

Doktori (PhD) értekezés

Soproni Egyetem

Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Tolvaj László egyetemi tanár

Doktori program: Fafeldolgozási technológiák

Programvezető: Dr. Kovács Zsolt egyetemi tanár

Tudományág: anyagtudomány és technológiák

**A VÉGMEGMUNKÁLT TERMÉSZETES FAANYAGOK
FELÜLETI STABILITÁSA NEDVESÍTÉSKOR**

Készítette: Molnár Zsolt

Témavezető: Dr. Magoss Endre egyetemi docens

Sopron
2018

**A VÉGMEGMUNKÁLT TERMÉSZETES FAANYAGOK FELÜLETI
STABILITÁSA NEDVESÍTÉSKOR**

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

Írta:
Molnár Zsolt

Készült a Soproni Egyetem Cziráki József Doktori Iskola Fafeldolgozási technológiák
programja keretében

Témavezető: Dr. habil Magoss Endre
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

Nyilatkozat

Alulírott *Molnár Zsolt*, jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a „*A végmegmunkált természetes faanyagok felületi stabilitása nedvesítéskor*” című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény¹ szabályait, valamint a *Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola* által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezetőimet, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

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

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

Sopron, 2018.

.....
doktorjelölt

¹ **1999. évi LXXVI. tv.** 34. § (1) A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.
36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

Tartalomjegyzék

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	7
KIVONAT.....	8
ABSTRACT	9
1. BEVEZETÉS.....	10
1.1 A KUTATÓMUNKA JELENTŐSÉGE	10
1.2 A KUTATÓMUNKA CÉLKITŰZÉSEI.....	11
2. A FAFELÜLETEK STABILITÁSA.....	13
2.1 A FAANYAG FELÜLETI STABILITÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK	13
2.1.1 Fotodegradáció	13
2.1.2 Nedvességtartalom és hőmérsékletváltozás.....	15
2.1.2.1 Fafelületek nedvesítése, beszivárgás	17
2.1.3 Gombakárosodás	18
2.2 A FAANYAG FELÜLETI STABILITÁSÁT JELLEMZŐ TULAJDONSÁGOK	20
2.2.1 Szín.....	20
2.2.2 Keménység.....	21
2.2.3 Felületi érdesség.....	23
2.2.3.1 A faanyag szerkezeti felépítése.....	25
2.2.3.2 A deformációs zóna	27
2.3 MODIFIKÁLÁS	30
2.4 ÖSSZEGZÉS.....	31
3. A FAANYAG FELÜLETI ÉRDESSÉGE	32
3.1 A FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉSI ELJÁRÁSAI.....	33
3.1.1 Tapintótűs berendezések (MSZ EN ISO 3274:1996).....	34
3.1.2 Optikai berendezések	35
3.1.2.1 Kódolt fény eljárás	35
3.1.2.2 Fókuszvariáció.....	38
3.1.3 Egyéb berendezések	40
3.1.3.1 Pásztázó elektronmikroszkóp (REM).....	40
3.1.4 Összegzés	41
3.2 A HÁROMDIMENZIÓS FELÜLETI PARAMÉTEREK	42
3.2.1 Magasság paraméterek/Amplitúdó paraméterek.....	43
3.2.2 Térközi paraméterek.....	47
3.2.3 Hibrid paraméterek.....	47
3.2.4 Az Abbott-görbe paraméterei (funkcionális paraméterek).....	49
4. EDDIGI MÉRÉSEK ÉS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI (IRODALMI ÁTTEKINTÉS)	51
5. A KÍSÉRLETEK PROGRAMJA ÉS METODIKÁJA	54
5.1 A VIZSGÁLT FAFAJOK KIVÁLASZTÁSA, ELŐKÉSZÍTÉSE, JELLEMZÉSE.....	54
5.2 A FELÜLETEK KIALAKÍTÁSA	55
5.2.1 Gyalulás.....	55
5.2.2 Csiszolás	56

5.2.3 Marás	56
5.2.4 Finiselés.....	57
5.2.5 Termikus simítás	57
5.3 A FELÜLETEK NEDVESÍTÉSE.....	58
5.4 MÉRŐMŰSZER	59
5.4.1 Kamera.....	59
5.4.2 Projektor	60
5.4.3 Hidegfényforrás	61
5.4.4 Számítógép (Kiértékelő szoftver).....	61
5.5 MÉRÉSI MENETREND KIALAKÍTÁSA.....	62
5.6 TÖMEGMÉRÉSEK	65
6. A KUTATÁS EREDMÉNYEINEK ISMERTETÉSE	66
6.1 A NEDVESSÉG ELPÁROLGÁSA	66
6.2 A NEDVESÍTÉS HATÁSA A FELÜLETI ÉRDESSÉGRE	70
6.2.1 Megmunkálás utáni érdességi paraméterek.....	70
6.2.2 Nedvesítés hatása az érdességi paraméterek változására.....	74
6.2.2.1 Átlagos egyenetlenség (S_a)	74
6.2.2.2 Az anyagtartalom görbe paraméterei (S_{pk} , S_k , S_{vk})	77
6.2.2.3 Ferdeség (S_{sk})	83
6.2.2.4 Felületarány (S_{dr}).....	84
6.2.3 Összefoglalás.....	86
6.3 A HÁROMDIMENZIÓS ÉRDESSÉGI PARAMÉTEREK BELSŐ ÖSSZEFÜGGÉSEI	87
6.4 A 2 ÉS 3 DIMENZIÓS ÉRDESSÉGMÉRÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA.....	94
7. ÖSSZEFOGLALÁS	106
8. TÉZISEK	107
9. A GYAKORLAT SZÁMÁRA LEVONHATÓ KÖVETKEZTETÉSEK	108
10. PUBLIKÁCIÓS MUNKÁIM.....	109
11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	110
12. IRODALOMJEGYZÉK (IDÉZETT FORRÁSMUNKÁK)	111
MELLÉKLETEK.....	119

Jelölések jegyzéke

S_a	μm	átlagos egyenetlenség	3D
S_q	μm	az eltérések mértani átlaga	3D
S_p	μm	maximális csúcsmagasság	3D
S_v	μm	maximális völgymélység	3D
S_{max}	μm	maximális magasság	3D
S_z	μm	10 pont magasság	3D
S_{sk}		ferdeség	3D
S_{ku}		kilengés	3D
PC		a csúcsok száma	3D
S	μm	a csúcsok átlagos távolsága	3D
S_{dr}	%	felületarány	3D
S_{da}		átlagos dőlés	3D
S_{dq}		a dőlés mértani átlaga	3D
S_{pk}	μm	redukált csúcsmagasság	3D
S_{vk}	μm	redukált völgymélység	3D
S_k	μm	magrész magassága	3D
S_{Mr1}	%	a redukált csúcsmagassághoz tartozó anyagtartalmi pont	3D
S_{Mr2}	%	a redukált völgymélységhez tartozó anyagtartalmi pont	3D
V_1	μm	anyaggal töltött csúcsterület	3D
V_2	μm	üres völgyterület	3D
R_a	μm	átlagos érdesség	2D
R_q	μm	az eltérések négyzetes közepe	2D
R_z	μm	egyenetlenség magasság	2D
R_{sk}		ferdeség	2D
R_{ku}		kilengés	2D
R_{pk}	μm	redukált csúcsmagasság	2D
R_{vk}	μm	redukált völgymélység	2D
R_k	μm	magrész magassága	2D
M_{r1}	%	a redukált csúcsmagassághoz tartozó anyagtartalmi pont	2D
M_{r2}	%	a redukált völgymélységhez tartozó anyagtartalmi pont	2D

Kivonat

A disszertáció a természetes faanyagok mechanikai megmunkálás utáni felületének stabilitásával foglalkozik. Hét hazai fafajon és öt megmunkálási eljáráson keresztül mutatja be a faanyagok felületén nedvesítés hatására bekövetkező változásokat. A folyamatot egy egyedileg kidolgozott mérési eljárás alapján szemlélteti, mellyel a felületek mozgása regisztrálható, számszerűsíthető ezáltal összehasonlítható. A mérési módszer alapja, az optikai elven működő három dimenziós felületi érdességmérés. A jelenséget leíró három dimenziós érdességi paraméterekkel szemlélteti az egyes megmunkálások és fafajok felületi stabilitása közti különbségeket, kitér az érdességi paraméterek belső összefüggéseire és ajánlást tesz mozgást leíró paraméterek használatára. A mérési módszer fő előnye, hogy az eddigi nedvesítés vizsgálatokkal ellentétben nemcsak a nedvesítés előtti és utáni felületek jellemzését teszi lehetővé, hanem a nedvesség beszívódásának és párolgásának teljes folyamata nyomon követhető. Fontos megjegyezni, hogy a felületi stabilitás ismerete az ipar számára is nagy jelentőséggel bír. Mivel a mérés csak optikai módszerrel végezhető, ezért szükségesnek látszott az új, a gyakorlatban még kevésbé használt optikai, három dimenziós érdességi paraméterek és a klasszikus Perthometeres két dimenziós érdességi paraméterek összehasonlítása is.

Nedvesítés során a felületre helyezett folyadék a fellépő kapilláris erőknek köszönhetően a faanyag belsejébe szivárog, aminek hatására a felület megduzzad. A folyadék mélyebb rétegekbe történő szivárgása és a felületről történő elpárolgása után, a felület zsugorodni kezd, azonban ez a folyamat már jóval lassabb lefolyású. A száradást követően a felület soha nem nyeri vissza eredeti alakját, attól kisebb nagyobb mértékben - a maradó alakváltozások mértékétől függően – eltér. A vizsgált fafajok közül nedvesítés hatására az akác, a megmunkálások közül pedig a finiselt felületek bizonyultak a legstabilabbnak, míg a fenyők illetve a csiszolt felületek a leginstabilabbnak.

Abstract

This study deals with the surface stability on the solid wood after different woodcutting method. Seven domestic wood species and five woodworking operation are analysed do to defining the surface stability of solid wood. New surface roughness evaluation method is introduced to characterise and compare the movements of the different wood surfaces. The evaluation based on an optic 3D measuring method and the standardised 3D surface roughness parameters. In the frame of this method the correlation of the surface parameters and the best indicators of the surface stability are defined. Earlier research works published data only concerning the stabilised phases of the wood surfaces. The new method can describe the surface movements during the watering process too. It is important to note that the characterisation of the surface movements affect by water useful information for the experts of the wood industry. In the practice commonly the tactile measuring method is used therefore, discovering of the correlations between the 2D and 3D roughness parameters is part of my dissertation.

During the watering process the water is infiltrated into the inner structure of the wood material by the effect of the capillary forces as a result the sample is swelled. After the water infiltration and evaporation process the sample is shrunk. The shrinking process is slower than the swelling process. The examined wood surfaces have never gotten back their original surface structure. The Robinia has the biggest surface stability among the examined wood species and the precision planning is resulted the most stable surfaces. The most instable surfaces are resulted by the sanding process

*„A legszebb, amit átélhetünk, a dolgok titokzatossága”
(Albert Einstein)*

1. Bevezetés

1.1 A kutatómunka jelentősége

Régóta ismert tény, hogy a természetes faanyagok megmunkálás után kialakult felülete azon túlmenően, hogy rendkívül változatos és inhomogén, roppantul instabil is. A stabilitás egy latin eredetű szó, mely állandóságot, egyensúlyt jelent. Egy anyag vagy rendszer stabilitásán azt a képességet értjük, amellyel a rendeltetésszerű használat illetve tárolás során képes a tulajdonságait változatlanul tartani. Ennek tükrében a felületi stabilitás az egyes felületek ellenálló képességét jelenti az őket érő külső hatásokkal szemben. Természetes faanyagok felületi stabilitását rendkívül sok tényező befolyásolja, melyek lehetnek mesterséges és környezeti hatások. A fő környezeti hatások, a különböző hullámhosszúságú fénysugárzás, a nedvességtartalom illetve hőmérsékletváltozás és a gombakárosodás, míg a mesterséges hatások közé a felületeket érő különböző terhelések és az egyes hőkezelési eljárások tartoznak. Ezen hatások jelentősen képesek megváltoztatni a természetes faanyagok fizikai, mechanikai és esztétikai tulajdonságait, ezáltal erőteljesen befolyásolják a felületek tulajdonságait. A felületi réteg tulajdonságainak negatív változása alapvetően csökkenti a faipari termékek használati és esztétikai értékét. Jelen dolgozat a faanyag felületi stabilitását befolyásoló tényezők közül a nedvességtartalom változásának a felületre gyakorolt hatásainak pontosabb megismerésével foglalkozik. A dolgozat célkitűzése a nedvességtartalom hatására bekövetkező felületmozgások detektálása, és számszerű jellemzése.

A természetes faanyag kapillárporózus természetének köszönhetően kisebb nagyobb mennyiségben mindig tartalmaz vizet. A nedvességtartalom rendkívül fontos szerepet játszik a faanyagban, hiszen mértéke jelentősen befolyásolja mind a fizikai, mechanikai tulajdonságait, mind az esztétikai megjelenését. A faanyag nedvességtartalmát viszont mindig a környezet hőmérséklete és a levegő páratartalma határozza meg, ugyanis a faanyag az őt körülvevő környezettel folyamatosan egyensúlyra törekszik. Az adott hőmérséklethez és relatív páratartalomhoz kapcsolódó fanedvességet egyensúlyi fanedvességnek nevezzük. A frissen kivágott fa sejtfalai teljesen, sejtüregei részben telítettek vízzel. Az ilyen élőnedves faanyag a környezet hőmérsékletétől és páratartalmától függően folyamatosan veszíti víztartalmát, mindaddig, míg az egyensúly be nem áll. A nedvességleadás során a faanyag folyamatosan zsugorodik, míg nedvességfelvétel során dagad. A zsugorodás és dagadás következtében nemcsak a faanyag méretei változnak, de a felülete is jelentősen átalakul. Minél gyorsabban megy végbe a nedvességfelvétel vagy leadás folyamata, annál drasztikusabb következményei vannak a felületre nézve. A hirtelen száradás például felületi repedések megjelenéséhez vagy szélsőséges esetben akár sejtösszeroppanáshoz is vezethet (Molnár 2004), amely jelenségek fokozzák a felületek instabilitását. Hirtelen nedvességfelvétel a felületek mesterséges nedvesítésekor, többek között például felületkezelésekor léphet fel.

A természetes fából készült faipari termékek, mechanikai megmunkálás utáni felületének megóvása az őket érő külső behatások ellen rendkívül fontos, így a termékek felületkezelése a termelési folyamat szükséges velejárója (Szabó 2003). A felületkezelésnek a védelmi funkción kívül, a termék eladhatósága szempontjából esztétikailag is fontos szerepe van. A gyakorlatban jól ismert és nagy mennyiségben

alkalmazott oldószeres felületkezelő anyagokkal bevont faipari termékek azonban jelentős terhelést jelentenek a környezetre, illetve az emberi egészségre. Ezenkívül tárolásuk és kezelésük is számos problémát vet fel. Az egyre erősödő környezetvédelmi előírásoknak köszönhetően az elmúlt években az oldószeres felületkezelő anyagokkal szemben a vízbázisú felületkezelő anyagok alkalmazása került előtérbe. A javasolt alternatíva azonban további problémákhoz vezet, hiszen a vizes bevonatok alkalmazásával a bevont felfelületek tulajdonságai is mások lesznek, illetve a megjelenésük is nagyban különbözik az oldószer alapú bevonatok megjelenésétől (Landry és Blanchet, 2012). Továbbá számolni kell a szálfelhúzó és bolyhosodás jelenségével, melyek vízbázisú felületkezelő anyagok alkalmazásakor fokozottan jelentkeznek. A természetes faanyagok felületére, a vízzel hígítható bevonatok használata során hirtelen nagy mennyiségben felhordott nedvesség hatására megbomlik az egyensúly a környezet és a faanyag nedvességtartalma között, aminek következtében a felületek mozgásba lendülnek, felduzzadnak. A mozgás mértéke azonban erőteljesen függ a korábban alkalmazott megmunkálási eljárástól, illetve a megmunkált anyag tulajdonságaitól. A beszívódás során a felület felső rétegében tehát akár jelentős változások is végbemehetnek, melyek hatására a felületek topográfiája nagymértékben átalakul, ezáltal a felületek minősége romlik. Az egyik legfontosabb probléma, hogy a nedvesség hatására a felülethez csak egyik végükkel kapcsolódó rostok kiemelkednek a felület síkjából. A felhúzó szálok a száradást követően sem simulnak vissza egészen a felület síkjába, ezért a megfelelő felületi minőség biztosítása érdekében a felületkezelés során az alapozó és fedőréteg felhordása között egy köztes csiszolást szükséges a technológiába illeszteni. Ez azonban jelentős idő és költségnövekedést jelent a faipari termékek gyártó cégek számára, emiatt a felületkezelés előtt alkalmazott megmunkálások összehasonlíthatóvá tétele, a felületi stabilitás szempontjából az ipar számára is fontos feladat. Belátható tehát, hogy a természetes faanyagok felületi stabilitásának pontos feltérképezése alapvető fontosságú makrogeometriailag a méretpontosság biztosítása, míg mikrogeometriailag a felületkezelés és ragasztási technológiák szempontjából.

A természetes faanyagok felületének nedvességgel szembeni stabilitása a felületek érdességének változásával követhető nyomon. Eddigi ismereteink a felületi stabilitást illetően a felületek érdességének nedvesítés előtti és utáni összehasonlításán alapultak, hisz ezidáig nem volt olyan szisztematikus vizsgálat, amely feltárta volna a fafaj, megmunkálás, víz mennyiség, párolgási sebesség közötti összefüggéseket. Arról, hogy mi történik a felületekkel a nedvesség beszívargása alatt eddig csak mikroszkópos felvételek nyújtottak információt. A felületmozgás jelensége tehát ismert, de annak belső törvényszerűségei (a beszívargás intenzitása, a száradás sebessége stb.) egyáltalán nem. Az utóbbi évtizedek mérés-technikai és a képi adatfeldolgozás fejlődésének köszönhetően, lehetőség nyílt, egy olyan mérési és kiértékelési módszer kidolgozására, amellyel feltárhatóak ezek az eddig nem ismert részletek is. A módszer lehetővé teszi a felületi mozgások folyamatos, számszerűsíthető nyomon követését és ezáltal összehasonlíthatóságát, amely eddig, a megfelelő mérőműszerek hiányában nem volt lehetséges, különösen a folyamat korai fázisában.

1.2 A kutatómunka célkitűzései

Faipari mérnökként rendkívül fontosnak tartom a megfelelő minőségű faipari termékek gyártását. Ennek eléréséhez sok egyéb más tényezőtől kívül, a faanyag felületi

érdességének ismerete illetve annak állandóságának, stabilitásának pontos feltérképezése is elengedhetetlen. Ezek a tulajdonságok biztosítják ugyanis, hogy a gyártott termékek a felhasználásuk teljes élettartama alatt tökéletesen be tudják tölteni funkciójukat, meg tudják őrizni eredeti esztétikai megjelenésüket.

A dolgozat legfőbb célja a természetes faanyagok felületén nedvesítés hatására bekövetkező felületmozgások regisztrálása, számszerűsítése, azaz a felületi stabilitás pontos feltérképezése. Ennek alapfeltétele egy olyan mérési módszer kidolgozása, amely lehetővé teszi a nedvesítés hatására bekövetkező felületi mozgások nyomon követését, így a felületi stabilitás számszerűsített, összehasonlítható megítélését. A felületmozgások nyomon követését 3D-s optikai érdességmérő berendezéssel kívántam megvalósítani, mivel ezek a berendezések lehetőséget nyújtanak a beszivárgás és párolgás folyamata alatti mérések elvégzésére is. További célom, azoknak az érdességi paramétereknek a meghatározása, amelyekkel a felületi mozgások jól leírhatók, jellemezhetők, illetve célul tűztem ki a 3 dimenziós érdességi paraméterek közti belső összefüggések faanyagokra való igazolását is. Fontosnak tartom továbbá, a 3D-s érdességi paraméterek pontos jelentésének tisztázását, azaz a természetes faanyagok felületéről nyert 2 és 3 dimenziós felületi érdességi paraméterek közti kapcsolat feltárását, hiszen a jelenlegi 3D-s érdességi paraméterek értékei nem összehasonlíthatók a jól definiált, széles körben alkalmazott, szabványosított 2D-s paraméterekkel.

*„Az ember legjobb barátja a Földön a fa. Amikor a fát tisztelettel és gazdaságosan használjuk, miénk a Föld egyik legnagyobb erőforrása.”
(Frank Lloyd Wright)*

2. A fafelületek stabilitása

A felületi stabilitás egy rendkívül összetett tulajdonság, mely a kialakult felületeket érő környezeti és mesterséges hatásokkal szembeni ellenálló képességet jelenti. Természetes faanyagok felületének a következő fő hatásokkal szemben kell ellenállni: napsugárzás, nedvességtartalom és hőmérsékletváltozás, gombatámadás, illetve különböző fizikai mechanikai terhelések. Ezen hatások az eltelt idő függvényében jelentősen képesek megváltoztatni a mechanikai megmunkálás után kialakult fafelületek tulajdonságait. A természetes faanyagok felületi stabilitása szempontjából legfontosabb tulajdonságok a felületi rétegek deformációja, a szín, a keménység és a felületi érdesség, ezért ezen tulajdonságok időbeni változásának mértéke határozza meg a fafelületek stabilitását.

Ebben a fejezetben röviden szeretném bemutatni, hogy az egyes felületi stabilitást befolyásoló tényezők miként módosítják a felületek tulajdonságait, milyen folyamatokat idéznek elő a faanyagban, milyen mértékben hatnak a felületek stabilitására. A befolyásoló tényezők közül részletesen foglalkozom a nedvességtartalom hatásával, a tulajdonságok közül pedig a felületi érdességgel. Ennek oka, hogy a nedvesítés hatására bekövetkező felületi változások regisztrálására, nyomon követésére ezt a tulajdonságot használtam.

2.1 A faanyag felületi stabilitását befolyásoló tényezők

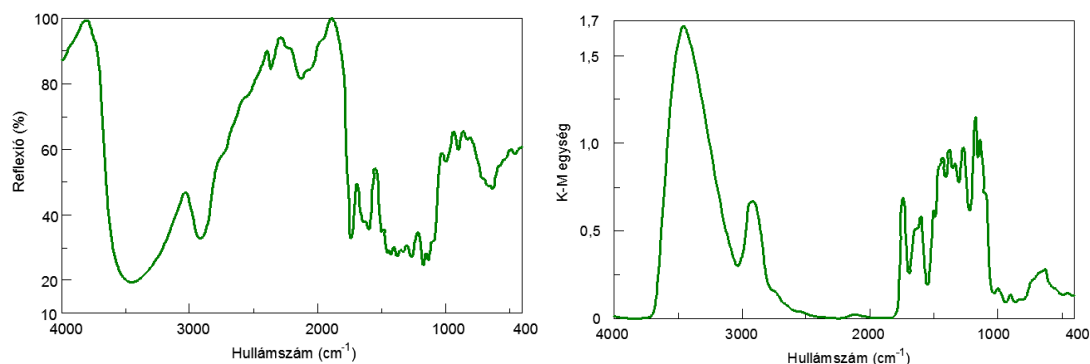
2.1.1 Fotodegradáció

Szerves természetének köszönhetően a faanyag biotikus és abiotikus degradációnak is ki van téve. Az egyik legmeghatározóbb abiotikus hatás a napsugárzás ultraibolya (UV) komponense. A naptól érkező fénysugárzás hatására a fotodegradáció jelensége lép fel, amely amellelt, hogy erőteljesen átformálja a felületi struktúrát, megváltoztatja a faanyag színét, rontja a fizikai és mechanikai tulajdonságait is. A fotodegradáció jelenségének feltárásában az jelenti a legnagyobb nehézséget, hogy a kültéren óhatatlanul jelenlévő többi időjárási tényező miatt nem vizsgálható tisztán, egyedül. Ráadásul a szabadban, a napsugárzás intenzitása is állandóan változik. Gondoljunk csak a nappalok és éjszakák váltakozására, a borús, esős napokra, vagy az évszakok változására. Emiatt a faanyagok fotodegradációja elsősorban mesterséges fényforrások alkalmazásával, reprodukálható körülmények között vizsgálható (Tolvaj 2005), így a környezeti hatások jelentős része kizárható. Mesterséges körülmények között fényforrásként xenon, illetve higanygőz lámpát alkalmaznak a minták UV-fénnyel történő besugárzásához. A természetes és mesterséges besugárzások hatásainak összehasonlítására is folytak kutatások (Derbyshire et al. 1995), és megállapítást nyert, hogy a mesterséges besugárzás faanyagok esetében alkalmazható a fotodegradáció szimulálására.

A beeső fény a felszín közelében gyorsan elnyelődik, emiatt a fotodegradáció felületi jelenség. A fény elnyelődése a faanyag alkotórészeinek molekuláiban a kötések felszakadását okozza, aminek hatására a felületen degradációs termékek jönnek létre.

Kültéren az időjárási tényezők (csapadék, szél) ezeket gyorsan eltávolítják a felszínről, így nyitva utat további rétegek fotodegradációjához. A folyamat ennek okán felgyorsul. Mesterséges körülmények között ezt a jelenséget vizes áztatással szimulálják. A fotodegradáció a felületek érdességének növekedését okozza, mivel a korai pászta erőteljesebben degradálódik, mint a késői (Molnár et al. 2013).

A faanyag fotodegradációjának kutatása az 1960-as évek közepén kezdődött. Az első kutatási eredményeket kültéren elhelyezett faanyagok szolgáltatták, és a kutatók a felületen megjelenő változások pontos leírását próbálták megvalósítani. A fotodegradáció hatására bekövetkező változásokat többféle módszerrel értékelték. Ilyen módszer például a faanyag felületi kopásának mérése (Feist és Mraz 1978), szilárdságtani jellemzők vizsgálata (Derbyshire és Miller 1981), a minta súlycsökkenésének mérése (Futó 1974, 1976), (Evans et al. 1992), a minta színváltozásának és infravörös színekének mérése (Tolvaj és Faix 1995). Az infravörös spektroszkópia az 1980-as évek közepétől kapott egyre nagyobb szerepet a fotodegradáció hatására bekövetkező változások értékelésében. Faanyag esetén az infravörös spektrum meghatározásához többféle technológia ismert. A kutatások kezdeti szakaszában a színeképeket transzmissziós technikákkal vették fel, ehhez a degradált felszíni réteget átlátszó pasztillába préselték. Az UV fény hatására a faanyag felszínén bekövetkező kémiai változásokat viszont az infravörös abszorpciós színek felvételével lehet nyomon követni. A közegek fényelnyelése (abszorpció) fontos információkat szolgáltat az anyagok kémiai felépítéséről. Az abszorpciós színek alakja az elnyelő közegtől függ, de az egyes fafajok esetén nagyon hasonló (1. ábra).



1. ábra Bükk faanyag reflexiós és abszorpciós színeképe (Saját felvétel)

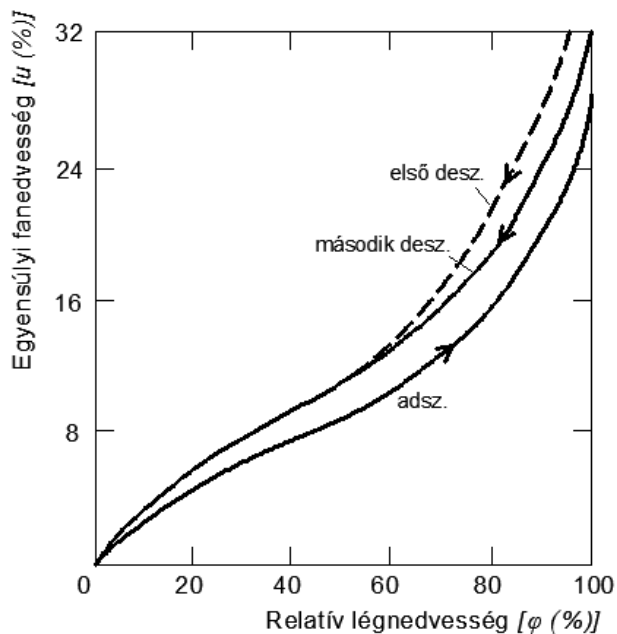
Jelentős eltérések az egyes fafajok közt csak az 1800-800 cm^{-1} hullámszám tartományban figyelhetők meg, melyet ezért ujjlenyomat tartománynak nevezünk. Mára az egyes elnyelési sávokhoz tartozó kémia csoportok ismertek. Ha változik az anyag kémiai szerkezete, akkor a megfelelő elnyelési sávok intenzitása annak megfelelően változik, hogy az ott abszorbeáló kémiai csoportok száma csökkent vagy nőtt.

A napsugárzás hatására bekövetkező fotodegradáció mértéke fafajonként eltérő, hiszen az egyes fafajok kémiai összetétele is eltérő. Jellemzően a magasabb sűrűségű fafajok felülete (akác) jobban ellenáll a fotodegradációnak, azaz tartósabb, stabilabb, mint a kisebb sűrűségű fafajok (nyár) felülete. Ugyanakkor a megfelelő felületkezelő anyagok és felületkezelési eljárás megválasztásával a fotodegradációval szembeni felületi stabilitás jelentősen javítható.

2.1.2 Nedvességtartalom és hőmérsékletváltozás

A faanyag nedvességtartalma és az őt körülvevő levegő hőmérséklete szoros összefüggésben állnak egymással, hiszen a faanyag nedvességtartalmát a környezet hőmérséklete és a levegő relatív páratartalma határozza meg. Ahogy a levegő, úgy a faanyag is mindig tartalmaz nedvességet, amely a faanyagban kétféle formában fordul elő. A sejtüregekben található nedvességet szabad víznek, míg a sejtfalakban megkötött nedvességet kötött víznek nevezzük (Siau 1984). A frissen kitermelt fa sejtfalai teljesen, sejtüregei részben telítettek vízzel. Az ilyen élőnedves faanyag a megváltozott nyomásviszonyok és a levegő páratartalmának, hőmérsékletének hatására azonnal száradni kezd, azaz nedvességet ad le. Először mindig a kapillárisokban tárolt szabad víz párolog el, melynek távozása nem jár jelentős mértékű alak és méretváltozással. Azt a nedvességtartalmi értéket, amelynél az üregekben már nem található szabad víz, de a sejtfalak még telítettek kötött vízzel, rosttelítettségi pontnak nevezzük. A legtöbb hazai fafaj rosttelítettsége 28-31% nedvességtartalomnál van (Molnár és Bariska 2005). Természetes száradás útján a faanyag csak annyi nedvességet képes leadni, amennyit a külső környezete enged. Ennél alacsonyabb nedvességtartalom csak mesterséges szárítás segítségével érhető el. A szárítás célja a faanyag nedvességtartalmának olyan értékre történő beállítása, amely a mindenkori felhasználási területének megfelelő egyensúlyi fanedvességgel egyenértékű, így a leszárított faanyag az adott klímában sem dagadást, sem zsugorodást nem szenved. A szárítás során viszont a kötött víz eltávózkodása jelentős méret és alakváltozással jár. A kötött víz eltávolításához a nedvességtartalom csökkenésével egyre növekvő energiaszintre van szükség. A szárításhoz szükséges energia közlése a szárítási technológia szerint többféle módon történhet. A legszelesebb körben elterjedt eljárás a melegelevegős áramoltatású szárítás. Az áramló levegő magas hőmérséklete következtében a faanyag felülete is felmelegszik, aminek hatására a felületen lévő víz elpárolog, és a felső rétegek nedvességtartalma csökken. A folyamatos hőközlés hatására a faanyag belsejéből a felület irányába egyfajta nedvességáramlás indul el. Amennyiben a nedvességáramlás és a felületi párologás intenzitása nincs egyensúlyban, úgy a faanyag felülete kiszárad, zsugorodik, a felület megreped. A hirtelen bekövetkező hőmérsékletváltozás hatására tehát a faanyag felülete jelentősen átalakul. Kíméletes szárítási menetrendet alkalmazva a felület kevésbé módosul, azaz stabilabb marad. Intenzív szárítás során viszont a felületi rétegekben akár sejttösszeroppanás is bekövetkezhet, amely a felület instabilitásához vezet. (Takáts 2004).

A faanyag nedvességtartalma a külső hőmérséklet állandó értéken tartása mellett is megváltozhat, hiszen a levegő páratartalmának változására is reagál. A fának a légnedvességgel való kapcsolatát a szorpciós elméletek írják le. Egy anyag nedvességtartalmát a környező levegő relatív páratartalmának függvényében ábrázolva kapjuk az adott hőmérséklethez tartozó szorpciós izotermát. Konkrétan fára vonatkozó megfogalmazás szerint, a szorpciós izoterma az egységnyi tömegű száraz fa által felvett vízmennyiség és a fával egyensúlyban lévő környezeti relatív páratartalom adott hőmérsékletre jellemző kapcsolatát jelenti (Babiak 1998). Az egyensúlyi nedvességtartalom a hőmérséklet növekedésével csökken. Gyakorlati mérések eredményei azt mutatják, hogy a nedvesség felvétel (adszorpció) során kapott és a nedvesség leadás (deszorpció) során kapott izotermák nem esnek egybe (2. ábra). Ezt a jelenséget szorpciós hiszterézisnek nevezzük, és azt jelenti, hogy az egyensúlyi fanedvesség egy adott légnedvesség esetén száradáskor magasabb, mint nedvesedéskor. A hiszterézis jelensége a 0-30%-os nedvességtartományban lép fel.



Gyakorlati jelentősége akkor van, amikor egy bizonyos nedvességtartalmú faanyagot szárítunk, majd újra visszahelyezzük az eredeti klímára. Az egyensúlyi nedvességtartalom ekkor már nem fogja elérni a kezdeti nedvességtartalmat, hanem alacsonyabb lesz. Az eredeti egyensúlyi nedvesség eléréséhez tehát a faanyagot magasabb relatív pártartalmú közegbe kell helyezni. A jelenség létrejöttének magyarázatára természetesen több elmélet is született (Kovács 1979, Skaar 1988), azonban a pontos okok még ma sem teljesen tisztázottak.

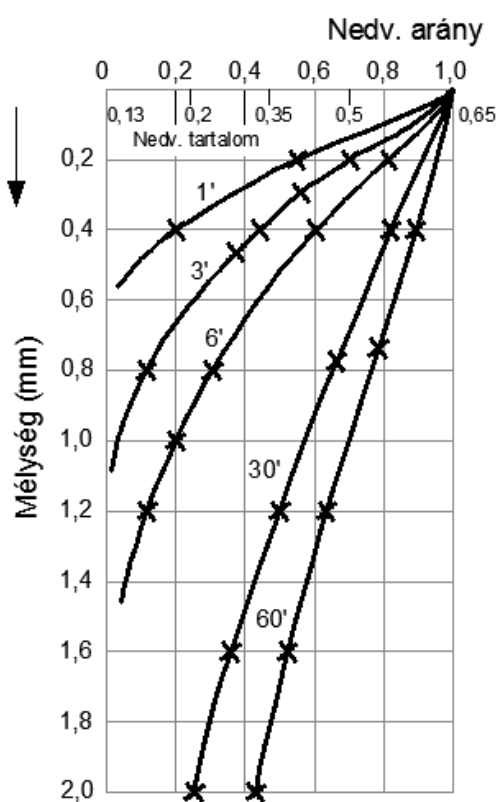
2. ábra A douglászfenyő szorpciós hiszterézise $t=40\text{ °C}$ (Molnár 2004)

A faanyag nedvességtartalmának ismerete több szempontból is rendkívül fontos, hiszen a fa szinte minden tulajdonságára hatással van. Meghatározására többféle elven működő nedvességmérő készülékek léteznek, melyek mérési pontossága is eltérő, így a faanyag feldolgozásának különböző fázisaiban használhatók. Az ellenállás alapú nedvességmérők a faanyagba beütött szondahegyek közötti ellenállás alapján jelzik a nedvességtartalmat. A kapott érték csak a két elektróda közötti tartományra érvényes és abból a mélységből származik, amilyen mélyre a szonda ér. A mérés pontossága viszont magas. Ezek a készülékek általában olyan esetekben használatosak, amikor a mérés pontossága fontosabb, mint a gyorsaság, vagy a szondák által okozott mechanikai sérülés. Ilyen eset például a mesterséges szárítás során a faanyag nedvességtartalmának nyomon követése vagy a különböző faipari alapanyagok (fűrészáru, furnér, rétegelt lemez, stb.) feldolgozását megelőző nedvességtartalom meghatározása. A dielektromos elven működő nedvességmérők a felszín közelében adják meg az átlagos nedvességtartalmat. A mérés gyors, nem okoz mechanikai sérülést, viszont a pontossága elmarad az ellenállás alapú műszerektől. Jól használható olyan esetekben, amikor rövid idő alatt sok mérés szükséges illetve fontos a roncsolásmentes mérés, mint például az alapanyag körülbelüli nedvességtartalmának meghatározásakor, vagy a késztermékek nedvességtartalmának ellenőrzésekor. A nedvességtartalom meghatározásának legpontosabb módszere a szárítási eljárás. Az eljárás lényege, hogy megmérjük a faanyag nedves illetve abszolút száraz tömegét, melyekből számolható a faanyag nedvességtartalma. Jellemzően különböző kutatásokhoz szükséges próbatetek nedvességtartalmának meghatározásakor alkalmazzák ezt a módszert.

A felsorolt módszereken kívül természetesen léteznek még egyéb módszerek is a faanyag nedvességtartalmának meghatározására (légnedvesség mérésén alapuló készülékek, spektrométeres eljárás, mikrohullámú eljárás, sugárzásos módszerek, stb.) de ezek a gyakorlatban kevésbé elterjedtek.

