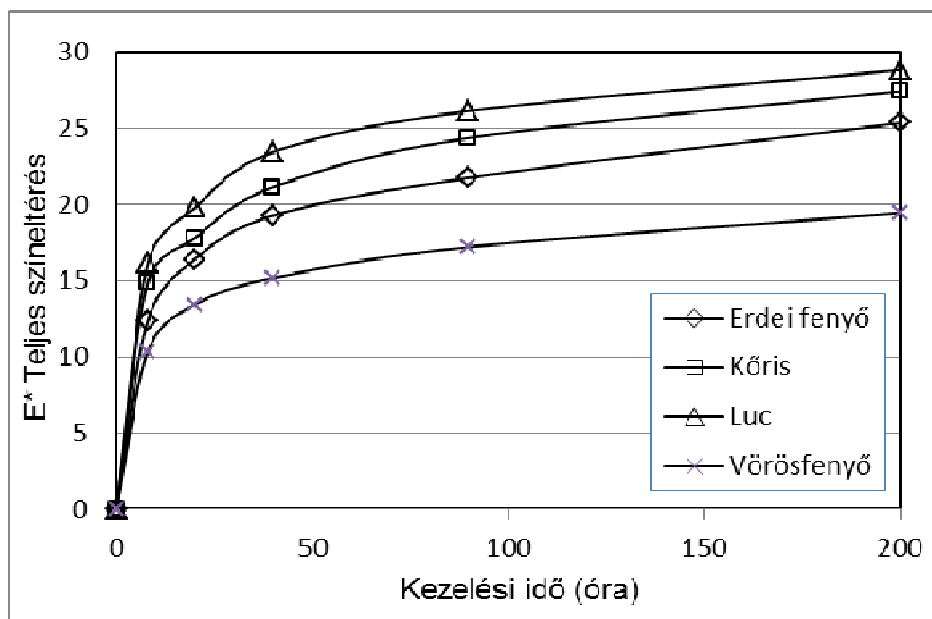
4.1.4 Teljes színváltozás

Teljes színváltozás (E^*) magában foglalja mindhárom színkoordináta változását. A három színkoordináta változását összehasonlítva szembetűnő, hogy a világosság változása

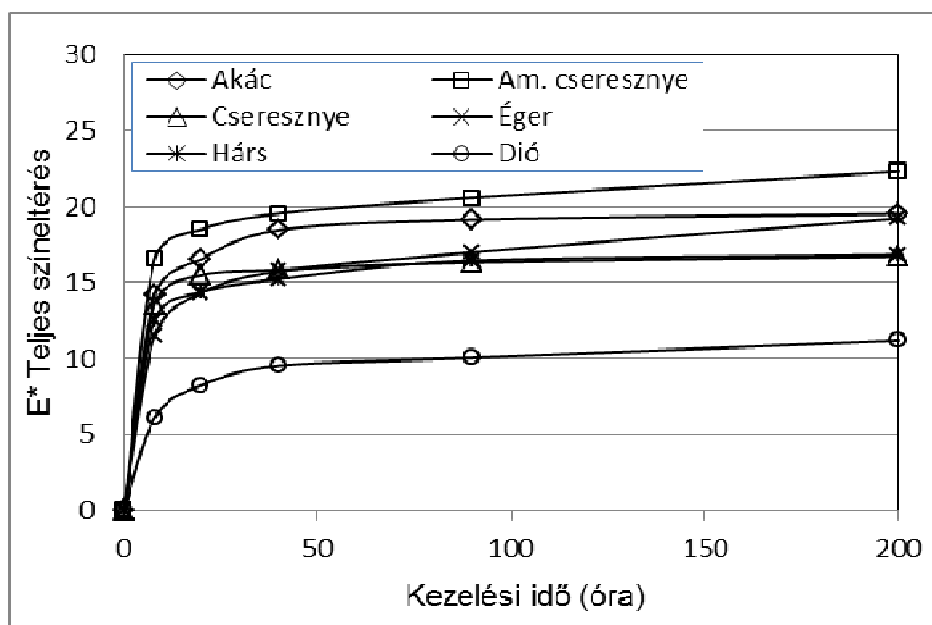
lényegesen nagyobb, mint a másik két koordináta változása. Ezért a teljes színváltozást döntő mértékben a világosság változása határozza meg. Az emberi szem számára viszont a színezet változása sokkal inkább szembetűnő, mint a világosság változása. Ezért nem célszerű színváltozást csupán a teljes színváltozással jellemezni, ha a színváltozást részletesen akarjuk tanulmányozni. Ennek ellenére a szakirodalomban sok munkát találunk, melyekben csupán a teljes színváltozást adják meg (Chang and Chang 2001, Müller et al. 2003, Ayadi et al. 2003, Oltean et al. 2008). Az általunk vizsgált fajok 3 csoportja esetében a világosság koordináta mutatta a legkisebb eltérést a csoportok között, ezért a teljes színváltozás esetében sem várhatunk jelentős eltéréseket a 3 csoport viselkedésében.

A higanygőz lámpás besugárzás hatására létrejött teljes színváltozás mindhárom csoportnál intenzív növekedést mutatott a kezelés első 8 órájában, majd a növekedés tendenciája lelassult (19-21. ábra). A 3 csoport közötti eltérés a 8 órás kezelést követő lassú növekedési szakaszban jelentkezett. Az akác, az amerikai cseresznye, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió esetében 40 órás kezelés után szinte nem változik az E^* értéke (20. ábra). A gyors és a lassú változás közötti átmenet éles ívet mutat a 8 és a 20 órás kezelés között. A túlevelűek és a kőris esetében (19. ábra) viszont az átmenet fokozatos egészen a kezelés 40. órájáig. A 40 órás kezelés utáni időszakban a teljes színváltozás értéke gyakorlatilag lineárisan növekszik. A másik két csoporthoz képest itt a legnagyobb a növekedés. A 3. csoport faanyagai, a gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy hasonló változást mutatnak, mint a fenyők, csupán a változás mértéke szerényebb.

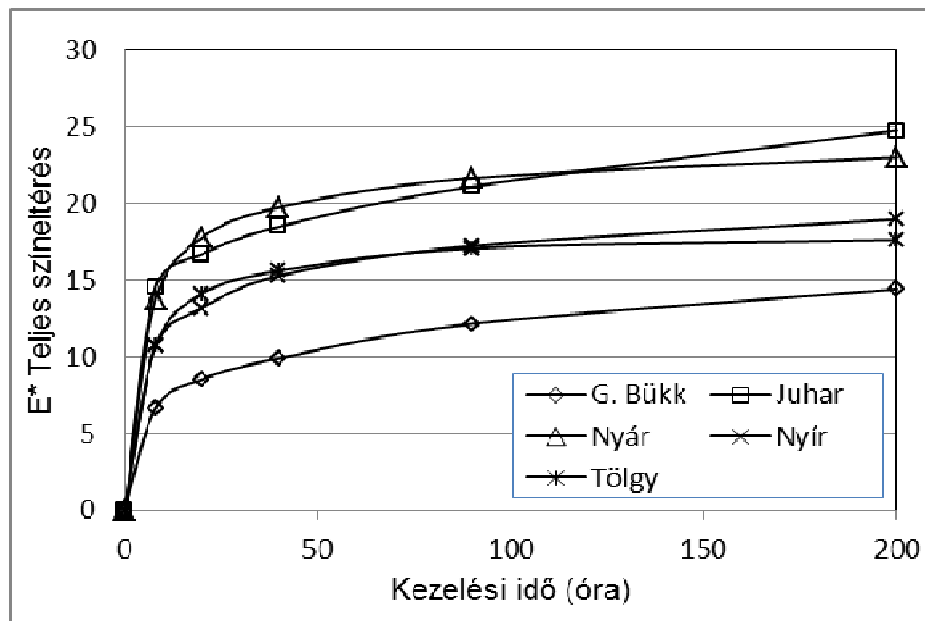
Az ablaküveg mögötti besugárzásnál a teljes színváltozás nem mutat olyan meredek változásokat, mint a higanygőz lámpás besugárzásnál. Ennek oka a gyengébb fényintenzitás és a kisebb mértékű ultraibolya sugárzástartalomban keresendő. A második csoportba tartozó fajok, az akác, az amerikai cseresznye, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió mutatta a legmeredekebb színváltozást a besugárzás első 20 órájában. Ezt követően a változás lelassult, és 40 óra után alig volt észrevehető változás. Sőt 90 óra után a kétféle cseresznye és az akác színezet változása kis mértékben visszafordult. Az első csoportba tartozó erdei fenyő, kőris, lucfenyő és vörösfenyő színváltozása a teljes időtartalomban emelkedett. A vörösfenyő és a luc színváltozása meredekebb volt az első 20 illetve 40 órában, mint a másik két fajé. A 3. csoportba tartozó gőzölt bükk, juhar, nyár, nyír és tölgy esetében a teljes színváltozás folyamatosan, szinte lineárisan emelkedett. A linearitást csak a 90. óra környékén lévő töréspont módosította.



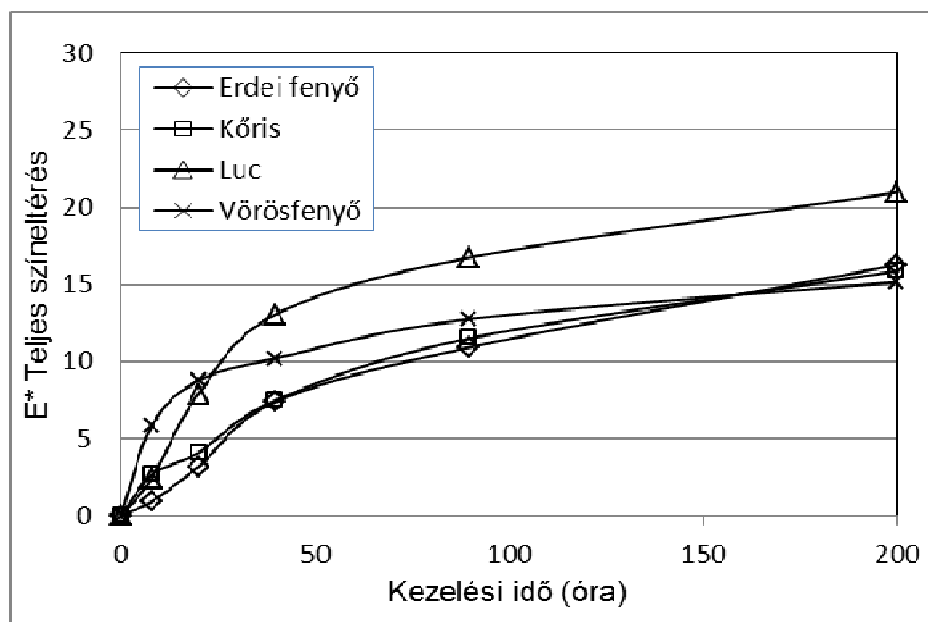
19. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő teljes színváltozása higanygőz lámpás besugárzásnál.



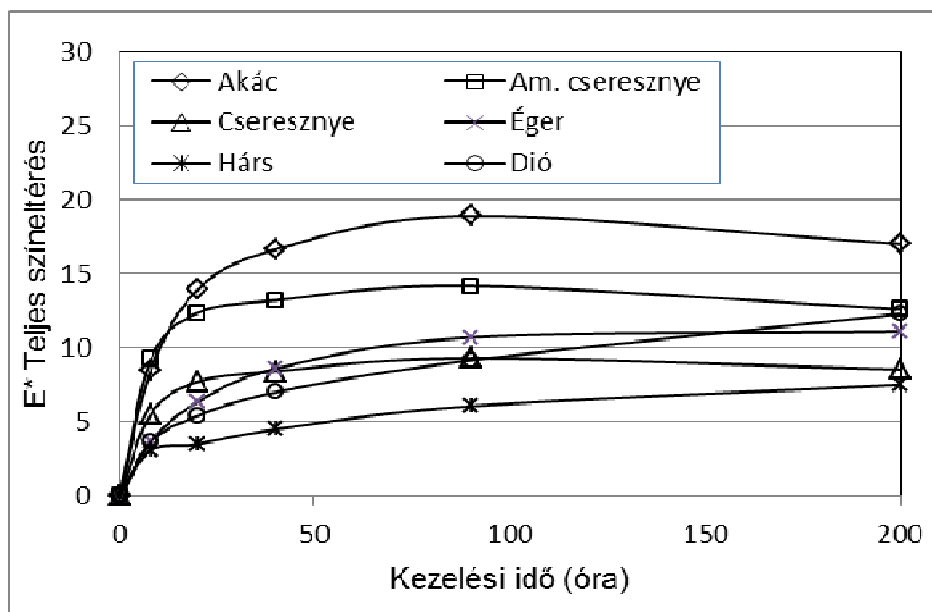
20. ábra Az akác, az amerikai cseresznye, a vadcsesznye, az éger, a hárs és a dió teljes színváltozása higanygőz lámpás besugárzásnál.



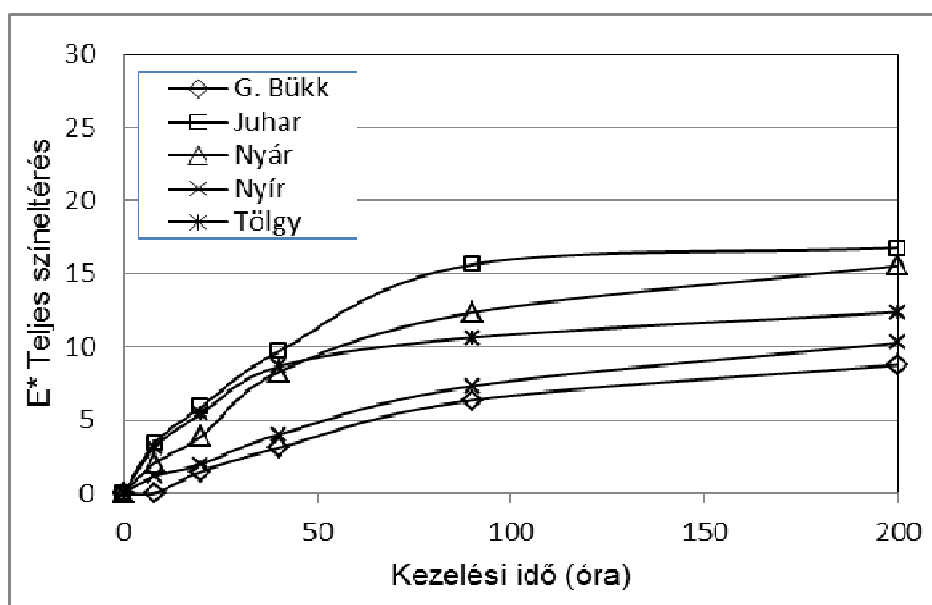
21. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy teljes színváltozása higanygőz lámpás besugárzásnál.



22. ábra Az erdei fenyő, a kőris, a lucfenyő és a vörösfenyő teljes színváltozása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



23. ábra Az akác, a kései meggy, a vadcsereznye, az éger, a hárs és a dió teljes színváltozása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.



24. ábra A gőzölt bükk, a juhar, a nyár, a nyír és a tölgy teljes színváltozása ablaküveg mögötti napsugárzás hatására.

A fent leírtakra tekintettel megállapíthatjuk, hogy a teljes színváltozás (E^*) értéke nem ad részletes információt a színváltozásról, mert fotodegradáció esetén benne a világosság változása dominál. Az emberi szem számára viszont a színezetváltozás sokkal inkább

szembetűnő, mint a világosság változása. Ezért ha pontos képet akarunk kapni a fotodegradáció által okozott színváltozásról, akkor mindhárom színkoordináta változását egyedileg meg kell vizsgálni.