2.1.2.1 Fafelületek nedvesítése, beszivárgás

A természetes faanyagok kapillárpórusos felépítésüknek köszönhetően mindig tartalmaznak valamennyi nedvességet. A faanyag higroszkopikus anyagként folyamatos vízcserét tart fent környezetével a nedvességtartalmak függvényében az egyensúlyi állapot kialakulásáig. Ennek megfelelően a külső körülményekhez igazodva képes a környező levegőből nedvességet felvenni és leadni. Számos esetben azonban (pl. vizes lakkok) a felületekre hirtelen nagy mennyiségben kerül nedvesség. Ekkor megbomlik az egyensúly a környezet és a faanyag nedvességtartalma közt, hiszen a faanyag felületének nedvességtartalma hirtelen megnő. A fafelületre helyezett folyadék egy része a kapilláris erők fellépésének köszönhetően azonnal elkezd beszivárogni a faanyagba, aminek a hatására az anyagon belül úgynevezett nedvesség gradiens, azaz nedvesség különbség jön létre. A nedvességfelvétel következménye a dagadás. Mivel a faanyag ortotróp anyag,



azaz a három főirányban (sugár, húr, rost) eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek, ezért a nedvesítés következtében fellépő dagadás mértéke is eltérő a különböző irányokban. Az eltérő mértékű dagadás feszültségek fellépéséhez vezet a faanyagban belül. Faanyag esetén bármilyen lassú a nedvesítés folyamata, nedvesség gradiens és így feszültség mindig kialakul. A fellépő feszültségek maradó deformációkhoz vezetnek, aminek következtében a faanyagok felülete jelentősen átalakul.

A 3. ábra a nedvesség beszivárgásának hatására kialakuló pillanatnyi nedvességtartalom profilokat mutatja az eltelt idő függvényében. Látszik, hogy az idő múlásával a nedvesség a felület egyre mélyebb rétegeibe szivárog, illetve az is, hogy a nedvesség gradiens folyamatosan nő.

3. ábra Nedvességtartalom profilok a beszivárgás alatt, különböző időpontokban, fenyő esetén (Csanády et al. 2015)

Nedvesítést követően a levegő páratartalmát és hőmérsékletét állandó értéken tartva a nedvesség másik része azonnal elkezd párologni a felületről. A felületről ennek köszönhetően viszonylag gyorsan eltűnik a folyadék.

A beszivárgott nedvesség hatására a felületek felduzzadnak, mozgásba lendülnek. A felületmozgások során a felület felső rétegében jelentős változások mennek végbe, ezért a felületek topográfiája nagymértékben átalakul. A mozgás mértéke azonban erőteljesen függ az alkalmazott megmunkálási eljárástól, illetve a megmunkált anyag tulajdonságaitól. Az egyes megmunkálások a kialakult fafelületek felső rétegét eltérő módon veszik igénybe. A megmunkálás során a legfelső sejtsorok különböző deformációkat szenvednek. A kialakult felületek nedvességgel szembeni stabilitását ennek a rétegnek a vastagsága jelentősen befolyásolja.

Miután a nedvesség eltávozik a felületről, az lassan száradni, zsugorodni kezd. Ennek hatására a megduzzadt felület is eredeti formáját igyekszik felvenni. A felületi mozgások

megszűnését követően a felület stabilizálódik, de a maradó alakváltozások fellépésének köszönhetően a nedvesítés előtti alakját soha nem nyeri vissza.

A fa-víz kapcsolat kutatásának évszázados története ellenére nem mondható, hogy a folyamat ismert, sőt korábban jónak hitt kutatási eredményekről bizonyították be, hogy téves megállapítások (Engelund et al. 2013). A fa-víz kapcsolatot egyes kutatók fizikai, egyes kutatók kémia szempontból vizsgálták. A legújabb fizikai tulajdonságokat feldolgozó kutatások szabad és kötött vizet különböztetnek meg (a korábbi feltevést mi szerint a kötött víz fagyott és nem fagyott csoportokra osztható, cáfolták). A kémiai megközelítés szerint a megkülönböztetnek sejtüregben elhelyezkedő vizet, és sejtfalban található vizet.

A fa-víz kapcsolat már az 1930-as évek óta (Stamm 1929) a kutatások középpontjában áll (Stamm 1950, Stamm 1956, Siau 1984, Sahin 2008). A víz fában történő diffúziójának kétdimenziós matematikai leírása bizonyos peremfeltételek mellett ismert (Simpson 1973, R. Baronas et al. 2001). A nedvesség hatására bekövetkező felületmozgások regisztrálása azonban eddig nem volt megoldott. Dolgozatomban a felületmozgások regisztrálására, és számszerűsített jellemzésére fókuszálok, nem célozom a fa-víz kapcsolat mélyebb analízisére.

2.1.3 Gombakárosodás

A fa organikus eredeténél fogva a lebontó szervezetek (gombák) kedvelt tápláléka. A gombakárosodás színbeli elváltozásokat, szilárdságcsökkenést, korhadást okozhat a faanyagban. A farontó gombák pusztító hatásukat az élő fától kezdve a döntött, a feldolgozott faanyagon át a megmunkált és beépített fáig annak minden állapotában kifejthetik, ha megtelepedésükhöz, illetve életfolyamataikhoz a szükséges feltételek biztosítottak. Ezek a tápanyag, a levegő (oxigén), a nedvesség és a megfelelő hőmérséklet. A gombák önálló táplálkozásra képtelen többsejtű szervezetek, ezért a létfenntartásukhoz szükséges tápanyagokat más élő vagy élettelen növényi szervezetből készen veszik fel. A fán élősködő gombák a sejtekből vagy a sejtfalak lebontásából szerzik meg táplálékukat (Gyarmati et al. 1964).

A korhadás a farontó gombák sejtfalakat bontó tevékenysége. Attól függően, hogy a sejtfal mely fő alkotóelemét (cellulóz, lignin, hemicellulóz) bontja el egy adott gombafaj, megkülönböztetünk barna, lágy valamint fehér korhadást (Csupor 2004). A három típus elnevezése az általuk okozott színbeli változásokat tükrözi. A barna és lágy korhasztó gombák ugyanis elsősorban a cellulózt bontják, ezért a visszamaradó lignin hatására az anyag megbarnul. A fehér korhasztó gombák elsősorban a lignint bontják, ezért a megmaradó cellulózváz miatt, a fatest fehéres szürkés színű lesz. A korhadás előrehaladtával a fatest sűrűsége és szilárdsága is drasztikusan csökken, emiatt jóval kevésbé képes ellenállni az őt érő környezeti és mesterséges hatásokkal szemben. A korhasztó gombák megtámadhatják az élő fákat, a kitermelt faanyagot és akár a már beépített faanyagot is (Németh 1998).

A korhasztó gombákon kívül más gombafajok is okozhatnak változásokat az élő fák fatestében. A lombos fajoknál gyakori jelenség az álgesztesedés, amely gyakorlatilag nem más, mint a faanyag védekezési reakciója az őt érő különböző káros hatásokkal szemben. Ilyen káros hatások lehetnek például a kedvezőtlen időjárási, termőhelyi tényezők, vagy különböző mechanikai sérülések nyomán fellépő gombatámadások. Az álgeszt képződésekor hasonló folyamatok játszódnak le az élő fában, mint az egészséges geszt létrejöttékor. Az életműködésüket befejező sejtek, amelyek a tápanyagszállításban már nem vesznek részt, gesztesednek. Plazmájuk elhal, a sejtekbe és a sejtfalak közé

színező és járulékos anyagok rakódnak le. Az edényekben ún. tilliszek nőnek, amelyek azt részben vagy egészen eltömlik. A létrejött „gesztfa” színe általában sötétebb, így jól elkülönül a szíjácstól.

Egyes fafajoknál viszont nincs különbség a geszt és a szíjács színe között, ezért megkülönböztetünk színes gesztű (tölgy, akác, kőris, dió stb.) és színes geszt nélküli (bükk, juhar, gyertyán, nyír, hárs stb.) fákat. A nyárfélék között ismertek színes gesztű (pl. szürke nyár) és színes geszt nélküli (pl. rezgő nyár) fajok is. Az álgesztesedés során szintén megfigyelhető a színező anyagok és a tillisz képződése. A különbség az, hogy a képződés sokkal erőteljesebb mértékű, mint egészséges geszt létrejöttkor és mindig valami külső tényező váltja ki.



4. ábra Álgesztes tölgy faanyag és bükk frontok

Az erőteljes mértékű színezőanyag és tilliszképződésnek köszönhetően az álgesztes faanyag színe még sötétebb, mint az egészséges gesztnek. További különbség, hogy az álgeszt határa nem követi az évgűrű vonalát, tehát szabálytalan (4. ábra), míg a valódi geszt minden esetben. Az álgesztes faanyag szilárdsági jellemzői kedvezőek, sűrű, tartós, de jobban reped és vetemedik, nem telíthető, nehezebben szárítható és ragasztható. A hazai fafajok közül álgesztesedésre különösen hajlamosak a cser, a bükk és a nyárak. Korábban az álgesztes faanyag a színbeli eltérések miatt igen jelentős esztétikai hibának számított, ezért a bútort-, a parketta- és a rétegeltlemez-gyártásban sem használták fel. Mára viszont a vásárlók részéről jelentősen megnőtt a kereslet az álgesztes faanyag iránt, hiszen rendkívül dekoratív, egyedi megjelenést biztosít a gyártott termékeknek, ezért a vevői igényekhez igazodva egyre jobban előtérbe kerül használata. Erre példa Tasmániában a Sassafras, melyet a helyiek „Black heart Sassafras”-nak neveznek.

Egyes gombafajok viszont csak a döntött vagy feldolgozott faanyagban okoznak változásokat. Ilyen gombák a penészesedést okozó különböző penészgombák. Közös jellemzőjük, hogy a sejtfalakat nem támadják meg, csupán a sejtüreg tápanyagait élik fel, ezért a fa fizikai és mechanikai tulajdonságait nem rontják, viszont a felület elszínezik. A penészesedés mélységét tekintve általában felületi hiba, ezért a penész könnyen eltávolítható és a felület alatt a faanyag teljesen egészséges. A főleg fenyőféléknél jelentkező kékülést, különböző tömlős gombák idézik elő az egészségesen kitermelt, de nem megfelelően, tömör máglyákban tárolt rönkökön. A sejtfalakat szintén nem károsítják, az elszíneződés viszont nemcsak felületi, hanem a szíjács teljes keresztmetszetén jelentkezik. A kékült faanyag műszaki tulajdonságai tehát lényegesen nem változnak meg, azonban kevésbé telíthető. Esztétikai megítélése az utóbbi években az álgeszthez hasonlóan kedvezően változott, ezért ma már egyre gyakrabban használják fel belsőépítészeti célokra a kékült faanyagot is. A fülledés szintén a szíjács rész elszíneződése gombatámadás következtében, a különbség az, hogy a fülledés később korhadással jár együtt és jellemzően a lombos fafajoknál tapasztalható. A fülledt faanyag felhasználhatóságát a károsodási folyamat előrehaladottsága határozza meg.

A kitermelt és az elsődleges feldolgozáson átesett faanyagok gombakárosítókkal szembeni felületi stabilitása jelentősen javítható a téli fakitermeléssel, a gyors és szakszerű tovább feldolgozással, illetve a laza, szellős, hézagléces tárolással. Az élőfa álgesztesedése pedig az optimális termőhely megválasztásával és az alacsony vágáskor alkalmazásával minimalizálható.

2.2 A faanyag felületi stabilitását jellemző tulajdonságok

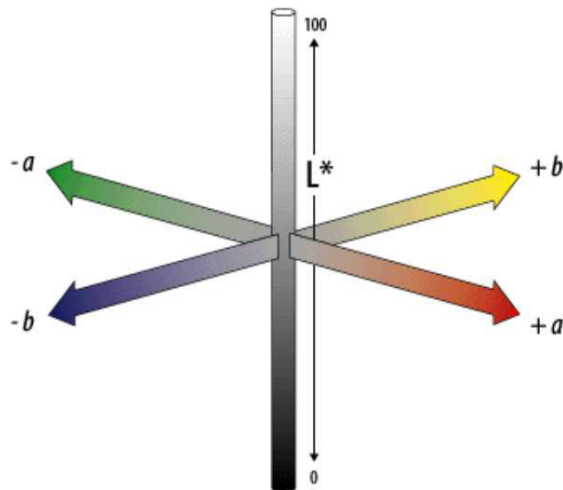
2.2.1 Szín

A fafelületek egyik legfontosabb tulajdonsága a szín, hiszen a fizikai és mechanikai tulajdonságokon túl gyakran ez határozza meg a termékek gyártásához felhasználandó fafajt. A természetes faanyagok színe a sárga és a vörös árnyalatok között található, azonban a kialakult fafelületek színe sohasem teljesen homogén, hanem rendkívül változatos. Ez az anatómiai felépítésüknek köszönhető, mivel a felületeken a vágási irányától függően különböző rajzolatok alakulnak ki, hiszen a legtöbb fafajnál a korai és késői pászta színe markánsan eltér egymástól. Az egyedi rajzolatok kialakulásához hozzájárulnak a göcsök, az átmetszett bélsugarak, és az esetleges fahibák is, melyek színe szintén jelentősen eltér az alapszövet színétől. Ez az egyedi rajzolat azonban rendkívül érzékeny a fényre, hőre, nedvességre egyaránt, ezért a szín folyamatosan változik. A faanyag színe tehát eléggé instabilnak mondható. Fény hatására például sötétebbé, vörösebbé válik, míg hőkezeléssel szinte valamennyi fafaj faanyagának színe kellemes barnává változtatható, de ha nedvesítjük a faanyagok a színe élénkebb, telítettebb lesz (Tolvaj 2013). A szabadban elhelyezett kezeletlen faanyag színe az idő múlásával elhalványul, kevésbé telítetté válik, és a szürke árnyalatok felé tolódik (Tolvaj és Papp 1999). Beltéren a felületeket érő hatások mértéke jóval csekélyebb, ezért a színváltozás folyamata is jelentősen lassabb. A megfelelő felületkezelő anyagok alkalmazásával mind kültéren, mind beltéren elhelyezett a fafelületek színváltozásának mértéke csökkenthető, azaz a kialakult szín maradandóbbá, stabilabbá tehető.

Otthonunkban előszeretettel használunk fából készült tárgyakat, hiszen sárgás vörösesbarna színük melegséget, harmóniát, nyugalmat sugároz. A kellemes szín csodálatos és teljesen egyedi rajzollal párosulva eredményezi azt az unikális színharmóniát, ami olyan népszerűvé teszi a faanyagot. Egyes fafajok színe viszont kevésbé jellegzetes, szinte rajzolat nélküli, szürkésfehér (pl gyertyán, nyár, hárs). Más fafajok színe nagyon is erőteljes, határozott, azonban kevésbé közkedvelt. Ilyen fafaj például az akác melynek megmunkálás utáni színe sárgászöldes tartományban található. Ezen fafajok szintén megfelelő fizikai és mechanikai jellemzőkkel rendelkeznek a beltéri alkalmazáshoz, azonban kissé kedvezőtlenebb esztétikai megjelenésük miatt eddig háttérbe szorultak. Hőkezelés hatására a faanyag színe mesterségesen is módosítható. A magas hőmérsékleten (100-200 °C) kezelt faanyag színváltozása nagyrészt a faanyagban jelen lévő járulékos anyagok és hemicellulózok kémiai átalakulásának köszönhető. A kezelés során a faanyagok többségének színe a kellemes meleg tónusú, barna színek felé tolódik, így az eljárásnak köszönhetően, ezen fafajok alkalmazási területe is jelentősen szélesíthető. A színváltozás mértéke nagymértékben függ az alkalmazott kezelési időtől, a kezelési hőmérséklettől és az alkalmazott közegtől is. A kezelési idő és hőmérséklet növelése is a faanyag folyamatos sötétedését okozza, de a két tényező közül a hőmérséklet szerepe a nagyobb. A hőkezelt faanyagok színtartósságáról megoszlik a kutatók véleménye. Egyes kutatások azt igazolják, hogy a hőkezelt faanyag színtartóssága sokkal jobb (Ayadi et al. 2003), míg más kutatási eredmények (Bak 2012) cáfolják ezt a

kijelentést. Ami bizonyos, hogy kültéri igénybevétel során a hőkezelt és a kezeletlen faanyag színe idővel kiegyenlítődik, vagyis hasonlóan szürkévé válik.

A tárgyak színét szemünkkel érzékeljük, amely rendkívül érzékeny, hiszen egymás mellé helyezve nagyon hasonló árnyalatokat is meg tudunk különböztetni. A szembe jutó színingert a tárgyak felületéről visszaverődött különböző hullámhosszúságú fény váltja



ki. A színeknek három jellegzetes tulajdonsága van: színezet, telítettség, világosság. Két szín akkor azonos, ha mind a három tulajdonságuk megegyezik. Egy adott szín meghatározásához kezdetben a vizuális értékelésre kellett hagyatkozni, ami viszont rendkívül szubjektív, erősen függ a megítélő személytől, és mivel nem szolgáltat mérőszámokat, ezért pontatlan is.

5. ábra A CIELAB színingertér
(<https://www.slideshare.net/dfoley2019/color-seminar>)

A szín méréséhez és objektív megítéléséhez a tulajdonságainak mérhetővé tételét kellett megoldani, amire az évek során számos próbálkozás történt. A gyakorlatban a CIELAB (L^* , a^* , b^*) rendszer terjedt el, amely egy 3D színtérben elhelyezett koordinátákkal (L^* , a^* , b^*), színponttal jellemzi a színt (5. ábra). A színtérben minden színt csak egy pont jelöl, így minden szín pontosan azonosítható. A mai színmérő készülékek a reflexiók színekéből határozzák meg a színinger összetevőket.

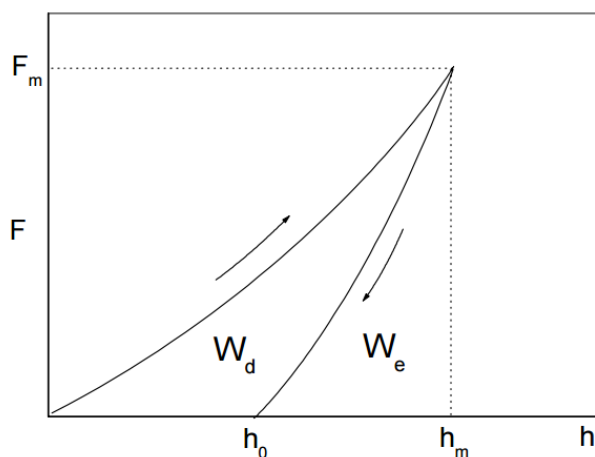
2.2.2 Keménység

A fafelületek keménysége szintén egy nagyon fontos paraméter. E sajátosság alapján különböztetünk meg puha- és keményfát, lágy- és keménylombos anyagot. Keménységnek azt az ellenállást nevezzük, amelyet az anyag egy másik test behatolásával szemben kifejt. Emiatt a keménység elsősorban a felületek mechanikai ellenállóképességét jellemzi, míg a teljes faanyagra vonatkozóan a sűrűséget használjuk, mint jellemző paraméter. A hazai gyakorlatban a Brinell-Mörath féle keménységi osztályozás terjedt el. A vizsgálat 500N terhelés mellett egy 10 mm átmérőjű acélgolyót a felületre merőlegesen a vizsgálandó faanyagba nyomnak majd mérik a golyó által a felületen hagyott nyom átmérőjét. A kapott mérőszámok segítségével az egyes fafajok keménysége összehasonlítható, osztályokba rendezhető. Ez a módszer azonban csak összességében, egészében képes a faanyag keménységét jellemezni, hiszen csak 5d vastagságánál nagyobb minták vizsgálatára alkalmas. A faanyag viszont egy hierarchikus szerkezetű anyag, melyben az egyes szintek akár jelentősen eltérő tulajdonságokkal rendelkezhetnek. A faanyag teljes keresztmetszetén belül centiméteres léptékben több egymástól eltérő tulajdonságú réteget (bél, geszt, szíjács, kéreg) különíthetünk el. Az egyes rétegek milliméteres léptékben további alkotórészekre, évgyűrűkre (korai és késői pászta) bonthatók, melyeket mikrométeres léptékben különböző sejttípusok (tracheidák, parenchimák, stb.) építenek fel. Az egyes sejtek építőelemei a sejtfalrétegek (elsődleges, másodlagos, S1, S2, S3), melyeket nanométeres léptékben a cellulóz-fibrillumok, a

közéjük rakódó lignin és az őket összekötő hemicellulózok alkotnak. Az egyes alkotórészek keménységének meghatározására különböző keménységmérési eljárásokat léteznek. A technika fejlődésének köszönhetően ma már lehetőség van mikro vagy akár nanométeres léptékű keménységmérésre is. Az ilyen nagy pontosságú keménységmérési eljárások kifejlesztésére egyébként a ma már egyre több iparágban egyre gyakrabban alkalmazott nanométeres szemcseméretű anyagok alkalmazása miatt került sor, mivel az ilyen méretű anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározására legtöbbször csak a keménységmérés alkalmas. A korai és késő pászta keménysége közti különbségek feltárására 2001-ben Hirata és társai még a Brinell féle eljárást alkalmazták, azzal a változtatással, hogy a vizsgálataik során alkalmazott acélgolyó átmérője csak 2 mm volt. Azt találták, hogy a késői pászta keménysége fafajtól és anatómiai főiránytól függően 2-10-szer nagyobb, mint a korai pásztáé. Ezt azzal magyarázzák, hogy a késői pásztát felépítő vastagfalú kisüregű sejtek sűrűsége nagyobb, mint a korai pásztát felépítő vékonyfalú nagyüregű sejteké.

Kiseb léptékű keménységmérésre a Vickers-féle eljárás alkalmazható. A módszer lényege, hogy a felületbe nem egy gömb, hanem egy 136 fokos csúcshögű, gyémántból készült gúlát nyomnak, amely jellegzetes négyzet alakú lenyomatokat hagy az anyagban. A keménység értéke a terhelőerő és a terhelt fej alatti érintkezési felület hányadosaként számítható. A behatoló fej geometriai kialakításának köszönhetően a módszer mérési tartománya 30-1000 μm . A Vickers-fej előállításakor azonban előfordulhat, hogy a gúla négy éle nem pontosan egy pontban találkozik, ami nagyon kis terhelés esetén hibát okozhat a mérésben. Ennek a problémának a kiküszöbölésére alkották meg az ún. Berkovich-fejet, amely tetraéder alakú, így három éle van, amelyek biztosan egy pontban találkoznak. Kialakításának köszönhetően a Berkovich-fej háromszög alakú lenyomatot hagy az anyagban, és a keménység értéke ugyanúgy a terhelőerő és a terhelt fej alatti érintkezési felület hányadosaként számítható.

Az 1980-as években fejlesztették ki az ún. mélységérzékeny (vagy dinamikus) keménységmérési módszert (depth sensing indentation – DSI). Ezek a modern, számítógép által vezérelt keménységmérő berendezések már mélységérzékelővel is fel



vannak szerelve, illetve képesek a mérés során a fejet állandó terhelési sebességgel a mintába nyomni, majd kiemelni. Ezalatt a gép folyamatosan rögzíti a benyomódási mélységet (h) a terhelőerő függvényében (F), így megkapjuk a benyomódási F - h görbét (6. ábra).

6. ábra A mélységérzékeny keménységmérés erő – benyomódási mélység görbéje (<http://docplayer.hu/16941878-Dinamikus-nano-es-mikro-kemenyse-g-mere-se.html>)

A berendezések nagyon finom (0,1 mN) erő, és nanométeres mélységi felbontással rendelkeznek, így segítségükkel akár a faanyag sejtfalának keménysége is meghatározható (Gindl et al. 2004), (Tze et al. 2007). Wimmer és társai 1997-ben lucfenyő próbatesteken vizsgálták a korai és késői pászta tracheidáinak sejtfa keménységét. Megállapították, hogy a sejtfa S2 rétegének keménysége a késői pásztában magasabb, mint a korai pásztában. A faanyag keménységét összehasonlítva a

sejtfal keménységével jelentős különbségek tapasztalhatók (Vincent et al. 2014). Némiképp talán meglepő, hogy a kapott mérési eredmények alapján a faanyag keménysége jóval alacsonyabb, kb. csak 20%-a sejtfal keménységének (Moon et al. 2009). Ez annak a köszönhető, hogy míg a sejtfal anyaga egy rendkívül sűrű szerkezetű cellulóz szálakból, ligninből és hemicellulózsból felépülő mátrix, addig a faanyag egy sejtesen felépülő porózus, nyitott üregekkel átszótt anyag. Arányaiban vizsgálva tehát a sejtfal jóval magasabb sűrűségű, mint a faanyag, ezért jóval nagyobb ellenállást képes kifejteni a behatoló fejjel szemben, ami magasabb keménységértékeket eredményez.

A mindennapi használat során a faipari termékek felülete (bútorok, padló és falburkolatok, nyílászárók, faszerkezetek, stb.) különböző dinamikus illetve statikus terheléseknek is ki vannak téve. A felfelületeket érő ezen hatások különböző maradandó károsodásokat (karc, benyomódás, esetleg repedés, kiszakadás) okoznak, mely sérülések nagyban csökkentik a termékek megjelenését, esztétikai értékét. A keménység különösen a padlóburkolatoknál, munkalapoknál, lépcsőknél fontos tulajdonság, mivel szoros összefüggésben áll a kopásállósággal. A kopásállóság kifejezi, hogy a felületi réteg mennyire képes ellenállni a külső koptató erőknek (főként súrlódási erők). A kopás következtében az egyes farészek a felületről lemorzsolódnak, lekopnak, ezért mértéke vastagságcsökkenéssel vagy tömegvesztéssel fejezhető ki. Szabványos koptatásvizsgálatok az ún. Taber-féle koptató berendezésekkel végezhetőek. A vizsgálat során kapott mérőszámok segítségével az egyes fafajok kopásállóságának sorrendje meghatározható. Nem meglepő, hogy a természetes faanyagok keménységi és a kopásállósági sorrendje nagyon hasonló.

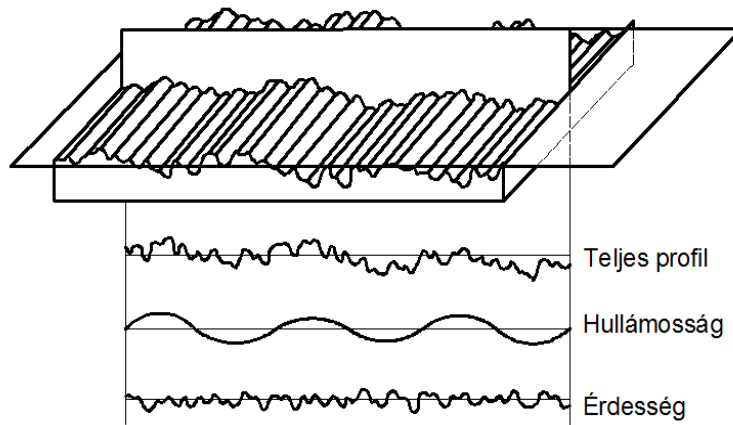
Parkettavásárláskor gyakran tapasztalható, hogy a koptatóréteg vastagsága mellett a kopásállóság a legfontosabb szempont, és sokan ez alapján választják ki az alapanyagot, azt remélve, hogy a keményebb, nagyobb kopásállóságú faanyagok felülete tartósabb, stabilabb. Ez bizonyos mértékig igaz is, de még a legkeményebb felület sem képes minden terhelésnek ellenállni. A szalagparketta nagy előnye a laminált padlóburkolatokkal szemben, hogy sérülés esetén a kopóréteg finom csiszolással javítható, így élettartama meghosszabbítható. A kopás mértéke a felületekre felhordott különböző bevonatokkal (lakk, viasz, olaj stb.) is csökkenthető. A bevonatok szerepe ezenkívül, hogy a faanyag struktúrájából és a felület megmunkálásából adódó egyenetlenségeket kiegyenlítsék, így egységesebbé, simábbá, homogénebbé tegyék a járófelületeket.

2.2.3 Felületi érdekesség

A felületi stabilitás szempontjából talán a legfontosabb tulajdonság a felületi érdekesség, hiszen a felületet érő hatások mindegyike szinte azonnal módosítja a kialakult felület struktúráját, ami nagymértékben meghatározza a faipari termékek esztétikai megjelenését. A felületi réteg tulajdonságainak negatív változása ezért alapvetően csökkentheti a faipari termékek használati és esztétikai értékét. A természetes faanyagok felületi érdekességének jellemzésében a legnagyobb nehézséget a felületek rendkívüli változékonysága okozza, mely elsősorban a faanyag belső struktúrájának, szöveti szerkezetének következménye.

Általánosságban elmondható, hogy az érdekességmérés során nyert felületi profil több tényező együttes hatásaként jön létre. A két legfontosabb ilyen tényező a hullámosság és az érdekesség. Ahhoz, hogy a mért felületi érdekességet értékelni tudjuk, ezeket külön kell választani (7. ábra). Ehhez különböző elven működő szűrőket vezettek be, melyek leggyakrabban hullámhosszaik alapján választják szét az egyes összetevőket. A

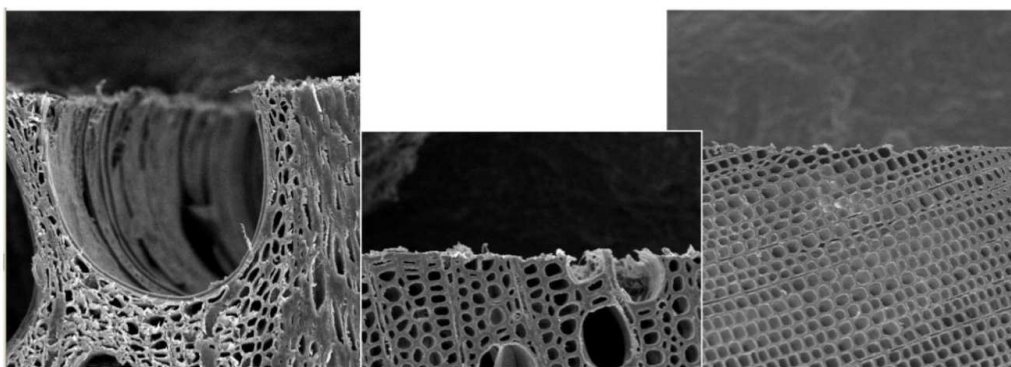
szétválasztásnál a legnagyobb problémát az jelenti, hogy az egyes alaki eltérések horizontális kiterjedése nem határozott értékű, így az elválasztó határok egymásba mosódnak. A felületi hullámosság, a megmunkált felület mikrogeometriájának viszonylag nagy térközű egyenetlensége, amelyet az jellemez, hogy amplitúdója sokkal kisebb a hullámhosszához képest. Az érdesség, a megmunkált felület mikrogeometriájának sajátos mintázatot mutató, az alkalmazott szerszám kinematikai



nyomát magánviselő, kis térközű egyenetlensége, amelyet olyan tényezők befolyásolnak, mint a munkadarab anyagának szerkezete, a szerszám élének pontatlanságai.

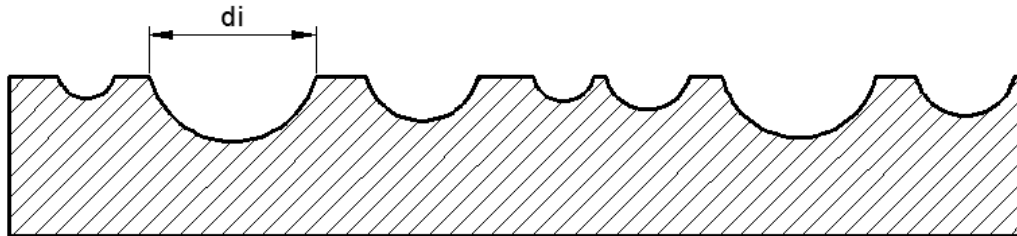
7. *ábra* A felületi egyenetlenség és összetevői (Kokkonen 2007)

Természetes faanyagok esetén a hullámosság elsősorban a felület mechanikai megmunkálásakor alkalmazott paraméterekből (a vágási sebesség, a szerszám élének állapota, a vágási szög, a vágás iránya, a gépasztal illetve a munkadarab rezgése stb.) származik, az érdesség pedig a faanyag anatómiai jellemzőiből (a fafaj, a sűrűség, a nedvességtartalom, a szövetszerkezet stb.) ered. Ennek köszönhetően a természetes faanyag felületi érdessége alapvetően két befolyásoló csoportra osztható, az ún. megmunkálási érdességre, illetve az anatómiai érdességre. A megmunkálási érdesség a paraméterek megfelelő megválasztásával jelentősen redukálható, hiszen például kis forgácsvastagság mellett, magas fordulatszámot és alacsony előtolási sebességet alkalmazva a hullámosság mértéke szinte elenyésző. Ilyen esetben különösen nagyedényes fafajoknál előfordulhat, hogy az edények mélysége nagyságrendekkel meghaladja a megmunkálási érdességet (8. ábra). Az elektromos profilszűrők ekkor hibásan hullámosságnak érzékelhetik az anatómiai érdességet. A szűrés után kapott torzított eredményekből helytelenül olyan felületre következtethetünk, melyen a megmunkálás nem megfelelő, holott a felületen igazából elértük a jó megmunkálás felső határát. A mért profilból az edények kiszűrésével már többen is foglalkoztak (Fujiwara et al. 2003, Mahr 2001, Csiha 2003), de a különböző elméleti megfontolások alapján létrehozott edényszűrők egyike sem terjedt el. Az anatómiai érdesség jellemzésre más megközelítésből is történtek kísérletek.



8. *ábra* Természetes faanyagok felületének változékonysága (Gottlöber 2008)

Az egyes fafajok belső struktúrájának jellemzésére bevezették az ún. struktúra számot, mely lehetővé teszi a felületek várható érdességének megítélését, illetve segít létrehozni néhány általános szabályszerűséget (9. ábra). A struktúra szám a megmunkálás után kialakult egységnyi fafelületen elhelyezkedő átvágott edények számából és méretéből származtatható (Magoss 2001). Jele: ΔF .



9. ábra A felületi érdesség modellje (Magoss 2001)

A struktúra szám meghatározása:

$$\Delta F = \frac{\pi}{8} [a(\sqrt{n_1} d_1^2 + \sqrt{n_2} d_2^2) + b(\sqrt{n_3} d_3^2 + \sqrt{n_4} d_4^2)]$$

ahol:

- n_1, n_2 : az edények és tracheidák száma a korai pásztában az egységnyi keresztmetszetre vonatkoztatva
- n_3, n_4 : az edények és tracheidák száma a késői pásztában az egységnyi keresztmetszetre vonatkoztatva
- d_1, d_2, d_3, d_4 : az edények és tracheidák közepes átmérője a korai illetve a késői pásztában
- a, b : a korai és késői pászta aránya ($a+b=1$).

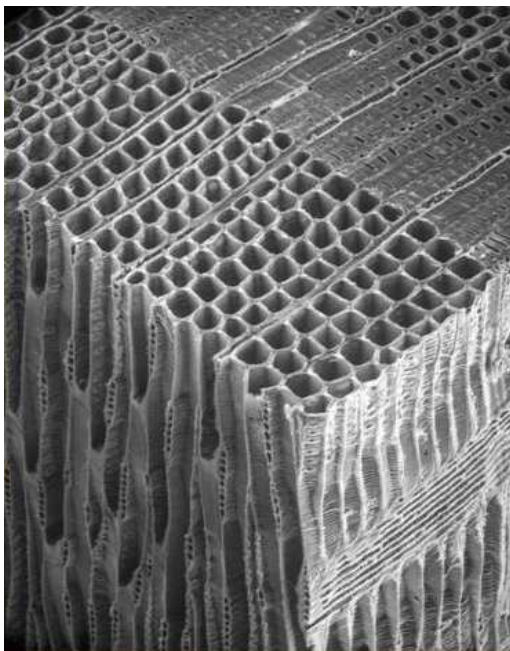
A struktúra szám meghatározása rendkívül sok időt és megfelelő mérőberendezéseket igénylő feladat, ezért az iparban kevésbé használatos. A tudományos világban viszont ismerete szükségszerű és hasznos, hiszen az egyes fafajok belső struktúrája még fafajon belül is nagyban eltérhet. Jó példa erre az erdeifenyő, ugyanis egy Észak-Európából származó rönk sűrűsége jelentősen magasabb lehet, mint egy Közép-Európából származó rönké. A struktúra szám ezeket az eltéréseket egy adott fafajon belül is figyelembe veszi. A nagyszámú befolyásoló tényező miatt azonban általános érvényű összefüggések megállapítására máig nem került sor.

2.2.3.1 A faanyag szerkezeti felépítése

A fa mikroszkópos szerkezetének a fát felépítő sejtek, szövetek által létrehozott szerkezetet nevezzük. A mikroszkópos szerkezet meghatározza a faanyag műszaki (fizikai, mechanikai és technológiai) tulajdonságait, ismerete ezért kiemelkedő fontossággal bír. Szövetnek nevezzük az azonos eredetű, működésű, szerepű és felépítésű sejtek csoportját. A szövetek úgy jönnek létre, hogy bizonyos sejtek osztódnak, majd az így kialakuló fiatal sejtek átalakulnak, azaz adott feladatok elvégzésére differenciálódnak. A fát felépítő szöveteket két nagy csoportba soroljuk: az osztódó szövetek és az

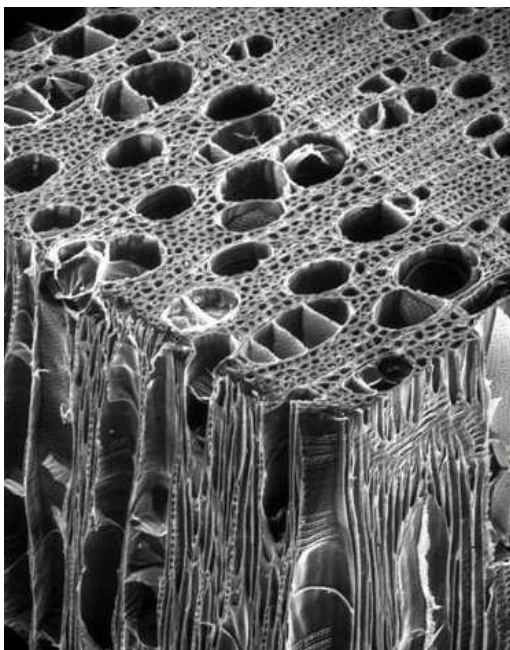
állandósult szövetek csoportjába. A fatestet legnagyobbbrészt állandósult szövetek alkotják és csak elenyésző mennyiségben osztódó szövetek. Az osztódó szövetek (merisztémák) felelősek a növények állandó gyarapodásáért és növekedéséért. A fa osztódó szövetei biztosítják egyrészt a magassági növekedést, másrészt a vastagsági gyarapodást. Az osztódó szövetekből alakulnak ki (differentiálódnak) az állandósult szövetek. Mindazokat a szöveteket, melyeknek sejtjei nem osztódnak, hanem különféle feladatok elvégzésére alakultak át, állandósult szöveteknek nevezzük. A fa állandósult szövetei a következők: védőszövet (bőrszövet), felszívó-, asszimiláló-, kiválasztó és váladéktartó-, szállító-, raktározó-, szilárdító szövetek.