4.1.5 Összefoglalás

A vizsgálatok azt mutatták, hogy:

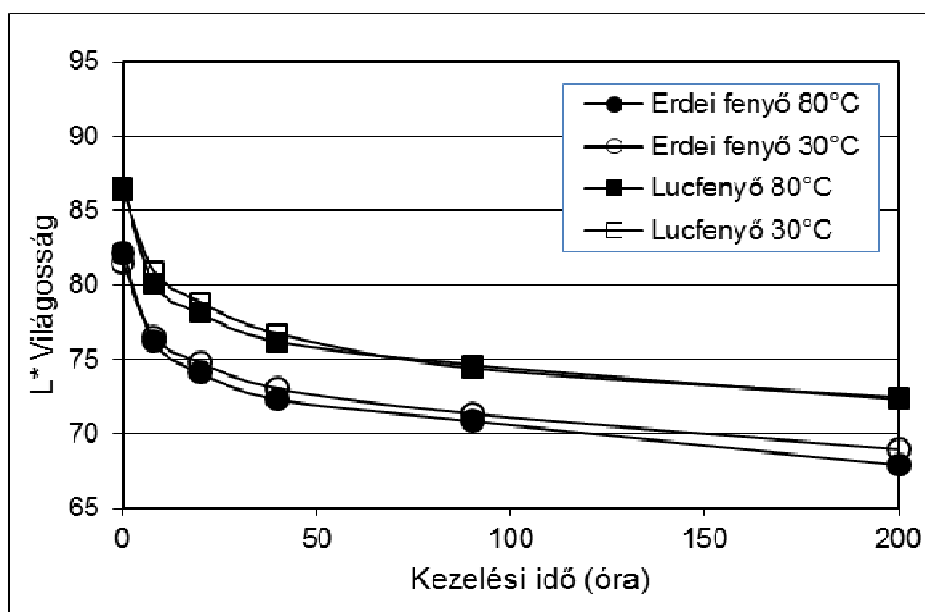
- *hosszútávon a második csoportba sorolt faanyagok (akác, kései meggy, vadcseresznye, éger, hárs) színe a legstabilabb a fotodegradációval szemben, annak ellenére, hogy a kezelés kezdetén ezeknél a fafajoknál voltak a legintenzívebb változások. Az első 8 órában módosult szín viszont tartósnak mutatkozott, még az erős UV sugárzást kibocsátó higanygőz lámpa esetében is.*
- *A legkisebb színváltozást a nyír faanyag mutatta.*
- *A legsérülékenyebb a fenyőfélék és a kőris színe. Ezeknél a fafajoknál folyamatos színváltozást tapasztaltunk a teljes vizsgált időtartamban.*
- *Megállapítottuk, hogy a teljes színváltozás (E^*) vizsgálata nem ad olyan részletes információkat a színváltozásról, mint az egyes színkoordináták részletes elemzése.*
- *Az eredmények azt is mutatják, hogy a színváltozás kettős folyamat. A fénybesugárzás károsítja a faanyagban meglévő kromofor kémiai csoportokat, de a lignin és az extrakt anyagok degradációját követő oxidáció során újabb kromofór csoportok keletkeznek.*
- *A két változás üteme fafajonként eltér, de jelentősen függ a fénybesugárzás hullámhossz eloszlásától is.*
- *Napsugárzás esetén a faanyagok többségénél a faanyagban meglévő kromofór kémiai csoportok bomlása intenzívebb volt, mint az új kromofór csoportok épülése, a kezelés első 8 órája során.*
- *Az eredmények alátámasztják azt a korábbi megfigyelést, hogy a higanygőz lámpa nem alkalmas a rövididejű napfény besugárzás imitálására.*

4.2 A hőmérséklet hatása a faanyag fotodegradációjára

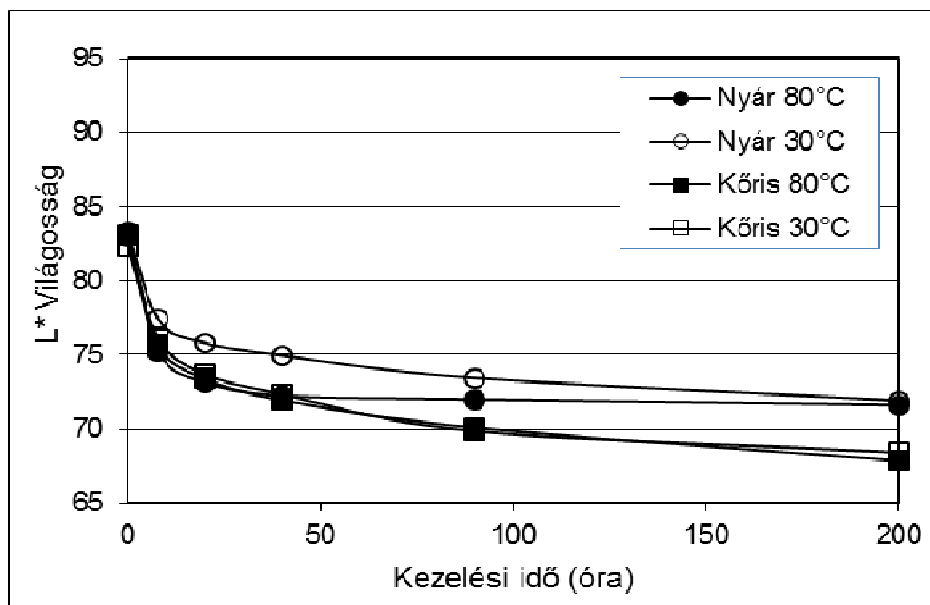
4.2.1 Világosság változás

A minták színének szabad szemmel történő megfigyelése során megállapítottuk, hogy a kétféle kezelés (30°C-os és 80°C-os) nem okozott szembetűnő világosság változásbeli eltérést. Észrevehető volt viszont, hogy a magasabb hőmérséklet erőteljesebb barna irányú színeltolódást okozott, mint az alacsonyabb hőmérséklet. Az objektív színmérés eredményeit az egyes színekoordináták változásának bemutatásával adjuk meg.

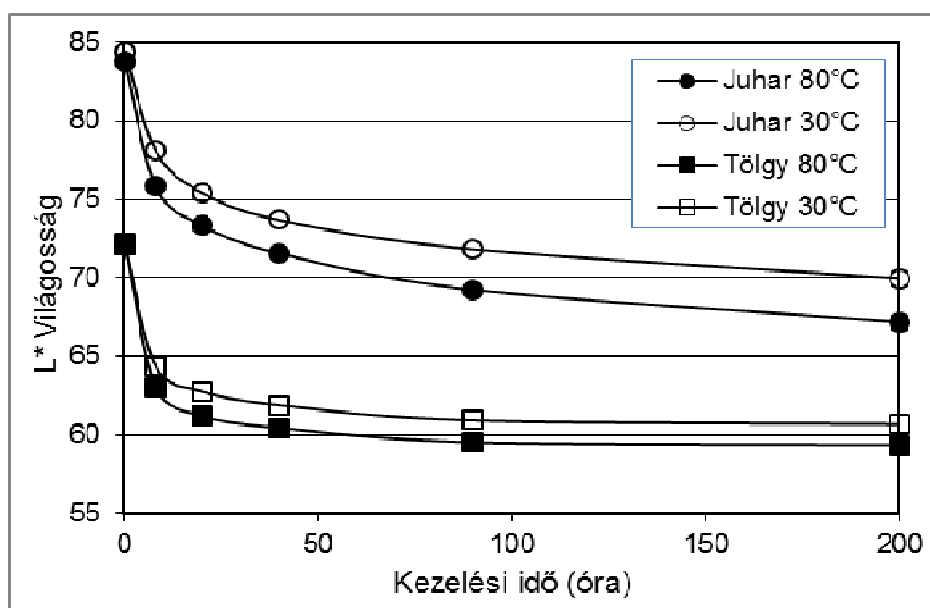
Az 25-27. ábrák a világosság változásait mutatják be. Valamennyi minta esetében intenzív világosság csökkenést tapasztaltunk a kezelés első 8 órájában. Ezt követően a változás lelassult, és 40 óra elteltével a világosság változása enyhe, lineáris csökkenésbe ment át. A két fenyő mintánál alig volt eltérés a kétféle hőmérsékleten végzett kezelés hatása között, de az eltéréseknél mindig a 80°C-os kezelés okozott nagyobb világosság csökkenést (25. ábra).



25. ábra Az erdei fenyő és a lucfenyő világosságának változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.



26. ábra A nyár és a kőris világosságának változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.



27. ábra A juhar és a tölgy világosságának változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.

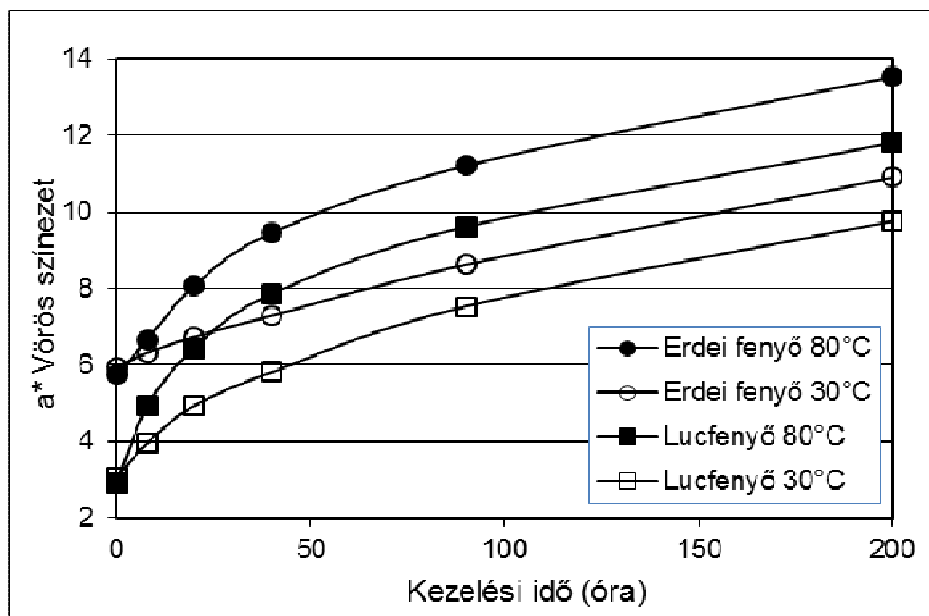
A lombhullató fafajoknál már nagyobb hatása jelentkezett a megemelt hőmérsékletnek (26-27. ábra). A nyár, a juhar és a tölgy próbatestek a kezelés teljes ideje alatt jelentősebb sötétedést szenvedtek el a 80°C-on történt fénybesugárzás hatására, mint a 30°C-os kezelés

hatására. A kőris esetében nem volt számottevő eltérés a kétféle kezelés hatása között. A fentiek alapján *megállapíthatjuk, hogy a megemelt hőmérséklet hatására fafajfüggően, de a szobahőmérséklet közeli hőmérsékleten történt kezeléshez képest erőteljesebb világosság csökkenés történt.* Végeztünk kezeléseket 80°C hőmérsékleten, teljes sötétben, hogy meghatározzuk a megemelt hőmérséklet színváltoztató hatását. Nagyon kicsiny sötétedést tapasztaltunk a kezelés első 20 órájában, mely a továbbiakban változatlan maradt, illetve néhány faj esetében kismértékű világosodás történt.

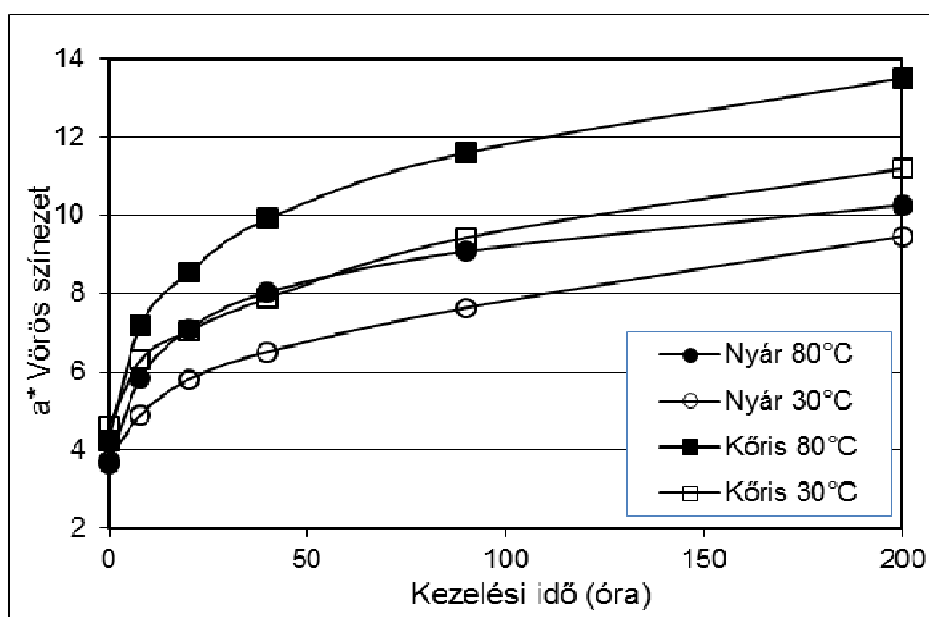
4.2.2 Vörös színezet változás

A vörös színkoordináta változása lényegesen nagyobb eltérést mutatott a kétféle hőmérsékleten történt kezelés hatására, mint a világosság változása, és mint a későbbiekben tárgyalandó sárga színezet változása. A vörös színezet értéke folyamatosan növekedett a kezelés során valamennyi fajtánál, mindkét hőmérsékleten (28-30. ábra). A besugárzás első 8 órájában a lombhullató fajok intenzívebb változást szenvedtek, mint a tűlevelűek. Ez a trend a kezelés végére megfordult, mert a tűlevelű fajok a kezelés során végig szinte egyenletes vörös irányú színeltolódást mutattak. A lucfenyő és az erdőfenyő vörös színezete szinte lineárisan növekedett a 30°C-on történt besugárzás hatására. Ezzel szemben a lombhullató fajoknál a kezdeti intenzív változás később lelassult. A 80°C-os besugárzás lényegesen nagyobb vörös színkoordináta változást okozott, mint a 30°C-os besugárzás, valamennyi fajtánál. A sötétben történt 80°C-os kezelés nem okozott számottevő színezetváltozást. Ez a tény azt mutatja, hogy a 80°C-on történt besugárzás hatására létrejött vörös színezetváltozás nem csupán a termikus hatás és a fényhatás egyszerű összeadódása. Az eredmények azt mutatják, hogy a megemelt hőmérséklet megkönnyíti a fotonok számára a kémiai kötések felszakítását. Az erdei fenyő minták mutatták a legnagyobb eltérést a kétféle kezelés hatásában. Esetükben a vörös színezet változása 57%-kal nagyobb volt a 80°C-os kezelésnél, mint a 30°C-os kezelésnél. Ugyanezek az adatok a kőrisre, lucfenyőre, tölgyre, nyárra és juharra rendre; 40%, 33%, 26%, 15% és 2% volt.

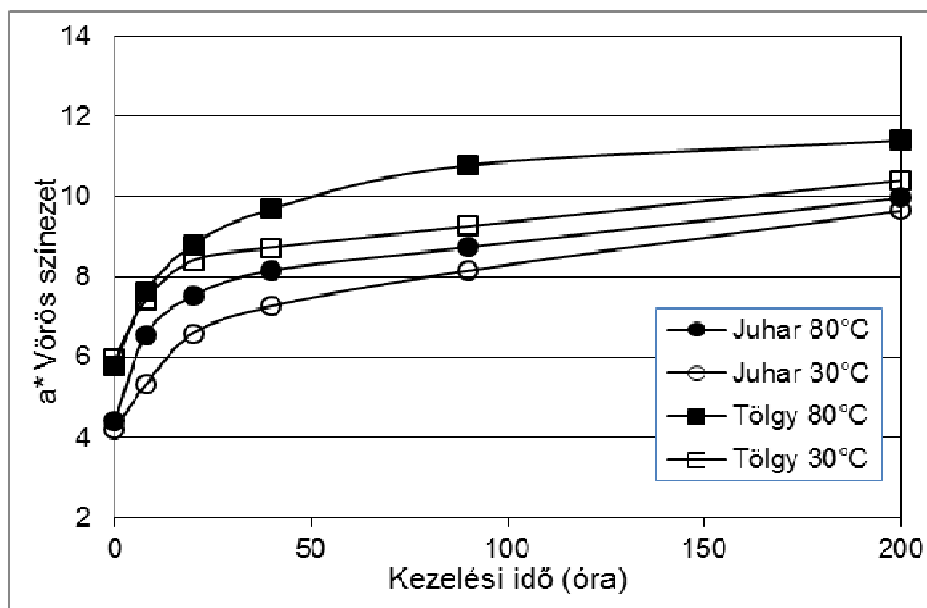
A faanyagban a kromofor, konjugált kettős kötések (színképző csoportok) a ligninben és az extraktanyagokban találhatók. A lignin fotodegradációját követő oxidációs folyamat eredményeként elsősorban sárga irányú színeltolódás következik be. Ez a folyamat okozza a



28. ábra Az erdei fenyő és a lucfenyő vörös színezetének változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.



29. ábra A nyár és a kőris vörös színezetének változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.



30. ábra A juhar és a tölgy vörös színezetének változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.

lignintartalmú papír sárgulását (Heitner 1993). Az extraktanyagokban sokféle kromofór csoport előfordul. A vörös irányú színváltozásokat elsősorban az extraktanyagok degradációja okozza. Ezt támasztja alá az a tapasztalatunk is, hogy a kevés extraktanyagot tartalmazó nyár és juhar faanyag esetében volt a legkisebb a vörös színkoordináta változása a megemelt hőmérséklet és besugárzás hatására. A vörös színezet változása tekintetében hasonló eredményeket kapott Mitsui (Mitsui et al.2001) is, amikor a fénybesugárzás után a mintákat száraz és nedves termikus kezelésnek tette ki. Azt tapasztalta, hogy a termikus kezelés nagyobb vörös színezet emelkedést okozott, ha azt megelőzte a fénybesugárzás. *A nedves termikus kezelés nyolcszor nagyobb vörös színezetváltozást okozott, mint a száraz körülmények között végrehajtott.* Mitsui 120 és 160°C közötti hőmérsékleteket alkalmazott, ezért az általa mért színváltozás mértéke nem összemérhető az általunk alkalmazott hőmérsékleten történt színváltozással, de a tendencia igen. Hasonló eredményre jutott Tolvaj (Tolvaj et al. 2010) az akácgőzölés vizsgálatakor. Kimutatták, hogy a sok extraktanyagot tartalmazó akác faanyag gőzölésénél a vörös színezet változása nagyon érzékeny az alkalmazott hőmérsékletre.

A beltérben lévő fából készült bútorok és belsőépítészeti elemek színe az évek során egyre sötétedik és barnább lesz. Ezt a változást a fotodegradáció és a termikus degradáció együttesen okozza. Mivel a termikus degradáció mértéke a hőmérséklettől exponenciálisan függ, ezért lehet ezt a szobahőmérsékleten végbemenő változást megemelt hőmérsékleten

gyorsított formában vizsgálni. Meg kell jegyezni, hogy *az ilyen jellegű vizsgálat (folyamatok gyorsítása) határa talán éppen a 80°C körüli hőmérsékleten lehet, mert felette már a degradáció minőségében is változás következik be, nem csak a sebességében.* Éppen ez volt a célunk a 80°C-on végrehajtott fénybesugárzás megvalósításával. Ha a hőmérsékletet egyre csökkentjük, akkor a fentiek alapján a vörös színezet változásának egyre kisebbnek kell lennie. Ezt vizsgálta Mitsui és Tsuchikawa (2005) 50°C és -40°C között végzett fénybesugárzás esetében. Azt tapasztalták, hogy -40°C-on alig történt színváltozás. Ahogy emelték a hőmérsékletet egyre nagyobb lett a vörös színezet változása. A gyors növekedést érzékelteti, hogy 20 és 50°C között háromszor akkora volt a vörös színezet változása, mint -40 és 20°C között. Ezek az eredmények is azt mutatják, hogy a megemelt hőmérséklet hatása elsősorban a vörös színkoordináta megváltoztatásában jelentkezik.