Megkülönböztetünk fenyő és lombos fafajokat. A fenyők felépítése egységesebb, homogénebb, míg a lombosoké összetettebb, változékonyabb. Mindkét típus korai és késői pásztából épül fel, melyeket jelentősen eltérő sűrűség, szín és lumenátmérő jellemez. Az évgyűrűk szélessége a környezeti tényezőktől és a fafajtól függ. A fenyők mikroszkópos szerkezete a 10. ábrán, míg a lombosoké a 11. ábrán látható.



A tűlevelűek legfőbb alkotóelemei a tracheidák (áledények), mely a fatest 90-95%-át teszi ki. Ennek köszönhető a fenyők viszonylag egyszerű, homogén sejtfelepítése. A késői pásztát vastag falú (7 – 15 μm), szűk üregű (10 – 25 μm) tracheidák, a korai pásztát vékony falú (2 – 10 μm) nagy üregű (20 – 60 μm) tracheidák építik fel. A fenyők faanyagában sajátos szöveti részt képeznek a gyantajáratok, melyek igazából nem sejtek, hanem sejtek közti üregek.

10. ábra A fenyők mikroszkópos szerkezete (Molnár és Bariska 2005)



A lombos fafajok felépítése jóval bonyolultabb a fenyőkénél. A lombosok főbb alkotóelemei a tracheák (edények), libriform rostok, faparenchimák. Az edények elrendeződése a faanyagon belül lehet gyűrűs és szórt. Az edénytagok hossza és átmérője fafajtól függően változó. A gyűrűslikacsú fafajoknál a nagyméretű (100 – 400 μm) edények a korai pásztában, a kisméretű edények a késői pásztában (20 – 140 μm) helyezkednek el, ezért a két pászta élesen elkülönül egymástól. A mechanikai megmunkálás szempontjából kedvezőbb az edények egyenes, szórt elrendeződése. A szórtlikacsú fafajoknál a korai és a késői pásztába az edényátmérők nem térnek el (50 – 200 μm).

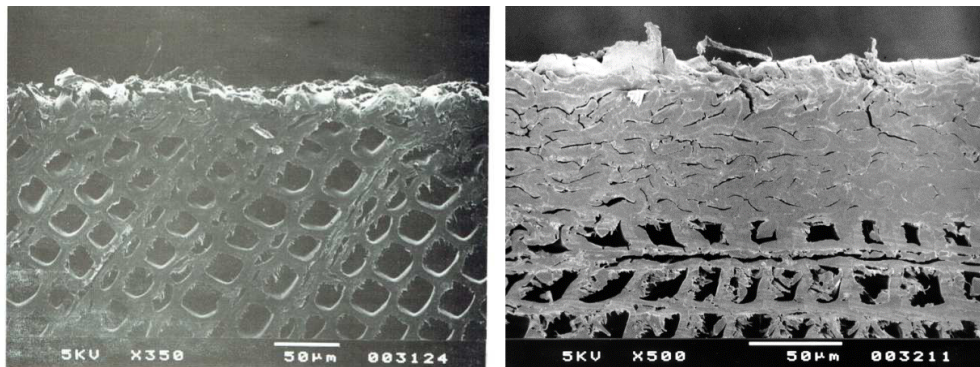
11. ábra A lombosok mikroszkópos szerkezete (Molnár és Bariska 2005)

2.2.3.2 A deformációs zóna

A megmunkálás során a felületet olyan hatások érik, melyek következtében a faanyag keresztmetszetében átalakul. Attól függően, hogy az adott sejtfalat mekkora erőhatás éri, az különböző mértékű deformációt szenved. Amennyiben ezen hatások nem haladják meg a megmunkált faanyag sejtfal szilárdságát, úgy nem alakul ki maradandó változás. Ezen hatások egy része elasztikus, azaz a hatás megszűnését követően azonnal visszarugózik, egy része viszkoelasztikus, azaz csak bizonyos idő eltelte után nyeri vissza eredeti alakját. Abban az esetben, ha a megmunkáláskor fellépő erők meghaladják a sejtfal szilárdságát az végleges, azaz plasztikus alakváltozáshoz vezet. Ez a sejtsztruktúra tömörödését okozza a felületen.

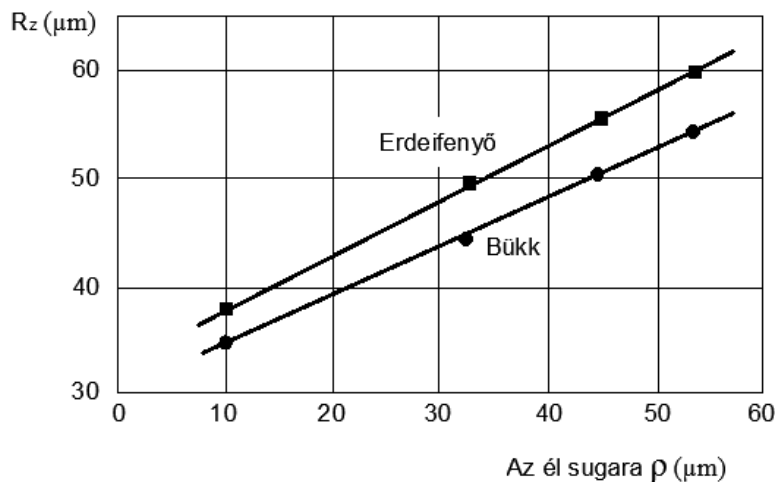
A mechanikai megmunkálása során tehát a fellépő forgácsolási erők hatására a felület felső rétegében elhelyezkedő sejtsorok (5-100 μm mélyen) összeroppannak, tömörödnek. Ezt a réteget deformációs zónának nevezzük. A zóna a megmunkáláskor fellépő forgácsolási erők felületre merőleges komponensei hatására jön létre, melyek nyomást fejtenek ki a felület felső rétegére. A megmunkálás hatására a felület felső rétegében bekövetkező sejtkárosodás már korábban is ismert volt a kutatók előtt (Marra 1943, Pahlitzsch 1966, Stewart és Crist 1982, Murmanis et al. 1986). A felületen kialakult deformációs zóna vastagságát azonban több tényező befolyásolja (Westkämper et al. 1997). Egyrészt a forgácsolási paraméterek (szerszámél kopottsága, forgácsvastagság, előtolási sebesség stb.), másrészt a megmunkált faanyag tulajdonságai (nedvességtartalom, fafaj, sűrűség stb.). A megmunkálási paraméterek megfelelő megválasztásával a deformációs zóna mélysége jelentősen lecsökkenthető, de a legoptimálisabb megmunkálási paraméterekkel sem hozható létre olyan felület, ahol egyetlen sejtsor sem deformálódik. Egyetlen megmunkálás ismert, ami közel tökéletesen tudja elválni az anatómiai építőelemeket, az ősi japán gyalulás, ami azonban ipari körülmények között nem alkalmazható. A zóna vastagsága nagymértékben meghatározza a kialakult felületet tulajdonságait, későbbi felhasználhatóságának korlátait.

A deformációs zónáról (mélység, tömörödött sejtsorok száma, alakja) a felületvizsgálatok (felületi érdességmérés, felületi feszültség vizsgálata) csak kevés, közvetett információt nyújtanak. A kialakult deformációs réteg keresztmetszete azonban elektronmikroszkópos felvételeken jól kivehető, kialakulása gyorskamerával regisztrálható, modellezése aktuális feladat. Fischer 1993-ban tette közzé a 12. ábrán látható elektronmikroszkópos felvételeket, melyeken jól látható a különbség az éles és tompa szerszámmal megmunkált felületen kialakuló deformációs rétegek vastagsága között. Míg éles kés esetén alig pár sejtsor roncsolódott a felület alatt (kb. 40 μm), addig a tompa szerszámot alkalmazva jelentős mélységig deformálódik a sejtsztruktúra (kb. 100 μm).



12. ábra Éles és tompa szerszám által okozott felületi roncsolódás lucfenyő felületeken (Fischer, 1993)

Természetes faanyagok felületi érdességének mérése során ennek a deformálódott rétegnek a felszínéről kapunk információkat. Annak kiderítésére, hogy a tömörödés milyen hatással van a felület érdességére, Magoss 2002-ben 10 és 53 μm között változtatva az él lekerekítési sugarát vizsgálta a felületi érdesség változását 4 fafajra. Az eredmények alapján kijelenti, hogy az R_z érdességi paraméter és az él sugara között lineáris az összefüggés (13. ábra).



13. ábra Az él lekerekítési sugara és az R_z paraméter összefüggése erdei fenyő és bükk fafajok esetén (Magoss 2002)

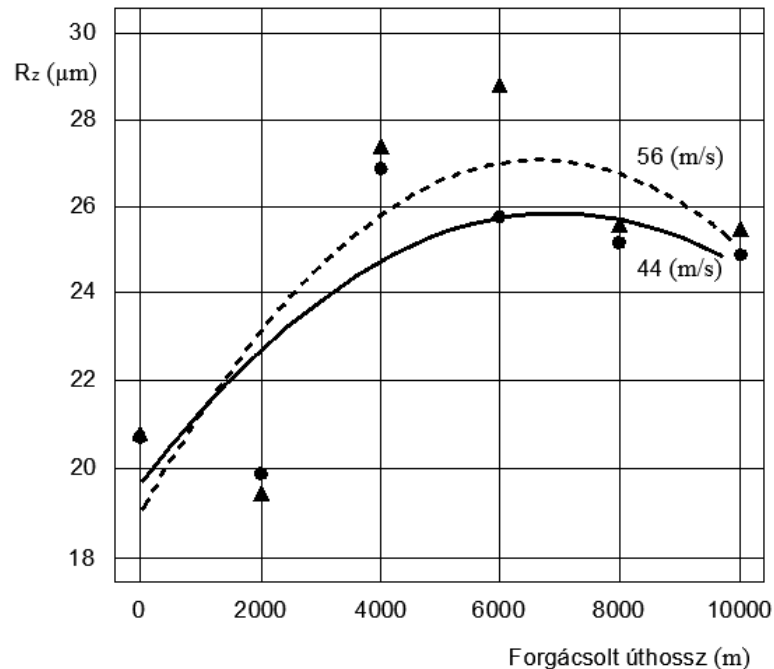
A szerszám élkopásának egyik legjelentősebb hatása, hogy a felületi profil hullámossá, egyenetlenné válik. Ez a hullámosság okozza az érdességi paraméterek értékeinek növekedését.

Pinkowski és társai hasonló kísérletsorozatot végeztek, melyek eredményeit 2010-ben tették közzé. Kezdetben éles késsel munkáltak meg tölgy faanyagot majd 1, 50, 100, 200, 300 és 400 métert forgácsolva visszamérték az érdességet. Tapintótűs érdességmérővel az R_a és R_z paraméterek változását figyelték. A megmunkált faanyag nedvességtartalma 8%-os volt. Azt tapasztalták, hogy a forgácsolt úthossz növekedésével együtt az érdességi paraméterek értékei is növekedtek. A 400 méterhez érve azonban minden esetben csökkenés figyelhető meg az értékekben. Ennek okaként, a felületi réteg olyan mértékű roncsolódását és tömörödést neveztek meg, melynek következtében az érdességi értékek a felület hullámosságának ellenére csökkennek és egy homogénebb, jobb felületet jeleznek. Ez a javulás azonban csak látszólagos, mert nedvesség hatására a felület mozgásba jön, és lényegesen érdesebb felületet eredményez.

Hasonló eredményeket publikálnak Aguilera és társai (2016) radiáta fenyő próbatesteken 10,9%-os nedvességtartalom mellett (14. ábra). A vizsgálatok során a forgácsolt úthossz jelentősen hosszabb volt, egészen 10 000 méterig minden 2 000 méternél rögzítették az R_z érdességi paraméter értékeit, két forgácsolási sebességet (44 és 56 m/s) alkalmazva. A megmunkáláshoz egy hatképes gyorsacél szerszámot használtak 15°-os élszöggel.

Mindkét esetben azt kapták, hogy a szerszámél kopásának növekedése az érdesség növekedését vonja maga után egészen 6000 méterig. A további szerszámkopás ellenére az R_z érdességi paraméter értékei viszont csökkentek. A kapott pontokra egyenest illesztve az R^2 értéke 0.32-re adódott. Másodfokú regressziót használva viszont jóval nagyobb a korreláció, ugyanis az R^2 értékre 0.65-öt kaptak. Érdekes, hogy korábban Gilewicz és társai (2010) szintén vizsgálták a tömörödés és az érdesség kapcsolatát, de

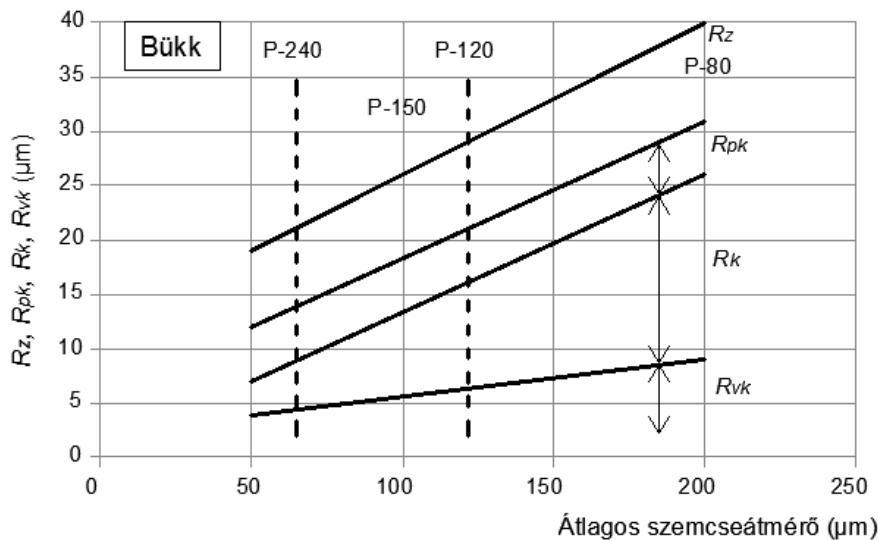
csak 6000 méteres forgácsolási úthosszon. Az ő eredményeik szerint, ahogy növekszik a szerszámél kopottsága, úgy emelkedik az R_z paraméter értéke is, azaz lineáris kapcsolatot feltételeznek a kopás és a megmunkált fafelület érdessége közt, ugyanúgy, mint korábban Magoss 2002-ben. Jelen eredményekből azonban jól látható, hogy pontosan ezután az érték után kezdenek csökkenni az érdességi értékek, de a felületi réteg instabilitása nő.



14. ábra A forgácsolt úthossz és az R_z érdességi paraméter kapcsolata radiáta fenyő fafajon 44 és 56 m/s vágási sebességek mellett (Aguilera 2016)

Faanyagok felületének végleges kialakítására leggyakrabban alkalmazott megmunkálási eljárás a csiszolás. A csiszolás egy rendkívüli végmegmunkálási eljárás számos különbséggel, a késéllel történő megmunkálásokhoz képest. Itt az anyageltávolítást olyan kis szemcsék végzik, melyek egy alap hordozórétegbe ágyazottan végeznek mozgást a felületen sűrűlődv. A szemcsék útja a megmunkálás során gyakran átfedi, illetve keresztezi is egymást. A legfontosabb megmunkálási paraméterek a felületi nyomás, az előtolási sebesség, a szemcseméret, a fordulatszám. Ezen paraméterek adott fafajra meghatároznak egy fajlagos anyageltávolítás mennyiségét ($\text{g/m}^2 \cdot \text{min}$), amely a kopási folyamat előrehaladtával folyamatosan csökken. A csiszolópapíron található szemcsék átlagos átmérője a szemcsemérettől függ és annál kisebb, minél finomabb a csiszolópapír. A felületről eltávolított faanyag mennyisége elméletig független a szemcsemérettől, de a gyakorlati tapasztalatok alapján nagyon finom csiszolópapír alkalmazásakor jelentősen csökken a mennyiség.

Csiszolás után a felületen kialakuló deformációs zóna viselkedését, és érdességi paraméterekkel történő leírását is vizsgálták már (Magoss 2013, Magoss 2015), és megállapították, hogy az átlagos szemcseátmérő és az érdességi paraméterek közt lineáris a kapcsolat, hiszen az átlagos szemcseátmérő emelkedésével az érdességi paraméterek értékei is növekedtek (15. ábra). Meglepő az R_k paraméter erős korrelációja a csiszolópapír szemcseméretével. Ez arra utal, hogy a durvább szemcsék a felület alsóbb rétegeiben is nagyobb károkat okoznak, mint a finomabb szemcsékkel ellátott csiszolópapírok. A késes megmunkáláshoz viszonyítva csiszoláskor az alsóbb rétegekben bekövetkező deformáció mélysége egy adott szemcseátmérőjű papírral fele akkora, mint egy ugyanakkora lekerekítési sugarú késsel.



15. ábra A szemcseméret befolyása az érdességi paraméterek értékeire bükk faanyag esetén (Magoss 2015)

A kutatás további eredményeként közlik, hogy csiszolás esetén a felületi érdesség értékek kisebbek, mint az anatómiai érdesség értékei. Ennek oka egyrészt csiszolatpor tömítő hatása, amely az edényeket eltömítve redukálja az anatómiai érdességet, másrészt a megmunkálás során a felületi sejt sorok tömörödése.

Belátható tehát, hogy a kialakult felület érdességének a meghatározása nem elégséges a felületi minőség megítéléséhez. Az érdességi paraméterek ugyanis annak a tömörödött és károsodott sejtstruktúrának az érdességét jellemzik, amely a felület felső rétegében a szerszámél alatt kialakul. Ez a réteg megmunkáláskor jelentős deformációt szenved, különösen tompa szerszámél használatakor, így az érdességi paraméterek adott esetben a valóságostól jelentősen eltérő felületi minőséget jelezhetnek. A tömörödött sejt sorok számának, azaz a deformációs zóna mélységének ismerete tehát ugyanolyan fontos, mint az érdességé. A deformációs zóna rendkívül instabil, hiszen a tömörödött rész elveszti mechanikai stabilitását, kopásállóságát és nedvesség hatására egyenetlenül duzzad, ennek következtében a nedvesség felszívódása során a felület struktúrája jelentősen átalakul. A mozgás és a változás mértéke legfőképp a zóna vastagságától és a felületre helyezett nedvesség mennyiségétől függ.

2.3 Modifikálás

Napjainkban már léteznek különböző eljárások, amelyek alkalmazásával a fafelületek stabilitása jelentősen javítható. Ezeket az eljárásokat összefoglaló néven modifikációs eljárásoknak nevezzük. A modifikálásnak több definíciója is létezik, ezek közül talán a leggyakrabban használt a következő: „Olyan módosító eljárás, mely megváltoztatja a faanyag konstitúcióját, azzal a céllal, hogy a felhasználás szempontjából a fa előnyös tulajdonságait növelje, és új termékeket állítson elő.” (Bosshard 1984). A faanyag modifikálás célja a méretstabilitás, a szín, a színtartósság javítása, a biológiai stabilitás növelése, az időjárással szembeni ellenálló képesség javítása, és a felületi tulajdonságok pozitív módosítása, és a nedvességre való érzékenység csökkentése. Léteznek aktív, illetve passzív modifikációs eljárások. Aktív eljárásnak nevezzük azokat a módosításokat, amikor a kezelés hatására az anyag kémiai szerkezete megváltozik, passzívnak, amikor csak az anyag tulajdonságai változnak meg, a kémiai szerkezet nem. A két csoporton belül a következő modifikálási módszerek ismertek: a kémiai, a termikus, a felületi, és az

impregnálásos modifikáció. Kémiai modifikáció során a faanyagba juttatott különböző kémiai anyagok következtében, hőkezeléskor a magas hőhatás következtében, felületi modifikáció során a faanyag felszínének kémiai fizikai vagy biológiai kezelése következtében, míg az impregnálásos modifikáció során a faanyagot impregnálószerrel való feltöltése következtében bekövetkező átalakulások járulnak hozzá a faanyag egyes tulajdonságainak célzott javításához. Azonban az egyes beavatkozások minden esetben párosulnak negatív mellékhatásokkal is, így fontos a pozitív és negatív tulajdonságok súlyozása, azaz a felhasználási területnek megfelelő eljárás kiválasztása. Természetesen a faanyag tartósságának javítására használhatunk különböző faanyagvédő szereket, amelyek többsége egészségre káros összetevőkkel rendelkezik, így veszélyes hulladéknak minősülnek. A modifikált faanyag viszont sem a használata során, sem az életciklusa végén elvégzett ártalmatlanítás során nem bocsát ki a környezetébe toxikus, mérgező anyagokat.

Az iparban leggyakrabban alkalmazott modifikáló eljárás a faanyagok hőkezelése, mely után az utóbbi években jelentősen megnőtt az érdeklődés. Ez a vegyszermentes faanyagvédelem iránti környezetvédelmi és fogyasztói részről egyaránt jelentkező elvárásoknak és igényeknek, valamint a nagy ellenálló képességű trópusi fafajok állományának jelentős csökkenésének köszönhető. A faanyag egyes jellemzői a hőkezelés hatására jelentősen megváltoznak. Az egyik legjelentősebb változás, hogy csökken az egyensúlyi fánedvesség, ezzel együtt a zsugorodás, dagadás mértéke, aminek következtében növekszik a méretstabilitás (ASE) is. Az egyensúlyi nedvesség csökkenésének oka, a faanyagban bekövetkező kémiai változásoknak köszönhető. A hőkezelt faanyagban nemcsak a zsugorodás és dagadás mértéke csökken, de a nedvességfelvétel sebessége is. Így nemcsak kevesebb nedvességet vesz fel a környezetből, de mindez lassabban is megy végbe. Az ilyen faanyagot elsősorban olyan helyeken érdemes alkalmazni, ahol a páratartalom gyakran változik és fontos a méretstabilitás (Pfriem et al. 2007). A hőkezelés további hatása a faanyagra annak színének változása. A kezelt faanyag a kezelési idő növelésével egyre sötétebb lesz. Javul a gombakárosítókkal szembeni ellenálló képesség (Dirol és Guyonnet 1993, Horváth N. 2008), viszont csökkennek a mechanikai tulajdonságok (Korkut et al. 2008a). Természetesen a változások mértéke mindig függ a fafajtól és a kezelési eljárás paramétereitől (alkalmazott hőmérséklet, kezelési idő, kezelési közeg stb.).

A fapelületek stabilitásának növelésére a felületi modifikációs eljárások alkalmazhatók. Céljuk a ragasztási szilárdság, a felületkezelő anyagok tapadásának vagy a felszín vízlepergető hatásának fokozása (kitettség). A legújabb irányzat a felületi stabilitás növelése, illetve a nedvesség hatására bekövetkező dagadás csökkentése érdekében a nano bevonatok alkalmazása (Sahin és Mantanis 2011).

2.4 Összegzés

Látható tehát, hogy a faipari termékek felületének stabilitását rendkívül sok tényező befolyásolja, illetve, hogy a stabilitás meglehetősen sok tulajdonságra hatással van. A faipari termékek felületének megóvása illetve mechanikai és esztétikai tulajdonságainak megőrzése rendkívül fontos, hiszen a gyártott termékeknek a mindennapi használat során is ellen kell állniuk az őket érő hatásokkal szemben, és meg kell őrizniük eredeti tulajdonságaikat. Ez biztosítja, hogy a fából készült termékek akár évtizedeken keresztül is tökéletesen betöltsék funkciójukat, ezenkívül melegséget sugárzó színükkel, egyedi rajzolatukkal díszítsék otthonunk.

*“Ami számítható, azt számítsd ki;
ami mérhető, azt mérd meg;
és ami nem mérhető, azt tedd mérhetővé!”
(Galileo Galilei)*

3. A faanyag felületi érdekessége

A mechanikai megmunkálás után kialakult természetes faanyagok felületének minőségét számos tényező befolyásolja. Ezek egyrészt a forgácsolási paraméterek (szerszámél kopottsága, forgácsvastagság, előtolási sebesség stb.), másrészt a megmunkált faanyag tulajdonságai (nedvességtartalom, fafaj, sűrűség stb.). Kezdetben, mint minden felületnek, így a faanyagok felületének minősítése is vizuális úton, illetve tapintással történt. Ezek a módszerek manapság is gyakran használatosak a felület „jóóságának” megítélésére, azonban nem szolgáltatnak számszerűsíthető adatokat, így a felületek összehasonlíthatósága nem biztosított. Később a fémiparban megjelent érdekességmérési eljárásokat és érdekességi mérőszámokat alkalmazva, lehetővé vált az egyes felületek 2 dimenziós, vonalmenti érdekességének mérése és jellemzése. A faiparban is jelentős energiákat fordítottak a felületi érdekességi mérőszámok meghatározására, de a faanyagok felületének inhomogenitása miatt, kimondottan a fafelületek jellemzésre szabványos mérőszámokat még nem sikerült meghatározni. Ez nagyrészt a faanyagok anatómiai felépítésének köszönhető, hiszen a kialakult felületeket átvágott edények, felületből kiszakadt rostok tarkítják, melyek mérete, mennyisége és elhelyezkedése még egy adott fafaj esetén is rendkívül változatos. Pontosan ez a változatos felszín eredményezi, hogy a vonalmenti érdekességmérésből kapott eredmények nagymértékben eltérhetnek egymástól, hiszen a mérési vonal megválasztása különösen nagyedényes fafajok esetében jelentősen befolyásolja a kapott érdekességi paraméterek értékét. Az anatómiai és megmunkálási érdekesség szétválasztására különböző elven működő szűrőket dolgoztak ki, melyek lehetővé teszik a mért profilból az edények kiszűrését, így következtetve a megmunkálásból származó érdekességre (Csiha 2003), ugyanakkor az ipar számára is megfelelő eljárás kidolgozása, mely segítségével egyértelműen jellemezhetők a fafelületek, még várat magára.

Napjainkban viszont a számítástechnika fejlődésének köszönhetően már lehetővé vált nagymennyiségű adat viszonylag rövid idejű feldolgozása és így a 3D-s felületértékelés megalkotása. A 3D-s érdekességmérési eljárások többsége (kivétel pl. Flemming féle gél területi teszt) érintésmentes, optikai elven működik. Az optikai rendszerek nagy előnye a tapintótűs rendszerekkel szemben a gyorsaságuk, illetve, hogy a mérőműszer a mérés során nem érintkezik közvetlenül a felülettel, így nem módosítja azt. Ez faanyagoknál azért különösen fontos, mert így a mérés során a felületből kiálló rostok biztosan nem hajlanak el vagy törnek le. Az eljárás legnagyobb előnye azonban, hogy nem egy vonal, hanem egy felület érdekességéről kapunk információt, így lehetővé válik a felület lényegesen valóságosabb jellemzése, amelyről ezáltal jóval több következtetés vonható le az adott felület minőségét illetően. Ez különösen olyan felületeknél előny, melyek felszíne változatos, inhomogén, mint a természetes faanyagok felülete.

Fafelületek optikai vizsgálata során az eretből adódó (korai és késői pászták váltakozása) színbeli eltérések ugyanakkor gyakran problémát okozhatnak, ugyanis egyes rendszerek a színbeli eltéréseket rendszerint mélységkülönbségként érzékelik. Az optikai elven működő érdekességmérő berendezések további közös problémája, hogy a beeső fénysugár a felület tulajdonságtól függően eltérően reflektálódik. Ha a fényvisszaverő felület érdes, akkor szórt (diffúz) visszaverődés jön létre, és ebben az esetben a fény

minden irányba egyforma erősen verődik vissza. Ha viszont a fényvisszaverődés egy kellően sima felületről történik, akkor a visszaverődés szabályos tükrös és a fény egy irányba verődik vissza.

A mért felületek háromdimenziós érdességét és a jellemző mérőszámokat elsőként Stout és társai definiálták (Stout et al. 1993). Ezek szintén elsősorban homogén felületek jellemzésére alkalmas mérőszámok, de egyidejűleg több paraméter figyelembevételével, bármilyen felület jól leírható. Sajnos a szabványosított profilszűrő eljárások paraméterezése még fémek esetén sem egyezik meg a gyakorlati elvárásokkal (De Chiffre et al. 2000), ezért egyes esetekben még fém felületek jellemzésére is együttesen alkalmaznak két és három dimenziós felületi érdességi jellemzőket (Grzesik et al. 2005; Christy et al. 2005).

Régóta ismert, hogy az érdességmérés mind 2, mind 3D-ben relatív magas szórással társul, különösen faanyag esetén. Ennek fő oka természetesen a felületen elhelyezkedő edények véletlenszerű elhelyezkedése.

3.1 A felületi érdesség mérési eljárásai

A megmunkált fafelületek érdességének meghatározása a végtermék jó minőségének biztosítása érdekében elengedhetetlenül fontos. A fémiparban már régóta használatosak különböző elven működő érdességmérő berendezések. A faipar jobb híján átvette ezeket a mérési módszereket és fafelületek minősítésére használja, annak ellenére, hogy ezeket elsősorban fém illetve egyéb homogén szerkezetű anyagok (üveg, műanyag, kerámia) mérésére fejlesztették ki. A fa ezekkel szemben inhomogén szerkezetű ortotróp anyag, melynek következtében az említett mérőműszerek használhatósága, és a kapott mérési eredmények jelentéstartalma felülvizsgálatra szorul. A felületi érdesség minősítése a mért felületi profilból illetve térhálóból nyert szabványos mérőszámokkal történik. Ma már sok ilyen 2 és 3 dimenziós érdességi paraméter létezik a felületek kiértékelésére.

A megmunkált felületek geometriájának meghatározására alkalmas műszereket a mérőberendezés működési elve szerint alapvetően két nagy csoportra lehet osztani: érintéses illetve érintés nélküli. Az érintés nélküli berendezések optikai elven működnek, míg az érintéses műszerek a felületet egy előtoló berendezés által mozgatott tapintócsúccsal tapogatták le. Természetesen e két csoporton belül többféle módszer is létezik, melyeket a következő táblázat foglal össze:

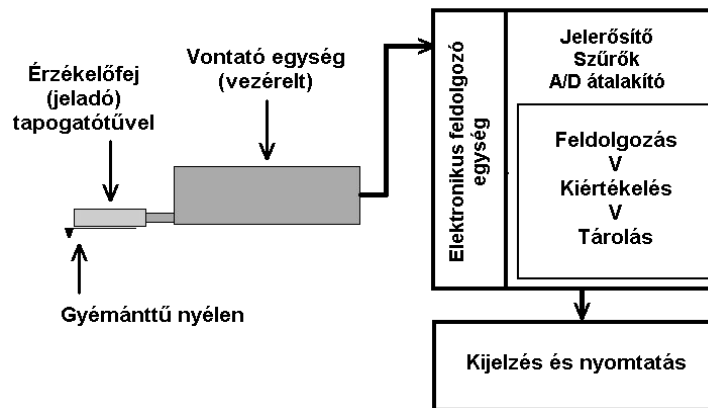
	Tapintófejes technika	Optikai mérések	Egyéb technikák
Számszerűsíthető eredmények	- Mechanikus berendezések - Elektronikus berendezések	- Visszatükröződésen alapuló (Specular reflectance) - Teljes integrált szórás (Total integrated scatter) - Irányeloslzás (Angular distribution) - Direkt Fourier-transzformáció - Ellipszometria	- Mechanikus eljárások (STP, SCPM, SICM, LFM, MFM, stb.) - Elektronikai eljárások (kapacitív alapú berendezések, nagyfrekvenciás váltóáramú berendezések) - Fluid technikák - Akusztikus technikák
Képi megjelenítés	Mért felület képi megjelenítése (felületi háló)	- Optikai metszetek (Optical sections) - Optikai tapintók (Optical probes) - Interferométerek	- Vékony metszetek (Taper Sectioning) - Elektronmikroszkópia (TEM, SEM) - Pásztázó mikroszkópok (STM, AFM, SNAM)

1. táblázat Felületi érdesség mérésének módszerei (Thomas 1998)

A következőkben csak azon érdességmérési eljárásokat ismertetem részletesen, melyek a gyakorlatban a legelterjedtebbek fafelületek jellemzésére.

3.1.1 Tapintótűs berendezések (MSZ EN ISO 3274:1996)

Faanyagok felületének jellemzésére a legáltalánosabban alkalmazott eljárás a mechanikus tűs letapogatás. Ez egy olyan érintéses felületmérő eljárás, melynek során a térbeli felület struktúráját egy vonal mentén, tapintótű segítségével letapogatjuk. A tű függőleges irányú kitéréseit elektromos jellé alakítva egy vonalmenti, kétdimenziós érdesség profilt kapunk, melyből a felületet jellemző paraméterek meghatározhatók. A tapintótűs érdességmérő berendezések elvi felépítését a 16. ábra mutatja. Az eljárás előnye, hogy jól definiált szabványosított, széles körben használt érdességi paramétereket szolgáltat. További előnye, hogy a természetes faanyagok felületi érdességének mérésekor a mechanikus tűs letapogatás pontosabb eredményeket szolgáltat az optikai elven működő berendezéseknél (Westkämper et al. 1995). Különösen nagyedényes fafajoknál okoz problémát, hogy a felületen elhelyezkedő átvágott mély edények falán a kamera elveszti a fókuszpontot („nem lát le az edény aljára”) és amíg az edényfal másik oldalán újra meg nem találja azt, hibás jelet szolgáltat. Ez a probléma tűs letapogatás során nem lép fel, hiszen a tű beleesik a mély üregekbe is, és pontosan letapogatja az edények falát. Az eljárás hátránya viszont, hogy a letapogató tű mindig rendelkezik valamekkora lekerekítési sugárral, amely már a méréskor egy mechanikai szűrést végez a felületen. Minél kisebb a lekerekítési sugár, annál pontosabban tapogathatók le a felület egyenetlenségei (repedések, sejtüregek stb.). Ugyanakkor a tűs letapogatás nem teszi lehetővé a „takart” üregek meghatározását.



16. ábra Tapintótűs érdességmérés elve (MAHR 1998)

További hátrányként jelentkezik, hogy a mechanikus tűs letapogató berendezések egy kétdimenziós profilt vágnak ki a tényleges 3 dimenziós felületből. Ezért inhomogén felületeknél, mint például a természetes faanyagok felülete, a mérési vonal megválasztása jelentősen befolyásolja a kapott eredményeket. Különösen nagyedényes fafajoknál nem mindegy ugyanis, hogy a mérési vonal mennyi és milyen mély edényt tartalmaz. Ugyanazon a fafelületen, egymással párhuzamos vonalak mentén mérve az érdességet a kapott érdességi paraméterek, a mérés helyétől függően eltérő mértékben változnak. Egyes paraméterek értékét kevésbé (P_a), míg másokét jelentősen (P_t , P_z , P_{max}) befolyásolja a mérés pontos helye (Molnár 2011). A paraméterek értékeinek változása természetesen fafajonként is eltérő, hiszen a homogénebb fenyő felületekről származó

eredmények alacsonyabb, míg a nagyedényes lombos fafajok felületéről kapott eredmények magasabb szórásértékkel rendelkeznek. Egyes érdességi paraméterek értékeiben még homogénebb, teljesen általános felületekről származó eredmények esetén is előfordulhat több, mint 50%-os eltérés az ugyanarról a felületről származó mérések között, sőt etalon felületeknél is adódhat akár 15%-os eltérés is (Thomas és Charlton 1981). A probléma kiküszöbölésére különböző elv szerint működő szűrőket dolgoztak ki (MSZ EN ISO 13565-1:1998, Csiha 2003), melyekkel a mért profilból kiszűrhető a faanyag anatómiai felépítéséből adódó érdessége, így következtetve a megmunkálás minőségére (Schadoffsky 1996). Természetesen ezek a matematikailag definiált szűrők mindig valamekkora hibával dolgoznak, hiszen egy a felületi profilon látható mélyedést okozhat egy kisebb edény, ugyanakkor okozhat valamilyen felületi repedés is.

Ezen hátrányok ellenére is fafelületek minősítésére a legszélesebb körben használt berendezések a tapintótűs érdességmérők, hiszen az általuk szolgáltatott 2 dimenziós paraméterek a kutatók által is elfogadottak és jelentésük pontosan ismert.

3.1.2 Optikai berendezések

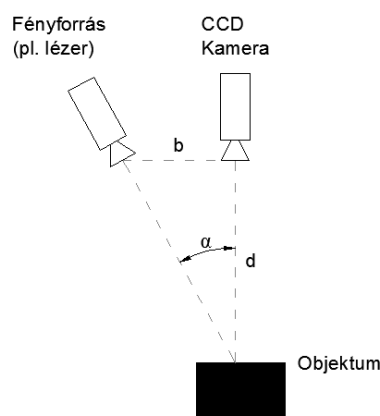
Az első optikai úton működő érdességmérő berendezések szintén kétdimenziós profilt vágta ki a felületből, de anélkül, hogy mechanikai kapcsolat jött volna létre mérendő felület és a mérőfej között. Az optikai vagy más néven lézeres letapogató berendezések működési elve hasonló, hiszen minden esetben a mérendő felületre egy lézercsík vetítenek, amely a felület struktúrájától függően torzul. Az egyes berendezések vagy a kamera és a lézercsík pontjainak távolságából vagy a visszavert sugár pontjainak intenzitásából veszik fel a felületi profilt. Ezen berendezések szintén csak 2 dimenziós érdességi paramétereket szolgáltatnak. A fafelületek inhomogenitása viszont megköveteli egy nagyobb felület értékelését a minőségét illetően. Fa és faalapú anyagok esetén a kétdimenziós profilok egymás mellé sorolásával generálhatók ugyan háromdimenziós felületek, de az így kapott felületek érzékenyek a mérési irányra, illetve a mérési felületre (Pierre Larricq et al. 2000), ezenkívül az eljárás roppant időigényes.

Az első 3D-s topográfiaikat Greenwood és Williamson az 1960-as években rögzítették egy "mikro kartográf" berendezéssel (Dowson 1979). Mára a digitális technika adta lehetőségeknek köszönhetően többféle elvet használó optikai mérőrendszer létezik, melyek általában gyors és megbízható mérést tesznek lehetővé. Fontos azonban megjegyezni, hogy az optikai 3 dimenziós mérőeljárások természetes faanyag esetén gyakran vezetnek hibás mérési adatokra, mivel az éles színeltéréseket gyakran méreteltérésnek regisztrálják, valamint a reflexió is gyakran okoz mérési hibát, ezért faanyagnál történő alkalmazásuk esetén nagyon körültekintően kell eljárni. Ezt a saját mérési eredményeimből képzett grafikon is alátámasztja (91. ábra), melyen ugyanazon mérési felületről származó 2 és 3 dimenziós érdességi paraméterek értékei közti különbségek figyelhetők meg gyalult és csiszolt felületeken. A probléma pontos okainak feltérképezése és kifejtése a 6.4 fejezetben található.