4.2.3 Sárga színezet változás

A fotodegradáció elsősorban a faanyag színének sárga irányú eltolódását okozza. Ezt a színváltozást a lignin degradációját követő oxidációs folyamatok során létrejövő kromofór csoportok produkálják. Ezért a fotodegradáció során létrejövő sárga színezetváltozás tekintetében nem szokott lényeges eltérés mutatkozni a fafajok között. Ezt igazolják a jelen vizsgálatok eredményei is. A lényegi változások tekintetében a vizsgált fafajok azonos jellegű sárga színezetváltozást mutatnak (31-33. ábra). Valamennyi vizsgált minta intenzív sárgulást mutatott a kezelés első 8 órájában. Ez az intenzív változás fokozatosan lassult az elkövetkező 32 órában, majd a sárga színezet változása lineárisan, enyhén növekvő tendenciát vett fel. A fent leírtak egyformán igazak mindkét hőmérsékleten lejátszódott változásokra. Ezek az eredmények jól egyeznek a szakirodalomban leírtakkal (Kawamura et al. 1996, Tolvaj és Mitsui 2005, Wang és Ren 2008).

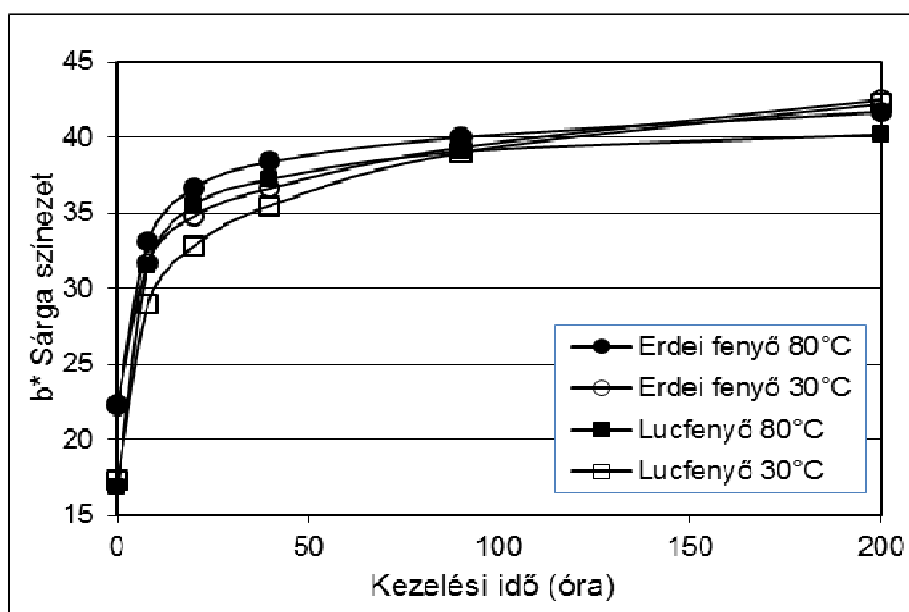
Ha összehasonlítjuk a 80°C-on és a 30°C-on létrejött változásokat, akkor már észrevehetőek eltérések.

- Azt látjuk, hogy a fenyőknél alig van eltérés a kétféle kezelés hatása között. A besugárzás elején a 80°C-on történt kezelés okoz egy kicsivel intenzívebb sárgulást, de a kezelés végére ez a trend megfordul és a 30°C-os kezelés hatása lesz nagyobb. A megfordulást az okozza, hogy a kezelés döntő részében (20 órától 200 óráig) a 30°C-on történt kezelés hatására kismértékben intenzívebb változás történik, mint a 80°C-on történt kezelés hatására.
- A lombhullató fafajok esetében is intenzívebb volt a sárgulás a 30°C-on történt kezelés hatására a kezelés döntő részében. Lényeges eltérés a fenyőkhöz képest, hogy a besugárzás első 20 órájában a lombhullató fafajok esetében 30°C-on legalább olyan

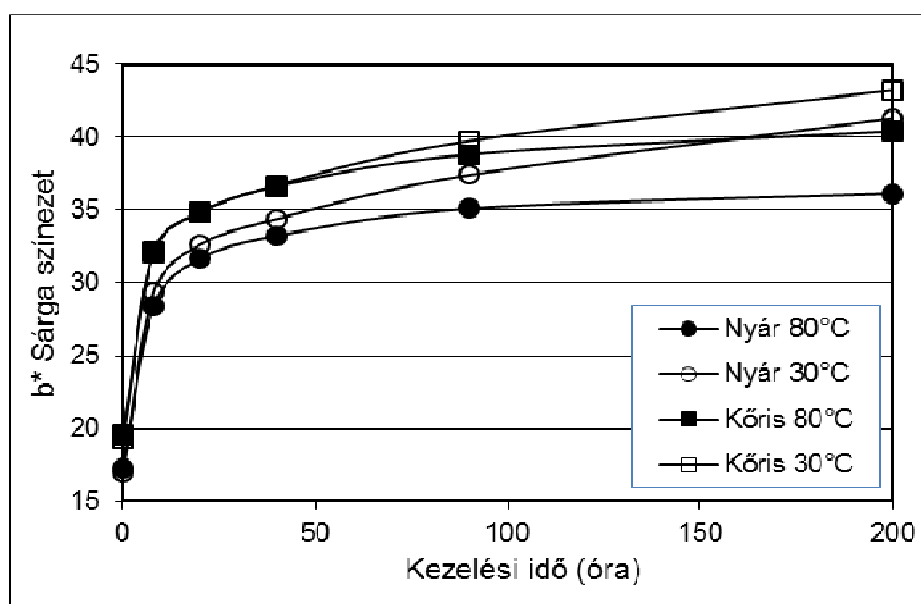
mértékű (vagy nagyobb) sárgulás következett be, mint 80°C-on. Sőt a juhar és a tölgy még jelentős előnyt is szerzett az első 20 órában.

- A mérési eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy a 30°C-on történt fénybesugárzás intenzívebb sárgulást okozott valamennyi vizsgált fafaj esetében, a kezelési idő döntő részében, mint a 80°C-on történt kezelés. Az eredmények összecsengnek Mitsui (Mitsui et al. 2001) megfigyeléseivel, amikor a fénybesugárzást követő termikus kezelés hatását vizsgálta. A fénybesugárzás hatására intenzív (12 egységnyi) sárgulást tapasztalt, de a fénybesugárzást követő termikus kezelés során csupán a kezelés első néhány órájában tapasztalt (2-6 egységnyi) sárgulást.

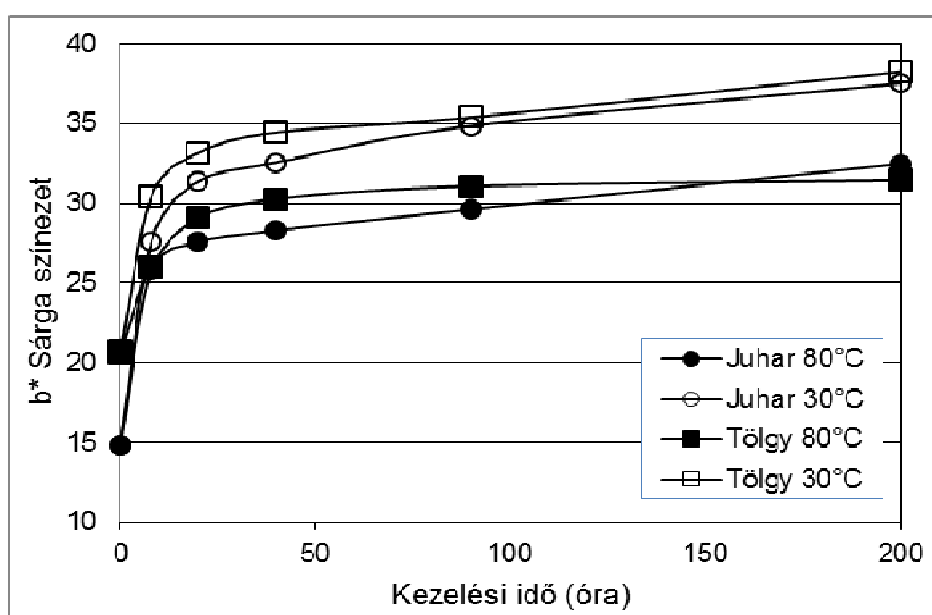
A fent leírt eltéréseket azzal magyarázhatjuk, hogy a fényhatásra bekövetkező lignindegradáció kromofór termékei nem stabilak, és az általunk alkalmazott 80°C hőmérsékleten részben elbomlanak. Ez a bomlás lehet annak az oka, hogy a faanyagok sárga színezete 30°C-on intenzívebben emelkedik, mint 80°C-on. Hasonló jelenséget figyeltek meg a faanyag gőzölésénél is (Tolvaj és Faix 1996, Tolvaj 2013). A 90°C-on gőzölt erdei fenyő, lucfenyő, vörösfenyő, nyár és akác minták esetében a kezelés első részében kialakult, a sárga színezetért felelős kromofor csoportok a kezelés további részében degradálódtak, számottevő sárga színezetcsökkenést okozva. Az akác a többiektől eltérően viselkedett, a gőzölés során a sárga színezete folyamatosan csökkent. Ez azt jelenti, hogy az akácban nagy számban jelen lévő, a sárga színezetért felelős, kromofór csoportok intenzívebben degradálódtak, mint ahogyan keletkeztek a 90°C-os hőmérsékleten.



31. ábra Az erdei fenyő és a lucfenyő sárga színezetének változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.



32. ábra A nyár és a kőris sárga színezetének változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.

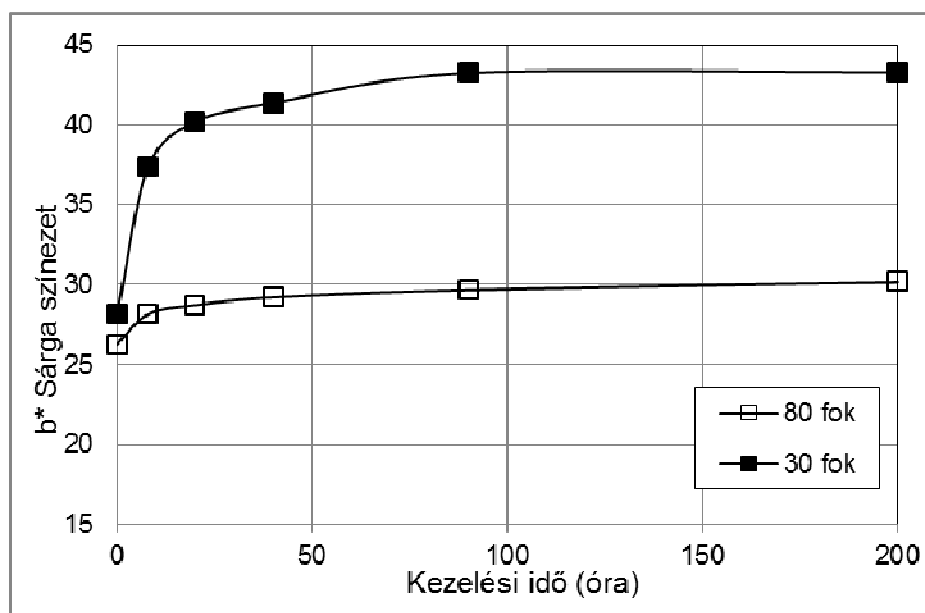


33. ábra A juhar és a tölgy sárga színezetének változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.

Az akác ezen különleges viselkedése miatt megvizsgáltuk, hogy hogyan változik a sárga színezete a 80°C-os és a 30°C-os hőmérsékleten történő fénybesugárzás hatására. Az

eredményeket a 34. ábrán mutatjuk be. Szembetűnő, hogy a 80°C-on történt kezelésnél, csak a kezelés elején történt kismértékű sárga színezet növekedés. Ezen a hőmérsékleten, valószínűleg az akác faanyagban eredendően meglévő kromofór kémiai csoportok már nem stabilak és részben elbomlanak. Így a kezelés során hamar egyensúlyba kerül a lignin bomlásából származó, a sárga színezetért felelős kromofór csoportok szaporodása, és a termikus hatásra lebomló kromofór csoportok fogyása. Ezzel a kettős folyamattal magyarázható az is, hogy egyedül az akác esetében áll be a sárga színezet egy konstans szintre 90 órás kezelés után.

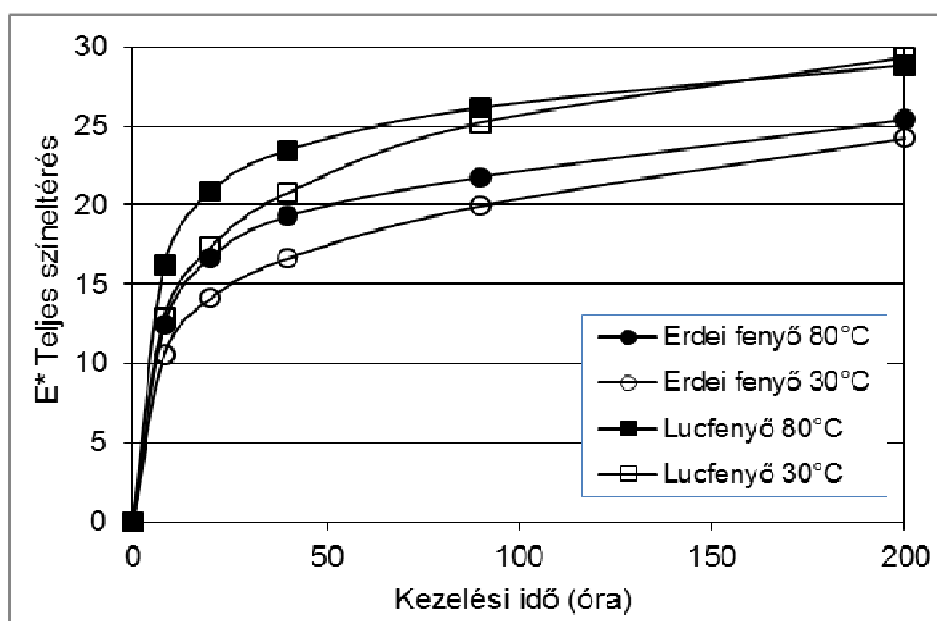
A teljes sötétben 80°C-on végzett tiszta termikus kezelés hatására faanyagok sárga színezete kis mértékben növekedett a kezelés első 20 órájában, majd változatlan maradt. Ez a kis változás éppen ott volt, ahol a kétféle hőmérsékleten alig volt eltérés a sárga színezet változásában. Ahol viszont nagy volt az eltérés a sárga színezet változásában a 80°C-os és a 30°C-os hőmérsékleten történt fénybesugárzás hatására ott a tiszta termikus kezelés nem produkált észrevehető sárgulást. A fenti eredmények azt erősítik meg, hogy a 80°C-on mért fotodegradációs sárgulás nem a fotodegradációs hatás és a termikus hatás összege, hanem a megemelt hőmérséklet megsokszorozza a fotodegradációs változást. A megemelt hőmérséklethez tartozó intenzívebb hőmozgás hozzásegít a változás megindításához szükséges aktivációs energia megteremtéséhez.



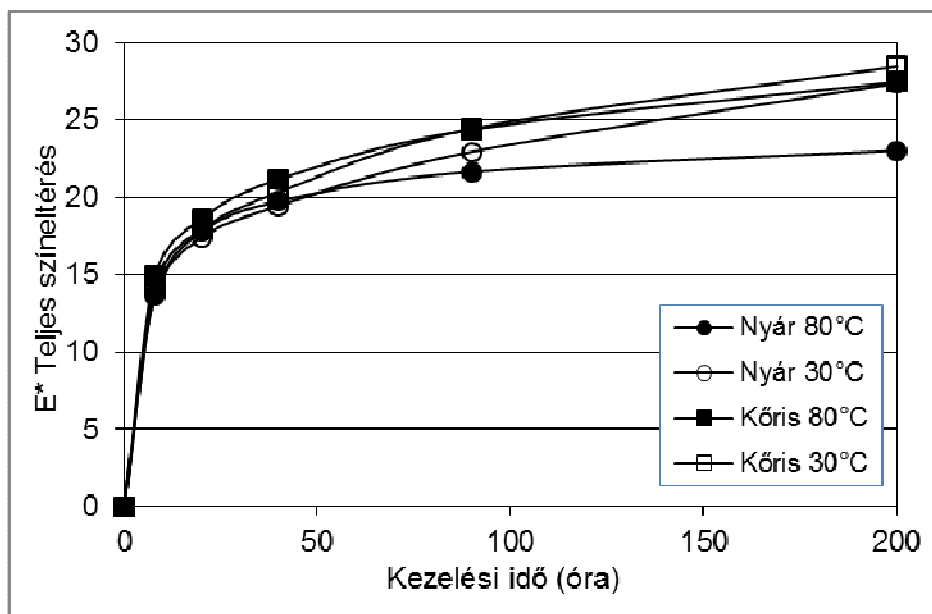
34. ábra Az akác sárga színezetének változása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.