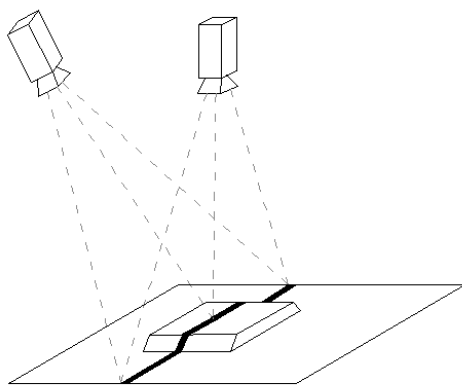
3.1.2.1 Kódolt fény eljárás

Az eljárás alapja, az úgynevezett trianguláció, vagy más néven a háromszögelés elv, melynek két fajtája az aktív és a passzív trianguláció. A passzív mérési módszernél a vizsgált felületek nem igényelnek különösebb megvilágítást. Ebben az esetben a felületet megvilágító (természetes vagy mesterséges) fények visszaverődéséből jön létre a digitális

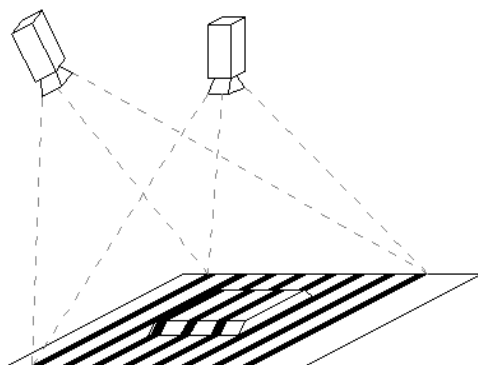
kép. Hasonlóképpen működik, mint az emberi szem. A rendszer két kamerából épül fel, melyek különböző nézőpontokból készítenek felvételt a vizsgált felületről. Ezt követően a keletkezett képek összevonásából kapjuk a 3 dimenziós képet. A módszer fő hátránya az árnyékolóhatás („Abschattungseffekt”), ami abból adódik, hogy a felület egy adott pontja az egyik perspektívából látható, a másiktól viszont nem. További problémát okoz a két kamera által készített képek összetartozó pontjainak egymáshoz rendelése. Így kapunk ugyanis mélységinformációt a felület pontjairól. A pontok azonosítására azt a törvényszerűséget használják, mely szerint egy adott pont különböző nézőpontokból nézve ugyanolyan, a visszaverődésből származó fényintenzitással rendelkezik. Ilyen elven működnek a sztereo képfeldolgozó rendszerek. A módszerrel általában nagyobb felületekről nyerhetők adatok, legfeljebb milliméteres pontossággal. Kisebb felületek nagyobb pontossággal való feltérképezése az aktív elven működő berendezésekkel lehetséges.



Projektor CCD Kamera



Projektor CCD Kamera



Az aktív mérési módszer abban különbözik a passzívtól, hogy itt a vizsgált felületet egy jól meghatározott mesterséges jellel tapogattjuk le, melynek optikai és geometriai tulajdonságai ismertek. Ezek a módszerek általában megbízhatóbb távolságadatokat szolgáltatnak, mint a passzív technikák. A módszer lényege, a mérendő felületre egy irányított fényforrás segítségével egy pontot vetítünk. Ezt a pontot egy a mérendő felületre merőlegesen elhelyezett CCD kamera érzékeli. A technikát azért nevezzük háromszögelésnek, mert a fényforrás, a kamera és a pont egy háromszöget alkot (17. ábra). A kamera és a fényforrás tengelye egy rögzített α szöget zár be, míg egymástól való távolságuk szintén állandó (b). A rendszer felépítésének köszönhetően a felületre vetített pont és a kamera képsíkjának távolsága számolható.

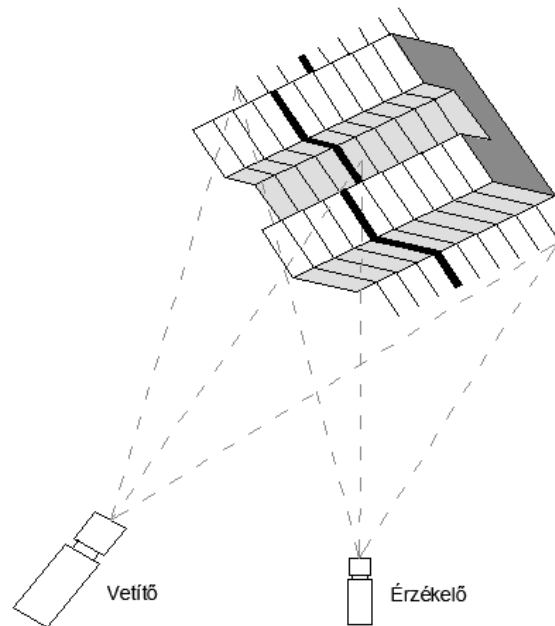
$$\operatorname{tg} \alpha = d / b \rightarrow d = b \times \operatorname{tg} \alpha$$

Ez a módszer több millió mérési pont esetén roppant időigényes, ezért a mérések felgyorsítása érdekében a mérendő felületre egy pont helyett, egy vonalat vetítve a kamera felbontásától függően egy időpillanatban a felületen végigfutó vonal összes pontjának távolsága meghatározható. Eredményként szintén egy kétdimenziós profilt kapunk, ugyanúgy, mint a tapintótűs eljárásnál. A felületre vetített vonalak egymás mellé sorolásával képezhető ugyan felület, de egy nagyobb méretű felület esetén ez még mindig sok emberi energiát és időt igénylő módszer.

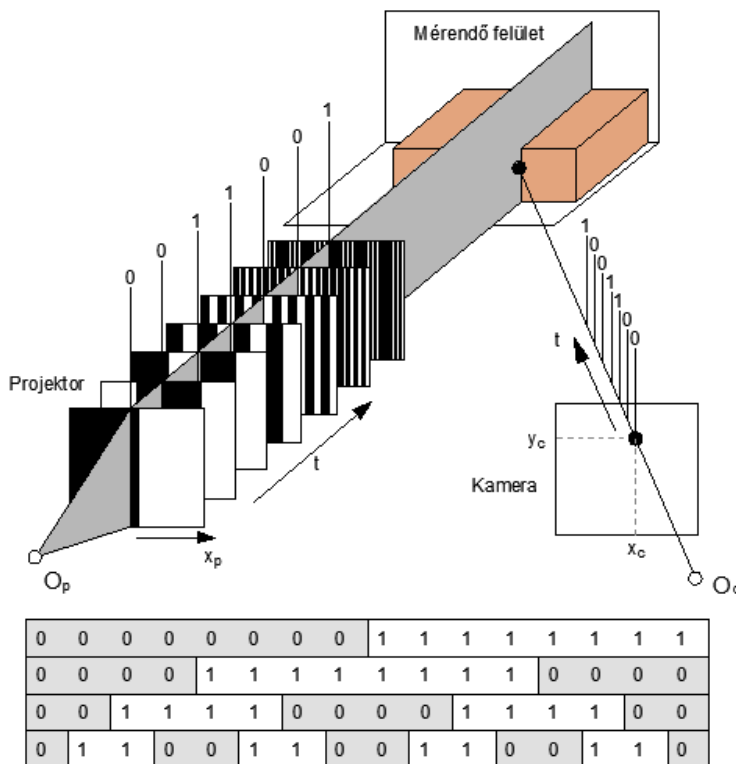
17. ábra Az aktív triangulációs mérési eljárás (Frankowski 1999)

Ha azonban a vizsgált felületre egy időben vetítünk több, egymással párhuzamos csíkot, akkor egy lépésben az egész térrészről nyerhetünk információt. A kapott adatok kiértékelésénél azonban problémák léphetnek föl. Mivel a felületre vetített csíkok bizonyos szögben érkeznek a felületre, a fényforráshoz közelebb eső felületrészek kitakarhatják a valós felület egy részét, mint ahogy az a 18. ábrán látható. A csíkok ezáltal megszakadnak, majd bizonyos eltolással, a már látható felületrészen újra megjelennek. Az eltolódás ismeretének hiányában a csíkok összekeveredhetnek, mivel a rendszer nem tudja végigkövetni és azonosítani azokat.

18. ábra A lézeres távolságmérés problémája (Lassó 2000)



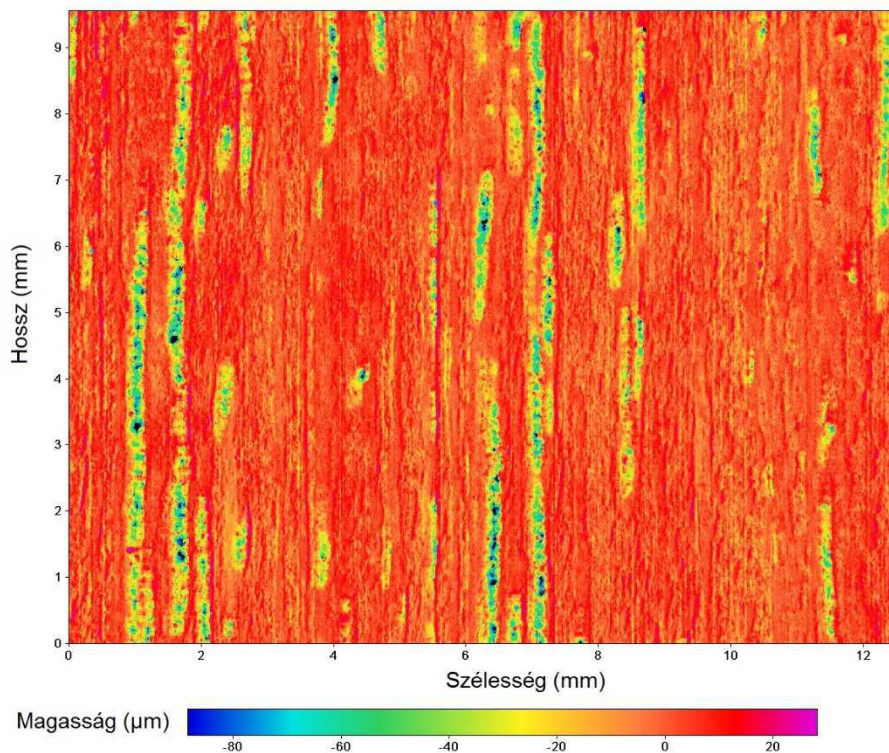
A probléma a felületre vetített csíkok kódolásával küszöbölhető ki, amiről az eljárás a kódolt fény nevet kapta. Ezzel a módszerrel a mérés során tulajdonképpen nem egyeneseket vetítünk a felületre, hanem fekete fehér sávokat. A sötét sávokat 0, a világosakat 1-es kóddal látjuk el. Ahogy a 19. ábrán látható, első lépésben a vizsgált felületet két (sötét, világos), a második lépésben három (világos, sötét, világos), majd négy (és így tovább) részre osztva világítjuk meg. Az egyes sávokon belüli pontok azonban nem lokalizálhatók, így csak ott kapunk információt a felületről ahol átmenet van a két sáv között. Ez az első esetben a felület közepén csak egyetlen, a második esetben két stb. mérési vonalat jelent.



19. ábra Kódolt fény (Gühning 2002), (Kovács 2011)

Elegendő számú vonalmenti méréshez a mérési felületre egymás után több változó szélességű fekete fehér sávot kell vetíteni. Ennek köszönhetően a sávok közti átmenetek

száma jelentősen megnő, ami mérési vonalak számának a növekedését jelenti. A módszerrel minden mérési vonal egyértelműen beazonosítható, az adott vonalon belüli pontok távolsága pedig a kamera síkjától már meghatározható. Az így kapott pontfelhőt ábrázolva kapjuk a felület 3 dimenziós magasságkülönbség képét, mely a 20. ábrán látható. A kapott adatfelhő minden pontja három (x, y, z) koordinátával adható meg. Egy mérés során akár több millió pont is digitalizálásra kerülhet, ez a kamera felbontásától függ. Az adathalmazból pedig már matematikai módszerek alkalmazásával tudjuk számolni a felületek 3 dimenziós érdességi paraméter értékeit.



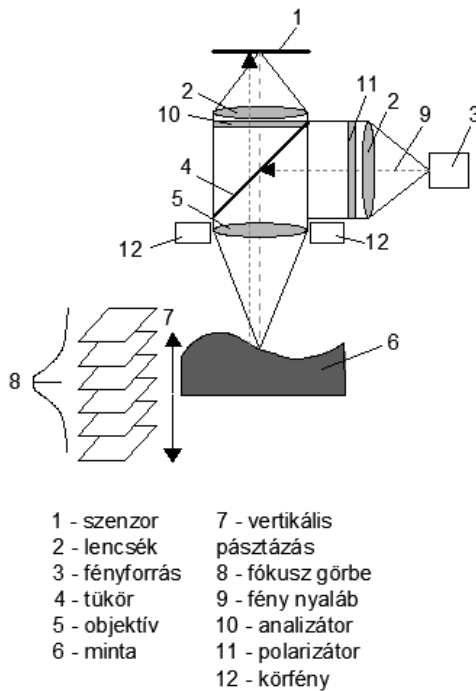
20. ábra Gyalult akác felület magasságkülönbség képe (Saját felvétel)

A mérési módszerrel csak viszonylag kis, pár centiméteres felületek vizsgálhatók, viszont akár mikrométeres pontossággal. A rendszerek egyik legnagyobb hátránya a kis mérési tartomány. Míg a tapintótűs berendezések +2,5 mm és -2,5 mm mérési tartománnyal rendelkeznek, ezen rendszerek csak maximum +1,5 mm és -1,5 mm tartományban képesek pontosan dolgozni. A mérési tartományon kívül eső pontokról nem kapható információ, mivel a rendszer elveszti a fókuszpontot, azaz a kamera képe nem éles. A probléma az úgynevezett fókusz variáció elvén működő berendezésekkel orvosolható.

3.1.2.2 Fókuszvariáció

A rendszer fő összetevője jelen esetben is egy precíziós kamera, amely a mérni kívánt felület méretétől függően különböző nagyítású lencsékkel szerelhető fel. Ahogy a 21. ábrán látható, a féhéfény forrásból kilépő fénysugarakat egy tükör a mérendő felületre irányítja, amelyek a minta felületére fókuszálódnak. A megvilágítás tehát nem egy meghatározott szögben, hanem a felületre merőlegesen érkező fénnel történik. Ha

ugyanis a felület megvilágítása egy adott szögben történik, lásd kódolt fény eljárás, akkor előfordulhat, hogy egy, a felületen elhelyezkedő csúcs kitakarja a mögötte elhelyezkedő területet, azaz árnyékot vet. Erre a területre nem jutnak el a fénysugarak, így a mérés során a felület ezen részéről nem kapunk információt.



Ha viszont a megvilágítás merőleges a felületre ez nem fordulhat elő, és a felület pontosabban feltérképezhető. A visszaverődő sugarakat egy lencse összegyűjti és egy fényérzékeny szenzorba irányítja. A visszavert fény intenzitásából meghatározható a felület pontjainak a távolsága. A rendszer kis mélységélessége miatt azonban, a minta csak azon részei képezhetők le, ahol a kamera képe az adott síkban éles. A felület teljes leképezése több lépésben, a kamera függőleges irányú mozgatásával érhető el, miközben rétegenként folyamatosan történik az adatok rögzítése. Minden síkban csak ott kapunk információt a felületről ahol a fókusztávolság éles.

21. ábra A fókusztávolsági mérőmikroszkóp elvi vázlatja (Danzl et al. 2011)

Az egyes rétegekből nyert adatokat szoftveresen összeillesztve a felülete teljes 3 dimenziós képe adódik. A rendszer a mérés során azonban nemcsak a felület topográfiáját képes rögzíteni, hanem a felület minden pontjához eredeti színadatokat is társít. Így egy olyan színes képet is nyerhetünk, amely megkönnyíti a felület jellegzetes vonásainak azonosítását, vagy esetleges változását.

A legújabb berendezések már úgynevezett kör vagy gyűrű fényt használnak a felület megvilágítására. Ez a fényforrás a kamera objektívjét körülvevő, a kilépő fénysugarakat közvetlenül a felületre irányítja. A megoldás előnye, hogy a gyűrűben elhelyezett fényforrás szegmentálható és az egyes szegmensek egymástól teljesen függetlenül szabályozhatók. Ennek akkor van jelentősége, mikor például a mérendő felületen egy sötétebb folt (göcs) található. A felület pontos feltérképezése érdekében ez a terület nagyobb megvilágítást igényel. Ebben az esetben, az ezt a területet megvilágító szegmens fényerősségét magasabb értékre állítva, több fény juttatható az adott területre. Ha viszont a felület egy része erősen reflektál, tükröződik, az adott szegmens fényerősségét csökkentve, a reflexióból adódó mérési pontatlanság csökkenthető.

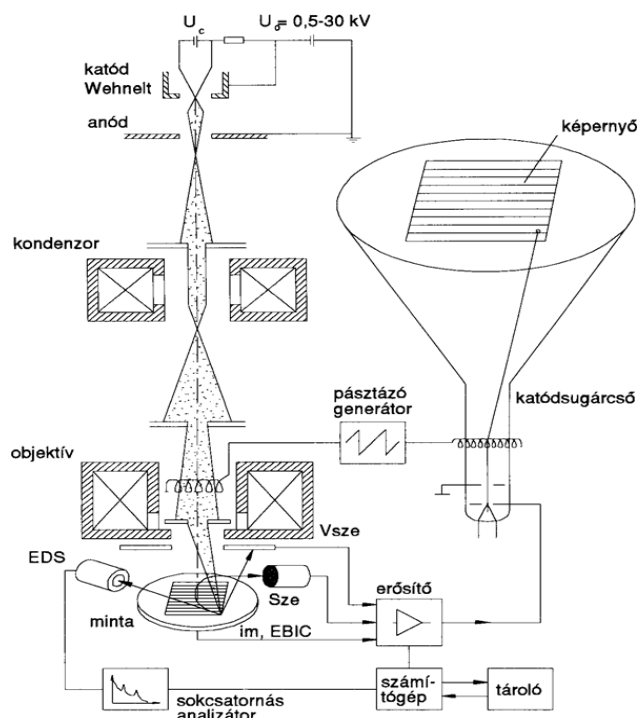
A fókusztávolsági elvű működő berendezések akár 10 nanométeres függőleges felbontásra is képesek, melyhez akár 500 nanométeres vízszintes felbontás is társulhat. A függőleges mérési tartomány egészen 22 milliméterig kiterjeszthető, míg vízszintes irányban több mérési felület egymás mellé sorolásával 10000 mm²-es felület is képezhető. Az egy mérés során maximálisan feldolgozható adatok száma kb. 100 millió pont. A mérések ideje természetesen a felbontástól és a mérési tartománytól függően változik, de másodpercenként akár 200.000 pont mérése is lehetséges.

3.1.3 Egyéb berendezések

Az előzőekben bemutatott mérési eljárásokkal tehát nagy pontossággal meghatározható a felületek topográfiája. A mért adatok kiértékelése azonban a felület valós képének összevetésével végezhető el maradéktalanul. A felületek képi megjelenítésére alkalmazhatók fénymikroszkópok, azonban a készített képek minősége és felbontása gyakran nem elégséges a kiértékeléshez. További problémaként jelentkezik, hogy a felületek megvilágításához szüksége fényforrás számtalanszor csillogást idéz elő a felület egyes részein. Ezekre a problémákra az elektronmikroszkópok nyújtanak megoldást, hiszen ezek a berendezések nem rendelkeznek belső fényforrással illetve rendkívül magas felbontás mellett is tökéletesen éles képek készítésére alkalmasak.

3.1.3.1 Pásztázó elektronmikroszkóp (REM)

Az elektronmikroszkópok a vizsgált felület megvilágítására fény helyett, elektronnyalábot használnak. A pásztázó elektronmikroszkópban az elektronforrás vagy elektronágyú (benn többnyire izzó katód) állítja elő a vizsgálatához szükséges elektronokat, amelyeket nagyfeszültség gyorsít a vizsgálandó minta felé, és egy elektromágnesekből álló lencserendszer (kondenzor és objektív) fókuszál tűhegyű nyalábbá. A pásztázó elektronmikroszkópok elvi felépítése a 22. ábrán figyelhető meg.



22. ábra Pásztázó elektronmikroszkóp felépítése (Pozsgai 1995)

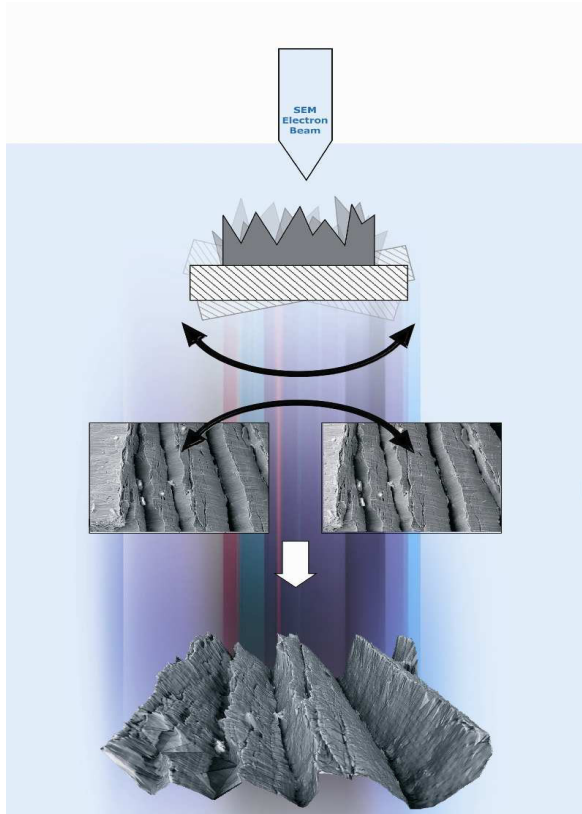
Az elektronok a minta anyagával kölcsönhatásba lépve számos olyan jelet (szekunder elektronokat, visszaszórt elektronokat, röntgensugárzást, fényt stb.) hoznak létre, amelyek visszatükrözik a vizsgálandó minta valamilyen tulajdonságát az adott pontban. Ezen jelek detektálására különféle detektorokat alkalmaznak. A nyalábot a minta felületén pásztázva, a televíziós készülékben szokásos módon, a minta felületi tulajdonságai pontról pontra feltérképezhetők. Egy-egy detektorból vett jel megjelenítésére televíziós képernyő használható, amelyben az elektronnyaláb szinkronban mozog a pásztázó elektronmikroszkóp elektronnyalábjával. Kicsit leegyszerűsítve, a mintáról pontról pontra vett információt ugyanabban a sorrendben jelenítjük meg egy TV-képernyőn és így áll elő a kép.

Az elektronsugárzás hullámhossza lényegesen kisebb a fénysugár hullámhosszánál, ami sokkal erősebb nagyítást tesz lehetővé. A fénymikroszkópokhoz képest az

elektronmikroszkópokkal több, mint ezerszer nagyobb felbontás (0,1 és 0,2 nm) érhető el. Ehhez az óriási felbontáshoz pedig nagy mélységélesség is társul, így a kapott képen a felület legapróbb részletei is jól kivehetők, élesek.

Az elektronmikroszkóppal készített képek viszont nem számszerűsíthetők, így az eszközt „csupán csak” a vizsgált felület megtekintésére használható, ami persze sok esetben rengeteg információt nyújt a felületről, és igen gyakran magyarázattal szolgál az egyébként nem érzékelhető mikrotopográfiai tényekre, jelenségekre.

Mára a sztereo képalkotás elvét felhasználva már léteznek olyan szoftverek, melyek képesek az elektronmikroszkópok által készített képekből 3 dimenziós felületet létrehozni (23. ábra). A mérés során a minta felületéről legalább két, különböző szemszögből nyert



felvétel készül, mely a felület központos megbillentésével érhető el. A két képből, algoritmusok segítségével az összetartozó képpontokat egymáshoz rendelve, a program kiszámolja az x, y, z koordinátákat, és létrehozza a felület 3 dimenziós képét. Egy harmadik szemszögből készített felvétellel az adatok tovább pontosíthatók. Így bármekkora nagyítás esetén, egy nagy felbontású, sűrű és pontos értékeket tartalmazó pontfelhőt kapunk. A szoftver képes az elkészült 3 dimenziós képet megjeleníteni, amely minden szemszögből megtekinthető, forgatható illetve lehetőség van 2 és 3 dimenziós érdességi paraméterek számoltatására is. Hátrányként a mért felület nagysága jelentkezik, hiszen a nagy felbontás és nagyítás miatt, a vizsgált felület nagysága lényegesen lecsökken.

23. ábra A sztereo képalkotás elve (<http://www.alicon.at/home/produkte/mex/technologie.html>)

3.1.4 Összegzés

Összességében megállapítható, hogy a bemutatott mérőeszközök mérési elvüket, mérési tartományukat, mérési pontosságukat és a mérés idejét tekintve is jelentősen eltérnek egymástól. A vizuális és tapintós értékelés azon túlmenően, hogy túlságosan idő és költségigényes, meglehetősen szubjektív is, hiszen rengeteg múlik az értékelő személy ítélőképességén illetve aktuális állapotán. A kapott eredmények ennek megfelelően nagy szórással rendelkezhetnek. Egy jólképzett személyzet eredményei azonban nagy pontossággal meg tudnak egyezni a műszeres mérések eredményeivel. Az érzékszervi értékeléssel szemben minden más módszer számszerűsített eredményeket szolgáltat a vizsgált felületről. Ezek vagy egy érdesség profilból vagy egy felület magasságkülönbség képéből származtatott 2 illetve 3D-s érdességi paraméterek. A 2D-s paraméterek jelentéstartalma jól ismert és habár a paramétereket homogén felületek jellemzésére alkották meg, ma már a faiparban is elegendő mennyiségű mérései eredménnyel

rendelkezőnk az értékek reális megítéléséhez. A 3D-s paraméterek jelentésértalma különösen a faipar területén ma még nem teljesen tisztázott, így azokat mindig megfelelő körültekintés mellett kell értékelni.

Az egyes mérőberendezéseket illetően elmondható, hogy mindegyikhez köthetők egyaránt pozitív és negatív tulajdonságok. Az optikai mérőberendezésekkel nyert adatok jóval több információt hordoznak a felület minőségéről és a mérések ideje is jóval rövidebb, de alkalmazásukkal sokkal körültekintőbben kell eljárni, hiszen fa és faalapú anyagok esetében figyelembe kell venni a felület fény reflektáló képességét, illetve a változó színösszetételű felület mérése is speciális beállításokat igényel. A klasszikus tapintótűs berendezések pontosabb és megbízhatóbb mérést tesznek lehetővé, bár ehhez jóval több idő szükséges. A legélesebb és minden részletet feltáró képi felvételeket a pásztázó elektromikroszkópok szolgáltatják, amelyek bizonyos törvényszerűségek felismeréséhez elengedhetetlen információkat nyújtanak.

Az előbbiek figyelembevételével a jelenlegi mérés technikai lehetőségek közül mindig az aktuális feladatnak megfelelően érdemes megválasztani a mérőeszközt. Amennyiben a felületről gyors magas felbontású mérésekre van szükség, úgy javasolt az optikai berendezéseket előnyben részesíteni. Amennyiben viszont pontos és jól jellemezhető eredmények szükségesek, akkor a jól bevált mechanikus tapintótűs berendezéseket alkalmazása javasol. Ha a felületről nincs szükség számszerűsített eredményekre, akkor a felület jóságának megítélésére adott esetben az egyszerűbb fénymikroszkópok, magas felbontás esetén az elektronmikroszkópok is megfelelő mennyiségű információt nyújtanak.

3.2 A háromdimenziós felületi paraméterek

Az egyes optikai érdességmérő berendezések által mért adathalmazból matematikai úton különböző érdességi paraméterek származtathatók. A háromdimenziós ún. mikrotopográfiai érdességi paraméterek többségének van kétdimenziós ún. mikrogeometriai megfelelője. A 2D-ben megszokott elnevezési szabályokkal ellentétben a 3D-s paraméterek jelölése nem nyújt információt a felület jellegét illetően. Míg 2D-ben a szüretlen profilt P -vel (P_a), az érdességprofil R -rel (R_a), a hullámosságprofil W -vel (W_a) jelöljük (MSZ EN ISO 4287:1998), addig 3D-ben csak S_a jelölés létezik (DIN EN ISO 25178-2:2012). A jelölésből tehát semmilyen következtetést nem lehet levonni a paraméter számítása előtt alkalmazott szűrésekről. Már 2D-ben is széles paraméterkészlet áll rendelkezésre a felületi textúra jellemzésre, az ipari gyakorlat mégis csak 2-3 mérőszámot alkalmaz. A 3D-s paraméterek közül egyesek a mért felület függőleges irányú, mások a vízszintes irányú jellemzését teszik lehetővé. Léteznek ezenkívül ún. hibrid paraméterek, melyek a mikrotopográfia alakjának leírására alkalmasak, valamint ún. funkcionális paraméterek, melyek az anyagtartalom görbéből származtathatók. A felületet leíró paraméterek száma jelentősen magasabb, mint 2D-ben, ezért lehetőség van olyan tulajdonságok kimutatására is, melyekre egy 2D-s érdességprofilból nem lehetett következtetni (Verma et al. 2005, Czifra et al. 2007).

A 3D-s érdességi paramétereket a 2D-s paraméterekhez hasonlóan a fémiparban felmerülő igényeknek megfelelően alakították ki. A fémiparban és a faiparban az érdességi paraméterekkel szemben támasztott követelmények azonban gyakran eltérőek. Míg a fémiparban a kenési, csúszási, kopási stb. tulajdonságok jellemzése a legfontosabb szempont, addig a faiparban általában az optikai, esztétikai tulajdonságok jellemzése szükséges. A rendelkezésre álló paraméterek közül ezért nagy figyelmet kell fordítani a

megfelelő érdességi paraméterek kiválasztására, attól függően, hogy pontosan milyen szempontból szeretnénk értékelni a fafelületeket. Az egyes szabványosított érdességi paraméterek még a homogénebb fém felületek esetén sem adnak komplex információt a felületről, csak jellemzést adnak az adott mikrogeometria egyes tulajdonságáról (De Chiffre et al. 2000). A paraméterek elsősorban homogén felületek jellemzésére alkalmas mérőszámok, de egyidejűleg több paraméter figyelembevételével, bármilyen felület jól leírható. Ez a probléma faanyagok felületének a jellemzésénél fokozottan jelentkezik. A faanyagok felületének jellemzésére alkalmas mérőszámok meghatározása már régóta a kutatások homlokterében áll, de a faanyagok felületének inhomogenitása miatt, kimondottan a fafelületek jellemzésre olyan szabványos mérőszámokat melyek a gyakorlatban is jól használhatók, még nem sikerült meghatározni. Ugyanakkor a tudományos szakirodalomban már találhatóak ilyen paraméterek (Magoss 2008).

Ebben a fejezetben a kevésbé közismert 3D-s érdességi paraméterek jelentését mutatom be részletesen. A 2D-s paraméterek értelmezését az 1. melléklet tartalmazza, mivel ezen paraméterek sokkal közismertebbek és már rengeteg helyen publikáltak.

3.2.1 Magasság paraméterek/Amplitúdó paraméterek

Az amplitúdó paraméterek a mért felületek függőleges irányú jellemzését teszik lehetővé.

S_a Átlagos egyenetlenség (DIN EN ISO 25178-2:2012)

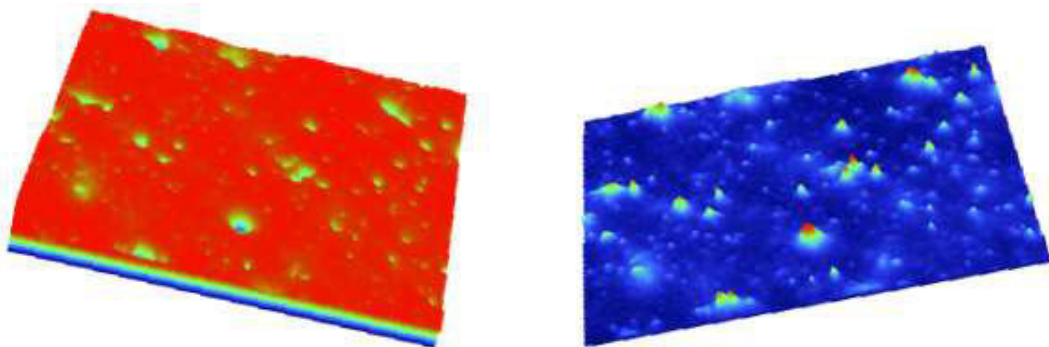
$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy$$

ahol:

A: mérési tartomány (felület)

z: ordináta érték

A felület pontjainak a középstól mért átlagos távolságát adja meg. Jól használható a felület jelentős eltéréseinek jellemzésére. Érzéketlen viszont arra, hogy a felületet csúcsok vagy völgyek tarkítják. Ezért fordulhat elő, hogy két egymástól teljesen különböző felület ugyanolyan S_a értékkel rendelkezik, ha két felület egymás „ellentettje” (24. ábra).



24. ábra Ugyanazon S_a paraméterekkel rendelkező felületek
(http://www.michmet.com/3d_s_height_parameters.htm)

S_q Az eltérések mértani átlaga RMS (DIN EN ISO 25178-2:2012)

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |z^2(x, y)| dx dy}$$

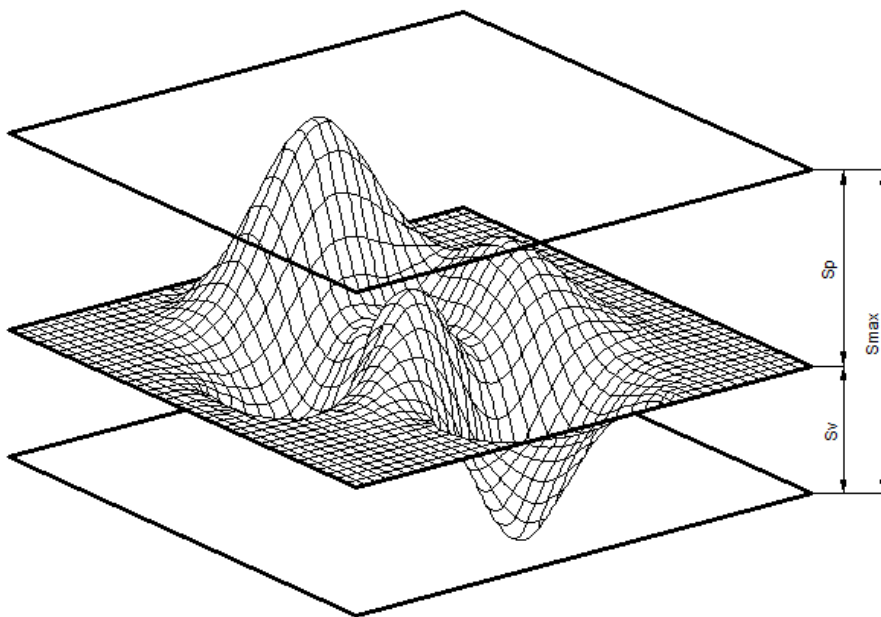
A középsíktól való eltérések mértani közepe. Nagyon általános és széles körben használt paraméter. A négyzetre emelésnek köszönhetően igen érzékenyen reagál a felület szélső értékeire. A statisztikában ezt az értéket a minta szórásának nevezzük.

S_p Maximális csúcsmagasság (DIN EN ISO 25178-2:2012)

A legmagasabb csúcs távolsága a középsíktól. Jól használható sűrűlódó felületeken történő változások jellemzésére.

S_v Maximális völgymélység (DIN EN ISO 25178-2:2012)

A legmélyebb völgy távolsága a középsíktól. Gyakran használják fémfelületek korrózióval szembeni ellenállásának a jellemzésére. Mivel mindkét paraméter (S_p , S_v) értéke egyetlen ponttól függ, ezért a hibás jelek kiszűrése ezen két paraméternél különösen fontos. Pontos eredmény a megfelelően beállított szűrési eljárással érhető el.



25. ábra S_p , S_v , S_{max} érdességi paraméterek (Saját ábra)

S_{max} Maximális magasság (GFMesstechnik 2008)

$$S_{max} = S_p + S_v$$

A paraméter a DIN EN ISO 25178-2:2012 szabványban nincs definiálva. A szabvány a legmagasabb csúcs és a legmélyebb völgy merőleges távolságát S_z -nek nevezi. Az általam használt (később bemutatásra kerülő) ODSCAD 6.0 kiértékelő szoftver azonban

különbséget tesz a két paraméter közt. Eszerint S_{max} a legmagasabb csúcs és a legmélyebb völgy merőleges távolsága, S_z pedig az úgynevezett 10 pont magasság.

S_z 10 pont magasság (GFMesstechnik 2008)

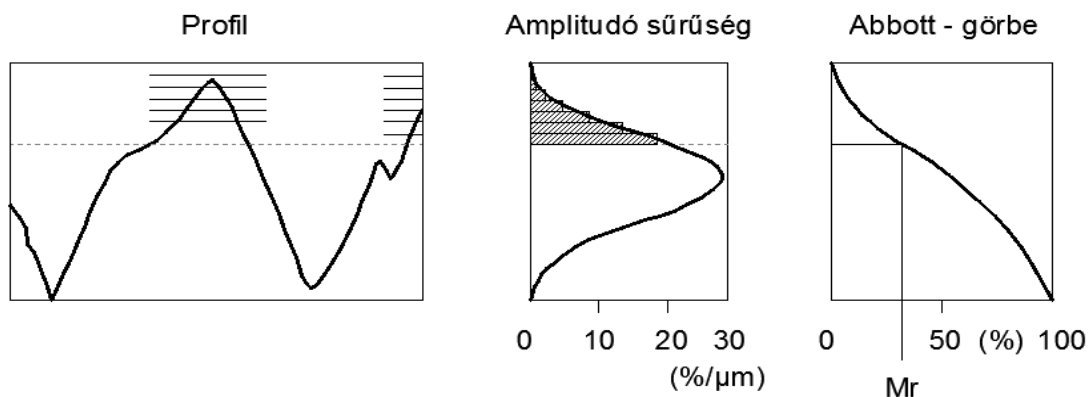
$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |R_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |R_{vi}|}{5}$$

Az 5 legmagasabb csúcs és az 5 legmélyebb völgy, középsíktól mért merőleges távolságának a számtani közepe. Ennek köszönhetően általában extrém értékekből számolódik, emiatt nehezen összehasonlítható a 2D-s megfelelőjének számító R_z paraméterrel. Értéke érzékeny a topográfia jelentős tulajdonságainak változására. A mintavételi terület megválasztása a paraméter értékét jelentősebben befolyásolja, mint például az S_q paramétert. Definíciójából adódóan értéke gyakran hibás adatokból származik, ezért a következtetések levonása csak megfelelő körültekintés mellett lehetséges.