4.2.4 Teljes színváltozás

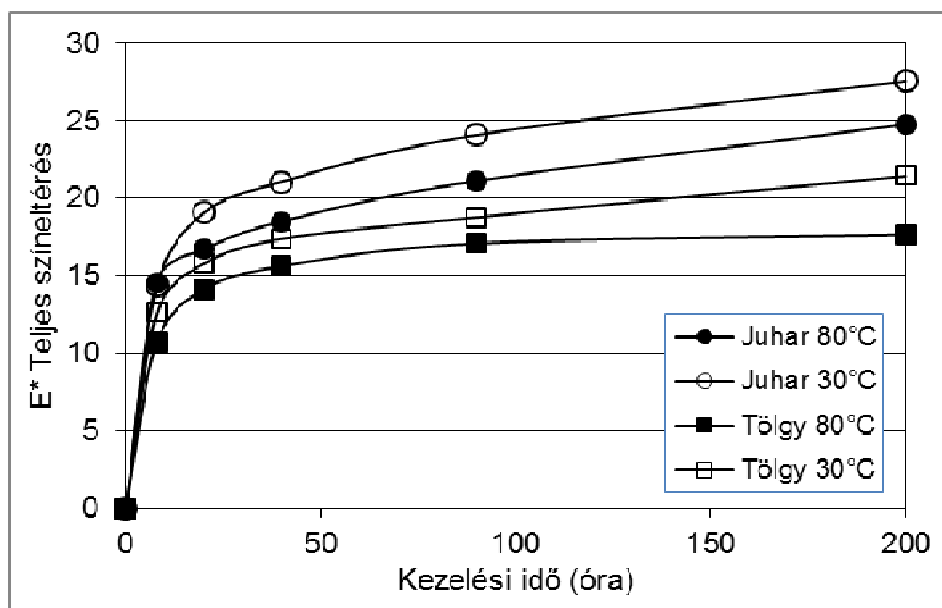
A szakirodalomban a színváltozást gyakran a teljes színváltozással szokták jellemezni, ezért meghatároztuk a teljes színváltozást is a vizsgált fajok esetében. Az eredményeket a 35-37. ábrákon mutatjuk be. A teljes színváltozást az egyes színkoordináták változásából a térbeli Pitagorasz tétellel kapjuk meg, ezért mindhárom színkoordináta változását magába foglalja. A nagyobb változások jelentősebb szerepet kapnak a teljes színváltozás értékében. Esetünkben a sárga színkoordináta mutatta a legnagyobb változást. A változás értéke 10,7 és 24,9 között volt. Ezt követte a világosság változása, melynek értéke 11,3 és 16,5 között változott. A legkisebb változást az a^* színkoordináta mutatta mely 4,4 és 7,7 között változott. Ezért nem véletlen, hogy a teljes színváltozás görbéinek lefutása a sárga színezet görbéihez hasonlít. Nagyon intenzív változás játszódik le a kezelés első 8 órájában, melyet lassuló tendencia, majd enyhe, lineáris növekedés követ. Szinte teljesen elveszik a vörös színezetben a kétféle hőmérsékleten történő kezelés hatására jelentkező eltérés a nyár és a kőris esetében. Éppen a vörös színezet változásai kerülnek hátrányos helyzetbe, pedig ez a színkoordináta mutatta egyöntetűen, mindegyik vizsgált mintánál a legnagyobb eltérést a kétféle kezelés között. Megállapíthatjuk, hogy a teljes színváltozás nem ad olyan részletes információt, mint az egyes színkoordináták külön-külön, előnye viszont, hogy a színváltozás egészét egyetlen számértékkel jellemzi.



35. ábra Az erdei fenyő és a lucfenyő teljes színváltozása 30 és 80°C-on történt fénylesugárzás hatására.



36. ábra A nyár és a kőris teljes színváltozása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.



37. ábra A juhar és a tölgy teljes színváltozása 30 és 80°C-on történt fénybesugárzás hatására.

4.2.5 Összefoglalás

A kutatásnál a fotodegradációs folyamat színváltoztató hatását vizsgáltuk. A próbatesteket higanygőz lámpával világítottuk meg 80°C-on és 30°C-on, hogy meghatározzuk a fotodegradáció során bekövetkező termikus változásokat. Az eredmények kimutatták hogy:

- a hőmérséklet hatása jelentős a faanyag fotodegradációja során.
- ugyanaz a fénybesugárzás lényegesen nagyobb vörös színkoordináta növekedést okoz 80°C-on mint 30°C-on.
- az erdei fenyő minták 80°C-on 57%-kal nagyobb vörös irányú színezetváltozást szenvedtek, mint 30°C-on.
- a legkevesebb extraktanyagot tartalmazó fafajok esetében volt a legkisebb vörös színezetváltozás. A szakirodalomban található eredményekre is alapozva megállapíthatjuk, hogy az extraktanyagoknak meghatározó szerepük van a vörös színezet változásában.
- a sárga színezet kétféle változást is mutatott. A fotodegradáció a sárga színezet növekedését okozta, míg a termikus hatás a sárga színkoordináta csökkenését produkálta. A fotodegradáció hatása a sárga színezet változására mindegyik fafajnál nagyobb volt, mint a termikus degradációé.

4.3 A színváltozásokat jellemző statisztikai adatok elemzése

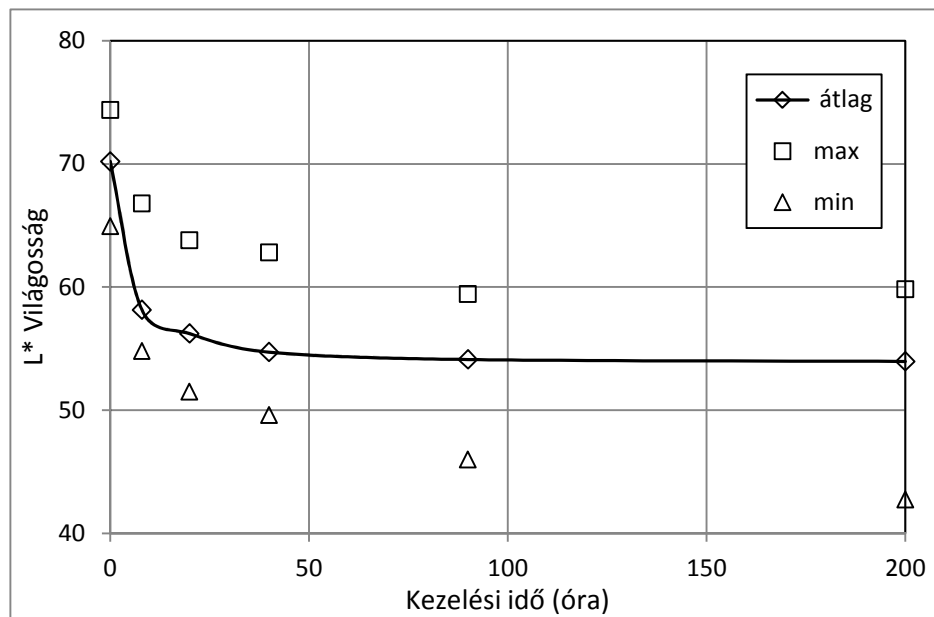
A higanygőz lámpás besugárzás során 15 fajtát teszteltünk, a 80°C-on történt higanygőz lámpás besugárzás eredményeit táblázatokba gyűjtöttem össze, illetve némelyik faanyag esetében az eredményeket grafikonon mutatom be. Mindegyik faj esetében 20 darab mintán végeztünk színmérést, 10 véletlenszerűen kiválasztott ponton. Így a statisztikai adatokat fajonként 200 mért értékből határoztuk meg.

4.3.1 Akác

Az akác világossága a higanygőzlámpás besugárzásra legintenzívebben az első 8 órában változott, átlagosan 64,17 értéket mutatott (70,2 – 58,13 között mozgott). A 200 órás mérés során folyamatosan csökkent a L^* értéke, a 200. órában 53,96 értéket mutatott. A csökkenés egyenletes volt a 8. órás eredmény után. A *minimum és maximum értékek távolsága folyamatosan növekedett a besugárzás során (38. ábra)*. Ez azt jelenti, hogy az akác faanyag világossága inhomogénebb lett, mint amilyen besugárzás előtt volt. Hasonló tendenciát mutatott az a^* és b^* koordináták minimum és maximum értékeinek alakulása is. Az a^* színkoordináta változása során folyamatos növekedés figyelhető meg az idő múlásával. Az értékek a vizsgálat során közel az eredeti 4-szeresére nőttek. A b^* színkoordináta változása eltér az a^* koordinátáétól. Az első órákban jelentős növekedés következett be, majd utána lassú, de egyenletes értéknövekedés volt tapasztalható. A három változó közül a b^* mozgott a legkisebb mértékben, tehát ez változott legkevésbé a kísérlet során. Ez az akác nagyon magas sárga színezetének tudható be. A legnagyobb változás a L^* koordináta esetében volt tapasztalható. Tehát a világossága változott a legnagyobb mértékben az akácnak 200 óra alatt.

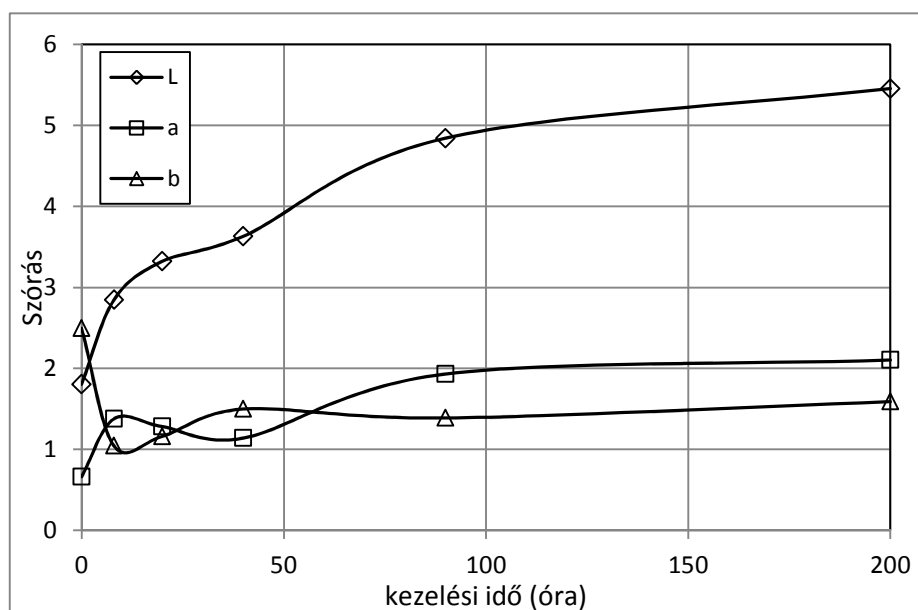
2. táblázat Az akác faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L^*			a^*			b^*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L^*	a^*	b^*
0	70,20	74,38	64,94	4,33	5,74	2,65	26,28	30,95	22,26	1,80	0,66	2,49
8	58,13	66,79	54,78	11,53	13,91	8,6	28,16	32,23	24,26	2,84	1,37	1,04
20	56,21	63,8	51,48	12,83	15,46	10,33	28,73	31,06	25,41	3,32	1,28	1,16
40	54,71	62,81	49,58	13,94	16,14	10,64	29,21	34,16	26,89	3,63	1,14	1,49
90	54,11	59,41	45,97	14,15	18,14	11,79	29,67	34,9	26,7	4,84	1,93	1,38
200	53,96	59,8	42,74	14,46	19,15	12,3	30,18	36,04	26,89	5,45	2,10	1,58



38. ábra A világosság minimum és maximum értékeinek alakulása akác esetében, higanygőz lámpás besugárzás hatására.

A 39. ábrán a különböző színkoordinátákhoz (L^* , a^* , b^*) tartozó értékek szórását lehet látni. Elmondható, hogy az idő múlásával az a^* és a b^* színkoordináta szórásai közelítettek egymáshoz, addig a L^* színkoordináta esetében 200 órás kísérlet végére már a 5,5 pontos szórás volt megfigyelhető. A szórás növekedése is a felület világossága inhomogenitásának a növekedését mutatja. A b^* változó esetében a mérés kezdetekor szignifikáns értékcsökkenés következett be, tehát az értékek közeledtek egymáshoz, majd enyhe növekedést lehet megfigyelni az értékekben.



39. ábra Az akác színkoordinátái szórásának változása higanygőzlámpás besugárzás hatására

Az a^* színkoordináta szóródásában ellentétes mozgás volt megfigyelhető, mint a b^* koordinátáéban. A mérés elején növekedett a szórás nagysága, majd kisebb csökkenés és lassú emelkedés volt megfigyelhető a 90. óráig, majd onnantól a kísérlet végéig szinte stagnáló értékeket mutat az ábra.

4.3.2 Amerikai cseresznye

A következő táblázatban az amerikai cseresznye faanyag vizsgálatának eredményei láthatóak.

3. táblázat Az amerikai cseresznye faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	71,06	73,95	67,03	10,11	12,85	7,17	20,42	25,02	17,72	1,52	1,48	1,11
8	55,91	62,48	52,34	14,05	15,99	8,39	25,85	28,99	21,98	3,44	2,27	1,17
20	53,86	60,42	50,48	14,31	17,11	9,25	25,82	29,23	23,95	3,64	2,28	0,86
40	52,85	59,28	45,63	14,54	17,7	9,68	25,99	30,54	23,07	3,88	2,17	0,80
90	51,80	59,1	42,46	14,75	19,74	9,91	26,04	30,4	23,34	4,60	2,79	2,07
200	50,05	59,57	40,77	14,81	20,06	10,42	26,27	31,82	23,55	4,55	2,64	1,91

Az L^* világossági koordináta nagyobb mértékű értékcsökkenést mutat a 200 órás vizsgálat során, mint az akác esetében. Több mint 25%-os értékcsökkenés volt megfigyelhető, tehát az amerikai cseresznye faanyag világossága szignifikáns változást mutatott. Az érték csökkenése az első 18 órában volt a legintenzívebb. Az a^* színkoordináta vizsgálatok hasonló eredményt mutatnak, mint az akác esetében, tehát a kezdő értékek egyenletes mértékű lassú emelkedést jeleznek. A b^* színkoordináta esetében szintén hasonló eredmények születtek, mint az akác faanyag mérései során. A kísérlet során 5-6 pontos emelkedés figyelhető meg, ami nem egyenletesen oszlott meg, hiszen az első 8 órában nagyobb volt az emelkedés mértéke, mint a maradék 192-ben.

Az értékek szórása ezen fajtánál teljesen máshogy alakult, mint az akác esetében. Elmondható, hogy mindhárom érték körülbelül azonos jellegű görbét írt le a szóródás tekintetében a kísérlet során.

4.3.3 Bükk

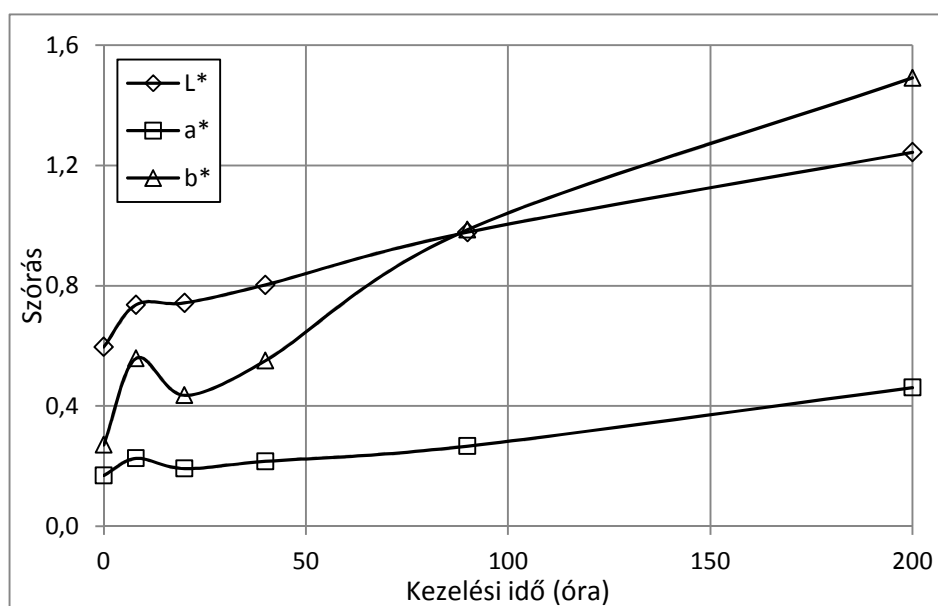
A harmadik vizsgálat alapja a gőzölt bükk faanyag volt. A vizsgálat eredményei az alábbi értékeket mutatták az L^* , a^* és b^* esetében. Az L^* világossági koordináta nagyon kismértékű és egyenletes csökkentés mutatott a kísérlet 200 órájában. Átlagosan 7%-os értékcsökkenés ment végbe a megfigyelés során. Az a^* színkoordináta értékei még az L^* értékeknél is mérsékeltebb változást mutattak.

4. táblázat A gőzölt bükk faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L^*			a^*			b^*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L^*	a^*	b^*
0	66,36	67,69	64,98	11,11	11,55	10,46	19,43	19,69	18,39	0,60	0,17	0,27
8	62,78	65,24	62,04	10,95	11,16	10,07	25,01	26,89	22,26	0,74	0,23	0,56
20	61,74	63,79	60,27	11,23	11,9	10,38	26,61	28,08	24,76	0,74	0,19	0,44
40	61,75	63,28	59	11,29	12,01	10,6	28,21	29,87	26,06	0,80	0,22	0,55
90	61,81	64,1	58,71	11,94	12,83	11,15	30,67	34,41	28,65	0,98	0,27	0,99
200	61,98	63,88	59,15	12,61	13,32	12,11	33,10	35	31,47	1,24	0,46	1,49

A növekedés szintén egyenletesen ment végbe. A b^* színkoordináta esetében mértük a legjelentősebb értékeltérést, amely 77%-os érték növekedést jelent.

Az L^* , a^* és b^* szórása a gőzölt bükk esetében az akáctól és az amerikai cseresznyétől is eltérően alakult. Az első 8 órában mindhárom érték intenzívebben nőtt, mint a maradék 192 órában. Mindhárom változó növekvő szórással rendelkezik, azonban nem konvergálnak egymáshoz. Az a^* és b^* koordináták kiindulása pontja közel van egymáshoz, de a 200. órában kapott eredmény e két tényező között a legnagyobb, mivel a b^* folyamatos meredek növekedő értéket mutat. Tehát a kezdeti hasonlóság után komoly eltérés észlelhető a két színkoordináta között. A vizsgálat közben kiderült, hogy L^* és az a^* változók szórása hasonló pályát jár be, a szórást mutató görbékük alakja hasonló, míg a b^* változóé teljesen különbözik tőlük (40. ábra).