S_{sk} Ferdeség (Sander 1993; DIN EN ISO 25178-2:2012)

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left(\frac{1}{A} \iint_A z^3(x; y) dx dy \right)$$

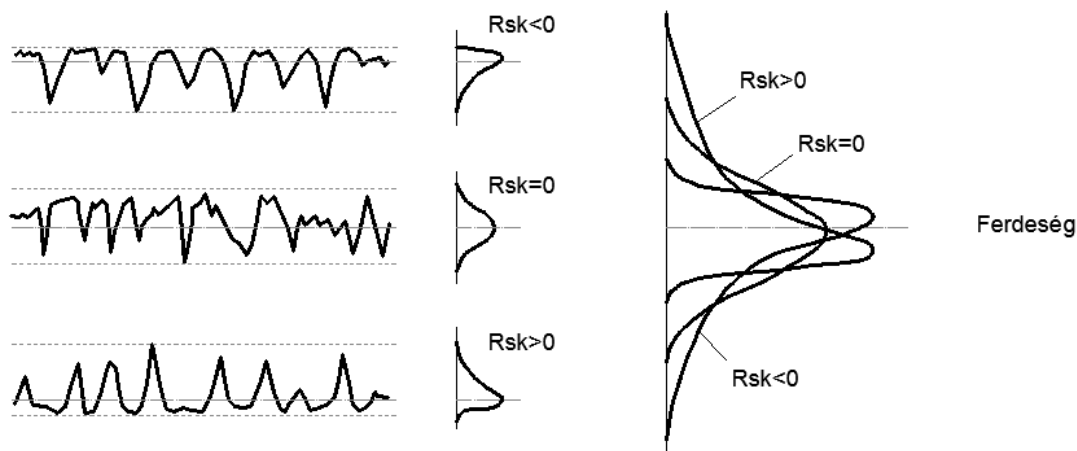
A felület amplitúdó sűrűségfüggvényének (az érdességprofil eloszlásának) a középsíkhöz viszonyított aszimmetriáját (ferdeségét) jelenti. Az amplitúdó sűrűség görbe (ADK) az egyes profilmagasságok eloszlását mutatja (26. ábra), azaz azt, hogy az egyes magasságok milyen gyakorisággal fordulnak elő (Steinhilper et al. 2012). Gaussi felületeknél, ahol az amplitúdó sűrűségfüggvény szimmetrikus, a ferdeség nulla.



26. ábra Az amplitúdó sűrűségfüggvény és az anyagtartalom görbe (Bodschwinna et al. 2013)

A paraméter jelentésének könnyebb értelmezhezősége miatt a 27. ábra az S_{sk} 3D-s érdességi paramétert annak 2D-s megfelelőjén (R_{sk}) keresztül mutatja be. Az S_{sk} tehát csak annyiban tér el az ábrán szereplő R_{sk} paramétertől, hogy nem egy felületi profil ferdeségét, hanem egy felület ferdeségét jellemzi. Ha negatív a paraméter értéke, akkor a sűrűségfüggvény-görbe csúcspontja a középsík felett helyezkedik el (27. ábra). Ez olyan felületeknél fordulhat elő, ahol a profilvölgy mélységek hangsúlyosak, mint például egy tükrösített felület esetén. Ha pozitív a paraméter értéke, akkor a sűrűségfüggvény-görbe csúcspontja a középsík alatt helyezkedik el. Ez leginkább gyalult, mart felületeknél

fordulhat elő, ahol a profilvölgy mélységek nem jelentősek, a felületen kialakuló profilcsúcsok száma azonban magas. Az ADK görbe formájából tehát a gyártási folyamat határozható meg.

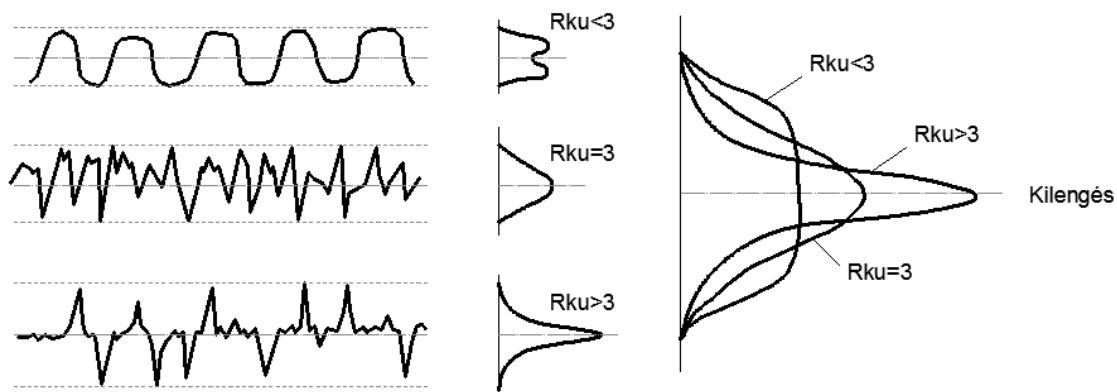


27. ábra Az amplitúdó sűrűségfüggvény alakjának jellemzése ferdeség szempontjából (Bodschwinna et al. 2013)

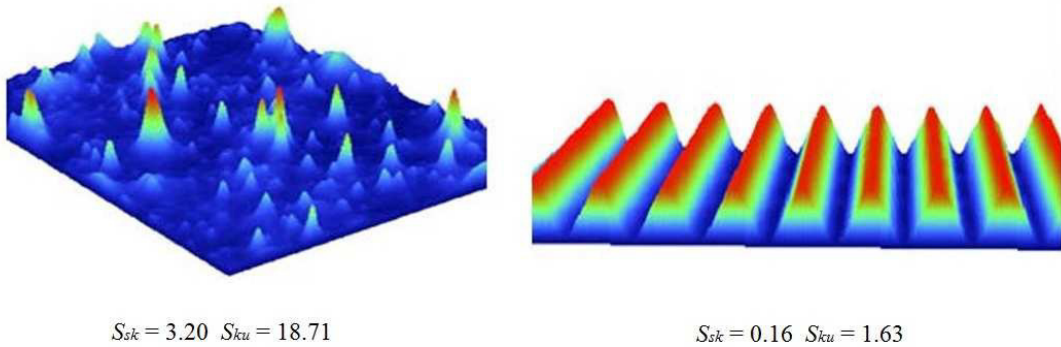
S_{ku} Kilengés (Stout et al. 1993; DIN EN ISO 25178-2:2012)

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left(\frac{1}{A} \iint_A z^4(x; y) dx dy \right)$$

A felület amplitúdó sűrűségfüggvényének a meredekségét jelenti, amit a profil csúcsok és völgyek alakja és száma határoz meg. A felületek egyenletességére utal. Normális eloszlás esetén a paraméter értéke 3. Ha magasabb az értéke, akkor a sűrűségfüggvény meredekebb, a profilértékek a közép vonal közelében helyezkednek el. Ha kisebb az értéke, laposabb, a profilértékek a közép vonaltól távolabb helyezkednek el (28. ábra).



28. ábra Az amplitúdó sűrűségfüggvény alakjának jellemzése kilengés szempontjából (Bodschwinna et al. 2013)



29. ábra Egy véletlenszerűen csúcsos és egy periódikusan hullámos felület ferdeség és kilengés paramétereinek összevetése (Cohen 2014, https://www.michmet.com/Texture_parameters.htm)

3.2.2 Térközi paraméterek

A térközi paraméterek a mért felületek vízszintes irányú jellemzését teszik lehetővé. A felületek térbeli tulajdonságai a legnehezebben definiálható paraméterek közé tartoznak.

PC Csúcs szám (GFMesstechnik 2008)

A paraméter a mért felületen található csúcsok számát adja meg. A paraméter értéke mindig egy adott, a középsíkkal párhuzamos síkhoz tartozik, amely sík feletti csúcsok számát kapjuk meg. Alapesetben a középsíktól 10 μm -rel párhuzamos síkban kapjuk a paraméter értékeit.

S A profilcsúcsok átlagos távolsága (GFMesstechnik 2008)

A profilcsúcsok számához tartozó síkban adja meg a csúcsok közti átlagos távolság értékét vízszintes irányban.

3.2.3 Hibrid paraméterek

A hibrid paramétereket az amplitúdó és a távolság paraméterek kombinációjából kapjuk. A felületen kialakuló minden változás hatással van a hibrid tulajdonságokra. A mintavételi terület nagysága jelentősen befolyásolja a hibrid paraméterek értékét.

S_{dr} Felületarány (GFMesstechnik 2008; DIN EN ISO 25178-2:2012)

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right]$$

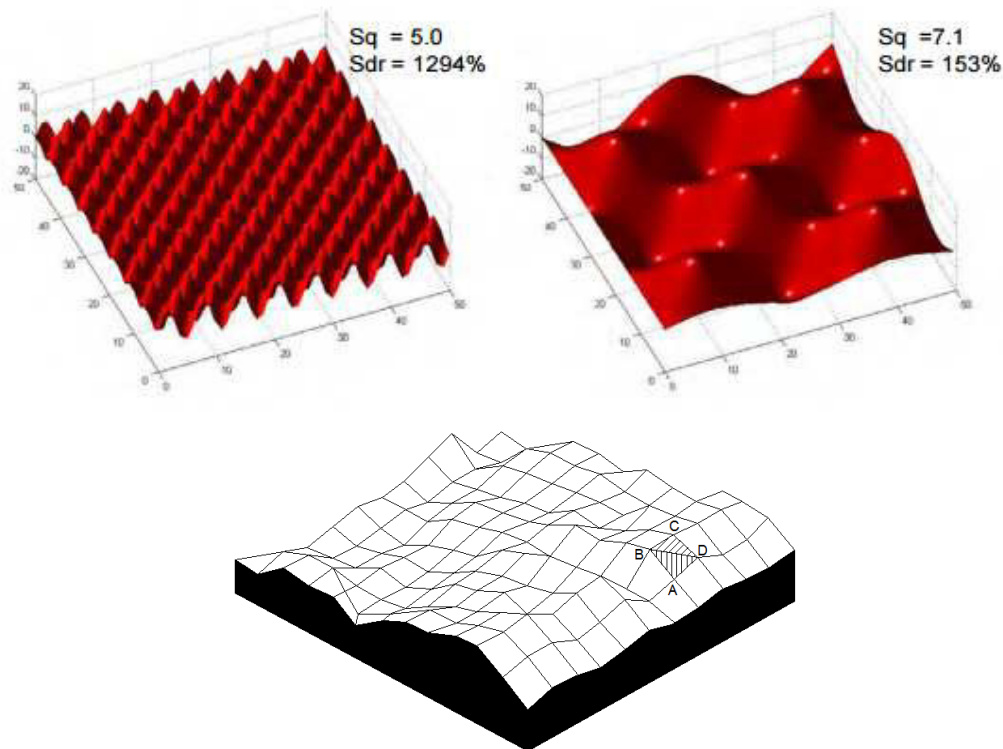
$$S_{dr} = \frac{A_0 - A}{A} * 100\%$$

ahol:

A_0 : a mérési pontokra fektetett háromszög lapocskákból képzett terület

A : mérési terület

A paraméter százalékosan adja meg a mérési pontokra fektetett háromszög lapocskákból képzett terület és a mérési terület arányát (30. ábra). Egy teljesen sík, elméleti felület S_{dr} paramétere 0%. A felületen található csúcsok és völgyek számának és méretének növekedésével nő a paraméter értéke. A paraméter magas értéke tehát azt jelenti, hogy a felület egyenetlen, azaz mély völgyeket és magas csúcsokat tartalmaz. Számértékét úgy kapjuk, hogy a mintavételi pontokra fektetett háromszöglapocskákból alkotott terület nagyságának és a mintavételi terület nagyságának különbségét viszonyítjuk a mintavételi területre nagyságára. Segítségével hasonló átlagos érdességű felületek is elkülöníthetők.



30. ábra A felületarány paraméter (Stout et al. 1993)

S_{da} Átlagos dőlés, lejtés (Horváth S. 2008; DIN EN ISO 25178-2:2012)

$$S_{da} = \frac{1}{A} \iint_A \left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial x} + \frac{\partial z(x; y)}{\partial y} \right) dx dy$$

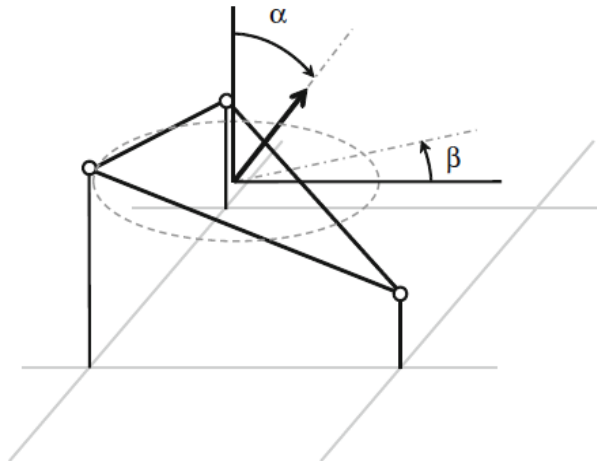
A felület átlagos lejtésének, dőlésének értékét adja meg, a mintavételi felületen belül.

S_{dq} A dőlés mértani átlaga (Horváth S. 2008; DIN EN ISO 25178-2:2012)

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

A felületi mikrotopográfia hajlásának dőlésének négyzetes középértékét adja meg, a mintavételi felületen belül. A paraméter értéke a felület amplitúdófüggetlen jellemzését biztosítja. Értéke az átlagos érdesség paramétertől függetlenül utal a felület alakjára. Magas értéke erősen barázdált felületre utal.

A mérési pontokra fektetett háromszöglapocskák ferdesége, a vízszintes és függőleges tengellyel bezárt szögükkel jellemezhetők (31. ábra).



31. ábra Az átlagos dőlés (Leach 2013)

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial y} \right)^2} \right)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial y} \right)^2}{\left(\frac{\partial z(x; y)}{\partial x} \right)^2} \right)$$

Az α szög jellemzi a lejtő meredekségét függőleges irányban. Értéke 0° és 90° között változhat. A β szög vízszintes irányban ad információt a felület orientáltságát illetően. Értéke 0° és 360° között változhat. Értéke az x tengelytől az óramutató járásával ellentétes irányba növekszik.

3.2.4 Az Abbott-görbe paraméterei (funkcionális paraméterek)

Az érdességi profilon belül a tér egy részét anyag, míg a maradék részt levegő tölti ki. A kettő viszonyát az anyagtartalom görbe (Abbott-görbe) fejezi ki, mely a 32. ábrán látható. Az anyagtartalom, az anyag és a hozzá tartozó elemek arányát jelenti egy adott „c” szinten. Az Abbott-görbe ennek a definíciónak a grafikus ábrázolása. Az anyagtartalom görbe mindig „S” alakú görbe, amelynek egy inflexiós pontja van.

Az anyagtartalom görbe jellegzetes paraméterei:

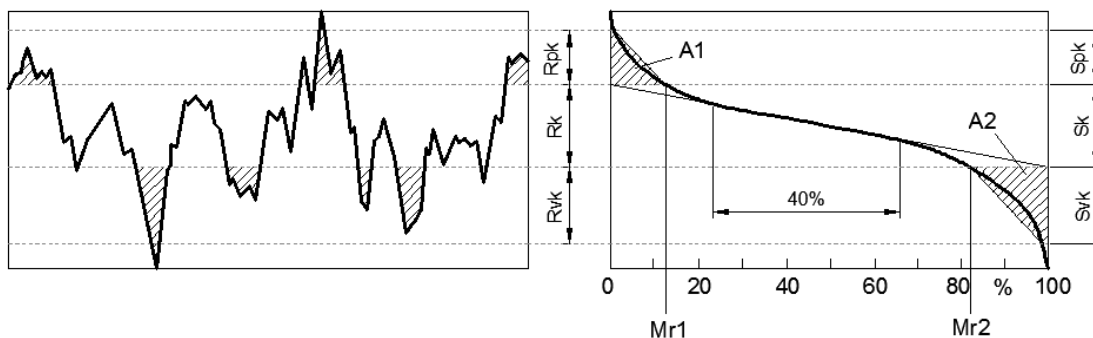
- S_{pk} Redukált csúcsmagasság (DIN EN ISO 25178-2:2012)
Az Abbott-görbe magrésze feletti kiálló csúcsok átlagos magassága
- S_{vk} Redukált völgmélység (DIN EN ISO 25178-2:2012)
Az Abbott-görbe magrésze alatti völgyek átlagos mélysége
- S_k Magrész magasság (DIN EN ISO 25178-2:2012)
Az Abbott-görbe magrészének magassága
- S_{Mr1} Anyagtartalmi pont (1) (DIN EN ISO 25178-2:2012)
A redukált csúcsmagassághoz tartozó anyagtartalmi pont
- S_{Mr2} Anyagtartalmi pont (2) (DIN EN ISO 25178-2:2012)
A redukált völgmélységhez tartozó anyagtartalmi pont
- V_1 Anyaggal töltött csúcs területe

$$V_1 = \frac{1}{2} * S_{pk} * S_{Mr1}$$

- V_2 Üres völgyterület

$$V_2 = \frac{1}{2} * S_{vk} * (100 - S_{Mr2})$$

A magprofil meghatározása úgy történik, hogy az anyagtartalom görbén megkeressük azt a 40% hosszú szakaszt, amelynél a legkisebb a változás mértéke. Ez a szakasz a görbe középső részén adódik. Abban az esetben, ha nagyon kicsi az érdesség, akkor nem olyan egyszerű megtalálni ezt a szakaszt, hiszen nincsenek kiálló csúcsok és bemélyedő völgyek. Ekkor az anyagtartalom görbe kicsi meredekségű és nem teljesen egyértelmű ez a szakasz. Ha meghatároztuk ezt a 40% hosszúságú szakaszt, akkor a két végpontját egy egyenessel kötjük össze. Ezt az egyenest mindkét irányba meghosszabbítjuk, ami így a 0%-nál és a 100%-nál is megad egy magasságot. Ezeket a magasságokat rávetítjük a görbére. Így megkapjuk az Mr_1 és Mr_2 pontokat. A kapott két magasságot rávetítjük az érdességre és az Mr_1 pont feletti részeket levágjuk. Ugyanezt megteszük az Mr_2 -vel is. Az Mr_1 és Mr_2 pontok közti szakasz magassága az R_k . A levágott csúcsok magassága az R_{pk} , a levágott völgyek magassága R_{vk} .



32. ábra Az Abbott-görbe paraméterei (Stout et al. 1993)

4. Eddigi mérések és vizsgálatok eredményei (irodalmi áttekintés)

Természetesen a faanyagok felületi érdesség meghatározásának terjedelmes szakirodalma van, de kutató munkám gerincét adó, a végmégmunkált felület stabilitásával foglalkozó szakirodalom viszonylag ritka, és azok sem folyamatában vizsgálják a jelenséget, és nem is tesznek közzé számszerűsített eredményt a felületi stabilitásra. Máiig nem kerültek publikálásra olyan szisztematikus vizsgálati eredmények, melyek feltárták volna a fafaj, megmunkálás, víz mennyiség és párolgási sebesség közti összefüggéseket. Az eddigi kutatási eredmények a felületek stabilitását illetően csak a nedvesítés előtti és a már nyugalomban lévő felületről nyújtanak némi információt. A kezdeti és a végső állapot közti folyamatokról viszont nincsenek rendelkezésre álló adatok. Ennek legfőbb oka, hogy a rendelkezésre álló mérőeszközök nem alkalmasak folyamatközi mérések kivitelezésére. Az elektronmikroszkópok segítségével a deformációs zóna pillanatnyi, egyensúlyi állapotáról kapunk ugyan információkat, de a felületek változása, stabilitása nem követhető. A felületeken lezajló változások nagyfelbontású kamerák segítségével figyelemmel kísérhetők, de ezen eszközökkel a változás mértéke nem számszerűsíthető. A tapintótűs 2D-s felületi érdességméréssel csak egy adott mérési vonalon bekövetkező változások regisztrálhatók, ezenkívül a tű maga is módosítja a vizsgált felületet. További probléma, hogy a mérés rendkívül időigényes így két mérés közt eltelt idő alatt is jelentős változások történhetnek és nem vizsgálható vele egy felület. A megfelelő mérőműszerek hiányában a nedvesítés során lejátszódó folyamatok vizsgálata nem volt megoldott, ezért a szakirodalmi eredmények többsége a faanyagok felületén nedvesítés hatására végbemenő változásokat a nedvesítés előtti és utáni állapotokat összevetve írja le.

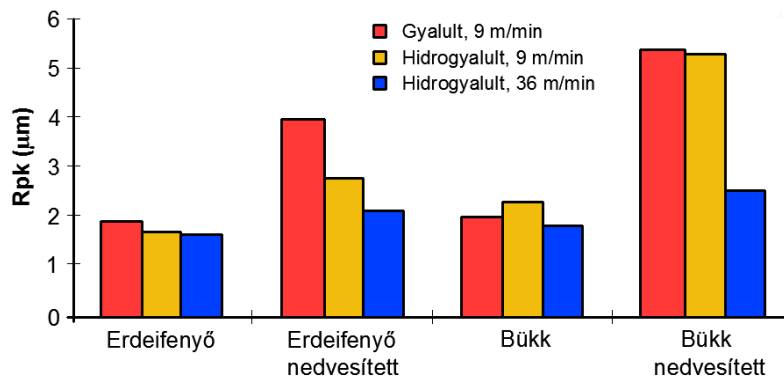
Az első publikált munka a témában 1932-ben jelent meg. Ekkor írja le Koehler, hogy a faanyagok felületén megfigyelhető szálfelhúzódnás a nedvesítés eredménye. Utalást tesz arra vonatkozóan is, hogy egyes fafajok hajlamosabbak a szálkásodásra, mint mások. Később (Marra, 1943) három fő okot neveznek meg a jelenség fellépésének okaként: a megmunkálás során bekövetkező sejtkárosodás, a rostok dagadása, és a rostok közti elválás. Azt is közlik, hogy a rostokra merőleges csiszolás nagyobb mértékű szálfelhúzódnáshoz vezet, illetve a jelenség mértéke a bél közelében hangsúlyosabb, mint a kéreg közelében. Megfigyelték, hogy a csiszolópapír szemcsemérete szintén jelentősen befolyásolja a felhúzódnott rostok számát. Nakamura és Takachio 1961-ben különféle csiszolási paramétereket alkalmazva jutottak hasonló eredményekhez. Vizsgálataik során a durvább szemcsenagyságú (60-80) csiszolópapír nagyobb mértékű szálfelhúzódnást okozott, mint a finomabb (150-240).

1996-ban Schadoffsky többféle csiszolási paraméterrel előállított meranti felületeket vizsgált. Az R_z paramétert használva hasonlítja össze a kialakított felületek minőségét. Eredményként azt kapta, hogy a durva csiszolópapírral megmunkált felületek R_z értéke minden esetben magasabb lett, mint finomabb szemcsenagyság használata esetén. A felületeket ezután 60g/m^2 mennyiségű hidrolakkal vontta be, aminek hatására a csiszolt felületek R_z értékei megemelkedtek. A változás mértéke a durva szemcsenagyságú csiszolópapírral megmunkált felületeken volt jelentősebb.

Westkämper és társai 1997-ben finiselt lucfenyő felületeket vizsgáltak a megmunkálólól romlásának függvényében. Elektronmikroszkópos felvételeket tettek közzé, melyeken a tompuló szerszám által egyre mélyebb deformációs zónákat mutatják be. A felvételeken jól látszik, hogy a korai pászta vékonyfalú tracheidái jelentősebben deformálódnak, mint a késői pászta vastagfalú tracheidái. A kialakított felületek nedvesítése után a tompa szerszámmal megmunkált felületek hullámossága jelentősen

megnő, míg ez éles szerszám által megmunkált felületen nem jelentkezik. Érdességi paraméterekkel is igazolják a vizuálisan tapasztalt jelenséget. R_a , R_z és R_{max} paramétereket értékeit vizsgálják és megállapítják, hogy a tompa szerszámmal megmunkált felületek nedvesítése után a paraméterek értékei jelentősen megnőnek. Éles szerszám használata esetén nem tapasztalnak jelentős különbséget a nedvesítést követően a paraméterek értékeiben.

Szintén 1997-ben Fuchs és munkatársai bükk és erdeifenyő fafajokat vizsgálnak, melyeket hagyományos és hidrofejes gyalun munkáltak meg, azonos megmunkálási paraméterek mellett. Az R_{pk} érdességi paraméter értékeit vizsgálva nedvesítették a felületeket. A két különböző megmunkálási eljárással kialakított felületeken nem tapasztaltak jelentős különbséget a paraméter értékeiben. Nedvesítést követően viszont a hidrogyalulás stabilabb felületet eredményezett, azaz a R_{pk} paraméter értékei csekélyebb mértékben növekedtek a nedvesítés előtti értékekhez képest, mint hagyományos gyalulás alkalmazása mellett.

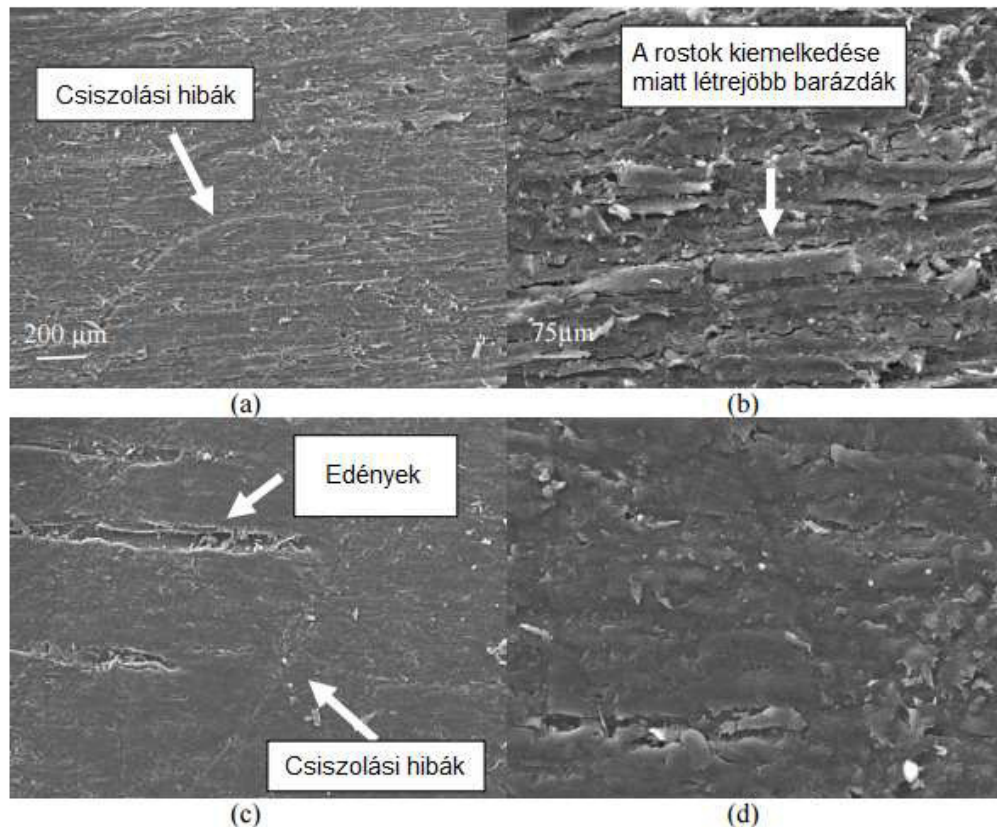


33. ábra Az R_{pk} érdességi paraméter értékeinek fajonkénti és megmunkálásonkénti változása nedvesítés hatására (Fuchs et al. 2007)

Hoffmeister és Riegel 1998-ban bükk mintákon hasonlították össze a vizezés és a vizes lakkok érdességre gyakorolt hatásait. A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a vizezéssel több rost emelkedik ki a felületből, mint vizes lakkok alkalmazásakor.

Evans 2009-ben arra a következtetésre jutott, hogy az alacsonyabb sűrűségű fafajoknál jelentősebb, míg nagyobb sűrűségű fafajoknál kevésbé jelentős a szálfelhúzó mértéke. További következtetésként leírja, hogy a csiszolás műveletkor a felületen keletkező rostok nedvesség hatására megdagadnak, de ez a dagadás sokkal csekélyebb, mint a sejtfalak károsodása miatt bekövetkező dagadás. Azt találta, hogy a csiszolt fafelületek nedvesítést követő szálfelhúzó mértéke arányos az alkalmazott szemcsemérettel, de az egyes fafajokhoz megfelelő csiszolási paraméterek megválasztásával csökkenthető a szálfásodás.

Landry és társai 2013-ban csiszolt nyír (*Betula alleghaniensis*) felületeken vizsgálták a szálfelhúzó jelenségét, elektronmikroszkópos és 3D optikai érdesség mérési módszerekkel, annak függvényében, hogy felületet oldószer bázisú vagy vízbázisú felületkezelő anyaggal kezelték. Az elektronmikroszkópos felvételek alapján (34. ábra) kijelentik, hogy vízbázisú kezelőanyagok alkalmazása után a felületi érdesség nagyobb, mint oldószer bázisú kezelést követően. Ennek elsődleges okaként a szálfelhúzódást nevezik meg. A csiszolásból származó rostdarabok az oldószer bázisú kezelés után is megfigyelhetők a felületen, de azok inkább a felület síkja felé dőlnek, míg vizes kezelést követően kiemelkednek a felület síkjából. Egyetértenek azzal a korábbi megállapítással, miszerint a felületmozgás döntően a deformációs zóna dagadásából adódik és a csiszolt részek emelkedése kevésbé jelentős.



34. ábra Nyír fűrészáru minták vízbázisú (a, b) és oldószer bázisú (c, d) felületkezelés után (Landry et al. 2013)

Az érdességmérésből kapott eredményeik megegyeznek az elektronmikroszkópos felvételeken látottakkal. A már jól ismert paraméterek mellett (S_q , S_p , S_v , S_{sk} , S_{ku}) egy korábban kevésbé ismert és alkalmazott paraméter (S_{dr}) változását is vizsgálták. A felületarány (S_{dr}) paraméter értékei vízbázisú kezelést követően majdnem felére, oldószer bázisú felületkezelést követően majdnem harmadára csökkentek. Ez a változás várható volt, hiszen a kezelőanyag a felületi repedéseket és a megmunkáláskor a felületen létrejött átvágott edényeket eltömíti, így egy jóval egységesebb, simább felület jön létre. Az átlagos érdesség szintén csökkent mindkét esetben, de jóval kisebb mértékben. A kezelés hatására bekövetkező szálfelhúzó hatás az S_p paraméter értékeinek változásán követhető. Vízbázisú kezelés után a paraméter értéke majdnem 20 százalékkal magasabb lett, míg oldószer bázisú felületkezelést követően felére csökkent.

A szakirodalmi adatok alapján kijelenthető, hogy a felületek megmunkálásakor kialakuló deformációs zóna vastagsága alapvetően meghatározza a felületek megmunkálás utáni viselkedését. Minél kisebb mértékű tehát a megmunkálás során felületi károsodás, annál stabilabb a kialakult felület. Az egyes megmunkálások közt természetesen különbség van a legoptimálisabban feltételekkel kialakítható deformációs zóna mélységét illetően. A szakirodalmi kutatások a kiindulási és az állandósult állapotok vizsgálatára korlátozódnak. Kutatómunkám egyik eredménye, hogy a természetes faanyagok felületének mechanikai megmunkálás utáni stabilitását a felületek érdességének optikai mérésével nyomon követhetjük.

5. A kísérletek programja és metodikája

Mint ahogy az előzőekben már említettem, a kutatómunkám legfőbb célja, hogy meghatározzam és számszerűsítsem a különböző módon megmunkált természetes faanyagok felületén nedvesítés hatására bekövetkező felületi mozgásokat. A felületmozgások regisztrálására mérési módszerként az optikai elven működő, háromdimenziós felületi érdességmérést alkalmaztam, mivel ezek a rendszerek működési elvüknek és felépítésüknek köszönhetően alkalmasak a feladat elvégzésére. A rendelkezésre álló berendezéshez kidolgoztam egy egyedi mérési menetrendet, amely fafajtól és megmunkálási eljárástól függetlenül lehetővé tette a felületek objektív összehasonlíthatóságát. A pontos mérési menetrend meghatározásához előzetes méréseket végeztem. Az érdességméréseket, a mérési menetrendhez igazodva tömegmérésekkel is kiegészítettem, így a nedvesség elpárolgásának lefolyásáról is pontos képet kaptam. A nedvesítéssel vizsgálatok végeztével a mérések során nyert nagymennyiségű adathalmazból lehetőség nyílt a 3 dimenziós érdességi paraméterek közti belső összefüggések feltárására és faanyagokra való igazolására. A nedvesítés előtti és a száradás utáni felületekről elektronmikroszkópos felvételeket is készítettem a különbségek feltérképezése céljából.

Ahhoz, hogy a kapott háromdimenziós érdességi paraméterek pontos jelentését megismerjem, összehasonlító vizsgálatokkal egészítettem ki a kutatást. A már jól ismert, szabványokban rögzített 2D-s paramétereket, a gyakorlatban még kevésbé használt 3D-s paraméterekkel vettem össze olyan módon, hogy ugyanannak a felületnek az érdességét mértem tradicionális 2D-s tús letapogatással, majd optikai úton.

5.1 A vizsgált fafajok kiválasztása, előkészítése, jellemzése

A különböző anatómiai felépítésű fafajok (fenyő, gyűrűslikacsú lombos, szórtlikacsú lombos) fizikai és mechanikai tulajdonságai nagymértékben eltérnek egymástól. A vizsgálatokba bevont fafajok kiválasztásának elsődleges szempontja, hogy a három csoport mindegyikéből kerüljön kiválasztásra legalább egy fafaj. További szempont volt, hogy a hazai ipar által legnagyobb mértékben feldolgozott fafajok kerüljenek a kutatás középpontjába. Ezen szempontokat figyelembe véve a vizsgálatokhoz hét fafajból készültek próbatestek:

- Fenyők: lucfenyő (*Picea abies* Karst.), vörösfenyő (*Larix decidua* Mill.), erdeifenyő (*Pinus sylvestris* L.)
- Gyűrűslikacsúak: kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* Liebl.), fehér akác (*Robinia pseudoacacia* L.)
- Szórtlikacsúak: bükk (*Fagus sylvatica* L.), rezgőnyár (*Populus tremula* L.)

A próbatestek darabszámának meghatározását és kialakítását az MSZ 6786-1:1976 „Faanyagok mintavétele és a fizikai-mechanikai tulajdonságok vizsgálatának általános előírásai” című szabvány előírásainak megfelelően végeztem. Minden fafajból öt próbatest készült, melyek felülete az öt alkalmazott megmunkálási eljárással lett kialakítva. Így fafajonként készült egy gyalult, egy csiszolt, egy mart, egy finiselt és egy termikusan simított felületű próbatest, melyek mérete 100 x 100 x 25 mm. Összesen tehát 35 darab próbatest került kialakításra, melyek mindegyike teljes szélességben álló

évyűrűs, illetve a rostlefutás a felületet hossz tengelyével minden esetben párhuzamos. A minták fafajonként azonos törzsből származnak, felületük fahibáktól mentes. Megmunkálás előtt a nyers deszkák 2 hónapot töltöttek 23°C hőmérséklet és 50%-os relatív páratartalmú (normál klíma) klimatizált helyiségben. Szakirodalmi adatok alapján a faanyag nedvességtartalma ezen a klímán $\approx 8 - 12\%$ (Molnár 2004), amely nedvességtartalmat a legtöbb faipari termékgyártási technológia során biztosítani kell. A megmunkálást követően és a mérések teljes időtartama alatt ugyanezen viszonyok álltak fenn.



35. ábra Erdeifenyő és tölgy próbatestek (Saját felvétel)

5.2 A felületek kialakítása

A próbatestek felületének kialakítását illetve a kísérletsorozat méréseit a drezdai Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD) kutatóintézetben végeztem.

A megmunkálási paraméterek kiválasztásánál elsődleges szempont volt, hogy a megmunkálásból származó érdesség a legminimálisabb legyen, ezért lehetőség szerint alacsony fogásmélység mellett, maximális fordulatszám, illetve minimális előtolási sebesség elérésére törekedtem. Az ilyen módon megmunkált felületeken kialakuló deformációs zóna mélysége a legminimálisabb. Más megmunkálásoknál az optimális megmunkálási paramétereket a különböző előírásokat figyelembe véve illetve előzetes mérések alapján határoztam meg.

5.2.1 Gyalulás

A gyalult felületek kialakításához egy PANHANS 436 típusú 4 kése vastagsági gyalugép állt rendelkezésre. A gép fordulatszámának változtatására nincs lehetőség, az előtolási sebesség 3 - 14 m/perc tartományban változtatható. Ennek megfelelően a megmunkálási paraméterek:

- Fordulatszám: 5000 ford/min
- Előtolási sebesség: 3 m/min
- Élek száma: 4 db
- Fogásmélység: 1 mm



36. ábra PANHANS 436 típusú vastagsági gyalugép (Saját felvétel)

5.2.2 Csiszolás

A csiszolást egy KÜNDIG Brilliant 2/1350 - CEed-L típusú szélesszalagú csiszológépen végeztem el. Itt a rendelkezésre álló beállítási lehetőségek száma hatalmas, ezért a felületek kialakításához az IHD által a géphez kidolgozott csiszolási utasításokat használtam (IHD 2012). Eszerint meg kell különböztetni a puha és kemény fafajokat. A puhafák közé soroltam a luc-, erdei-, vörösfenyő és nyár fafajokat, keményfák közé pedig a tölgy, akác és bükk fafajokat. A felületek kialakítása két lépcsőben valósult meg, melynek megmunkálási paraméterei a 2. táblázatban találhatók.



37. ábra KÜNDIG Brilliant szélesszalagú csiszológép (Saját felvétel)

		Forgács- vastagság (mm)	Előtolási sebesség (m/min)	Szalag- sebesség (m/s)	Szemcse- nagyság
Keményfa	1. lépés	0.2	7	10	P100
	2. lépés	0.1	7	8	P180
Puhafa	1. lépés	0.2	8	11	P100
	2. lépés	0.1	8	9	P180

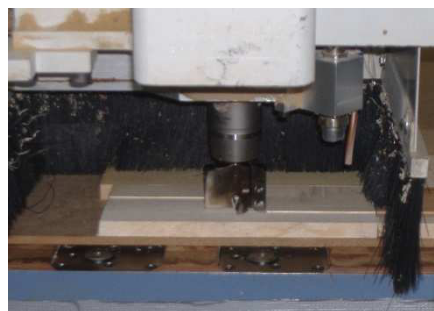
2. táblázat Csiszolási paraméterek

5.2.3 Marás

A marás művelete egy MAKА SC 20T típusú CNC vezérlésű felsőmaró gépen történt. A maráshoz használt szerszám két fő és két mellék vágóéllal rendelkezik, átmérője 60 mm. A felületeken homlokmarást végeztem, azaz a megmunkáló szerszám tengelye merőleges volt a felületre. Itt is a gyalulásnál használatos elvet követve, a lehetséges maximális fordulatszám mellett a minimális előtolási sebesség elérésére törekedtem.

A paraméterek így a következőképpen alakultak:

- Fordulatszám: 17000 ford/min
- Előtolási sebesség: 1 m/min
- Fogásmélység: 1 mm



38. ábra MAKА SC 20T típusú CNC vezérlésű felsőmaró és a maráshoz használt szerszám (Saját felvétel)

5.2.4 Finiselés

A finiseléshez használt gép egy MAPO SPU 180 FH típusú állókéses gyalugép. Ezen gyalugépek működési elve, hogy a kés áll, és egy hajtott gumiszalag segítségével a faanyag végzi az előtoló mellékmozgást. Így a kés egy nagyon vékony réteget (pár tized milliméter) képes a munkadarab teljes keresztmetszetéről leválasztani. A gép segítségével nagymértékben kiszűrhető a mechanikai megmunkálásból származó érdesség, hiszen nem keletkeznek a felületen ciklois ívek, az edényeket pedig nem tömíti el por vagy forgácsdarab. A finiselőgép fix előtolási sebességgel rendelkezik, a késnek az előtolási iránnyal bezárt szöge azonban fafajonként állítható. A megfelelő készögállást a gyártó által a géphez mellékelt táblázata alapján határoztam meg. Eszerint szintén külön kell választani a kemény és puha fajokra, melyet a csiszolásnál ismertetett módon tettem meg.



39. ábra MAPO SPU 180 FH típusú állókéses gyalugép (Saját felvétel)

Az alkalmazott megmunkálási paraméterek:

- Előtolási sebesség: 50 m/min
- Készögállás puhafák esetén: 35°
- Készögállás keményfák esetén: 15°

5.2.5 Termikus simítás

A termikus simítás művelete szintén a MAKKA SC 20T típusú CNC vezérlésű felsőmaró gépen valósult meg. A termikus simítás egy olyan forgácsmentes végmegmunkálási eljárás, mely egy elektromosan fűthető szerszámmal végezhető. A faanyagok felülete a magas hőmérséklet hatására plasztifikálódik, meglágyul. A felületből kiálló rostok a szerszámnak köszönhetően visszasimulnak a felületbe és ott rögzülnek, fixálódnak (Fuchs 2011, Fuchs et al. 2007, Raatz et al. 1999). Az eljárás ugyancsak alkalmas a megmunkálási érdesség minimalizálására, hiszen egy forgácsolás nélküli megmunkálásról van szó. A megmunkáláshoz használt szerszám síkfelületű, átmérője 20 mm.



A megmunkálási paraméterek meghatározásához természetes faanyagok felületének a megmunkálására semmilyen segédlet nem állt rendelkezésre. A megmunkáló szerszám hőmérsékletének és előtolási sebességének változtatásával előzetes méréseket végeztem, melyek alapján a paraméterek a következőképpen alakultak:

- Szerszámhőmérséklet: 250 °C
- Előtolási sebesség puhafák esetén: 30 m/min
- Előtolási sebesség keményfák esetén: 20 m/min



40. ábra A termikus simítás műveletéhez használt szerszám (Saját felvétel)

5.3 A felületek nedvesítése

A felületek megmunkálását követően 10 x 10 cm felületű próbatetek kerültek kialakításra. Ezeken az azonos felületű mintatesteken végeztem el a nedvesítést. A nedvesítésre reprodukálható módszert dolgoztam ki. A felületeken kialakult deformációs zóna mélységét erősen befolyásolja a fafaj és az alkalmazott megmunkálási módszer, de átlagosan igaz, hogy a tömörödött sejtsorok mélysége kb. 50-100 μm (Fisher, Schuster 1993). A nedvesítést ebben a tartományában kívántam elvégezni. Ehhez 100 x 100 x 0,1 mm, azaz 1000 mm³ mennyiségű desztillált vizet használtam, ami a próbatetek felületén 100 μm vízréteg vastagságot jelent. Az 1 cm³ mennyiség átszámítva 1 ml-nek, ami pedig 1 g folyadéknak felel meg. Ez a mennyiség pontosan megfelel az iparban használatos vízbázisú felületkezelő anyagok gyártó által javasolt felhasználási mennyiségének, amely általában 80-120 ml/m² (Remmers). Az 1 g desztillált vizet egy lombik üveg és egy ezredes pontosságú mérleg (MC1 LC 620 S) segítségével pontosan ki tudtam mérni. Ezt a mennyiséget egy műanyag pipettával felszívva cseppenként helyeztem a 10 x 10 cm-es felületű próbatetekre, majd egy előnedvesített ecset segítségével egyenletesen eloszlattam. Ezt követően kezdődhettek az érdességmérések.

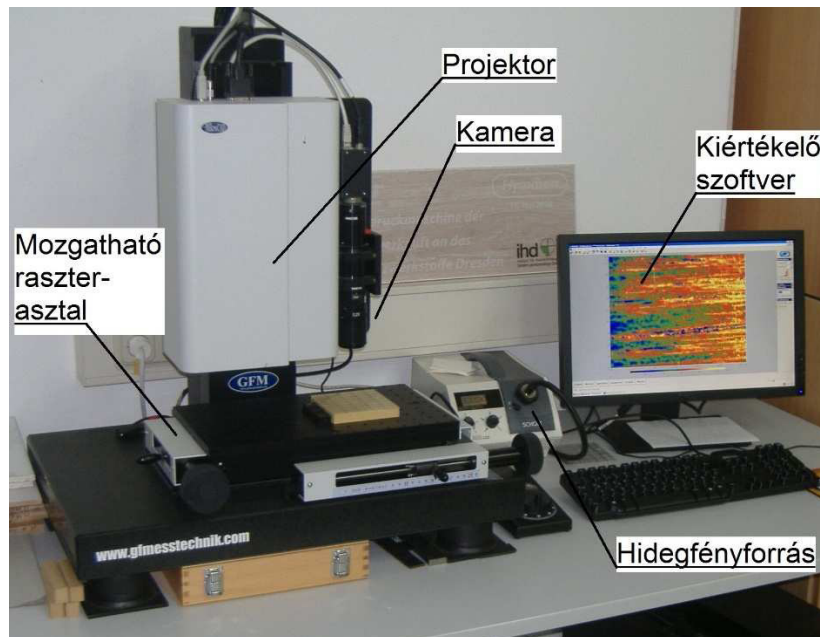


41. ábra A felületek nedvesítése (Saját felvétel)

5.4 Mérőműszer

A felületi mozgás detektálására egy GF Messtechnik által forgalmazott MicroCAD Compact típusú 3D-s optikai felületi érdességmérő berendezést használtam.

Az optikai mérőműszerek előnyeit a tapintótűs mérési eljárással szemben a 3 fejezetben ismertettem. Az általam használt berendezés talán legnagyobb előnye, hogy rendkívül gyors mérést tesz lehetővé. Nagyjából 10 másodperc alatt egy mérési felületen több mint kétmillió pont távolsága határozható meg a kamera síkjától. Ez az idő tapintótűs mérési eljárással talán egy felületi profil mérésére elegendő.



42. ábra A mérőrendszer felépítése (Saját felvétel)

Mérési elvét tekintve a gép a háromszögelési elv alapján működő, ún. „Streifenlichtprojektion” alapján határozza meg a felületek 3 dimenziós magasságkülönbség képét. A rendszer legfőbb elemei a kamera, a projektor, a hidegfényforrás és az adatok feldolgozását végző számítógép.

5.4.1 Kamera

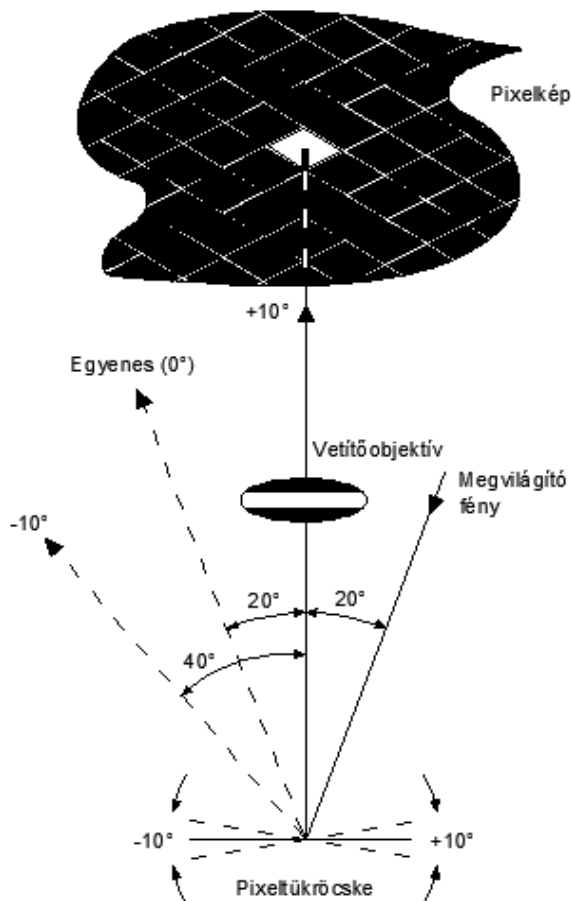
A mérőberendezéshez egy NAVITAR típusú nagyfelbontású CCD kamera tartozik. A kamera úgynevezett telecentrikus objektívvel rendelkezik, amivel a hagyományos optikáknál felmerülő torzítási hibák küszöbölhetők ki. Hagyományos optikánál elkerülhetetlenek az úgynevezett paralaxis hibák. Ez azt jelenti, hogy a kamera lencséjéhez közelebb lévő tárgyakat nagyobbak látja, mint a távolabbi tárgyakat, vagyis egy tárgy nagyítása változik az optikától való távolságától. A halszemoptikák pontosan ezt a torzítást használják ki és erősítik fel. Nagy pontosságú méréseknél azonban a képmező elhajlása jelentős különbségeket eredményez a kapott képet illetően. Felületek érdességének optikai meghatározásakor különösen fontos a lehető legpontosabb képalkotás, hiszen az így nyert adathalmazból kerülnek később kiszámításra a felületet jellemző érdességi paraméterek.

A kamera legfontosabb adatai:

- Maximális nagyítás: 12-szeres
- Maximális mérési terület: 12,5 x 9,5 mm
- Maximális felbontás vízszintes irányban: kb. 8 μm (1624 x 1236 Pixel)
- Maximális felbontás függőleges irányban: 1 μm
- Maximális mérési tartomány: + - 1,5 mm
- Fókusz távolság: 90 mm

5.4.2 Projektor

A mérőrendszer egy NEC LT-170 típusú projektorral rendelkezik. A berendezés feladata, hogy a mérési vonalak azonosításához szükséges fekete fehér sávokat a felületre vetítse. Működési elve szerint a DLP (Digital Light Processing) projektorok csoportjába tartozik. A DLP projektorok alapja egy mikrotükör rendszer, amelyet „digitális mikrotükrös eszköz” vagy DMD (Digital Micromirror Device) néven ismerhetünk. A DMD tulajdonképpen egy téglalap alakú félvezető chip, amely apró tükröcskék millióiból



áll. A chip felületén mindig annyi tükör helyezkedik el, amekkora a projektor felbontása. Minden egyes tükör egyedileg, egy elektromos jel hatására két különböző helyzetbe (0 vagy 1) mozgatható. Vezérlés nélkül minden tükör vízszintes helyzetben van, tehát a beeső fénysugár ugyanakkora szögben verődik vissza róla, mint amekkora szögben beérkezik. Bekapcsolt állapotban a tükör +10 vagy -10 fokban elbillen, ezáltal szabályozza a beeső fénysugár visszaverődésének irányát. Amennyiben a tükör +10 fokos helyzetbe billen, a beeső fénysugár az objektív tengelyének irányába verődik vissza (világos pixel), ha viszont -10 fokos állapotba kapcsol, akkor a fénysugár az objektívet elkerülve, egy fényelnyelő felületre verődik (sötét pixel). A tükrök másodpercenként rengetegszer, akár 5 μs -onként képesek átkapcsolni, így biztosított a mérés gyorsasága.

43. ábra A DLP projektorok működési elve (<http://www.projektor.hu/a+dlp+technologia.html>)

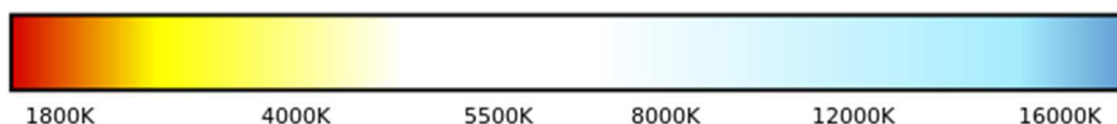
A projektor legfontosabb műszaki paramétereit:

- Felbontás: 1024 x 768 Pixel
- Megvilágított felület: 20 x 15 mm
- Vetítési szög: 30°
- Egy mikrotükör mérete: 16 x 16 µm
- A legvékonyabb vetített sáv szélessége: 8 Pixel

5.4.3 Hidegfényforrás

A rendszer megfelelő működéséhez szükséges fényt egy SCHOTT KL1500 LCD típusú hidegfényforrás biztosítja. A fényforrásban található halogénlámpa típusa Osram HLX 64634, melynek névleges feszültsége 15V, névleges teljesítménye 150 W.

A berendezés a fényerősség fokozatmentes beállítását teszi lehetővé, melyről egy kijelzőn kapunk visszajelzést. A kijelzőn a halogénlámpa adott fényerősséghez tartozó színhőmérsékletét olvashatjuk. A színhőmérséklet mértékegysége a Kelvin. Minél magasabb az értéke a fény vörös összetevői úgy csökkennek, míg a kék összetevői növekednek.



44. ábra Színhőmérséklet skála (<http://hu.wikipedia.org/wiki/Színhőmérséklet>)

Az alkalmazott halogénlámpa színhőmérséklete 2650 K - 3300 K tartományban változtatható. Természetesen minél magasabb fényerősséget használunk, a lámpa élettartama annál alacsonyabb lesz. A vizsgált fafajok felületének megvilágításához 3000K színhőmérséklet érték bizonyult szükségesnek és elégségesnek, így a mérések ezen beállított értéken történtek. A sötétebb (pl. tölgy, akác) és világosabb (pl. nyár, lucfenyő) felületek megvilágításához szükséges fény mennyiségének pontos beállítása, a kiértékelő szoftver segítségével valósítható meg.

5.4.4 Számítógép (Kiértékelő szoftver)

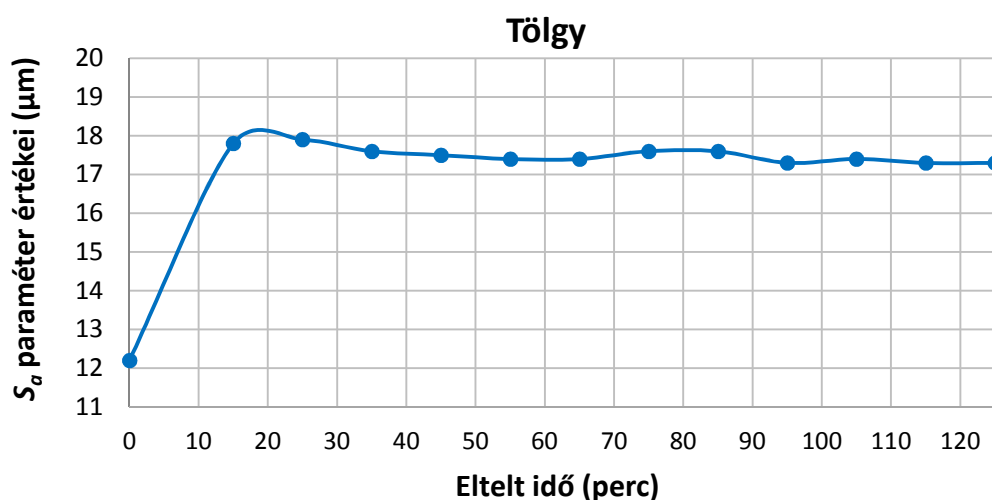
A kamera által készített képek a rendszerhez tartozó számítógép segítségével dolgozhatók fel. A mérési adatok kiértékeléséhez az ODSCAD 6.0 nevű szoftver állt a rendelkezésemre. A szoftver számtalan lehetőséget kínál a mérési paraméterek beállítására és a mért adatok további feldolgozására is. A szoftver a kamera képének élesre állításán, azaz a fókusz távolság pontos beállításán kívül, a mért felületekhez szükséges optimális fényerősség megválasztásában is segítséget nyújt. Amennyiben minden beállítás megfelelő, elvégezhető a mérés. Ezt követően a program megjeleníti a felület színes 2 dimenziós magasságkülönbség képét. A kép, a hozzá tartozó skálával menthető, de lehetőség van 3 dimenziós kép megjelenítésére és mentésére is. Az adatok kiértékelésére több szűrési eljárás és beállítási lehetőség áll rendelkezésre. A program lehetőséget kínál a mért felületből kisebb felületrészek kijelölésére és ezek további értékelésére. Ezenkívül lehetőség van a felületen tetszőleges irányú és hosszúságú

vonalak kijelölésére és az ezekből kapott érdességi profil kiértékelésére is. A szoftverrel természetesen különböző érdességi paraméterek értékei is meghatározhatók, mind felületek, mind a felületből kivágott profilok esetén.

5.5 Mérési menetrend kialakítása

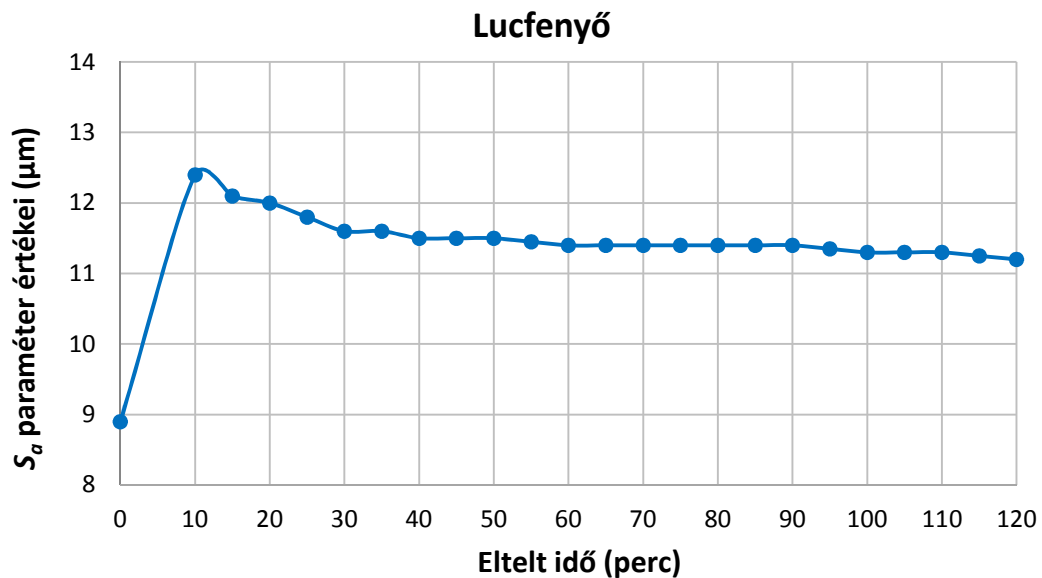
A pontos mérési menetrend meghatározása érdekében előzetes méréseket végeztem lucfenyő, bükk és tölgy fafajokon, 1 ml desztillált víz felhordásával. Az alapelv az volt, hogy a nedvesítést követően, minél rövidebb időközönként a lehető legnagyobb felület mozgását tudjam regisztrálni. Gyorsan kiderült, hogy egy méréshez az adatok mentésével együtt fél perc szükséges. Előzetesen 10 perces ismétlési időt határoztam meg, amely idő alatt 20 mérés végezhető. A 10 perc eltelte után, az adatok összehasonlíthatósága miatt mindig ugyanazon felületek érdességét mértem vissza. Ezt a nedvesítést követő 120. percgig ismételttem. A próbatestek pontos pozicionálása fontos részét képezte a mérési módszernek, melyet egy kétirányban mozgatható, tizedmilliméter pontosságban állítható raszterasztal segítségével valósítottam meg.

A próbatestek nedvesítését követően 5 perc elteltével kezdődtek az érdességmérések. Ennyi idő szükséges ahhoz, hogy a felületre juttatott nedvesség nagy része beszívódjon a faanyagba. A felületen elhelyezkedő folyadék ugyanis nagymértékben befolyásolja a mérési eredményeket. A nedvesség okozta csillogás miatt a rendszer, mérési elvől fakadóan, egyszerűen nem tud adatokat hozzárendelni azokhoz a koordinátákhoz, ahol a probléma jelentkezik. A program által megjelenített magasságkülönbség-képen ezeken a helyeken fekete foltok jelennek meg, ezzel jelezve, hogy az adott helyen nincs mért adat. Bár a felületek 5 perccel a vizezés után még nedvesek, de a csillogás már nem okoz adatvesztést. A 45. ábrán az S_a paraméter értékeinek változása figyelhető meg tölgy fafajon, a 10 percenként ismételt 20 mérés átlagából. Jól látszik, hogy a nedvesség hatására a paraméter értéke magasabb a kezdeti értéknél, de az idő múlásával nem változik jelentősen, azaz a felület már stabilizálódott. A mérések eredményeiből nyert grafikonok lefutása lucfenyő és bükk fafajokon is hasonlóképp alakultak. Különbséget csak a változás mértéke jelentett, ami a faanyagok eltérő anatómia felépítéséből adódhat, hiszen a felületek azonos feltételekkel, gyalulással kerültek kialakításra, illetve a felületre helyezett nedvesség mennyisége is azonos volt.



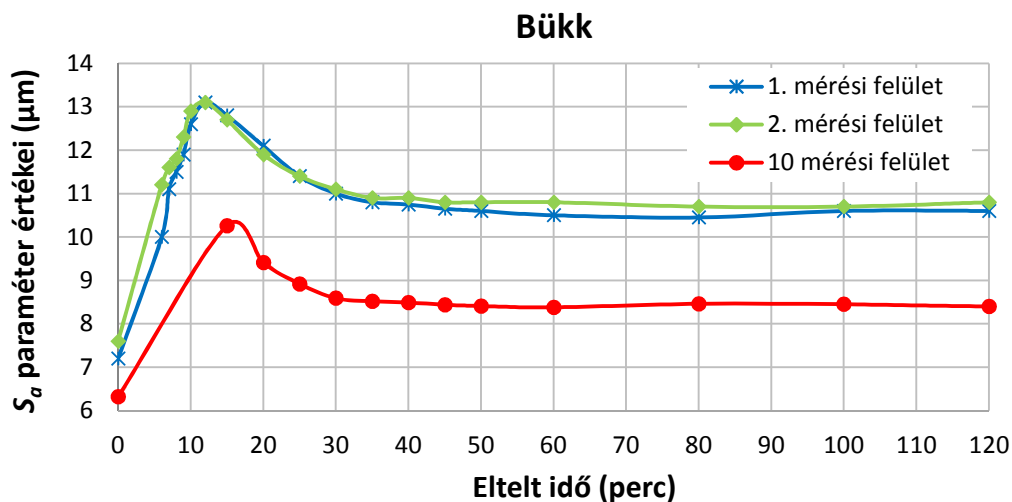
45. ábra Az S_a érdességi paraméter értékeinek változása tölgy felületen nedvesítés hatására

Ezzel a mérési menetrenddel, a folyadék beszívódásának hatására bekövetkező felületmozgásról nem jutottam új információhoz, hiszen így, csak a kezdeti és a már stabilizálódott felületek közti különbség látható. A módszerrel a nedvesítést követően 15 perc elteltével (5 perc várakozás + 10 perc a mérésekhez szükséges idő) kapható az első mérési eredmény. Ezt az időintervallumot lecsökkentve, a kezdeti szakaszban sűrűbb időközönként próbáltam adatokat nyerni. Ez természetesen a mérési felületek redukálásával jár, hiszen a folyamat nem megállítható. Emiatt az ismétlések közt eltelt időt 5 percre, a mérési felületek számát 10-re csökkentettem. A 10 mérésből számított átlagértékek változása lucfenyő esetén, a 46. ábrán látható.



46. ábra Az S_a érdességi paraméter értékeinek változása lucfenyő felületen nedvesítés hatására

Ezt a mérési módszert használva a tizedik percnél (5 perc várakozás + 5 perc a mérésekhez szükséges idő) egy csúcs, majd lassú csökkenés látható az értékekben mindhárom fafaj esetén. Ez azt sugallta, hogy a mérés első tíz percében tovább növeljem az ismétlések számát, hogy a csúcs pontos helyét megkapjam. Ez azonban újra a felületek számának csökkentését jelenti. Ezért meghatároztam két mérési felületet melynek érdességét percenként visszamértem az első öt percben, majd ezt követően a 7. és a 10. percben. A 10. perc után az ötpercenként 10 mérés elvet követve haladtam tovább, mely 10 mérés természetesen tartalmazta azt az előzőleg kiválasztott két mérési felület is. Ilyen módon pontos információhoz jutottam két kis mérési felületen történő mozgásokról, illetve bár nagyobb időközönként, de a 10 mérési felület átlagából, egy nagyobb felületen bekövetkező változásokról is.



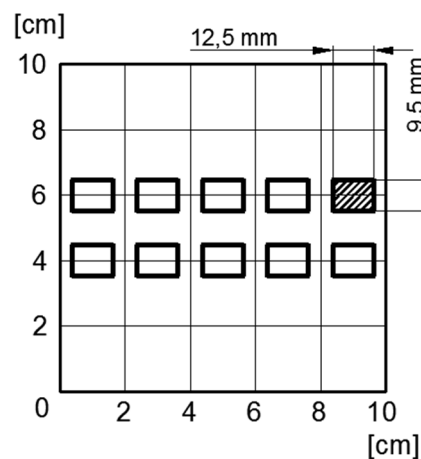
47. ábra Az S_a érdességi paraméter értékeinek változása bükk felületen nedvesítés hatására

Jól látszik, hogy az egyes mérési felületek értékei akár jelentősen eltérhetnek egymástól és így a 10 mérési felület értékeiből számított átlagértékektől is. Jelen esetben a mért 10 felületből sikerült pont a két legmagasabb kezdeti értékkel rendelkező felület mozgását kiválasztani és követni. Mivel a két kiválasztott mérési felület minden próbatestenen egy előre pontosan definiált pozíciójú felület volt, ezért teljesen véletlenszerűen alakult, hogy a kiválasztott felületek, a 10 mérés átlagából számolt felülethez képest milyen kezdeti paraméterekkel rendelkeznek. A változás azonban a kezdeti paraméterektől függetlenül ugyanolyan lefolyásúnak bizonyult és ez a megállapítás mindhárom vizsgált fafajnál igaznak bizonyult.

A próbamérések során az is nyilvánvalóvá vált, hogy egy óra eltelte után teljesen felesleges öt percnként ismételni a méréseket, hiszen az eredmények nem változnak jelentős mértékben. Ez különösen a 10 mérésből kapott felületek mozgására igaz, ezért egy óra eltelte után 20 perces ismétlést határoztam meg. Két óra eltelte után ezt az intervallumot is növeltem és csak egy óra múlva végeztem még egy kontrollmérést. Alátámasztva, hogy a felületeken ezután jelentős változás nem következik be, 24 óra és 1 hét eltelte után is visszamértem minden próbatestenen a vizsgált 10 mérési felület érdességét.

Ezen ismeretek birtokában a következő menetrend szerint végeztem el a méréseket:

Nedvesítés után eltelt idő (min)	Mérések száma (db)	Nedvesítés után eltelt idő (min)	Mérések száma (db)
Száraz	10	35	10
6	2	40	10
7	2	45	10
8	2	50	10
9	2	60	10
10	4	80	10
12	4	100	10
15	10	120	10
20	10	180	10
25	10	24 óra	10
30	10	1 hét	10



48. ábra A kialakult mérési menetrend és a mérési területek elhelyezkedése

A méréseket elvégezve a kiértékelő szoftver (ODSCAD 6.0) segítségével minden mért felületről 23 darab 3D-s érdességi paraméter értéke került meghatározásra. Az adatok kiértékelését szűrés nélkül hajtottam végre, mivel végmegmunkált felületeket vizsgáltam, illetve a rendelkezésre álló szűrési lehetőségek információvesztéshez vezethettek volna, míg az adatok összehasonlíthatósága így biztosított maradt. A szoftver által számolt értékek menthetők, így további feldolgozásuk és kiértékelésük lehetséges.

5.6 Tömegmérések

A vizsgált próbatetek felületi érdességének változásán kívül, az egyes mintatestek tömegének változása is regisztrálásra került. A próbatetek tömegének folyamatos mérésével ugyanis a felületre helyezett folyadék elpárolgásának sebességéről juthatunk fontos információkhoz. A folyamatos tömegméréseknek köszönhetően a próbatetekre juttatott folyadék mennyisége a vizsgálatok ideje alatt ismertté vált. Minden esetben a nedvesítés előtti értékek szolgáltak referencia értéknek, így az 1 ml desztillált víz, felületen történő eloszlata, a kezdeti tömegértékhez képest kb. 1 g tömegnövekedést eredményezett. A próbatetek tömegének rögzítésére az érdességméréshez kidolgozott mérési menetrendnek megfelelő időpontokban került sor, egy a mérőgép mellett elhelyezett MC1 LC 620 S típusú ezredgramm pontosságú mérleg segítségével. A tömegmérések maximum fél perc alatt elvégezhetők voltak, így az érdességvizsgálatok szempontjából ez nem járt jelentős idővesztéssel. A tömegvesztésből, azaz a nedvesség felületről történő elpárolgásából azonban további fontos következtetések vonhatók le.



49. ábra A tömegmérésekhez használt mérleg (Saját felvétel)

*„Sosem tudhatod, milyen eredményei lesznek a cselekedeteidnek,
de ha nem cselekszel, eredményük sem lesz.”
(Mahatma Gandhi)*

6. A kutatás eredményeinek ismertetése

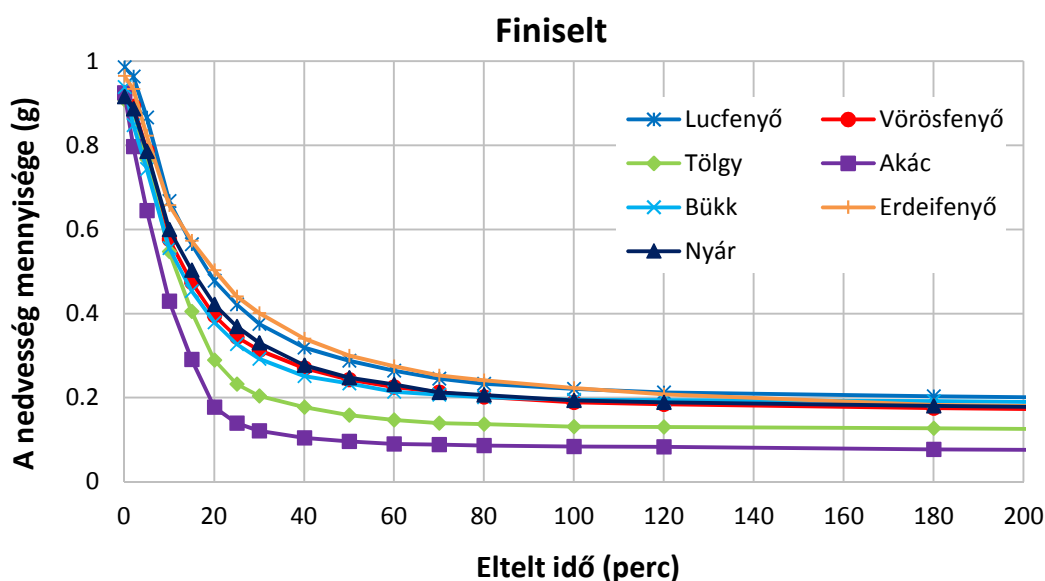
Ebben a fejezetben a kutatás főbb mérési eredményei kerülnek bemutatásra az egyes felületi érdesség paraméterek értékeinek változásán keresztül. Bizonyított tény, hogy a végmegmunkált felületek háromdimenziós vizsgálata esetén egyetlen érdességi paraméter még homogénebb fém felületek esetében sem ad átfogó leírást (Dong, W. P. et al. 1994) a felület minőségét illetően. Az egyes fafelületek pontos jellemzése tehát csak több paraméter együttes figyelembe vétele mellett lehetséges. Ma már számtalan érdességi paraméter létezik, amelyek különböző szempontok szerint jellemzik a felületeket. Az általam mért paraméterek közül részletes kiértékelésre azokat a választottam ki, melyek a felületváltozásokat a lehető legjobban jellemzik, ugyanakkor mutatják a változás irányát is. A mérések során nyert hatalmas mennyiségű adathalmaz feldolgozása során készült grafikonok, ábrák közül ebben a fejezetben csak a legfontosabbak kerülnek bemutatásra. A kevésbé sokatmondó, illetve ugyanazt a törvényszerűséget ábrázoló grafikonok a mellékletben találhatók meg.

Fontos megjegyezni, hogy a felületek stabilitását nem szabad egyértelműen pozitív vagy negatív tulajdonságként értékelni. Azt, hogy a magas felületi stabilitás előnyként vagy hátrányként kezelendő mindig az értékelés szempontja határozza meg. Nem feltétlenül igaz tehát, hogy a legstabilabb felület a legjobb, és a leginstabilabb a legrosszabb. Esztétikai szempontból a minimális felületi mozgás elérése a cél, hiszen nem szerencsés, ha egy szépen megmunkált fafelület nedvesség hatására jelentősen felszálkásodik, kibolyhosodik, és ezzel akár a termék használhatóságát befolyásolja. Amennyiben azonban a felület kialakítását követően további megmunkálási folyamatok következnek (ragasztás, felületkezelés) szerencsésebb, ha a felület kevésbé stabil, hiszen mind a ragasztási kötés kialakulása, mind a felületkezelő anyag felületen történő megtapadása sokkal hatékonyabb. A kutatási eredmények kiértékelését a mechanikai megmunkálás „jóságának” megítélése szempontjából végeztem. Ebből a szemszögből a megmunkáláskor a deformációs zóna mélységének, azaz a károsodott sejtsorok mélységének a minimalizálása, a minél stabilabb felület előállítása a cél. A következőkben a legstabilabb és leginstabilabb jelzők ezen ismeretek tükrében értelmezendők.

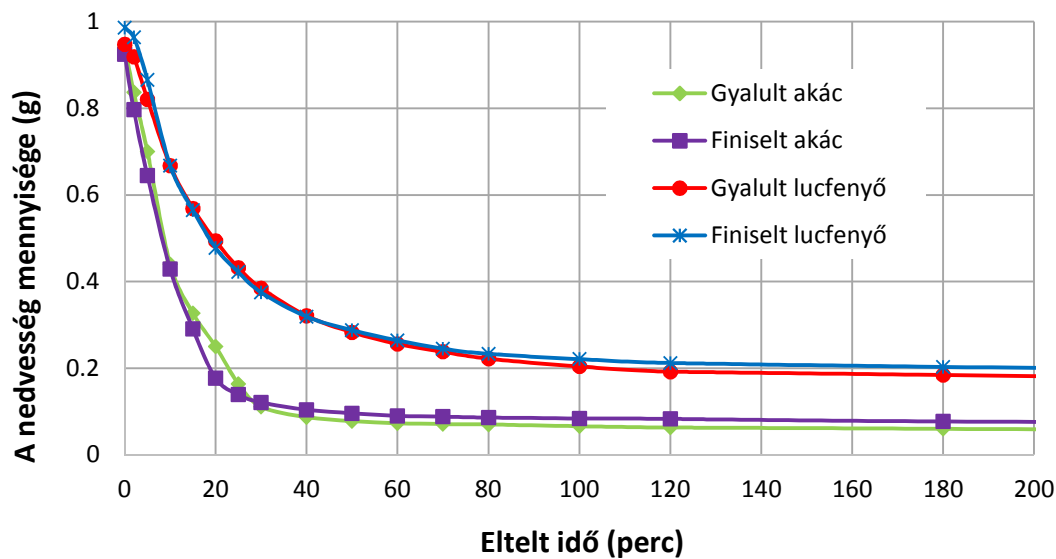
6.1 A nedvesség elpárolgása

A faanyagok felületére helyezett nedvesség egy része a nedvesítést követően a felület belseje felé kezd szivárogni, míg egy másik része azonnal elpárolog. A felületre helyezett folyadék elpárolgásának folyamata a próbatestek tömegének folyamatos regisztrálásával nyomon követhető. Az 5.5 fejezetben bemutatott mérési menetrendnek megfelelő időpontokban a 35 próbatest (7 fafaj, 5 megmunkálási eljárás) mindegyikének lemértem a tömegét, majd az eredményeket grafikonokon ábrázolva, kirajzolták az egyes fafajok illetve megmunkálási eljárások közti különbségek. A tömegmérések során a klimatikus viszonyok megegyeztek az 5.1 fejezetben ismertetett körülményekkel.