40. ábra A gőzölt bükk színkoordinátái szórásának változása higanygőzlámpás besugárzás hatására

4.3.4 Cseresznye

A cseresznye faanyag esetében az L^* világossági koordináta csökkenő értéket mutat a vizsgálat során az idő elteltével, azonban az első 8 órában jelentős csökkenés figyelhető meg az értékekben, majd a 8. órától egyenletes értékcsökkenés tapasztalható.

5. táblázat a cseresznye faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	74,42	77,02	67,64	10,44	12,28	8,76	22,79	26,48	19,88	1,93	0,63	1,26
8	62,67	68,61	60,88	13,28	14,44	11,01	28,95	31,04	25,05	1,60	0,61	0,66
20	60,61	65,98	59,1	13,61	15,06	11,41	29,03	31,82	25,69	1,37	0,73	0,88
40	59,91	64,25	56,9	13,36	15,39	11,94	28,45	32,13	25,93	1,39	0,71	0,86
90	59,50	62,38	55,63	13,63	16,27	12,37	28,60	34,68	25,86	1,63	1,01	1,38
200	59,25	62,06	54,73	13,58	16,72	12,04	29,10	35,73	25,42	1,79	0,98	1,28

Az összesen 25%-os értékcsökkenésből 18%-os csökkenés az első 8 órában következett be. Az a^* színkoordináta értékei fokozatos emelkedést mutatnak, azonban a világossággal párhuzamosan a kísérlet első 8 órájában ment végbe komolyabb értéknövekedés. A b^* változó a korábban említett két mutatóval azonos módon változott, mivel ennek a változónak az értékváltozása szintén az első 8 órában volt a legintenzívebb. A cseresznye faanyag szórása

tekintetében az első 8 órában mindegyik színkoordináta csökkenést mutat, majd ezt lassú emelkedés követi. A három változó szórás görbéje azonos ívet ír le.

4.3.5 Dió

A 6. táblázatban a dió faanyag vizsgálatának eredményeit lehet látni. A világosság csökkenése egyenletesen zajlott. Figyelemre méltó, hogy a maximális értékeknél 40 óra után figyelhető meg a legalacsonyabb érték, míg a minimális értéknél 90 óránál mérték a legalacsonyabb értéket. Ez az átlagos értékeket is befolyásolta, ezért fordulhat elő, hogy az átlagos értéknél 40 óra után volt a legalacsonyabb az eredmény, és a 200. óráig emelkedés következett be. Tehát a világosság csökkenése az idő múlásával visszafordul.

Az a^* színkoordináta változása folyamatos, de egyenletes emelkedést mutatott. A b^* értékeknél árnyaltabb a mérés eredménye. Folyamatos növekedés figyelhető meg, azonban az emelkedés mértéke eltér az idősávokban. Az átlagos értékekben a legintenzívebb változás az első 8 órában történt, ez annak volt köszönhető, hogy a minimális értékek ebben az időintervallumban emelkedtek legnagyobb mértékben.

6. táblázat A dió faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	59,05	65,69	53,78	6,65	7,47	6,31	14,23	20,6	12,1	3,43	0,21	1,83
8	55,65	64,28	51,82	8,10	8,93	7,14	19,09	22,73	17,4	3,17	0,29	1,73
20	53,92	63,47	51,34	8,44	9,31	7,34	20,43	24,83	18,12	3,15	0,31	1,84
40	53,24	62,22	49,65	8,78	10,2	7,79	21,48	25,41	19,48	2,91	0,26	1,83
90	54,4	62,55	48,24	9,35	10,92	8,56	22,72	28,21	20,12	3,52	0,40	2,07
200	55,79	62,57	49,17	9,89	11,34	9,05	24,42	31,73	20,16	3,18	0,34	2,59

A maximális értékekkel kapcsolatban ugyanakkor a 90., 200.órás ellenőrzéskor mutatható ki a legnagyobb értéknövekedés. A szórás tekintetében a három görbe teljesen más ívet ír le. Az a^* értékei nagyon kicsiny szórást mutatnak.

4.3.6 Éger

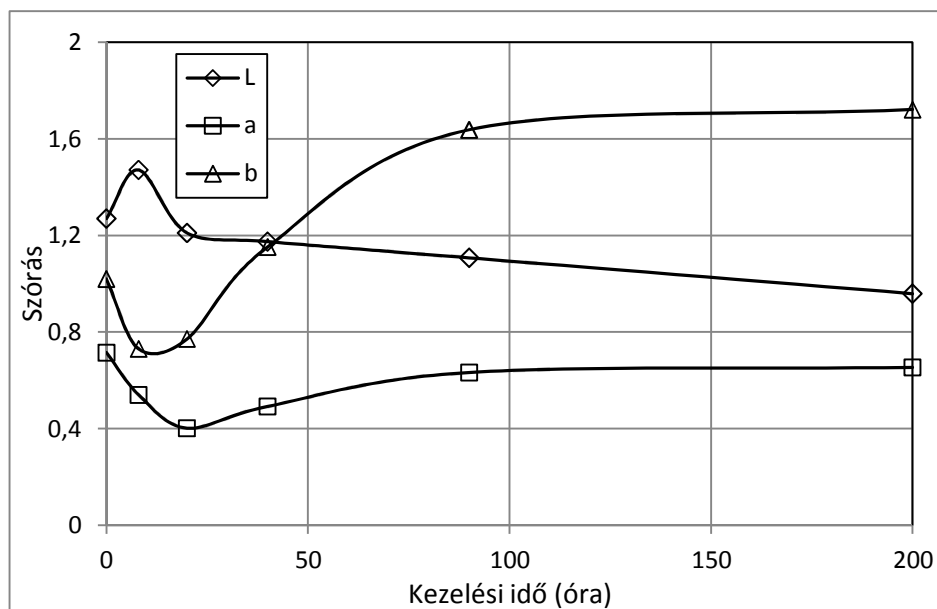
Az éger fánál –ahogy a 7. táblázatban látható – a kísérlet során a világosság csökkenést mutat, az első 8 órában a legintenzívebben, majd folyamatosan csökkenő intenzitással. Az a^* érték az éger faanyag esetében figyelemre méltó eredményeket mutat. Az első 20 órában emelkedés figyelhető meg az értékekben, különösen az első 8 óra meghatározó. A 20. óra után viszont csökkenés következik be az értékekben, amely még a 90. óránál is megfigyelhető, majd a 200.

órás mérésnél kaptuk a legmagasabb értékeket. Tehát ellentétes irányú változások mentek végbe az idő elteltével.

7. táblázat Az éger faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	79,29	83,31	77,26	8,31	9,59	6,21	22,09	23,55	19,36	1,27	0,72	1,02
8	70,38	74	68,24	10,37	11,83	8,34	29,07	31,35	25,37	1,47	0,54	0,73
20	67,05	70,28	65,08	11,11	12,38	9,74	28,99	31,15	27,07	1,21	0,40	0,77
40	64,97	68,58	61,89	10,88	12,31	9,73	28,13	31,99	26,99	1,17	0,49	1,15
90	63,69	66,22	60,04	10,74	12,66	10,07	28,39	32,58	26,68	1,11	0,63	1,64
200	62,25	64,28	58,47	11,21	12,88	9,67	30,56	33,82	27,75	0,96	0,65	1,72

A b* érték az első 8 órában szignifikáns emelkedést mutatott, és az a* változóhoz hasonlóan a 40. és a 90. órás mérésnél csökkenő adatokat kaptunk. Végül a 200. óra után mértük a legmagasabb értékeket. Az éger eltérő viselkedése valószínűleg a többi fafajtól eltérő extrakt anyag tartalmának tudható be. Ezek az extrakt anyagok könnyen degradálódnak. Ez történik a nedves faanyag felfűrészelésekor. A frissen vágott világos felület nagyon gyorsan elvörösödik.



41. ábra Az éger színkoordinátái szórásának változása higanygőzlámpás besugárzás hatására

Esetünkben a fotodegradáció keltette kromofor csoportok folyamatosan degradálódnak (valószínűleg oxidálódnak). A kromofor csoportok egyidejű keletkezése és bomlása okozza a színkoordináták hullámzó változását, attól függően, hogy melyik folyamat van túlsúlyban. Az egyes folyamatok eltérő sebességét jól szemlélteti a színkoordináták szórásának változása is (41. ábra). A szórás mindegyik esetben növekedett és csökkent is a kezelés során.

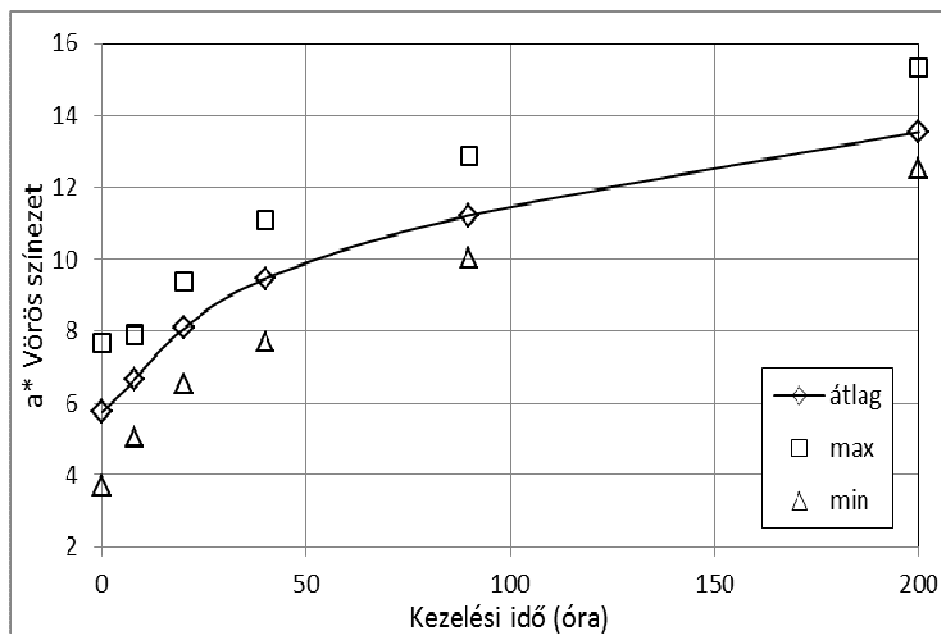
4.3.7 Erdei fenyő

A 8. táblázatban a higanygőzlámpás besugárzás erdei fenyőre gyakorolt hatását lehet számokban látni. A faanyag világosságában a legnagyobb változás az első 8 óra alatt ment végbe, utána egyenletes értékcsökkenés volt megfigyelhető. A vörös színkoordináta a végső értékintervallumot folyamatos, értéknövekedéssel érte el. A b^* színkoordinátáról nem lehet ezt elmondani, mivel az első 8 órában átlagosan 50%-kal növekedett az értéke. Ekkora változás már szignifikáns módosulást eredményez a faanyag színében.

8. táblázat Az erdei fenyő faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	82,17	85,58	78,12	5,75	7,66	3,7	22,25	25,47	20,55	1,72	0,84	1,10
8	76,21	80,03	74,09	6,66	7,91	5,06	33,07	35,52	29,76	1,18	0,53	0,76
20	74,60	77,07	72,46	8,07	9,37	6,52	36,63	38,91	33,81	1,11	0,46	0,45
40	72,30	75,23	70,66	9,46	11,1	7,72	38,40	41,48	36,18	1,05	0,44	0,43
90	70,84	73,57	67,16	11,21	12,88	10,03	40,01	44,68	37,38	1,14	0,52	0,92
200	67,87	70,63	64,57	13,54	15,34	12,53	41,70	45,92	38,03	1,24	0,63	1,15

A három tényező szórása azonos alakú görbét ír le, az első 40 órában csökkenést mutat, tehát az értékek egyre kevésbé térnek el az átlagtól, de a 40. óra után ez a tendencia megfordul és a szórások egyre nagyobbak lesznek. A szórás értékek a kezelés végén sem haladják meg a kezletlen minták szórási adatait. Az L^* és az a^* koordináta szórása lassú növekedést mutat, míg a b^* koordinátánál meredekebb emelkedés tapasztalható. A szórás értékek nagyon kicsik, többnyire egy alatt maradnak. A legnagyobb érték is csak 1,7. A kismértékű inhomogenitás csökkenést jól szemlélteti a maximum és minimum értékek alakulása is. A minimum és maximum értékek párhuzamosan futnak az átlagot mutató görbével. A 42. ábra a vörös színezet adatait szemlélteti. Itt kismértékű közeledés figyelhető meg a minimum és a maximum értékek között. A másik két koordináta is hasonló változást mutatott.



42. ábra A vörös színezet minimum és maximum értékeinek alakulása erdei fenyő esetében, higanygőz lámpás besugárzás hatására.

4.3.8 Hárs

Az L^* koordináta a hárs faanyag esetében eltérően viselkedett a fenyőhöz képest (9. táblázat). A mérés során az első 8 órában jelentős értékcsökkenés ment végbe (10%), ami a 8-90. óra között lassan folytatódott, mivel a 90. órás mérésnél 72,94 átlagos értéket kaptunk. 200 óra után azonban ez az érték enyhén emelkedett, és végül a 73,28 értékponton állt meg.

9. táblázat A hárs faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L^*			a^*			b^*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L^*	a^*	b^*
0	83,53	85,69	82,48	4,03	5,41	2,98	19,55	20,77	17,83	0,71	0,29	0,56
8	75,63	79,49	73,79	6,87	8,08	5,91	28,89	32,04	25,71	0,53	0,23	0,73
20	74,08	77,01	71,91	7,56	8,72	6,54	29,78	32,55	27,59	0,76	0,31	0,73
40	73,27	76,23	70,66	7,91	9,1	6,72	30,11	34,48	28,18	1,05	0,44	0,43
90	72,94	74,47	70,15	8,14	9,41	7,15	31,45	34,98	28,41	0,91	0,41	1,09
200	73,28	75,38	69,54	8,24	9,41	7,11	32,21	35,64	29,38	0,94	0,51	1,41

Az a^* színkoordinátának az első 8 óra után egyenletesen emelkedett az értéke. A 90. óra után azonban a maximális értékhatár nem emelkedett, csak a minimális értékhatár. A b^* esetében

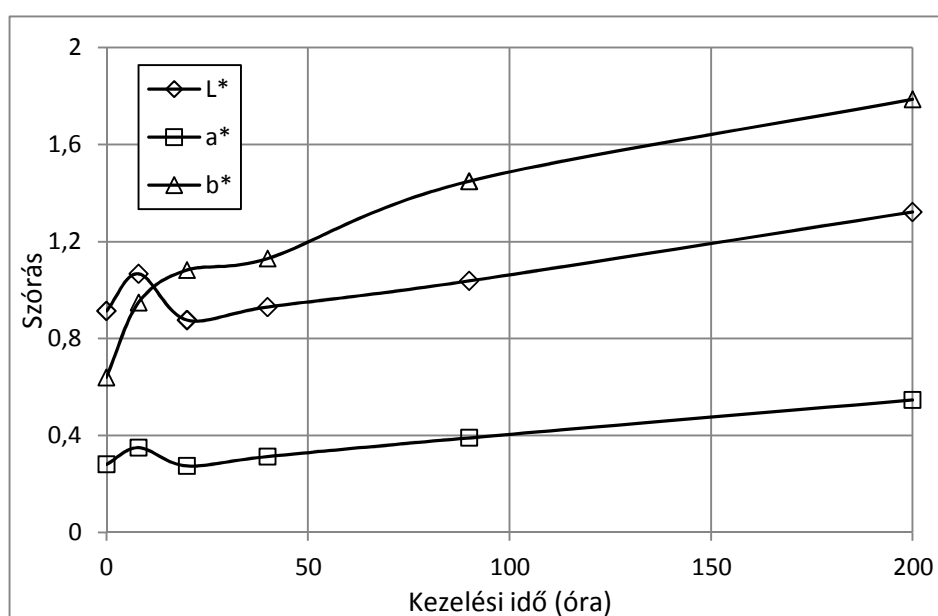
az első 8 órában a fenyőhöz hasonlóan 47%-os értékemelkedés következik be. A 200 óra alatt többször metszette egymást az L^* és a b^* illetve egyszer az a^* és a b^* szórás görbe. Mivel az L^* és az a^* görbe azonos ívet ír le, míg a b^* esetében ellentétes folyamatok figyelhetők meg, tehát amikor L^* és a^* szórás értéke csökken, akkor b^* szórásértéke emelkedik és fordítva.

4.3.9 Juhar

A 10. táblázatban a juhar faanyag értékei találhatóak, amelyek a kísérlet során készültek. A juhar világossága az előző eredményekhez hasonlóan az első 8 órában változott a legintenzívebben, majd az egyenletes kismértékű csökkenés folytatódott a 200 órás vizsgálat során. Az a^* és a b^* színkoordináta esetében elmondható, hogy az első 8 órában volt a legszignifikánsabb az értékváltozás. Majd folyamatos értékemelkedés volt tapasztalható.

10. táblázat A juhar faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kéz. idő (óra)	L^*			a^*			b^*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L^*	a^*	b^*
0	82,76	85,47	81,04	4,33	5,66	3,33	15,82	18,55	13,54	0,91	0,28	0,64
8	74,81	78,29	72,23	6,57	7,46	5,66	27,81	29,99	22,89	1,07	0,35	0,95
20	72,32	74,87	70	7,13	8,52	6,15	28,55	31,82	24,9	0,88	0,27	1,08
40	70,54	73,57	68,23	7,76	9,15	6,7	29,28	33,5	26,75	0,93	0,31	1,13
90	68,23	71,42	65,01	8,34	9,91	7,54	30,61	35,35	27,43	1,04	0,39	1,45
200	66,18	69,64	63,77	9,56	10,99	7,83	33,47	38,25	29,22	1,32	0,55	1,79



43. ábra A juhar színkoordinátái szórásának változása higanygőzlámpás besugárzás hatására

A három színkoordináta szórásának görbéje azonos ívet ír le (43. ábra). Ez azt jelenti, hogy az első 8 órában mindhárom szórás értéke emelkedik, majd kicsit csökken a 20. órás mérésre, és ezután a 200. óráig egyenletes emelkedést mutatnak a szórás adatok. Ez azt eredményezi, hogy a 3 szórásérték párhuzamosan mozog, és a juhar faanyag színe egyre inhomogénebb lesz.