Az 50. ábrán az egyes fajok közti különbségek figyelhetők meg. A grafikonon a finiséssel kialakított próbatetek tömegcsökkenése látható, de a következő megállapítások a többi alkalmazott megmunkálási eljárásra is ugyanúgy igazak. A grafikonokon jól látszik, hogy a próbatetek tömege a nedvesítést követően hirtelen és jelentősen csökken, ami az idő múlásával egyre mérséklődik. Az egyes fajok eltérő szöveti szerkezete azonban hatással van a párolgás mértékére, melyet a grafikonok eltérő lefutása jelez. Leggyorsabban a gyűrűslikacsú tölgy és akác próbatetek veszítik el tömegtöbbletüket, majd a szórtlikacsú bükk és nyár, legvégül pedig a három vizsgált fenyő. Az 51. ábrán az akác és lucfenyő két megmunkálással kialakított felületeinek összehasonlítása látható. A nedvesítés utáni 20. percben az akác próbatest tömege már csak alig 0,2 g-mal nagyobb, mint nedvesítés előtt. Ugyanezen időpontban a lucfenyő minták még kb. 0,5 g vizet tartalmaztak, és majdnem 3 órának kellett eltelni ahhoz, hogy a próbatetekre helyezett folyadék mennyisége 0,2 g-ra csökkenjen. Ennek oka, hogy a nedvesség beszivárgásának mértékét a faanyag diffúziós tényezője szabja meg. Az egyes fajok diffúziós tényezője eltérő, mivel a tényező függ a pórusmérettől és a pórusok eloszlásától. A fenyők gyorsan beszívják a felületre helyezett nedvességet, emiatt lelassul a párolgás, hiszen a folyadéknak a faanyag belső rétegeiből újra vissza kell térni a felületre, hogy aztán el tudjon párologni. A gyűrűslikacsú fafajok (akác, tölgy) lassabban szívják be a nedvességet, így a felületre helyezett nedvesség gyorsabban el tud párologni a felületről. A gyors párolgás következtében kevesebb nedvesség diffundál a felületbe, mely csekélyebb felületmozgásra enged következtetni. A fenyők lassú tömegcsökkenése viszont azt jelzi, hogy több nedvesség szívárog a felületbe, ami jelentősebb felületmozgásokat okozhat.



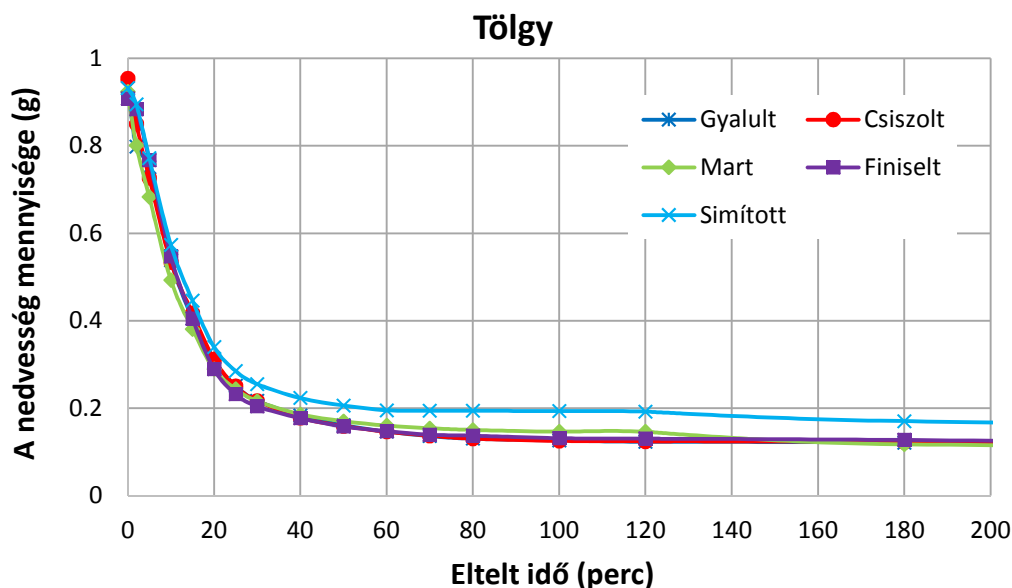
50. ábra A finiselt próbatetek tömegcsökkenése fajonként



51. ábra Gyalult és finiselt akác illetve lucfenyő próbatestek tömegcsökkenése

Három óra eltelte után a párolgás és az ebből adódó tömegcsökkenés mértéke már minden faj esetében rendkívül lassú, igaz a legtöbb minta még ekkor is jelentős mennyiségű folyadékot tartalmaz. A nedvességleadás csökkenésének oka, hogy egy felületről adott hőmérsékleten mindig az összefüggő víztükör párolog el a leggyorsabban. Ahogy megszűnik az összefüggő víztükör a felületen, a párolgás sebességét a fellépő molekuláris erők lelassítják. Bár a grafikonokon már nem látható, de a próbatestek a tömege 3 óra eltelte után is folyamatosan csökkent, azonban eredeti tömegüket teljes mértékben még hetekkel később sem nyerték vissza. Ennek oka a hiszterézis jelensége.

Az egyes megmunkálásokat vizsgálva nem állapíthatók meg olyan egyértelmű törvényszerűségek, mint a fafajok között. A felületet kialakításakor alkalmazott megmunkálási eljárásnak tehát kevésbé jelentős a befolyása a nedvesség beszivárgására és párolgására. Szembetűnő ugyanakkor, hogy a vizsgált lombos fafajok termikus simítás utáni felülete minden esetben a tovább tartotta a nedvességet. Ez a kijelentés fenyők esetén viszont már nem helytálló. A többi megmunkálással kialakított felületek fafajonként szinte ugyanolyan sebességgel adják le a nedvességet. A gyűrűslikacsú gyorsabban, a fenyők lassabban.



52. ábra A tölgy próbatestek tömegcsökkenése megmunkálásonként

A kapott eredményeket a következő táblázatban foglaltam össze:

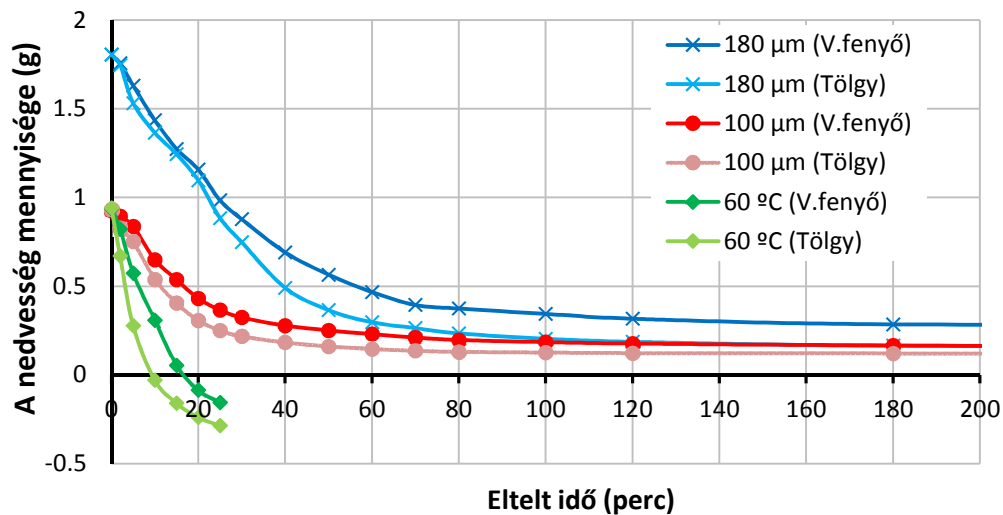
	Felezési idő (perc)	ΔG 60 perc (g)
Lucfenyő	16 - 18	0.22 - 0.26
Vörösfenyő	15 - 17	0.2 - 0.23
Erdeifenyő	15 - 18	0.21 - 0.26
Akác	8 - 10	0.09 - 0.1
Tölgy	10 - 11	0.15 - 0.18
Bükk	11 - 15	0.2 - 0.22
Nyár	16 - 18	0.2 - 0.22

3. táblázat A tömegmérésből kapott eredmények fafajonként

A táblázat középső oszlopában található időpontok a felületre helyezett összes nedvesség (1 g) felének (0,5 g) elpárolgásához szükséges időt mutatják. Míg az akác próbatestek felületéről – megmunkálástól függően – 8 - 10 perc alatt elpárolgott 0,5 g nedvesség, addig ugyanehhez lucfenyőnél 16 - 18 percre volt szükség. A táblázat utolsó oszlopa pedig azokat az értékeket tartalmazza, hogy 1 óra eltelte után mennyi nedvességet tartalmaztak még a próbatestek. Itt is kirajzolódnak a jelentős különbségek a gyűrűslikacsú lombosok és a fenyők között. Érdekes, hogy a tölgy próbatestek felezési ideje csaknem megegyezik az akácéval, ezt követően viszont az akáchoz képest lelassul a párolgás, hiszen 1 óra eltelte után még jelentősen több nedvességet tartalmaztak a tölgy próbatestek.

Bár a mérések során minden felületre egységesen 1 ml desztillált vizet juttattam, megvizsgáltam azt is, miként reagálnak a felületek ettől eltérő vízmennyiség illetve hirtelen szárítás esetén. A nedvesítés hatására bekövetkező felületi deformáció mértéke ugyanis a megmunkált anyag tulajdonságain és az alkalmazott megmunkálási eljáráson

kívül a felületre helyezett folyadék mennyiségétől és a párolgás sebességétől is függ. Gyalult vörösfenyő és tölgy minták felületére 100 μm helyett 180 μm folyadékréteget juttatva követtem a próbatetek tömegének változását. A nagyobb mennyiségű folyadék a felület mélyebb rétegeibe is képes beszivárogni, ezáltal növeli a felszín deformációját. Az eredmények itt is alátámasztják azt a korábbi állítást miszerint, a fenyők felületéről lassabban párolog a nedvesség. Míg tölgy esetén 40 perc után már csak 0,5 g vizet tartalmazott a próbatest, vörösfenyőnél csaknem 0,7 g-ot. Ahhoz, hogy a vörösfenyő próbatest is 0,5 g nedvességtöbbletig száradjon további 20 perc, azaz összesen 60 perc szükséges.



53. ábra A tölgy és vörösfenyő próbatetek tömegcsökkenése gyors szárítás és extrém nedvesítés után

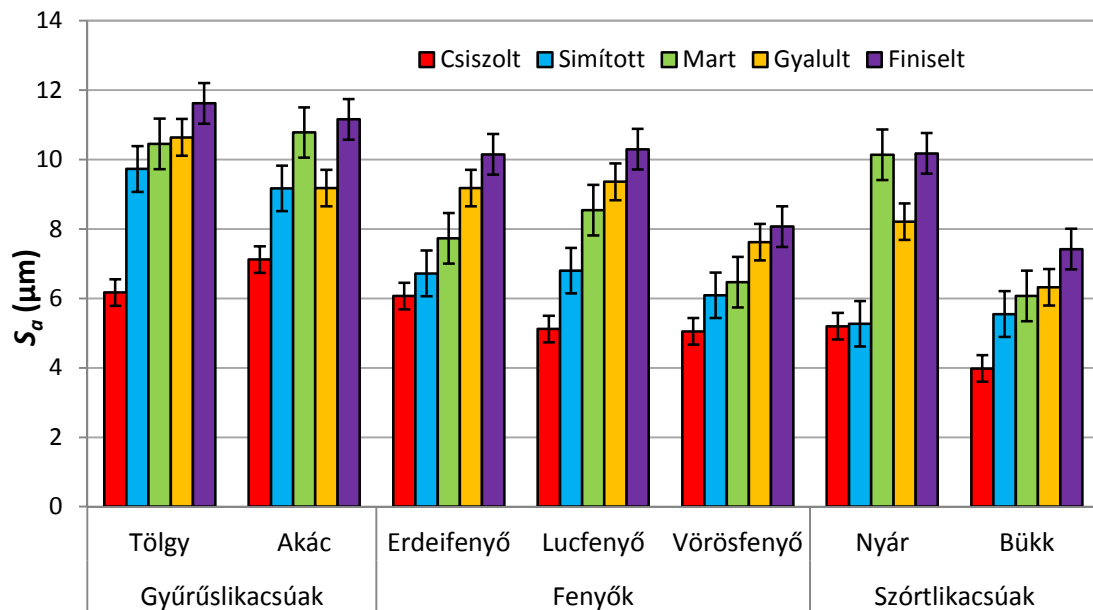
Ezt követően ugyanezen két fafajból készült próbatesteken újra 100 μm -es nedvesítést alkalmaztam és egy egyszerű hajszárítóval gyors szárításnak vettem alá őket. A hajszárítóból kiáramló, azaz a szárító levegő hőmérséklete 60 °C volt. A magas hőmérsékletnek köszönhetően a felületre helyezett nedvesség sokkal gyorsabban elpárolgott, sőt egy idő után a próbatetek tömege már kevesebb lett, mint nedvesítés előtt (53. ábra), ezért 25 perc után nem folytattam a szárítást. A negatív elpárolgott mennyiség a faanyag 23 és 60 °C-os egyensúlyi nedvességtartalma közötti különbség hatására elpárolgott mennyiséget jelzi. Ez a kísérlet is az előzőekhez hasonló eredménnyel zárult, azaz a tölgy próbatest gyorsabban száradt, mint a vörösfenyő. A gyors párolgás megakadályozza a folyadék mélyebb rétegekbe szivárgását, ezáltal mérsékli a felületi réteg deformációját.

6.2 A nedvesítés hatása a felületi érdességre

6.2.1 Megmunkálás utáni érdességi paraméterek

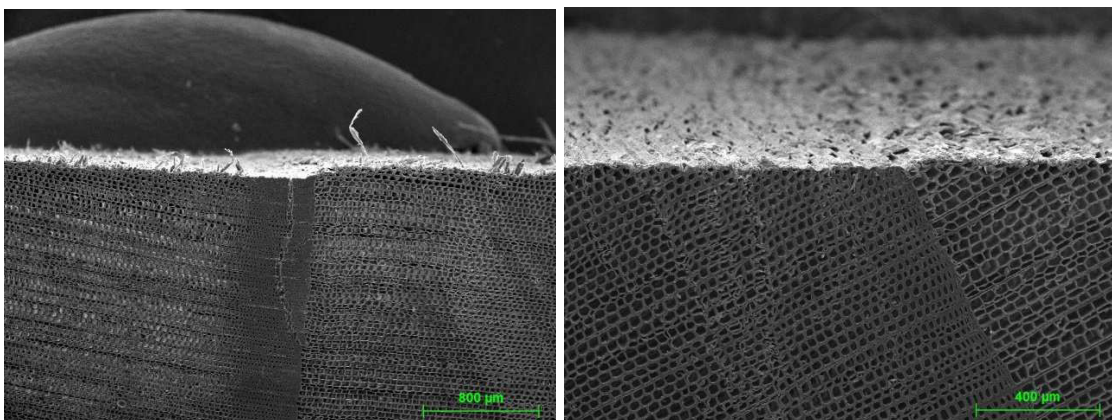
Az elkészült próbatetek mindegyikén a megmunkálást követően, de a nedvesítését még megelőzően rögzítésre került a 10 mérési felület érdessége. A későbbiekben ezek az adatok szolgálnak referencia vagy kiindulási értéként, ezenkívül jól szemléltetik az egyes fafajok és megmunkálások közti eltéréseket a felületek érdességét illetően. A

leggyakrabban használt paraméterek egyike az S_a átlagos egyenetlenség paraméter, mely a felületek általános jellemzését teszi lehetővé.



54. ábra A megmunkálás utáni felületeken mért átlagos felületi érdesség (S_a) paraméter értékei fafajonként

Az 54. ábrán láthatók mind a 35 vizsgált próbatest kezdeti, megmunkálás utáni felületén mért, 10 mérési felületből származó S_a paramétereinek átlag illetve szórásértékei. Minden fafajnál megfigyelhető, hogy a csiszolás után kapott felületek rendelkeznek a legalacsonyabb értékekkel. Ez nagymértékben a megmunkálás során keletkező csiszolatpornak köszönhető, hiszen a felületen található nyitott edényekbe beleülve eltömíti azokat, ezáltal jelentősen redukálja az anatómiai okozta érdességet. A mért felületről így eltűnnek a mély edények, ami az érdességi paraméterek csökkenéséhez vezet. A csiszolt felületeket a termikusan simított felületek követik. A megmunkálási eljárás során alkalmazott magas hőmérséklet hatására a felületek hirtelen fellágyulnak. Ezzel egyidejűleg a felületből kiálló apró rostokat a szerszám visszasimítja a felület síkjába, ahol a lehűlést követően fixálódnak.

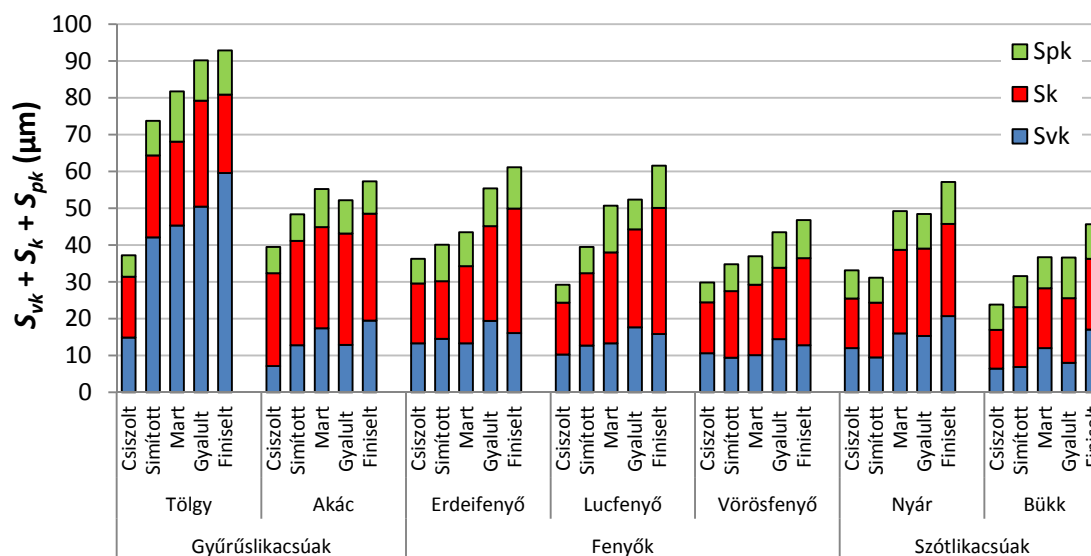


55. ábra Csizsolt és termikusan simított lucfenyő felületek (Saját felvétel)

Az így kialakuló fafelületek ezáltal homogénebbek lesznek, mint a gyalult vagy mart felületek. A gyalult és mart fafelületeken mért magasabb érdességi paraméterek legfőbb oka, a megmunkálás során a felületen kialakuló ciklois ívekből, azaz a megmunkálási érdességből adódik. A legmagasabb értékek finiselt felületek után mérhetők. Ennek oka, hogy a megmunkálás során a felület nyitott edényeit nem tömíti el forgács vagy por, illetve a forgácsoláskor fellépő felületre ható erők is jóval csekélyebbek. Ezáltal a felületen elhelyezkedő sejtsorok kevésbé tömörödnek, mint gyalulásnál vagy marásnál. A magas értékek oka tehát az anatómiai érdesség erős befolyásoló hatásának köszönhető.

A vizsgált fafajokat tekintve is jelentős különbségek figyelhetők meg. Jól látszik, hogy a gyűrűslikacsú tölgy és akác fafajok minden megmunkálást figyelembe véve magasabb érdességi paraméter értékeket szolgáltatnak. A három vizsgált fenyő közt jelentős különbségek nem figyelhetők meg, viszont a kapott értékek alapján a vörösfenyő homogénebbnek tűnik, mint a luc- és erdeifenyő. A legalacsonyabb érdességi értékek a bükk próbatestek felületén mérhetők.

Az S_a paraméter értékeiben tapasztalható különbségek az egyes fafajok közt egyértelműen azok anatómiai felépítésével magyarázható. Ezt bizonyítják az anyagtartalom görbéből származó S_{pk} , S_k , S_{vk} érdességi paraméterek értékei is.



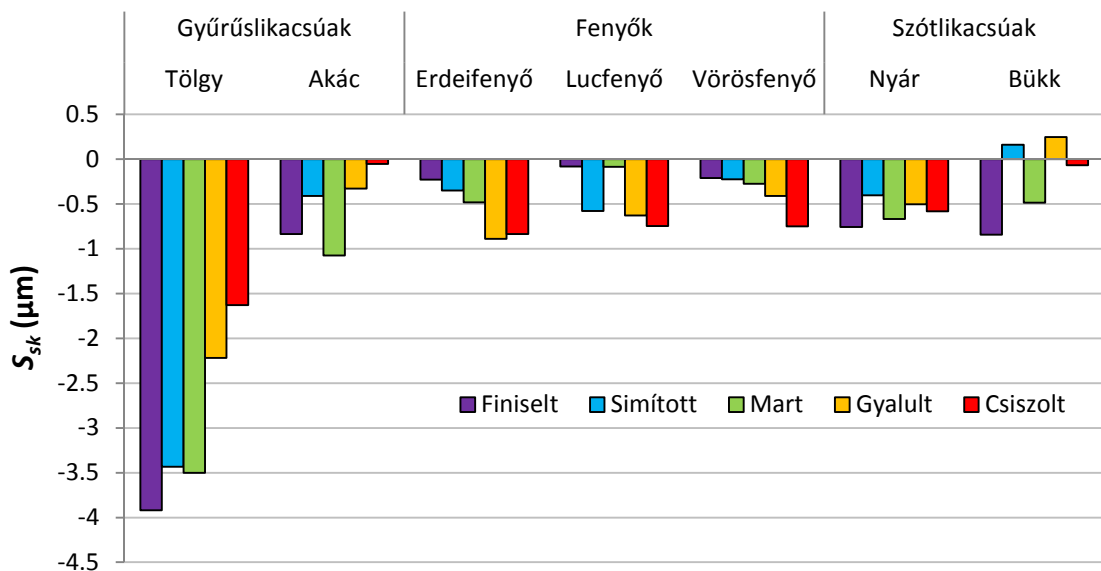
56. ábra A megmunkálás utáni felületeken mért S_{vk} , S_k és S_{pk} paraméterek értékei fafajonként

Az S_{vk} , azaz a redukált völgymélység paraméter nagyedényes fafajoknál jelentősen magasabb értékeket mutat. A paraméter legjobban tölgy fafajnál mutatja a csiszolás következtében bekövetkező edényeltömődést, ami bár jóval csekélyebb mértékben, de az összes többi fafajnál is megfigyelhető. Míg az S_{vk} paraméter értékeiben a fafajokat tekintve jelentős különbségek tapasztalhatók, addig az S_{pk} paraméter értékeit megvizsgálva, számottevő eltérés nem figyelhető meg, sem az egyes fafajok, sem a megmunkálási eljárások közt. Ez a megmunkálási érdesség jóságára enged következtetni, azaz a felületeken található csúcsok (rostok) befolyásoló hatása jóval csekélyebb, mint a felületet tarkító völgyek (edények) mértéke.

Az edények befolyásoló hatásának egy másik jó indikátora az S_{sk} , azaz a ferdeség érdességi paraméter. Az 57. ábráról rögtön szembetűnik, hogy a paraméter értéke két kivételtől eltekintve negatív. A paraméter jelentéséből következik, hogy negatív értékek esetén a vizsgált felületeken a völgyek jelenléte hangsúlyos. A két kivétel mindegyike bükk fafajnál adódott (simított, gyalult) és csiszolás után is csak kevéssel nyúlik negatív

tartományba. Ha megnézzük az előző ábrát, látható, hogy ezekben az esetekben az S_{pk} értékek magasabbak, mint az S_{vk} értékek. Ez annyit jelent, hogy a felületen található rostok és egyéb megmunkálásból származó csúcsok mértéke jelentősebb, mint az anatómia okozta völgyeké.

Érdekes továbbá, hogy a gyűrűslikacsú akác fafajnál mért S_{sk} értékek sokkal inkább a fenyők és szórtlikacsú lombosok értékeihez vannak közelebb, mint a tölgyhöz, holott az átlagos érdességi értékeket (S_a) nézve, egyértelműen magasabb érdességgel rendelkezik, mint a fenyők és szórtlikacsú lombosok. Ez csak úgy lehetséges, hogy a felületeken elhelyezkedő csúcsok és völgyek mértéke közel azonos. Ha az S_{vk} és S_{pk} paramétereket megfigyeljük (56. ábra), jól látszik, hogy tölgnél hatalmas a különbség az értékek közt, míg a többi fafajnál, köztük az akácnál, jelentősen kisebb. A kisebb eltérés az S_{vk} paraméter alacsonyabb értékeiből adódik. Annak ellenére tehát, hogy az akác a gyűrűslikacsú, azaz nagyedényes fajok közé tartozik, ez nem tükröződik az S_{vk} érdességi paraméterben. Ennek oka, az akác faanyagban erőteljesen jelen lévő anyag, a tillisz, amely a gesztesedési folyamat során az edényekben lerakódva eltömíti azokat, így redukálva az S_{vk} paramétert. Ennek következtében az S_{sk} ferdeség paraméter sem mutat a tölgyhöz hasonló értékeket.



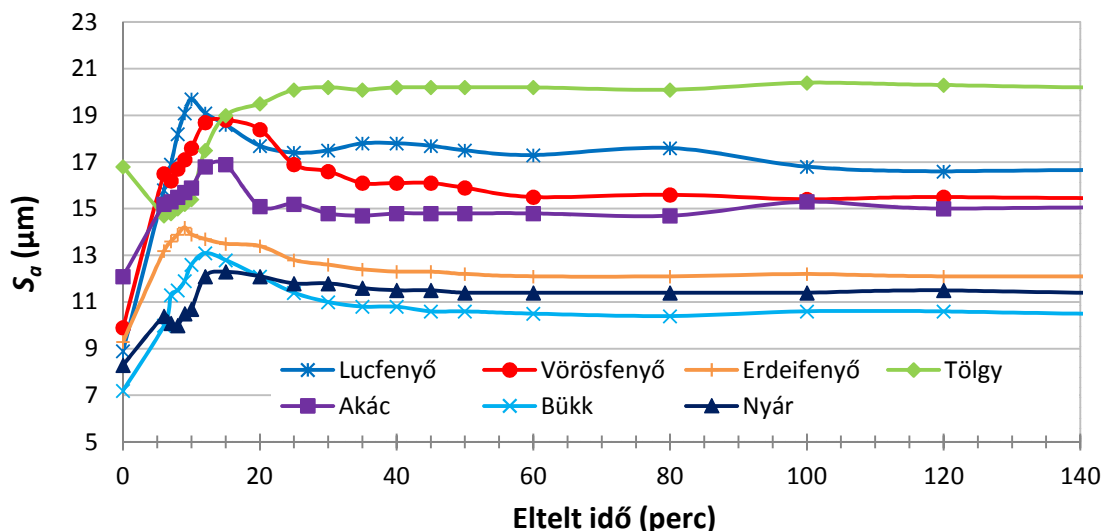
57. ábra A megmunkálás utáni felületeken mért S_{sk} paraméter értékei fafajonként

Összességében megállapítható, hogy a felületek megmunkálásakor alkalmazott forgácsolási paraméterek megválasztása mind az öt alkalmazott megmunkálási eljárás során sikeresen szolgálta azt a célt, hogy a megmunkálásból származó érdesség a lehető legminimálisabb legyen. Az egyes fajok anatómiai felépítéséből adódó felületi egyenetlenségeket hűen tükrözik a kapott érdességi paraméterek. Ebből következően illetve az elektronmikroszkópos felvételek alapján kijelenthető, hogy a felületeken kialakult deformációs zóna mélysége a legminimálisabb volt, amit az adott eljárással elérni lehetett.

6.2.2 Nedvesítés hatása az érdességi paraméterek változására

6.2.2.1 Átlagos egyenetlenség (S_a)

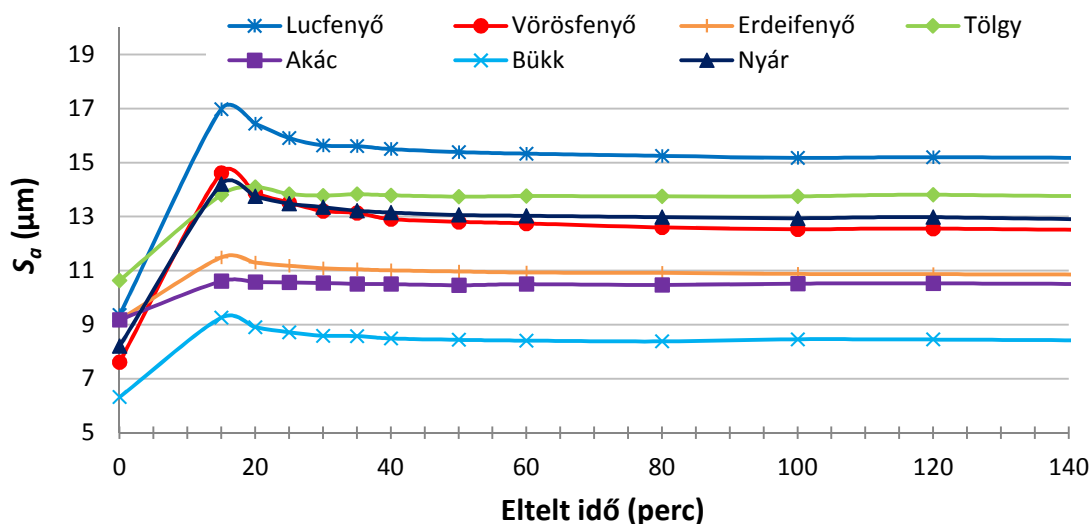
A nedvesítést követően a felületek mozgása az érdességi paraméterek értékeinek változásán keresztül követhető. A kezelés hatására bekövetkező változások jellegüket tekintve minden fafaj és megmunkálási eljárás esetén azonosak, különbség csak a felületi mozgás mértékében figyelhető meg. Az 58. ábrán a 7 gyalult felületen figyelhetjük meg nedvesítést követően az S_a paraméter értékeinek változását. A grafikon értékei fafajonként egyetlen mérési felület mozgásából származnak.



58. ábra Nedvesítést követően az S_a paraméter értékeinek változása fafajonként, 1 mérési felületen, gyalulást követően

Jól látszik, hogy az első fél órában minden fafajnál jelentős az értékek ingadozása, ezt követően viszont már csak lassú, csekély mértékű változás tapasztalható. Érdekes, hogy tölgy fafajnál a kezdeti referenciaértékhez viszonyítva a nedvesítés után az S_a felületi érdesség paraméter értékeinek csökkenése figyelhető meg, ami arra utal, hogy a felület kevésbé érdessé vált. Ennek oka szintén az anatómiai felépítésre vezethető vissza, ugyanis a felület dagadása során a nagyméretű nyitott edények elzáródnak. A felületen bekövetkező szálfelhúzódnás mértéke elmarad az edények dagadásából adódó felületkiegyenlítődés mértékétől, ezért a felület homogénebbnek tűnik. Ahogy egyre mélyebbre szívárog, illetve elpárolog a folyadék, a felület zsugorodni kezd, az edények újra nyitottá válnak, ezért a felület érdessége növekszik. A többi fafaj felületén ugyanez a jelenség játszódik le, annyi különbséggel hogy, a kezdeti értékekhez viszonyítva, az amúgy is kis átmérőjű edények elzáródása nem éri el a szálfelhúzódnás mértékét, így a felületek érdesebbnek mutatkoznak. Az is jól látszik, hogy fafajonként eltérő időpontban éri el a felületek érdessége a maximumot, illetve az is, hogy a kezdeti értékek sorrendje nem követi a maximum értékek sorrendjét, azaz egyes fafajok eltérő módon reagálnak a nedvesítésre. A legnagyobb változás lucfenyő esetén mutatkozik, a legcsekélyebb pedig talán a nyárnál.

Ahhoz azonban, hogy bővebb következtetéseket lehessen levonni, nem elégséges egyetlen mérési felület eredményeit értékelni. A kidolgozott mérési eljárásnak köszönhetően lehetőség van 10 mérési felületről nyert eredmények értékelésére is.



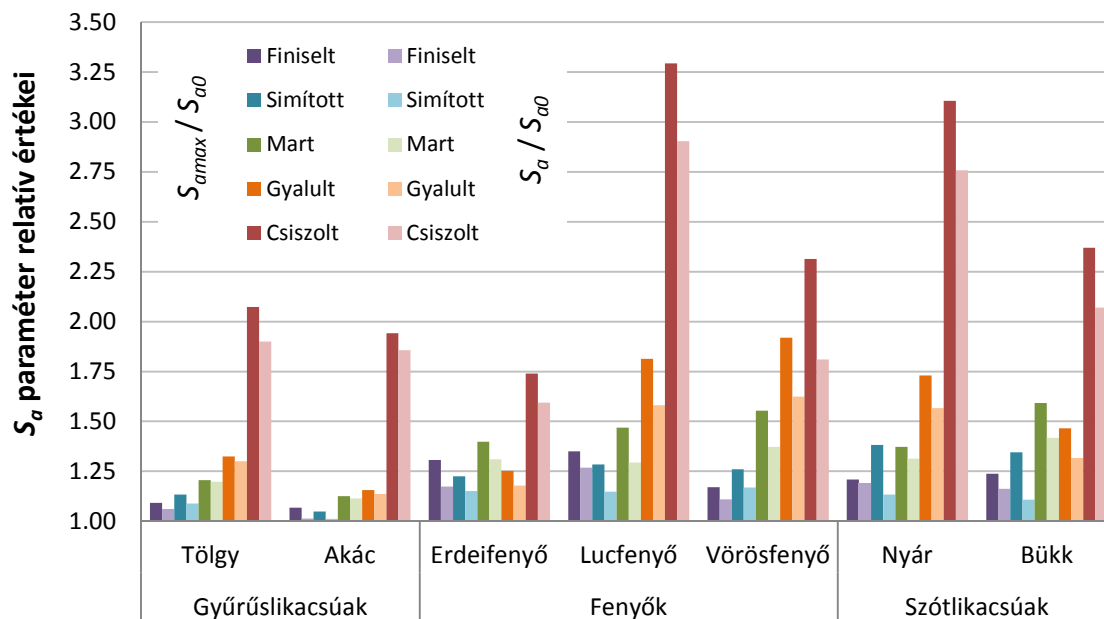
59. ábra Nedvesítést követően az S_a paraméter értékeinek változása fafajonként, 10 mérési felületen, gyalulást követően

Azonnal szembetűnik, hogy a grafikonok lefutása jóval rendezettebb, kevésbé ingadozó. Ez várható volt, hiszen az adatok egy jóval nagyobb terület információit hordozzák, így kevésbé jelentkeznek az egyes mérési felületek egyedi vonásai. Az első fél órában, mikor a mozgás a legaktívabbnak bizonyult, a 10 mérési felületről próbatestenként csak négy adat áll rendelkezésre. Az egyes felületek stabilitása közti különbség azonban így is tökéletesen kirajzolódik. Az egy mérési felület eredményeit tartalmazó grafikonokkal szemben a 10 mérési felület adataiból kapott grafikonok minden fafajnál a 15. percben érik el maximum értéküket, így az egyes fafajok esetén a csúcsok pontos helyének megállapítása nem lehetséges. Az egy mérési felületről származó eredményekből azonban látszik, hogy a maximumértéket a nedvesítést követő 10. és 15. perc közötti időintervallumban minden fafaj eléri, tehát jó közelítéssel átlagosan a 15. perc értékei tekinthetők a felületi mozgás maximumának.

A 10 mérési felületről származó adatok alapján a legnagyobb változás szintén lucfenyőnél, a legcsekélyebb azonban az előzőekkel ellentétben akácnál adódott. Ebből is látszik, hogy a pontos értékeléshez minél nagyobb felület mozgásának a regisztrálása szükséges, hiszen a véletlenszerűen kiválasztott mérési felületek meglehetősen eltérő viselkedést mutatnak.

Egyes fafajok felültén a mérhető átlagos felületi érdesség csaknem a duplájára emelkedik a nedvesítés után (pl. lucfenyő), míg más fafajok felületén alig figyelhető meg változás (pl. akác). Ebből látszik, hogy ugyanolyan feltételek biztosítása ellenére az egyes fafajok felületének stabilitása jelentősen eltér egymástól. Viszont nemcsak a maximum értékek térnek el jelentősen a kezdeti értékektől, hanem a már nyugalomban lévő felületek érdessége is. A nedvesített felületek tehát a száradást követően nem nyerik vissza eredeti formájukat, ami a maradandó alakváltozásoknak köszönhető. Természetesen ezek mértéke is fafajonként eltérő.

Az egyes felületeken bekövetkező mozgások, azaz a felületek stabilitásának összehasonlíthatósága érdekében az S_a érdességi paraméter maximum (S_{amax}) és kezdeti (S_{a0}), nedvesítés előtti értékeinek hányadosából képeztem egy dimenzió nélküli viszonyszámot. Annak kiderítésére, hogy a képzett hányados értékei hogyan alakulnak a mozgások lecsillapodását követően, képeztem az 1 nap eltelté után kapott (S_a) értékek és a kezdeti értékek (S_{a0}) hányadosát is. A vizsgált 35 felületen a hányadosértékek alakulása a 60. ábrán figyelhető meg.