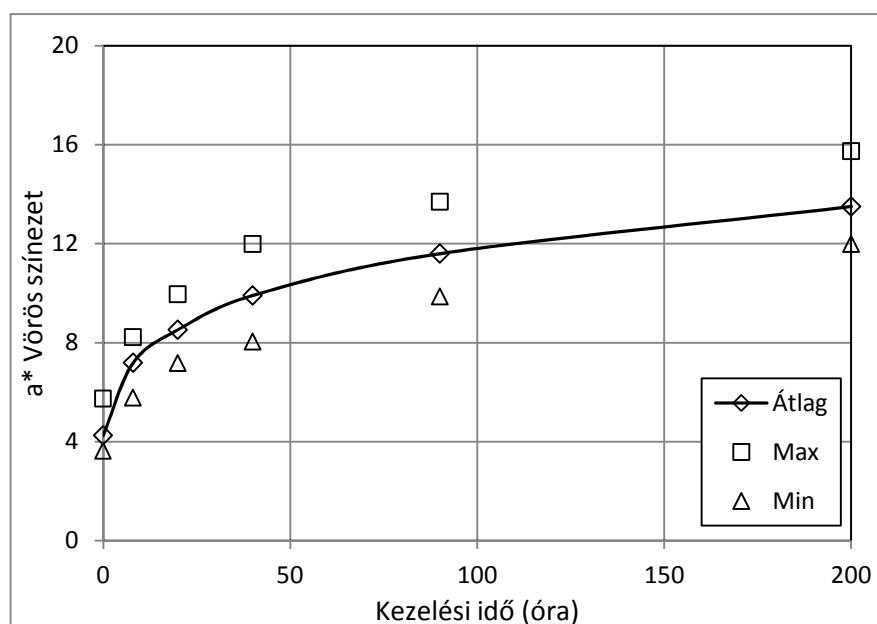
4.3.10 Kőris

A kőris faanyag vizsgálatának eredményeit a 11. táblázatban lehet látni, amely szerint a kőris világossága legnagyobb mértékben az első 8 órában változott. Ez a közel átlagosan 9,5 %-os értékcsökkenés lassan folytatódott a továbbiakban.

11. táblázat A kőris faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	83,10	85,3	78,84	4,24	5,74	3,62	19,53	22,38	16,46	1,30	0,45	1,26
8	75,71	79,37	72,97	7,18	8,22	5,78	32,17	34,45	29,17	1,23	0,45	1,11
20	74,00	78,26	71,67	8,52	9,95	7,17	34,23	36,99	31,45	1,29	0,55	1,18
40	71,95	75,83	69,76	9,90	11,99	8,04	36,61	39,67	33,69	1,10	0,48	1,00
90	70,10	73,38	66,99	11,59	13,69	9,87	38,80	43,17	35,02	1,34	0,74	1,75
200	67,85	71,23	63,86	13,50	15,74	11,98	40,41	44,23	37,34	1,34	0,80	1,66

Az a* és a b* változó értékelelkedésének üteme azonosan az L*-hez, szintén az első 8 órában volt a legnagyobb mértékű. Az a* a 8. óra után egyenletes értékelelkedést mutatott a vizsgálat alatt, míg a b* az első 8 órás átlagos 64,7%-os értékelelkedés után átlagosan 6%-os emelkedést mutatott a 20., 40., 90. és a 200. órás ellenőrzésnél. A kőris faanyag esetében a színkoordináták szórásainak görbéi azonos ívet írtak le, azonban az értékek növekedésének illetve csökkenésének mértékei eltérőek. A b* és L* koordináta szórása a 200 órás vizsgálat során közel halad egymáshoz. Az a* szórása csak annyiban tér el a sárga színezetétől, hogy az értékek alig fele akkorák. A kismértékű színezetbeli inhomogenitás emelkedését a szórás értékek mellett jól szemléltetik a minimum és maximum értékek változásai is (44. ábra). A minimum és a maximum értékek kis mértékben távolodtak egymástól a 200 órás fénybesugárzás során. Ez a távolodás a vörös és a sárga színezetre egyaránt jellemző volt.



44. ábra A vörös színezet minimum és maximum értékeinek alakulása kőris faanyag esetében, higanygőz lámpás besugárzás hatására.

4.3.11 Lucfenyő

A lucfenyő világossága a 200 órás megfigyelés során folyamatosan csökkent, az első 8 órában a legintenzívebben. Az első 8 órában megtörtént a teljes változás 45%-a. Ezt követően a változás fokozatosan lassult, de továbbra is jelentős maradt.

12. táblázat A lucfenyő faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	86,62	88,54	83,13	2,92	4,02	2,53	16,81	18,64	16,08	0,69	0,21	0,50
8	80,11	83,05	78,01	4,93	5,78	4,14	31,49	32,87	28,96	0,72	0,26	0,65
20	78,50	81,15	76,12	6,44	7,53	5,19	34,51	36,88	32,54	0,58	0,24	0,59
40	76,19	78,92	73,7	7,86	8,83	6,96	37,24	40,92	35,15	0,64	0,29	0,63
90	74,64	76,83	72,57	9,61	10,63	8,45	39,07	42,63	36,9	0,63	0,38	1,07
200	72,29	74,43	70,3	11,81	12,81	10,48	40,21	43,46	37,2	0,76	0,52	1,31

Az a^* színkoordináta egyenletes értéknövekedést mutatott, az első 8 órában sem volt kiemelkedő a növekedés mértéke. Ezzel szemben a lucfenyő faanyag b^* színkoordinátája az első 8 órában jelentős mértékben változott a besugárzás hatására, 87,3%-os értékemelkedés volt tapasztalható ezen rövid idő alatt. A kísérlet folyamán a 8. óra után, a változás lelassult de egyenletesen növekedett tovább a b^* értéke. Tehát a lucfenyő faanyagnál a b^* koordináta

intenzív változását az első 8 órában figyelembe kell venni. A lucfenyő faanyag kevés extrakt anyagot tartalmaz, ezért a sárga színezet növekedése a lignin degradációjával hozható kapcsolatba. Az eredményül kapott értékek szórásai azonos ívű görbéken helyezkednek el, de az értékek csökkenés- és növekedés mértéke eltérő. Kiemelkedik az b^* színkoordináta szórása, mivel ennek az értéke közel megháromszorozódott a kezelés során, de még így is alacsony érték maradt.

4.3.12 Nyír

A 13. táblázat a nyír faanyag vizsgálatának értékeit tartalmazza. Az értékek alapján elmondható, hogy az L^* világossági változó a nyír esetében folyamatos csökkenést mutat, de az átlagos érték a 200. órában ismét növekedett. Ez köszönhető annak, hogy a minimális értékhatár megemelkedett az utolsó mérési időpontban, eltérően a korábbi csökkenő tendenciától.

13. táblázat A nyír faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L^*			a^*			b^*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L^*	a^*	b^*
0	73,93	79,83	69,27	6,91	8,53	5,81	16,87	19,25	15,74	2,14	0,76	0,67
8	69,76	73,16	66,4	7,32	8,61	6,36	26,73	28,47	23,34	1,91	0,52	0,80
20	67,71	71,08	63,93	7,85	8,91	7,01	28,45	31,26	25,51	1,77	0,44	1,05
40	66,60	70,7	63,06	8,77	9,96	7,35	30,16	34,19	27,46	1,53	0,34	1,28
90	66,60	69,8	62,58	9,56	11,38	8,29	32,24	37,73	28,17	1,65	0,59	2,14
200	66,78	69,68	62,96	10,46	12,77	8,86	34,10	42,02	29,81	1,39	0,81	2,62

Az a^* koordináta növekedése fokozatosan és egyenletesen történt. A b^* színkoordináta az első 8 órában szignifikáns emelkedést mutatott, majd egyenletes, lassú növekedésű értékek figyelhetők meg a mérések során. A mért értékek szórása a nyír faanyag esetében hektikus. Míg a kiinduláskor az a^* és a b^* színkoordináták szórás értékei szinte azonosak voltak, addig a 200. órára ezeknek az értékei kerültek a legtávolabb egymástól. A b^* metszette az L^* görbét is, és a tendencia folyamatos érték emelkedést feltételez 200 óra után is. Ezzel szemben az L^* és az a^* változók szórás értékei közelítenek egymáshoz, L^* csökkenő, a^* növekvő tendenciát mutatva.

4.3.13 Nyár

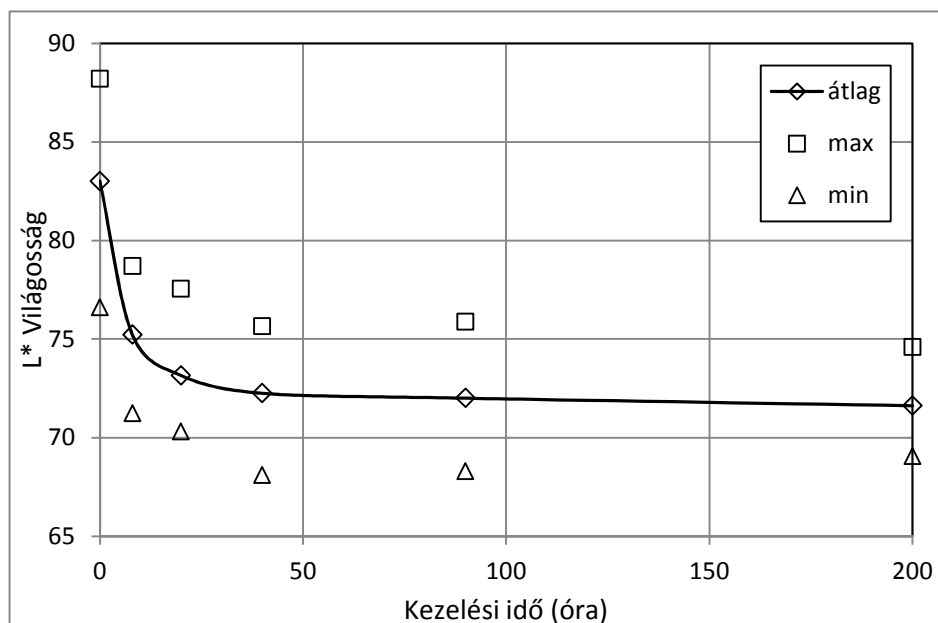
A nyár faanyag mérési eredményei a 14. táblázatban találhatóak. Ezekből a mérésekből arra lehet következtetni, hogy a nyár világossági koordinátája folyamatosan mérséklődik, de az

első 8 órában fokozottabb a csökkenés mértéke. Nem történt számottevő világosság csökkenés a 20 órát követő besugárzás során.

14. táblázat A nyár faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	83,01	88,2	76,6	3,65	5,96	2,16	17,25	18,81	15,69	2,82	0,89	0,66
8	75,23	78,72	71,23	5,83	7,14	4,06	28,37	31,52	26,34	2,46	0,70	0,80
20	73,15	77,55	70,31	7,07	8,05	5,95	31,65	33,6	29,07	2,24	0,43	1,10
40	72,25	75,64	68,11	8,03	9,02	7,02	33,22	36,49	31,4	2,06	0,42	1,04
90	72,00	75,87	68,3	9,07	9,99	7,95	35,09	38,59	32,5	1,83	0,39	1,43
200	71,62	74,59	69,06	10,26	11,42	9,26	36,13	39,25	33,37	1,46	0,42	1,58

Az a* és a b* színkoordináták esetében folyamatos növekedés figyelhető meg, de az első 8 óra intenzitása után fokozatos lassulás észlelhető az értékek növekedésében. A szórás értékeit megvizsgálva azt láthatjuk, hogy az a* és b* színkoordináta értékeinek szórása a közel azonos kiinduló helyből a vizsgálat során fokozatosan távolodott egymástól, míg a magas értéken nyitó L* világossági koordináta szórása egyenletesen csökkent. A sárga



45. ábra A világosság minimum és maximum értékeinek alakulása nyár faanyag esetében, higanygőz lámpás besugárzás hatására.

színkoordináta változása növelte, míg a vörös színkoordináta változása csökkentette a felület színének inhomogenitását. A világosság tekintetében a felszín jelentősen homogenizálódott. Ezt mutatja a minimum és maximum értékek közeledése (45. ábra) és a világosság szórásának jelentős csökkenése is.

4.3.14 Tölgy

A tölgy faanyag L^* színkoordinátáinak értékei az első 8 órában erőteljesen csökkentek, majd a csökkenés intenzitása megállt, a legutolsó mérés alapján szinte stagnáló eredményeket hozott.

15. táblázat A tölgy faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L^*			a^*			b^*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L^*	a^*	b^*
0	72,19	75,23	68,08	5,79	6,39	5,19	20,74	21,67	19,74	1,33	0,22	0,38
8	63,06	66,49	60,98	7,62	8,48	6,86	26,02	28,89	24,39	0,94	0,22	0,82
20	61,20	63,31	58,28	8,81	9,88	7,64	29,09	31,56	27,49	0,70	0,23	0,73
40	60,44	62,78	57,75	9,69	10,45	8,82	30,25	33,54	28,38	0,66	0,25	0,54
90	59,53	61,84	57,16	10,78	12,01	9,74	31,06	34,76	28,92	0,80	0,38	0,86
200	59,34	61,17	56,86	11,39	12,69	10,36	31,45	35,11	28,46	0,91	0,49	1,15

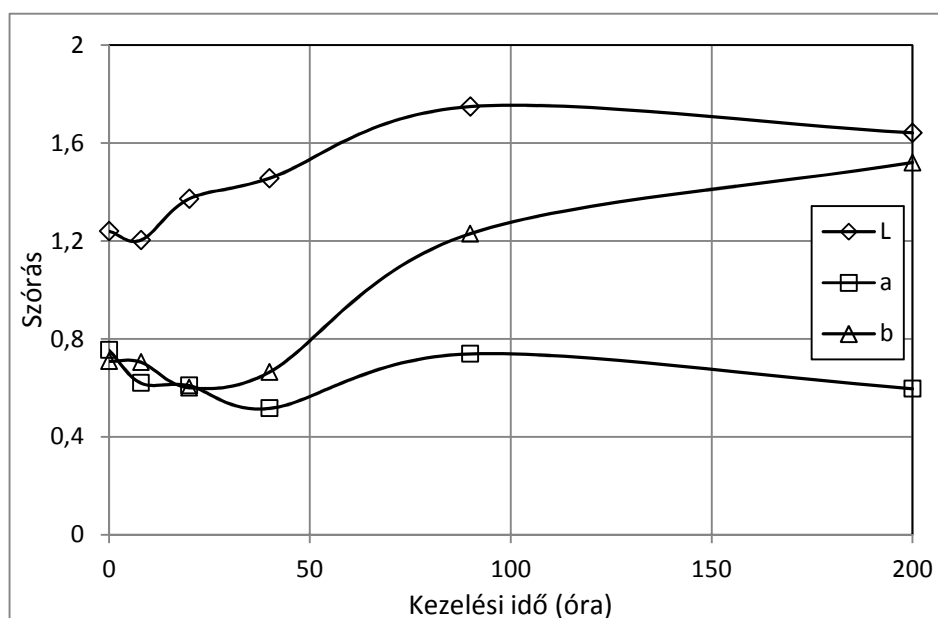
Az a^* és a b^* koordináta értékei emelkedő tendenciát mutattak. A 8. órában mért adatok alapján ezen időintervallumban sokkal aktívabb értékelmelkedéssel bír, mint az elkövetkező 192 órában, ugyanis az értékelmelkedés mértéke csökkent. A tölgy faanyag színkoordináta értékeinek szórásáról elmondható, hogy a b^* színkoordináta, ellentétesen mozgott az a^* és az L^* koordinátával az első 40 órában. A 40. órát követően mindegyik koordináta szórása növekedett.

4.3.15 Vörösfenyő

A 16. táblázatban a vörösfenyő faanyag vizsgálatának eredményei találhatóak. Az eredmények alapján elmondható, hogy az L^* világossági koordináta értékei fokozatos csökkenést mutatnak, az első 8 óra szignifikáns csökkenése után a világosság fokozatosan és egyenletesen változik. A b^* színkoordináta az első 8 órában változott legnagyobb mértékben.

16.táblázat A vörösfenyő faanyag színváltozásának statisztikai adatai higanygőz lámpás besugárzás hatására.

Kez. idő (óra)	L*			a*			b*			Szórás		
	átlag	max	min	átlag	max	min	átlag	max	min	L*	a*	b*
0	76,16	78,05	73,71	11,04	12,98	10,04	25,61	28,17	24,11	1,24	0,75	0,71
8	66,41	68,72	64,26	11,72	13,21	10,38	29,10	32,01	25,63	1,20	0,62	0,70
20	63,49	66,12	61,34	12,16	14,34	10,84	29,96	33,27	27,55	1,37	0,61	0,60
40	62,01	65,08	58,25	12,80	15,01	11,42	30,88	34,62	28,60	1,46	0,52	0,66
90	60,62	64,4	56,17	13,98	16,02	12,32	32,45	35,58	29,29	1,75	0,74	1,23
200	58,76	62,72	54,25	15,17	16,79	13,09	33,26	36,62	29,88	1,64	0,60	1,52



46. ábra A vörösfenyő színkoordinátái szórásának változása higanygőzlámpás besugárzás hatására

A vörösfenyő színkoordinátái értékeinek szórása eltér az átlagos tendenciától. A 200 órás vizsgálat végén azt lehet megállapítani, hogy az L* és a b* koordináták szórásai közelednek egymáshoz, távolodva az a* szórásának értékeitől, annak ellenére, hogy az a* és a b* szórások kiindulási értékei megegyeznek (46. ábra). A vörös színezet szórása gyakorlatilag nem változott a kezelés során, ellentétben a másik két koordinátával, melyek többnyire növekedtek.

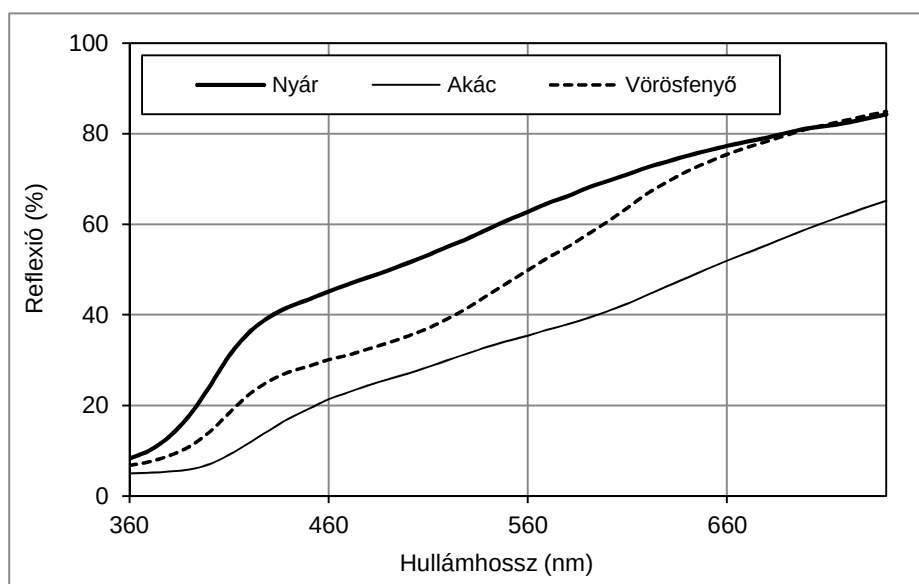
4.3.16 Összefoglalás

megállapíthatjuk, hogy:

- a vizsgált fajok többségénél a fénybesugárzás növelte a minták színbeli inhomogenitását.
- a legnagyobb szórásnövekedést az akácnál és az amerikai cseresznyénél találtuk. Ezeknél a fajoknál a világosság szórása volt a legnagyobb 5 körüli értékkel, míg a másik két koordináta esetében a szórás 2 körül alakult.
- egyértelmű, de csak kismértékű színbeli homogenizálódást csak az erdeifenyőnél találtunk.
- a többi vizsgált fajnál csak kismértékű színbeli homogenitás változást tapasztaltunk a fénybesugárzás hatására.

4.4 A kezeletlen minták színének elemzése

A tárgyak színét az határozza meg, hogy a rájuk eső látható fényt az egyes hullámhosszokon milyen mértékben verik vissza. A faanyag intenzíven elnyeli a fényt, a benne lévő sokféle fényelnyelő kémiai csoportnak köszönhetően. Az elnyelési tulajdonságok határozzák meg a faanyag reflexiós színeképét. A 39. ábra a vörösfenyő, a nyár és az akác sugárirányú metszeten mért reflexiós színeképét mutatja. Az ábra jól szemlélteti, hogy *a faanyag a ráeső fényből a vörös tartomány jelentős részét (70-80 %-át) visszaveri, míg a kék tartomány döntő részét (több mint 90 %-át) elnyeli*. Ez a tény okozza, hogy a faanyag színe a vörös és a sárga keverékeként meleg, barnás árnyalatú. Teljesen hiányzik belőle a rideg kék szín.

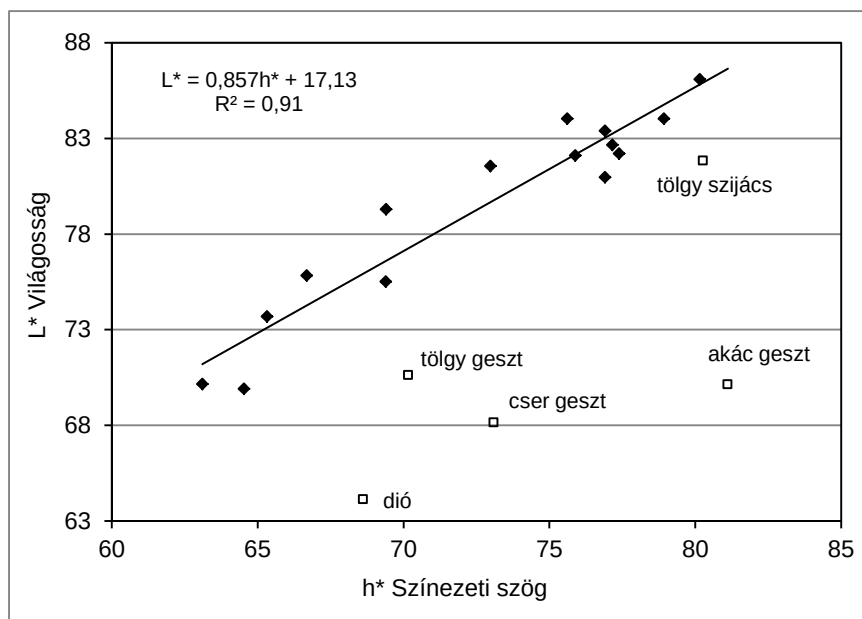


39. ábra A vörösfenyő, a nyár és az akác sugárirányú metszeten mért reflexiós színeképe

A látható tartomány középső részén a reflexió mértéke közel lineárisan csökken. A világos faanyagok reflexiós színeképe magas reflexiós értékeknél helyezkedik el. Ezeknél a faanyagoknál jelentős és meredek a reflexió csökkenése a kék tartományban. A sötét színű faanyagoknál a teljes tartományban alacsonyabbak a reflexió értékei, mint a világos faanyagok esetében. A világosság növekedése emeli, csökkenése pedig süllyeszti a reflexiós színeképet. A színezetet viszont az egyes hullámhosszokhoz tartozó reflexiók aránya határozza meg. A jellegtelen, szürkés színű faanyagok esetében a reflexiós színekép majdnem egyenes, alig tartalmaz görbületet.

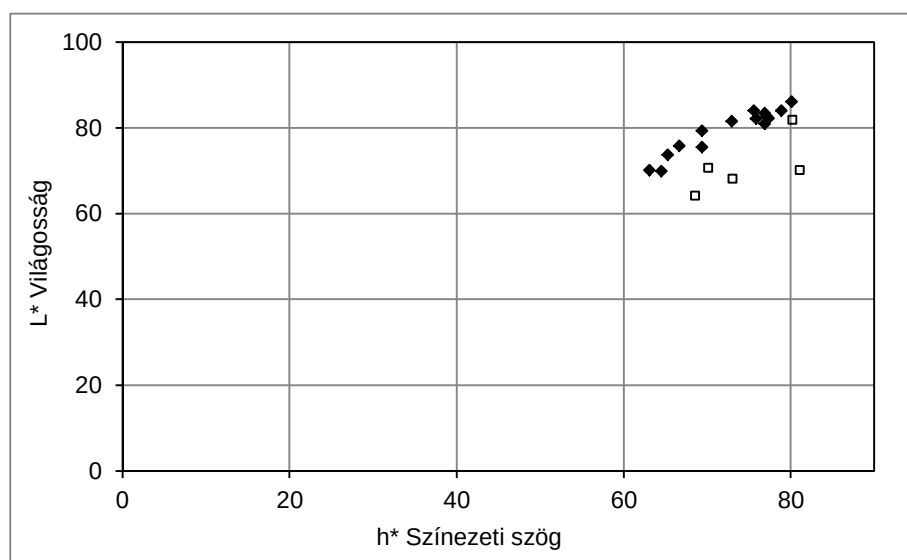
A tárgyak színét a kémiai szerkezetükben jelen lévő konjugált kettős kötések határozzák meg. A faanyag esetében ilyen kötések a ligninben és a járulékos (extrakt) anyagokban találhatók. A lignintartalomban nincsenek nagy eltérések a fafajok között, ezért a fafajok közötti színeltérést az extrakt anyagokban mutatkozó eltérések okozzák. Az extrakt anyagok jelentős része a gesztelés során rakódik be a faanyagba. Ezért a geszt és a szíjács között jelentős színeltérés alakulhat ki. Erre legjobb példa az ébenfa a világos szíjácsával és a majdnem fekete gesztjével. A termőhelynek is szerepe van, de a fa kora is befolyásolja a kialakuló színt. A termőhelyek színt befolyásoló szerepe van annyira jelentős, hogy érdemes legyen ezt a jövőben kutatni. Az idősebb korban valamivel sötétebb évgyűrűk képződnek, mint fiatal korban. A felfűrészelés után a friss felület a levegővel érintkezve elszíneződhet. A frissen felfűrészelt éger faanyag színe gyorsan eltolódik a vörös irányába. Hasonló dolog történik az akác faanyaggal az ultraibolya fény hatására. A magas cseresavtartalmú fák az acélszerszámokkal érintkezve megkékekülnek az érintkezési felületen (Tolvaj 2013).

A faanyag színe a vörös és a sárga közötti tartományba esik. A hengerkoordináta rendszerben (L^* ; h^* ; C^*) a h^* , színezeti szög segítségével lehet a színezeteket megadni, ahol a 0 fokhoz a vörös-, a 90 fokhoz a sárga színezet tartozik. A közbülső értékekhez a vörös és a sárga közötti színezetek tartoznak. A faanyag sárga színezetét mindig jóval nagyobb számértékek jellemzik, mint a vörös színezetét. Ez jól látszik az a^* és b^* színkoordináták összehasonlításakor. A nagyon sötét, csokoládé barnára gőzölt akác esetében is 56° fölött marad a színezet. Az európai fafajoknál nem találunk 50° alatti színezeti szöget. A sárga színezet is mindig 85° alatt marad. A magas sárga színezet miatt a faanyag barnás árnyalatot vesz fel, ha megnöveljük a vörös színezetét. Természetes állapotában a világos faanyagok inkább sárgák, míg a sötét színű faanyagok esetében relatíve magas a vörös színezet. Ezért összefüggés figyelhető meg a színezeti szög és a világosság között. Ezt a kapcsolatot szemlélteti a 40. ábra, melyen magyarországi fafajok adatait mutatjuk be. Az ábrára föltettük néhány további, a fotodegradációs színváltozásnál nem vizsgált fafaj színpontjait is. Az ábrán nem nevesített faanyagok: bükk; erdeifenyő; éger; hár; juhar; kései meggy; kör; lucfenyő; nyár; nyír; vadcsereesznye; vörösfenyő. Ezek színpontjai jól illeszkednek egy pozitív meredekségű egyenesre. Az illeszkedést jellemző szórásnégyzet értéke 0,91. Mindössze néhány fafaj, melyeknek nagy az extraktanyag tartalma, helyezkedik el a vonaltól távolabb. Ezek a faanyagok a tölgy (a szíjács és a geszt), a dió, az akác gesztje a cser gesztje (Tolvaj, Persze, Lang 2013).



40. ábra A magyarországi fafajok színezeti szögének és világosságának kapcsolata.

A kinagyított 40. ábrán az eltérés nagynak tűnik. Ha a teljes vörös-sárga színezettartományt ábrázoljuk (41. ábra), akkor látszik, hogy az eltérések nem jelentősek. Az ábra jól mutatja, hogy a teljes színezeti szög és világosság tartománynak csak egy nagyon kis részét foglalják el az európai fafajok.



41. ábra A magyarországi fafajok elhelyezkedése a színezeti szög –világosság grafikonon.

A trópusi fafajok között sokkal extrémebb színezetű faanyagok is előfordulnak, köztük kékes árnyalatúak is. A legextrémebb színű faanyagok az ébenfa gesztje és a zebrano.

4.4.1 Összefoglalás

- lineáris összefüggés figyelhető meg a színezeti szög és a világosság között.
- a bükk; erdeifenyő; éger; hárs; juhar; kései meggy; kőris; lucfenyő; nyár; nyír; vadcseresznye és vörösfenyő faanyagok színpontjai jól illeszkednek egy pozitív meredekségű egyenesre, melynek az illeszkedést jellemző szórásnégyzet értéke 0,91.
- A nagy extraktanyag tartalmú fafajok, mint a tölgy, dió, akác és cser gesztje távolabb helyezkednek el az egyenestől.

5 A kutatási eredmények összefoglalása

A higanygőz lámpás és ablaküveg mögötti napfény besugárzásos vizsgálatok azt mutatták, hogy:

- hosszútávon a második csoportba sorolt faanyagok (akác, kései meggy, vadcserezsnye, éger, hárs) színe a legstabilabb a fotodegradációval szemben hosszútávon, annak ellenére, hogy a kezelés kezdetén ezeknél a fajoknál voltak a legintenzívebb változások. Az első 8 órában módosult szín viszont tartósnak mutatkozott, még az erős UV sugárzást kibocsátó higanygőz lámpa esetében is.
- A legkisebb színváltozást a nyír faanyag mutatta.
- A legsérülékenyebb a fenyőfélék és a kőris színe. Ezeknél a fajoknál folyamatos színváltozást tapasztaltunk a teljes vizsgált időtartamban.
- Megállapítottuk, hogy a teljes színváltozás (E^*) vizsgálata nem ad olyan részletes információkat a színváltozásról, mint az egyes színkoordináták részletes elemzése.
- Az eredmények azt is mutatják, hogy a színváltozás kettős folyamat. A fénybesugárzás károsítja a faanyagban meglévő kromofor kémiai csoportokat, de a lignin és az extrakt anyagok degradációját követő oxidáció során újabb kromofor csoportok keletkeznek.
- A két változás üteme fafajonként eltér, de jelentősen függ a fénybesugárzás hullámhossz eloszlásától is.
- Napsugárzás esetén a faanyagok többségénél a faanyagban meglévő kromofor kémiai csoportok bomlása intenzívebb volt, mint az új kromofor csoportok épülése, a kezelés első 8 órája során.
- Az eredmények alátámasztják azt a korábbi megfigyelést, hogy a higanygőz lámpa nem alkalmas a rövididejű napfény besugárzás imitálására.

A hőmérséklet fotodegradációra való hatásával kapcsolatos vizsgálatok kimutatták hogy:

- a hőmérséklet hatása jelentős a faanyag fotodegradációja során.
- ugyanaz a fénybesugárzás lényegesen nagyobb vörös színkoordináta növekedést okoz 80°C-on mint 30°C-on.
- az erdei fenyő minták 80°C-on 57%-kal nagyobb vörös irányú színezetváltozást szenvedtek, mint 30°C-on.

- a legkevesebb extraktanyagot tartalmazó fafajok esetében volt a legkisebb vörös színezetváltozás. A szakirodalomban található eredményekre is alapozva megállapíthatjuk, hogy az extraktanyagoknak meghatározó szerepük van a vörös színezet változásában.
- a sárga színezet kétféle változást is mutatott. A fotodegradáció a sárga színezet növekedését okozta, míg a termikus hatás a sárga színkoordináta csökkenését produkálta. A fotodegradáció hatása a sárga színezet változására mindegyik fafajnál nagyobb volt, mint a termikus degradációé.

A mért adatok statisztikai elemzése alapján megállapíthatjuk, hogy:

- a vizsgált fafajok többségénél a fénybesugárzás növelte a minták színbeli inhomogenitását.
- a legnagyobb szórásnövekedést az akácnál és az amerikai cseresznyénél találtuk. Ezeknél a fafajoknál a világosság szórása volt a legnagyobb 5 körüli értékkel, míg a másik két koordináta esetében a szórás 2 körül alakult.
- egyértelmű, de csak kismértékű színbeli homogenizálódást csak az erdeifenyőnél találtunk.

a többi vizsgált fafajnál csak kismértékű színbeli homogenitás változást tapasztaltunk a fénybesugárzás hatására.

A kezeletlen minták színének elemzése alapján:

- összefüggés figyelhető meg a színezeti szög és a világosság között.
- a bükk; erdeifenyő; éger; hárs; juhar; kései meggy; kőris; lucfenyő; nyár; nyír; vadcseresznye és vörösfenyő faanyagok színpontjai jól illeszkednek egy pozitív meredekségű egyenesre, melynek az illeszkedést jellemző szórásnégyzet értéke 0,91.
- A nagy extraktanyag tartalmú fafajok, mint a tölgy, dió, akác és cser gesztje távolabb helyezkednek el az egyenestől.

6 Az eredmények hasznosításának és a vizsgálatok továbbvitelének lehetőségei:

Az eredmények azt mutatják, hogy az összes vizsgált fafaj faanyaga elszíneződik a fotodegradáció hatására, és a hőmérséklet megemelkedése gyorsítja ezt a folyamatot. Azt is látjuk, hogy a megváltozott új szín, a faanyagok többségénél kedvező, barnás árnyalatot eredményez.

Hosszútávú kitettség esetén szükségesnek látjuk fényvédő felületkezelő anyag alkalmazását. A felhordást viszont nem feltétlenül kell az új terméken elvégezni. Érdemes megvárni egy kedvezőbb színárnyalat kialakulását, és azt konzerválni. A csapadék kimosó hatásának kitett szerkezeteknél viszont a felületkezeléssel nem szabad várni, mert az eső kimossa az eredendően meglévő és a fotodegradáció hatására kialakuló színeképző vegyületeket. Ezáltal a faanyag elszürkül.

A vizsgálatokat érdemes magasabb hőmérsékleteken is elvégezni, hogy pontosabban megismerjük a hőmérsékletnek a színváltozást gyorsító hatását.

Célszerű azt is megvizsgálni, hogy a levegő páratartalma (és vele együtt a faanyag nedvességtartalma) milyen hatással van a fotodegradáció színváltoztató hatására.

Mivel a termőhely is nagymértékben befolyásolhatja a színváltozást, illetve annak intenzitását még azonos fafajnál is, javasolt ezen hatás jövőbeli vizsgálata.

7 Az értekezés tézisei:

1. Megállapítottam, hogy a fenyő faanyagok esetében intenzívebb a fotodegradáció színváltoztató hatása, mint a lombos fafajok esetében. Ez az eltérés a kezdeti intenzív változás szakaszában és a későbbi mérsékelt változás időszakában egyaránt megfigyelhető. A kőris faanyaga hasonlóan viselkedett, mint a fenyőfélék.
2. Kimutattam, hogy a fotodegradációs színváltozás szempontjából a lomblevelű fafajok két csoportba oszthatók. Az egyik csoportnál (akác, kései meggy, vadcserešny, éger, hárš, dió) a kezdeti intenzív színváltozást színbeli stagnálás követte. A másik csoportnál (gőzölt bükk, juhar, nyár, nyír tölgy) a kezdeti szakasz kevésbé volt intenzív, mint az első csoportnál, de ezt további enyhe színváltozás követte. Ez a hosszú távú színváltozás közel sem volt olyan intenzív, mint a fenyők esetében.
3. Mérésekkel igazoltam, hogy a fotodegradáció növeli a faanyag felületének színbeli inhomogenitását. Egyetlen kivétel az erdeifenyő volt, ahol nagyon kismértékű színbeli homogenizálódást figyeltem meg. A legnagyobb inhomogenitás növekedést az akác és az amerikai cseresny mutatott.
4. Igazoltam, hogy a napsugárzás ablaküveg mögötti színváltoztató hatása a kezelés első 20 órájában jelentősen eltér a higanygőz lámpás besugárzás hatásától. A higanygőz lámpás besugárzás ebben az intervallumban egyirányú és intenzív változást produkált. Ezzel szemben az ablaküveg mögötti napsugárzás jórészt színbeli stagnálást, de csökkenést és növekedést egyaránt produkált.
5. Kimutattam, hogy ugyanaz a fénybesugárzás lényegesen nagyobb vörös színkoordináta növekedést okoz 80°C-on mint 30°C-on. Az erdeifenyő minták 80°C-on 57%-kal nagyobb vörös irányú színezetváltozást szenvedtek, mint 30°C-on. A legkevesebb extraktanyagot tartalmazó fafajok esetében (például nyár) volt a legkisebb vörös színezetváltozás. A szakirodalomban található eredményekre is alapozva megállapítottam, hogy az extraktanyagoknak meghatározó szerepük van a vörös színezet változásában. Közvetlen napsugárzásnak kitett faanyagok esetében, erre a hatásra tekintettel kell lenni.

6. Mérésekkel igazoltam, hogy a magyarországi natúr állapotbeli fafajok esetében (a nagy extraktanyag tartalmú faanyagok kivételével) lineáris kapcsolat van a faanyag világossága és a színezeti szöge között. A nagy extraktanyag tartalmú faanyagok (tölgy, akác, dió) esetében a linearitástól való eltérés az extraktanyag tartalom függvénye.

Irodalomjegyzék

- Andrady AL, Hamid SH, Hu X, Torikai A (1998)
Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials.
J. Photochemistry and Photobiology B: Biology 46:96-103
- Ayady, N., Lejeune, F., Charrier, F., Merlin, A. (2003)
Color stability of heat treated wood during artificial weathering.
Holz als Roh- und Werkstoff 61:221-226
- Barta E, Tolvaj L, Nagy T, Szatmari S, Berkesi O, Papp G (1998)
Wood degradation caused by UV-laser of 248 nm wavelength.
Holz als Roh- und Werkstoff 56: 318
- Barta E, Tolvaj L, Nagy T, Szatmari S, Berkesi O, Papp G (1999)
Photodegradation of leaf-wood caused by 248.5 nm UV laser.
Wood Research (Drevarsky Vyskum) 44 (1): 13-19
- Chang HT and Chang ST (2001)
Correlation between softwood discoloration induced by accelerated lightfastness testing and indoor exposure.
Polymer Degradation and Stability 72:361-365
- Chang TC, Chang HT, Wu CL, Chang ST (2010)
Influences of extractives on the photodegradation of wood
Polymer Degradation and Stability 95 516-521.
- Dirckx OG, Masson DM, Deglise XM (1987)
Photodegradation du bois, de la cellulose et de la lignine
Wood and Pulping Chem. Simp. Paris
- Faix O. and Beinhoff O (1988)
FTIR spectra of milled wood lignin and lignin polimer models (DHP's) with enhanced resolution obtained by deconvolution
J. Wood Chemistry and Technology 8 (4) 505-522
- George B, Suttie E, Merlin A, Deglise X (2005)
Photo-degradation and photo-stabilisation of wood (State of art).
Polymer Degradation and Stability 88 (2): 268-274
- Hammond H. K. (1969)
Colorimeters. In: Applied Optics and Optical Engineering. Vol. 5
Academic Press, 105-131.

- Hansmann C, Deka M, Wimmer R, Gindl W (2006)
Artificial weathering of wood surfaces modified by melamine formaldehyde resins.
Holz Roh Werkstoff 64(3):198-203
- Heitner C (1993)
Light-Induced Yellowing of Wood-Containing Papers. In: Photochemistry of Lignocellulosic Materials. Ed. Heitner, ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, 3-25.
- Hon DNS (1983)
Weathering reactions and protection of wood surfaces
J. Appl. Polym. Sci.: Appl. Polym. Symp. 37. 845-864.
- Hon DNS and Feist W C (1986)
Weathering characteristics of hardwood surfaces
Wood Science and Technology 20 169-183.
- Jones HG and Heitner C (1973)
Optical Measurement of Absorption and Scattering Properties of Wood Using the Kubelka-Munk Equations
Pulp and Paper Magazine Canada 74 T182-T186
- Kataoka Y and Kiguchi M (2001)
Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy.
J. Wood Sciences 47:325-327
- Kawamura F, Ohashi H, Kawai S, Teratani F, Kai Y (1996)
Photodiscoloration of Western Hemlock (*Tsuga heterophylla*) Sapwood I. Actual conditions upon photodiscoloration of wood parts.
Mokuzai Gakkaishi 42: 293-300.
- Lukács GY. (1982)
Színmérés.
Műszaki Kiadó, Budapest
- Marton J and Sparks HE (1967)
Determination of lignin in pulp and paper by infrared multiple internal reflectance
Tappi 50 (7) 363-367.
- Masuda M (2001)
Why human loves wood grain figure?
AIDA Journal 10: 149-154
- Mitsui K, Takada H, Sugiyama M, Hasegawa R (2001)

- Changes in the Properties of Light-Irradiated Wood with Heat Treatment. Part 1. Effect of Treatment Conditions on the Change in Color
Holzforschung 55 (6) 601-605
- Mitsui K, Murata A, Kohara M, Tsuchikawa S (2003)
Colour modification of wood by light-irradiation and heat treatment
European Conf. on Wood Modification, Gent 43-52
- Mitsui K (2004a)
Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment. Part 2. Effect of light-irradiation time and wavelength.
Holz als Roh und Werkstoff 62 23-30
- Mitsui K, Murata A, Tsuchikawa S, Kohara M (2004/b)
Wood Photography Using Light Irradiation and Heat Treatment
Color Research and Application 29 (4) 312-316
- Mitsui K, Tsuchikawa S (2005)
Low Atmospheric Temperature Dependence on Photodegradation of Wood
Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 81 (2) 84-88
- Mitsui K, Tolvaj L, Papp G, Bohus J, Szatmári S, Berkesi O (2005)
Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment. Part 4. Application of laser.
Wood Research 50 (1) 1-8
- Müller U, Rätzsch M, Schwanninger M, Steiner M, Zöbl H (2003)
Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation.
J. Photochemistry and Photobiology, B: Biology 69 97-105
- Németh K und Faix O (1988)
Farbmessung zur Beobachtung der Photodegradation des Holzes
Holz als Roh- und Werkstoff 46 (12), 472.
- Németh K. (1989)
A faanyag abiotikus degradációja
Doktori Értekezés, Sopron.
- Németh K. (1998)
A faanyag degradációja
Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
- Németh K, Vanó V, Faix O. (1992)
The Effect of Wood Extractives on the Photodegradation of Wood.

- EWLP Conf. Grenoble, France 191-192
- Oltean L, Teischinger A, Hansmann C (2008)
Wood surface discolouration due to simulated indoor sunlight exposure.
Holz als Roh-und Werkstoff 66 (1): 51-56
- Oltean L, Hansmann C, Németh R, Teischinger A (2009)
Wood surface discolouration of three hungarian hardwood species due to simulated indoor sunlight exposure.
Wood Research. 55(1) 49-58
- Pandey KK, Vuorinen T (2008)
Comparative study of photodegradation of wood by a UV laser and a xenon light source.
Polymer Degradation and Stability 93(12):2138-2146
- Papp G, Preklet E, Košíková B, Barta E, Tolvaj L, Bohus J, Szatmári S, Berkesi O (2004)
Effect of UV laser radiation with different wavelengths on the spectrum of lignin extracted from hardwood materials.
J. Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry, 163 (1-2) 187-192
- Papp G, Barta E, Preklet E, Tolvaj L, Berkesi O, Nagy T, Szatmári S (2005)
Changes in DRIFT spectra of wood irradiated by UV laser as a function of energy.
J. Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry, 173 (2): 137-142
- 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.
J. Photochemistry and Photobiology B: Biology 108: 44–47
- Sarkanen KV, Change HM, Allan GG (1967)
Species variation in lignins. II. Conifer lignins. III. Hardwood lignins
Tappi 50 (12) 583-590.
- Schnabel T, Zimmer B, Petutschingg AJ (2009)
On the modelling of colour changes of wood surfaces.
European Journal of Wood and Wood Products 67: 141-149
- Sharratt V, Hill CAS, Kint DPR (2009)
A study of early colour change due to simulated accelerated sunlight exposure in Scots pine (*Pinus sylvestris*).

- Polymer Degradation and Stability 94: 1589-1594
- Sjöström, E. (1993)
Wood Chemistry-Fundamentals and Application, Academic Press, Inc. San Diego
- Taneda K, Yata N, Ota M (1989)
The coloration of wood I. The light coloration of Beech sapwood.
Mokuzai Gakkaishi 35 (6) 530-536
- Tolvaj L (1994/a)
A faanyag optikai tulajdonságai. *In: A faipari műveletek elmélete* (Szerk.: Sitkei György) Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest 87-103
- Tolvaj L (1994/b)
Discoloration and deterioration of wood surface by ultraviolet light.
Wood Structure and Properties '94. Conf. (5-9 September) Zvolen, 177-182
- 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 (5) 397-404
- Tolvaj L, Faix O (1996)
Modification of Wood Colour by Steaming. ICWSF '96 Conference, (10-12 April) Sopron, 10-19
- Tolvaj L, Papp G (1999)
Outdoor Weathering of Impregnated and Steamed Black Locust.
ICWSF'99 Conference, (14-16 July) Missenden Abbey (UK) 112-115
- Tolvaj L, Mitsui K (2005)
Light Source Dependence of the Photodegradation of Wood.
Journal of Wood Sciences 51: 468-473.
- Tolvaj L, Molnár S (2006)
Colour homogenisation of hardwood species by steaming.
Acta Silvatica et Lignaria Hungarica 2: 105-112
- Tolvaj L, Mitsui K (2010)
Correlation between hue angle and lightness of light irradiated wood.
Polymer Degradation and Stability 95 (4) 638-642
- Tolvaj L, Molnar S, Nemeth R, Varga D (2010)
Color modification of black locust depending on the steaming parameters. Wood Research 55 (2): 81-88

Tolvaj L., Persze L., Lang E. (2013)

Correlation between hue angle and lightness of wood species grown in Europe. Wood Research 58(1):141-145.

Tolvaj L. (2013)

A faanyagok optikai tulajdonságai.

Nyme Kiadó

Wang X and Ren H (2008)

Comparative study of the photo-discoloration of moso bamboo (*Phillostachys pubescens* Mazel) and two wood species.

Applied Surface Science 254: 7029-7034

Zahri S, Belloncle C, Charrier F, Pardon P, Qudeau S, Charrier B (2007)

UV light impact on ellagitannins and wood surface colour of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*)

Applied Surface Science 253: 4985-4989

A témában megjelent publikációk*Idegen nyelvű lektorált tudományos folyóiratban megjelent szakcikkek*

Tolvaj L; Persze L; Albert L (2011)

Thermal degradation of wood during photodegradation

Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 105: 90–93.

Impakt faktor: 2,814

Független idézők száma: 7

Persze L; Tolvaj L (2012)

Photodegradation of wood at elevated temperature: Colour change

Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 108: 44-47.

Impakt faktor: 3,110

Független idézők száma: 7

Tolvaj L; Persze L; Lang E (2013)

Correlation between hue angle and lightness of wood species grown in Hungary

Wood Research 58:(1) 141-145.

Impakt faktor: 0,275

Független idézők száma: 2

Idegen nyelvű konferencia kiadványban megjelent szakcikkek

Tolvaj L; Persze L (2010)

Photodegradation of black locust

The 4th Conference on Hardwood Research and Utilisation in Europe. Sopron, (May 17-18.) 186-194.

Független idézők száma: 1

Persze L; Tolvaj L (2012)

Superposition of thermal- and photodegradation for wood monitored by colour measurement.

The 5th Conference on Hardwood Research and Utilisation in Europe. Sopron, (2012. sept. 10-11.) 33-40.

Magyar nyelvű folyóiratban megjelent szakcikkek

Tolvaj L; Takáts P; Persze L (2010)

A vízgőz jelenlétének szerepe a faanyag színének 90°C-os termikus kezeléssel történő változtatásakor

Faipar 58: (1) 5-10.

Tolvaj L; Persze L (2011)

A napsugárzás mesterséges fényforrásokkal történő imitálásának problémája

Faipar 59: (2-3) 19-26.

Persze L (2011)

Magyarországi fafajok fotodegradációjának összehasonlítása: Színváltozás

Faipar 59: (2-3) 35-49.

Független idézők száma: 1

Persze L (2012)

A hőmérséklet hatása a faanyag fotodegradációjára: Színváltozás

Faipar 60: (2) 5-13.

Független idézők száma: 1

Köszönetnyilvánítás

Először is szeretném megköszönni Dr. Molnár Sándor professzor Úrnak, hogy inspirált, bátorított és végül elindított a tudományos kutatások néha rögzös, de annál érdekesebb útján. Az Ő ösztönzése, és „atyai” támogatása nélkül valószínűleg nem vágtam volna a fejszémet ekkora fába.

Szeretném megköszönni témavezetőmnek és kutató társamnak, Dr. Tolvaj Lászlónak azt a hatalmas és önzetlen segítséget, amit a több éves kutatás alatt kaptam. Az Ő folyamatos segítsége és támogatása nélkül lehet már az elején feladtam volna.

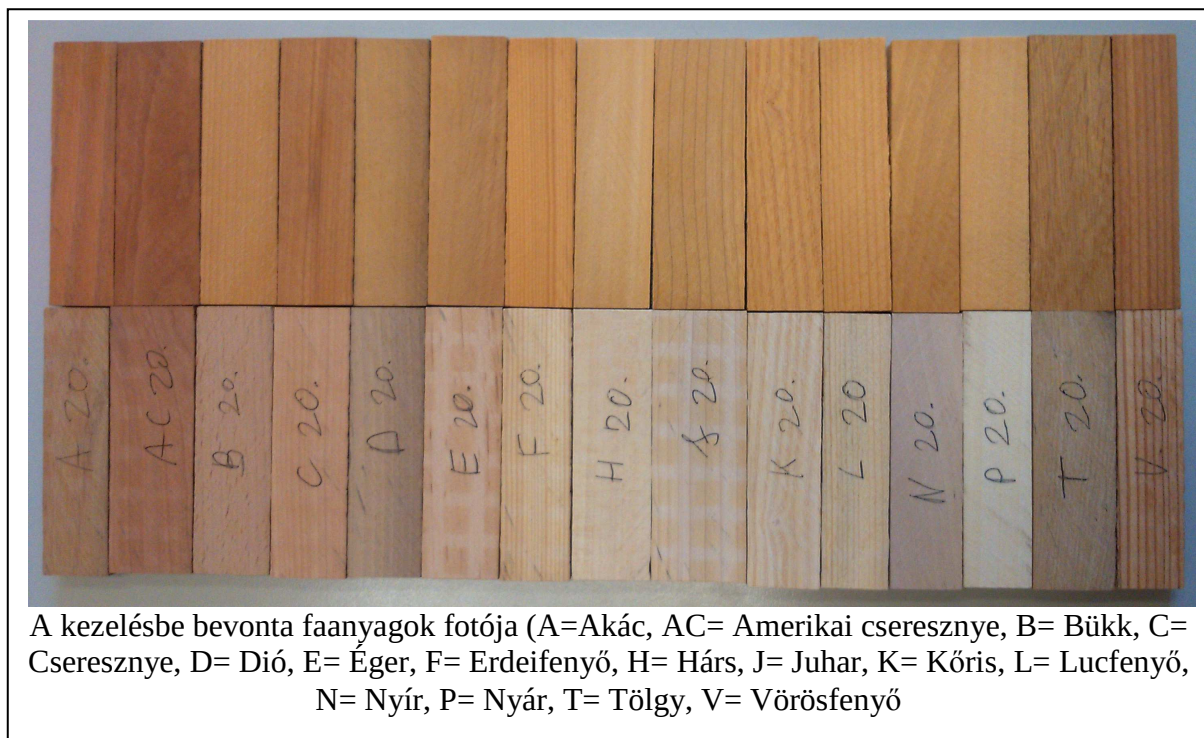
Szeretném megköszönni a Mezőkövesdi Bútoripari Kft-nek az anyagi támogatást, és szeretnék köszönetet mondani Nagl Tamásnak aki a mérésekhez szükséges rengeteg famintát megszerezte.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni családomnak a támogatását, akik nyugodt és kiegyensúlyozott háttérrel biztosítottak számomra.

Mezőkövesd, 2015. január 7.

Persze László

1.számú melléklet: fényképek





Klímakamra