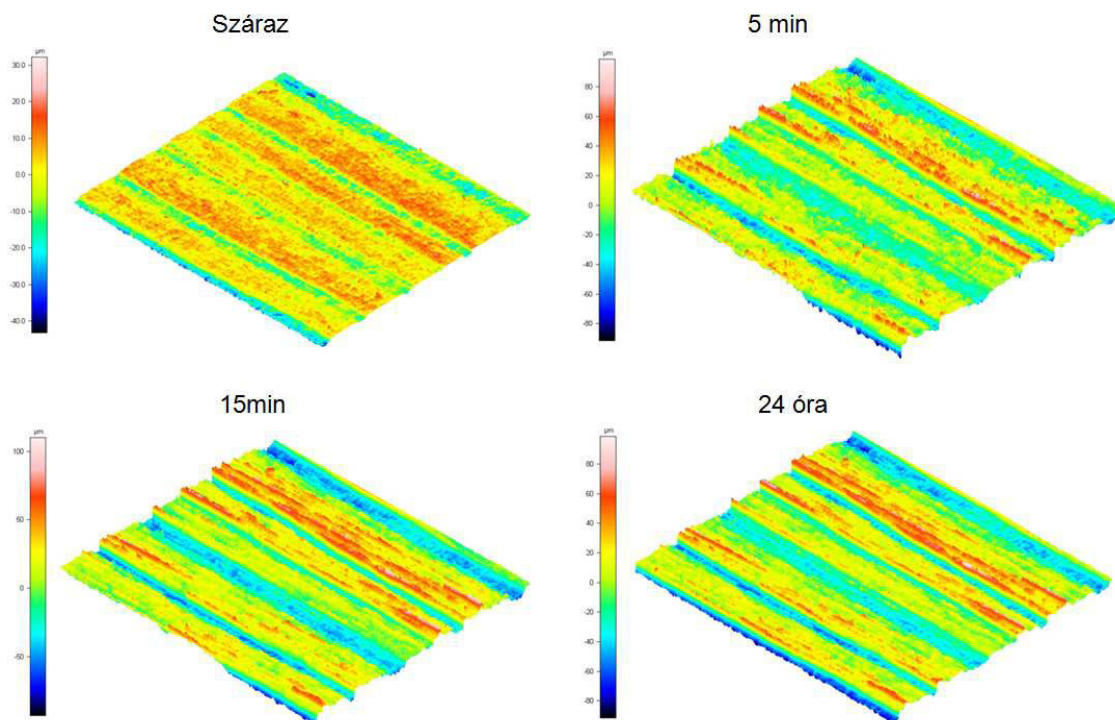


60. ábra A felületi stabilitás jellemzésére az S_a paraméterből képzett viszonyszámok fafajonként és megmunkálásonként

Mint korábban láttuk, a megmunkálásokat követően minden fafaj esetén a csiszolt felületek rendelkeztek a legalacsonyabb átlagos érdességgel. A kapott hányadosértékek viszont csiszolt felületek esetén a legmagasabbnak mutatkoznak, azaz ezeknél a felületeknél a legjelentősebb a maximum és kezdeti értékek közti különbség. A csiszolás után kialakult fafelületek tehát a kezdeti alacsony érdességük ellenére rendkívül instabilnak bizonyultak. A legmagasabb kezdeti értékekkel rendelkező finiselt felületek viszont a legstabilabbak, hiszen a kapott hányadosértékek itt a legalacsonyabbak. A finiselt és termikusan simított fafelületek hányadosértékei közt az egyes fafajokat tekintve jelentős eltérés nem tapasztalható, azaz stabilitásuk hasonló. A gyalult és mart felületek minden fafajnál a termikusan simított és csiszolt felületek között helyezkednek el. Az 1 nap eltelte után mért és a kezdeti értékek hányadosértékei, minden esetben alacsonyabbak, mint a maximum és kezdeti értékek hányadosai. Ez mutatja, hogy nedvesség beszivárgását és elpárologását követően a felületek eredeti alakjuk visszanyerésére törekednek, de a maradandó alakváltozások fellépésének köszönhetően ez nem valósulhat meg.

Az egyes fafajok stabilitása közt is jelentősek a különbségek. A legstabilabbnak a legnagyobb kezdeti érdességgel rendelkező gyűrűslikacsúak (tölgy, akác) bizonyultak. Az akác felületeken különösen csekély mértékű mozgás regisztrálható. A fenyők és szórtlikacsú lombosok felületének mozgása viszont minden megmunkálást tekintve jelentősebb. Érdekes megfigyelni, hogy a finiselt és simított akác felületek maximum és kezdeti S_a paraméteréből képzett hányados értéke, alig magasabb, mint egy, száradás után pedig szinte megegyezik a kiinduló értékkel. Ez annyit jelent, hogy a nedvesítést követően a paraméter értéke csak nagyon kis mértékben emelkedett, azaz a felület roppant stabilnak mutatkozott. A csiszolt lucfenyő és nyár felületeken mért S_a érdességi paraméter értékei viszont nedvesítés után több, mint háromszorosára emelkednek, és száradás után is alig maradnak el ettől az értéktől. Ez a felület struktúrájának teljes átrendeződését jelenti.

A különböző időpontokban felvett magasságkülönbség-képeken is jól láthatók az egyes felületeken nedvesítés hatására bekövetkező változások. A 61. ábrán a csiszolt lucfenyő egy mérési felületének változása követhető 4 jellegzetes időpontban.



61. ábra Csiszolt lucfenyő egy mérési felületének változása nedvesítéskor

A kezdeti egyenletes felülethez képest, a nedvesítést követő 5. percben a szárfelhúzó hatás következtében, már jelentősen átalakul a felület topográfiája. A 15. percben, ahol az S_a érdességi paraméter eléri a maximális értékét, a felület még barázdáltabb és egyenetlenebb. Egy nap elteltével aztán, a felületi mozgások megszűnése után látszik, hogy a felület valamelyest homogénebb, mint a nedvesítés után 15 perccel, de jelentősen eltér a kezdeti, nedvesítés előtti felülettől.

6.2.2.2 Az anyagtartalom görbe paramétere (S_{pk} , S_k , S_{vk})

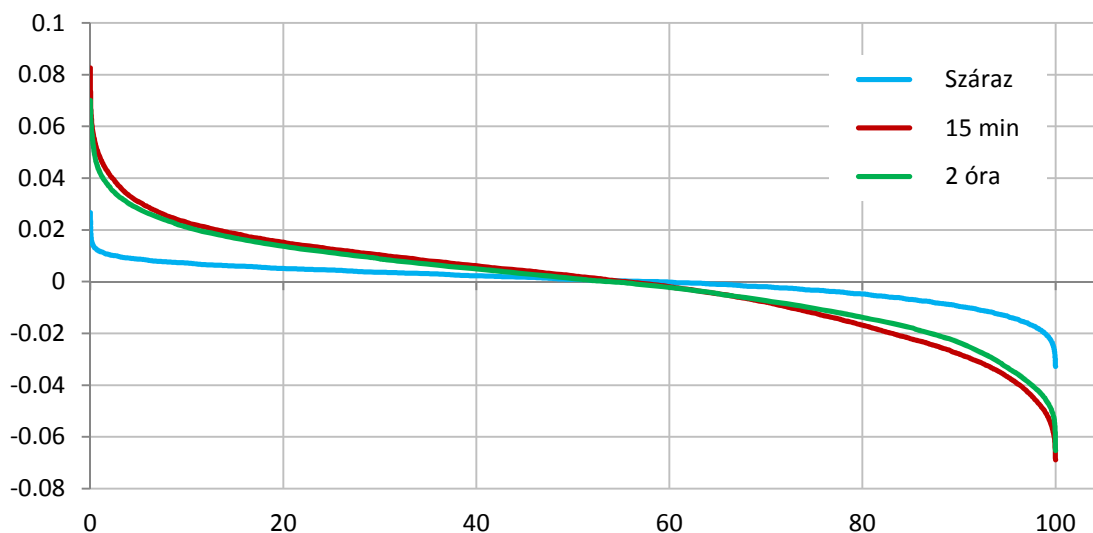
Az anyagtartalom, vagy más néven Abbott-görbe alakjának és belőle származtatott paramétereknek a változása szintén számos információt hordoz a nedvesítés után bekövetkező felületmozgásokról.

Az anyagtartalom görbe (3.2.4 fejezet) az anyag és az anyaghiány érdességi profilon belüli viszonyát fejezi ki. Teljesen ideális esetben a görbe egy vízszintes egyenes lenne. Ilyen felület azonban csak elméletben létezik, hiszen még teljesen homogén anyag esetén sem lehetséges olyan felület kialakítása, amely teljesen sík. A különböző módon kialakított felületek tehát kisebb nagyobb mértékben eltérnek ettől az ideális felülettől, ennek köszönhetően az Abbott-görbe mindig egy „S” alakú görbe. Minél homogénebb egy felület a görbe annál jobban közelíti az elméleti vízszintes vonalat. A felületeket barázdáló csúcsok és völgyek mennyisége és mérete szabja meg, hogy a görbe mennyire tér el az ideális esettől.

Az S_a paraméternél tapasztaltak szerint a csiszolt lucfenyő felület mutatta a legjelentősebb és simított akác a legcsekélyebb mértékű mozgást. A jó szemléltethetőség miatt ezen két felület egy-egy mérési felületén mutatom be az anyagtartalom görbe alakjában nedvesítés hatására bekövetkező változásokat. A nedvesítés előtti felületekről származó görbék alakja (62. és 63. ábra kék vonal) hűen tükrözi a két felület közti

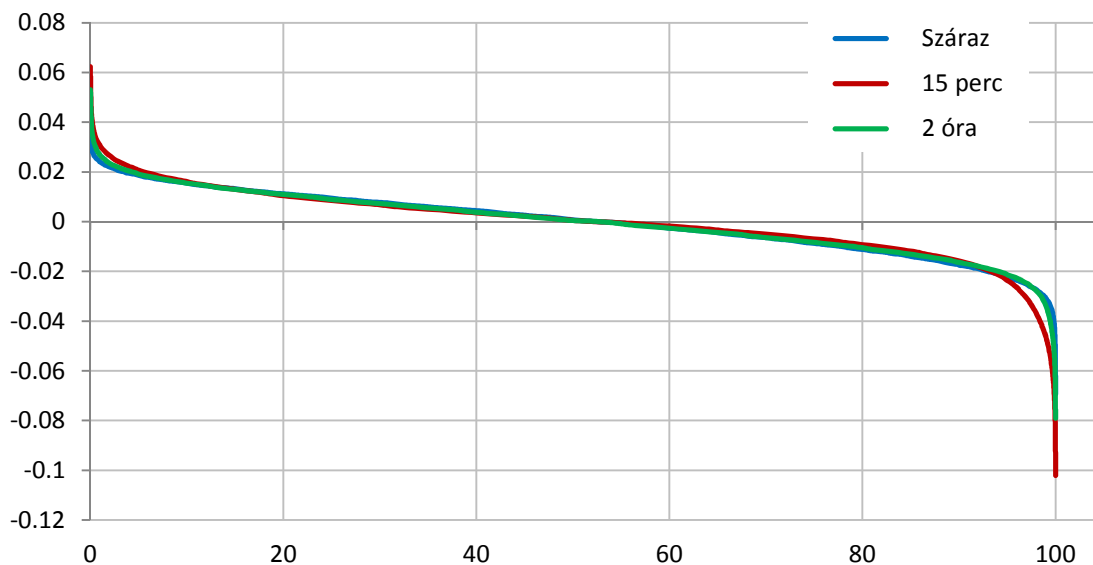
különbségeket. Míg a csiszolt lucfenyő görbéje csak apró felületi csúcsokat és völgyeket jelez, addig a simított akác görbéje jelentősebb mennyiségű és mélyebb völgyet. 15 perccel a nedvesítés után (piros vonal) a lucfenyő görbéje jóval nyújtottabbá válik, mely már egy erősen barázdált felületet jelez. Száradást követően (zöld vonal) látszik, hogy a felület kissé homogenizálódik, de még ekkor is jelentősen eltér a kiinduló állapottól. A simított akác felületen ugyanez a mozgás megfigyelhető, csak kisebb mértékben. Nedvesítés után a görbe itt is nyújtottabb lesz, majd száradás után szinte teljesen elfedi a kiinduló állapot görbáját. A felület tehát majdnem tökéletesen visszatér eredeti állapotába, ami egy rendkívül stabil felületet jelent.

Csiszolt lucfenyő



62. ábra Nedvesítést követően az anyagtartalom görbe alakjának változása csiszolt lucfenyő egy mérési felületén

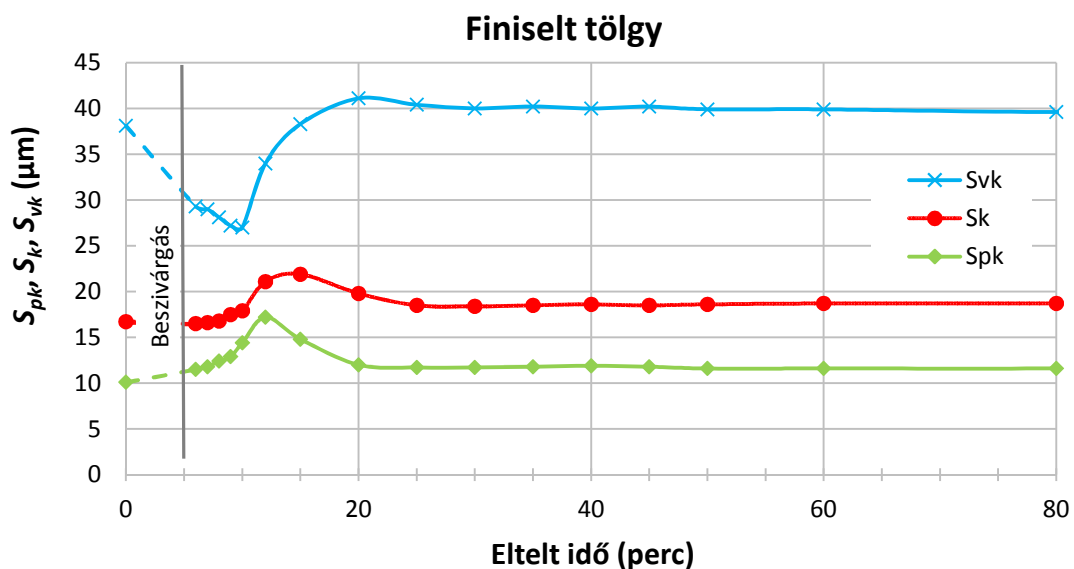
Simított akác



63. ábra Nedvesítést követően az anyagtartalom görbe alakjának változása simított akác egy mérési felületén

Az Abbott-görbékéből számolt érdességi paraméterek (S_{pk} , S_k , S_{vk}) is számos érdekes információt tartalmaznak a nedvesítés hatásáról. Míg az S_{pk} paraméter a felületen elhelyezkedő csúcsok, az S_{vk} paraméter a felületen elhelyezkedő völgyek mennyiségét és méretét jellemzi, addig az S_k paraméter a magprofil méretéről nyújt információt. Természetesen minden paraméter értékeinek változása ugyanúgy végigkövethető egyetlen mérési felületen, és a 10 mérési felületen egyaránt.

A 64. ábrán a finiselt tölgy felület egy mérési felületről kapott eredmények láthatók, amely jól mutatja a nedvesítés hatására bekövetkező változásokat a nagyedényes fafajok felületén. 5 perccel a nedvesítés után már mindhárom paraméter értékei (S_{pk} , S_k , S_{vk}) jelentősen eltérnek a kiinduló értékektől, tehát már a nedvesség beszívargásának ideje alatt is nagymértékben átalakul a felületek topográfiája. Az S_{pk} és S_k értékek növekedtek a beszívargás ideje alatt, míg az S_{vk} értékek gyorsan csökkentek. Ezek a változások tökéletesen mutatják a nedvesítés hatására a felületeken lejátszódó folyamatokat. Az S_{pk} és S_k értékeinek növekedése a szálfelhúzódság jelenségének eredménye, az S_{vk} értékeinek csökkenése pedig a felület megduzzadása következtében a felületen elhelyezkedő nagyméretű nyitott edények elzáródásának következménye. Körülbelül 10 perc eltelte után aztán hirtelen növekedni kezd a paraméter értéke, aminek oka, hogy a folyadék a mélyebb rétegek felé szivárog, illetve elpárolog a felületről. A felület ennek következtében zsugorodni kezd és az edények újra nyitottá válnak, ezáltal nő az anatómiai érdesség.

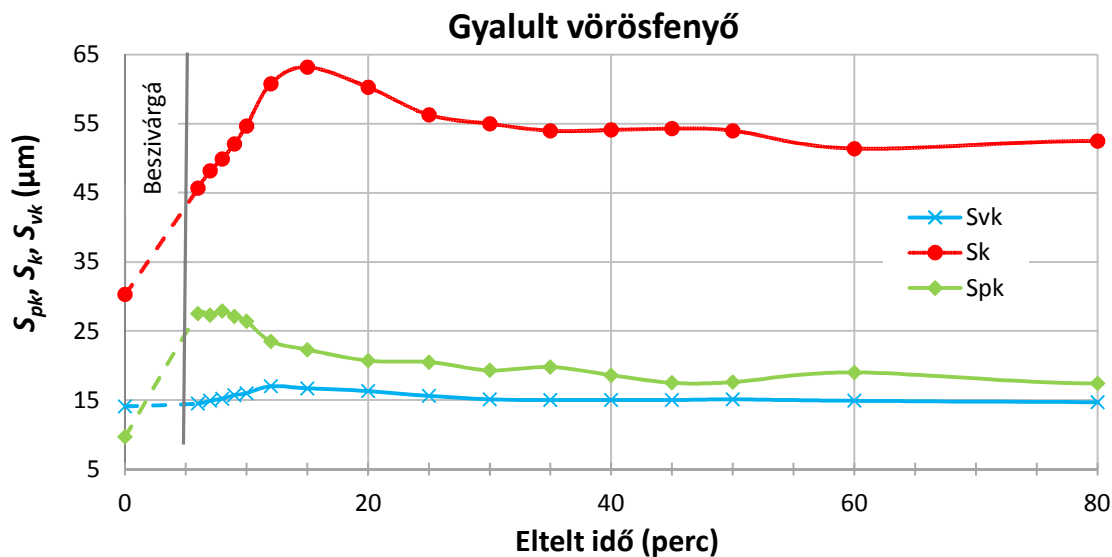


64. ábra Nedvesítést követően az S_{pk} , S_k , S_{vk} paraméterek értékeinek változása finiselt tölgy 1 mérési felületén

Mindhárom paraméternek van egy helyi maximuma melyet azonban különböző időpontokban érnek el. Elsőként a felület legfelső rétegét jellemző S_{pk} , majd a középréteget jellemző S_k , legvégül a felső alsó rétegét jellemző S_{vk} paraméter éri el a maximumát, ami jól mutatja, ahogy a nedvesség egyre mélyebb rétegekbe szivárog. A maximum érték elérését követően mindhárom paraméter értékei csökkennek, majd kb. 30 perccel a nedvesítés után állandósulnak. Az állandósult értékek minden esetben magasabbak a kiinduló értékeknél, ami a maradó alakváltozásoknak köszönhető.

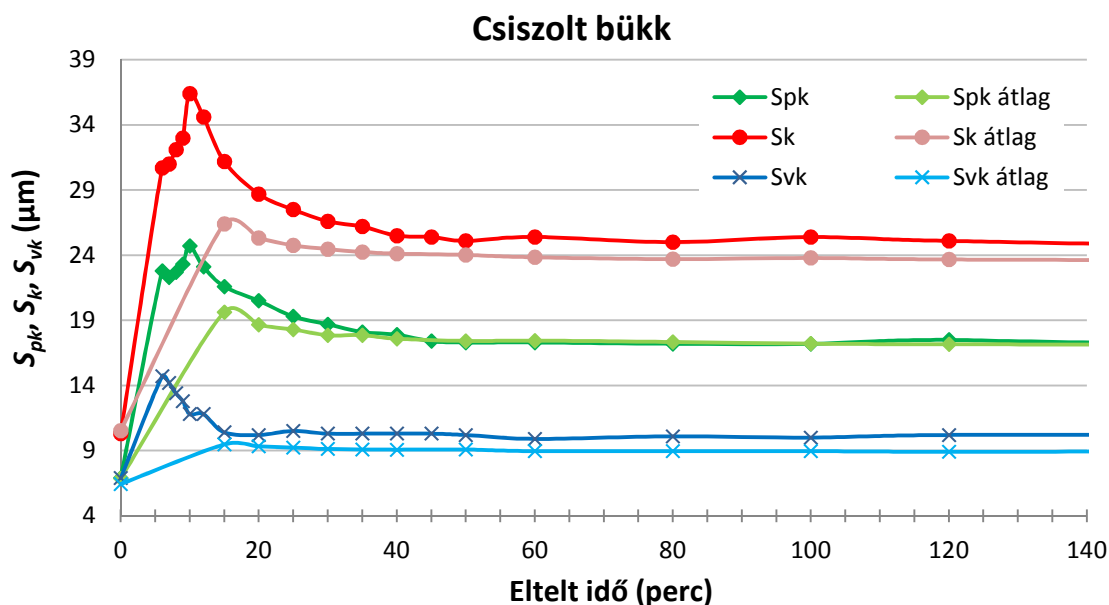
Némileg eltérő viselkedés figyelhető meg a nagy edényekkel nem rendelkező fafajoknál, mely gyalult vörösfenyő egyik mérési felületén jól követhető. Az S_{vk} paraméter jóval alacsonyabb kezdeti értékkel rendelkezik és a tölgy próbatesttel ellentétben már a beszívargás során sem csökken, hanem növekszik az értéke. A tölgy

fafajhoz hasonlóan a már állandósult értéke, bár csak kevéssel, de magasabb, mint a kiinduló értéke. Az S_{pk} és S_k értékeinél viszont már a beszívárgás ideje alatt hirtelen és jelentős növekedés tapasztalható. A három paraméter közül az S_k paraméter változása a legjelentősebb. A tölgy próbatestnél megfigyelt helyi maximumértékek itt is megfigyelhetők, annyi különbséggel, hogy az S_{vk} előbb éri el a maximumát.



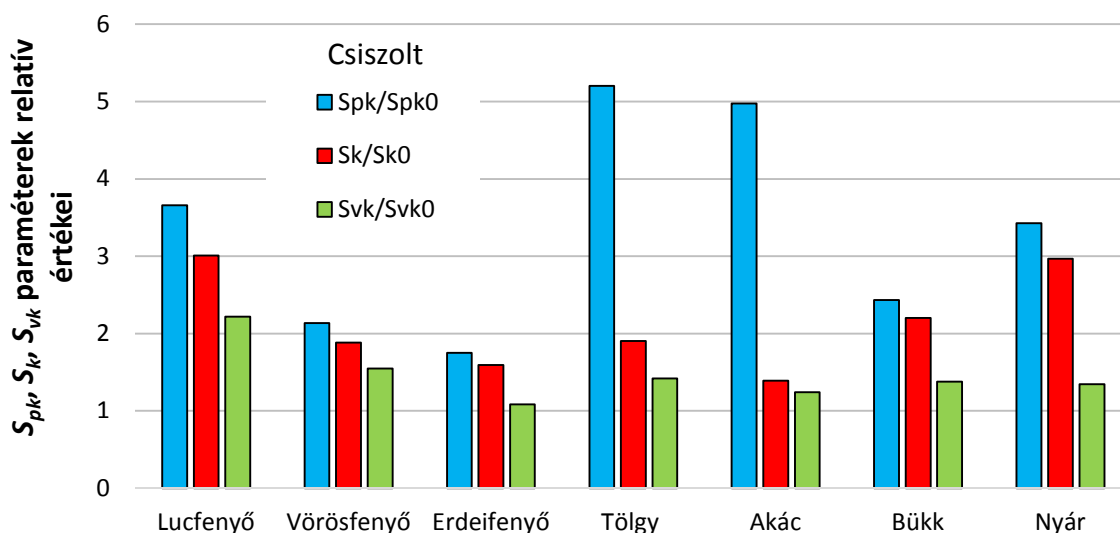
65. ábra Nedvesítést követően az S_{pk} , S_k , S_{vk} paraméterek értékeinek változása gyalult vörösfenyő 1 mérési felületén

A 66. ábrán a csiszolt bükk próbatest 1 és a 10 mérési felület átlagából származó eredményei láthatók. Fél órával a nedvesítés után az 1 és a 10 mérésből származó értékek egyértelműen közelednek egymáshoz, de látszik, hogy a nedvesség beszívárgásának kezdeti szakaszában a 10 felület mozgását rögzítő grafikonoktól, az egyes felületek mozgását ábrázoló grafikonok jelentősen eltérhetnek. Egyértelmű viszont, hogy mind az 1, mind a 10 mérésből származó eredményeknél az S_k paraméter növekszik a legnagyobb és az S_{vk} paraméter a legcsekélyebb mértékben. Közvetlenül a felületen (S_{pk}) és a felület középrétegben (S_k) tehát jelentős mozgások jelentkeznek, míg a felület mélyebb rétegeiben ezek (S_{vk}) kevésbé jelentősek.



66. ábra Nedvesítést követően az S_{pk} , S_k , S_{vk} paraméterek értékeinek változása csiszolt bükk 1 és 10 mérési felületén

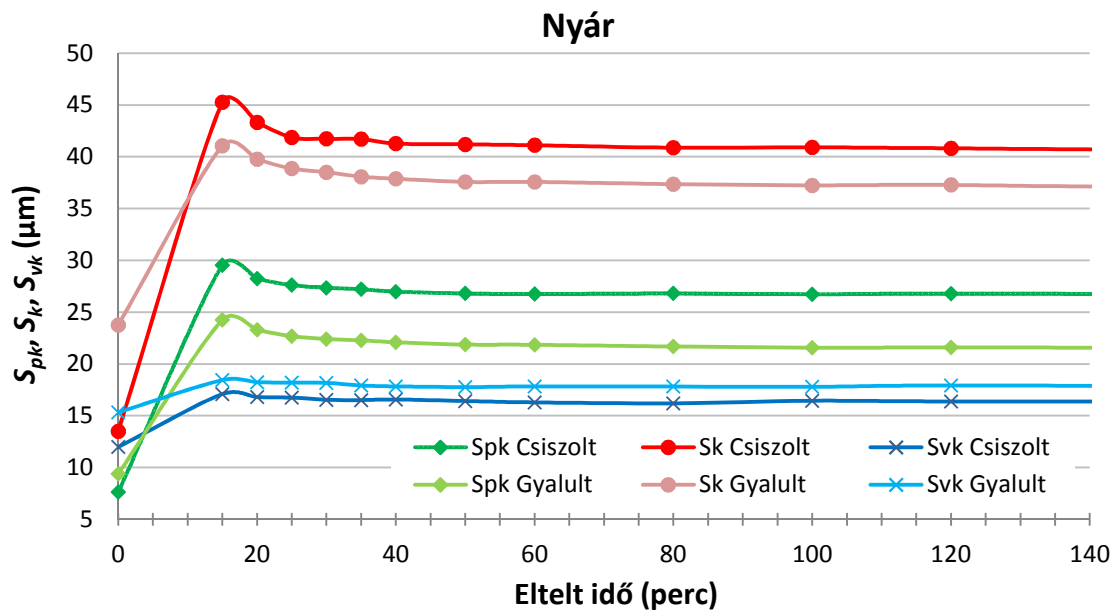
A 67. ábra az összes vizsgált fafaj csiszolás utáni felületén az S_{pk} , S_k és S_{vk} paraméterek relatív változását mutatja, 10 mérési felületen. Az ábrán az index nélküli (S_{pk} , S_k , S_{vk}) paraméterek a végső, már nyugalomban lévő felületekről származó értékeket, míg a 0-ás indexűek (S_{pk0} , S_{k0} , S_{vk0}) a kezdeti, nedvesítés előtti értékeket jelentik. Jól látszik, hogy minden fafajnál az S_{pk} paraméter értékei változtak a legnagyobb arányban nedvesítés hatására, különösen a nagyedényes fafajoknál. A legkisebb relatív növekedés pedig egyértelműen az S_{vk} paraméternél figyelhető meg.



67. ábra A felületi stabilitás jellemzésére az S_{pk} , S_k , S_{vk} paraméterből képzett viszonyszámok fafajonként csiszolt felületeken

Mint ahogy már korábban az S_a paraméternél és az anyagtartalom görbék alakjánál is láthattuk, a különböző megmunkálásokkal kialakított fafelületek mozgása közt is jókora eltérések figyelhetők meg. A 68. ábra csiszolt és gyalult nyár felületeken mutatja a 10

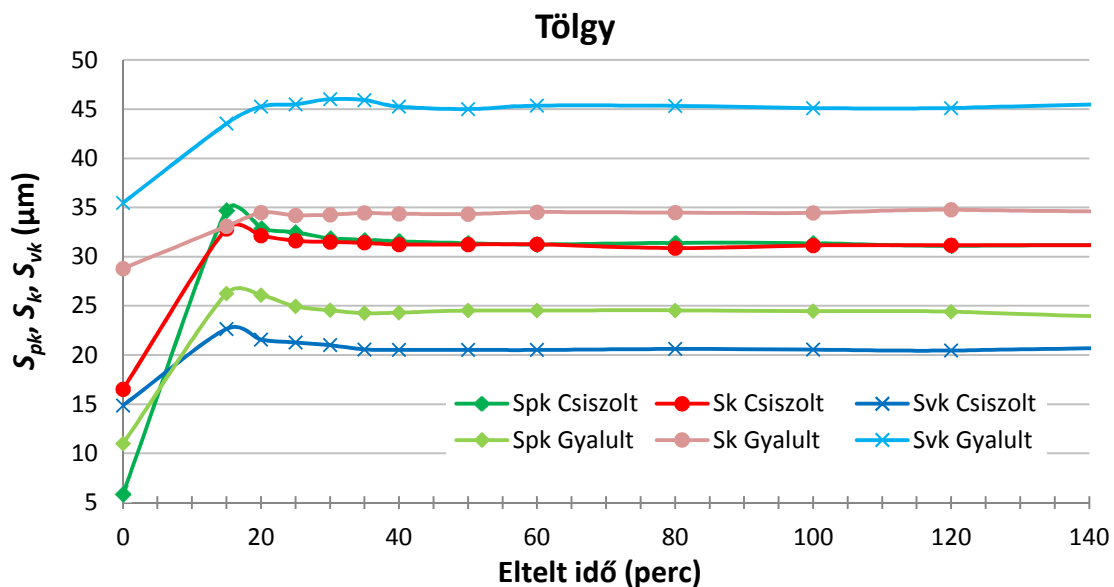
mérési felület átlagából származó anyagtartalom görbe paraméterek értékei közti különbségeket nedvesítés után.



68. ábra Nedvesítést követően az S_{pk} , S_k , S_{vk} paraméterek értékeinek változása csiszolt és gyalult nyár 10 mérési felületén

A csiszolt felületről származó eredmények az alacsonyabb kezdeti értékeik ellenére jelentősebb mozgásról árulkodnak. Mindhárom paraméter értékei csiszolás után változnak nagyobb mértékben, ez különösen a felület felső rétegeiben (S_{pk} , S_k) igaz. A kezdeti és állandósult értékek közti különbségek is arra utalnak, hogy a csiszolt felületek több maradandó alakváltozást szenvednek.

Ugyanezen eredmények némiképp másként alakulnak nagyedényes fafajoknál.

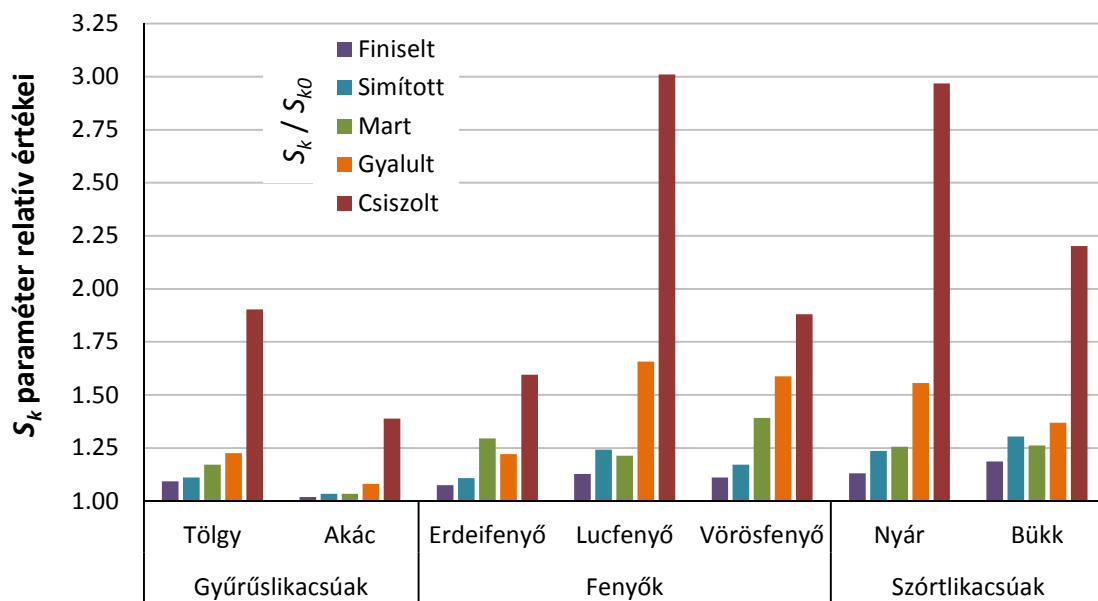


69. ábra Nedvesítést követően az S_{pk} , S_k , S_{vk} paraméterek értékeinek változása csiszolt és gyalult tölgy 10 mérési felületén

Csiszolás műveletekor a felületen található nagy edények miatt az eltömődés hatása jóval nagyobb mértékben érvényesül, ami a paraméterek kezdeti értékei közti

eltérésekben mutatkozik meg. A gyalult felületekről kapott átlagértékek mindhárom paraméter esetén jóval nagyobbak, de a legnagyobb eltérés a S_{vk} paraméternél adódott. A nagy edényekkel nem rendelkező fafajok esetén a 15. percnél tapasztalt maximumok a paraméterek értékeiben itt sokkal kevésbé markánsan jelennek meg, különösen a gyalult felületről származó eredményeknél. Ennek oka, hogy az edények mérete nagyobb elmozdulásokat tehet lehetővé.

Összességében tehát elmondható, hogy az anyagtartalom görbe paraméterei nagyon jó indikátorai a nedvesítés hatására bekövetkező felületmozgásoknak. Az S_k paraméter értékeinek relatív változása (S_k/S_{k0}) hűen tükrözi a különbségeket az egyes fafajok és megmunkálások között is (70. ábra). A kapott eredmények szinte tökéletesen megegyeznek az S_a paraméter eredményeivel, miszerint a fafajok közül az akác, míg a megmunkálások közül a finiselt felületek a legstabilabbak. Nedvesítés hatására a legtöbb felületmozgás a fafajok tekintetében a lucfenyőnél, a megmunkálásoknál pedig a csiszolás után tapasztalható.



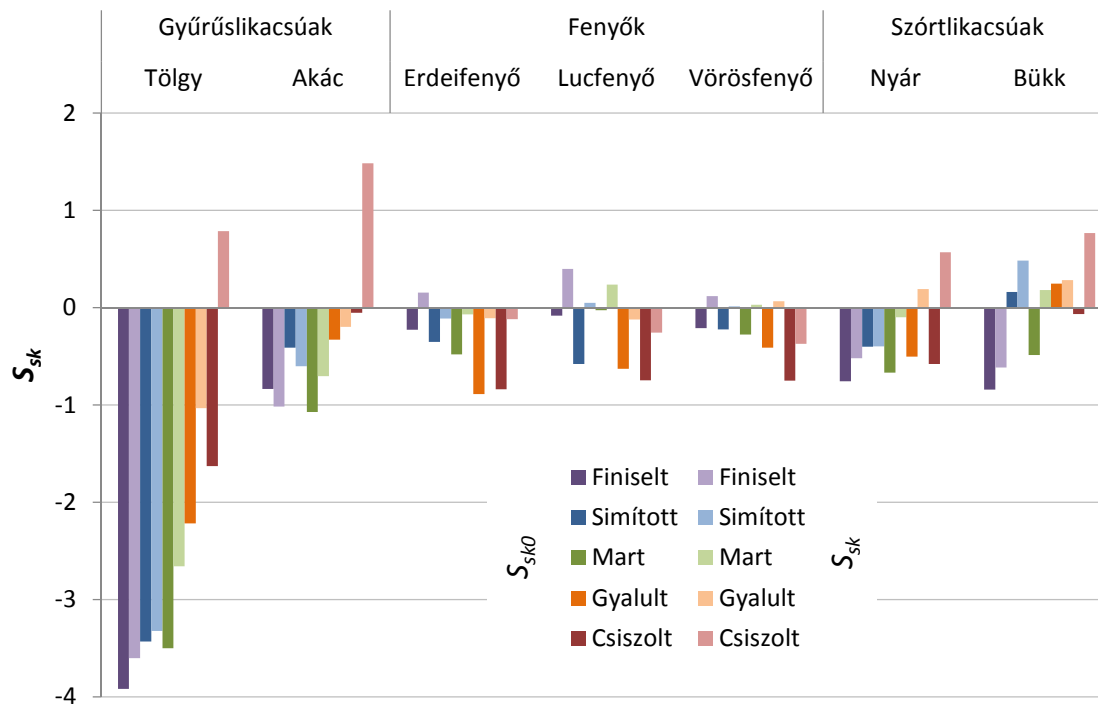
70. ábra A felületi stabilitás jellemzésére az S_k paraméterből képzett viszonyszámok fafajonként és megmunkálásonként

6.2.2.3 Ferdeség (S_{sk})

A fafelületeken nedvesítés hatására bekövetkező mozgások irányát az S_{sk} , azaz a ferdeség érdességi paraméter jól jellemzi, ezért látszott célszerűnek az eddigiekben kevésbé használt, de az egyenetlenségek eloszlását tökéletesen jellemző paraméter vizsgálata és alkalmazása. A nedvesítés előtt a paraméter értékei (két kivételtől eltekintve) negatívak voltak (71. ábra), ami a felületen elhelyezkedő völgyek hangsúlyosságát jelenti. Nedvesítés után minden felületen egyértelműen a pozitív tartomány felé mozdultak az értékek. Ennek egyik oka a felületen bekövetkező szálfelhúzódság jelensége, ami a felületeken kialakuló csúcsok számának a növekedésével kompenzálja a völgyek mennyiségét. A paraméter értékeinek növekedését okozza a felület feldagadása következtében az edények elzáródása is, hiszen ezáltal csökken a völgyek aránya a felületen. Két kivétel azonban itt is megfigyelhető. Simított és finiselt akác felületeken a ferdeség paraméter a negatív tartomány felé mozdult. Ennek oka

valószínűsíthetően az akác tilliszes szerkezetével magyarázható, de ennek részletes elemzését nem végeztem el.

Az egyes fafelületek stabilitása közti különbség itt is jól megfigyelhető. Az S_{sk} paraméter is a csiszolt felületeket jellemzi a leginstabilabbnak, hiszen fafajonként ezen felületek értékei változnak a legnagyobb mértékben. A finiselt és mart felületeken viszont jóval csekélyebb mértékű a változás mértéke, így ezek bizonyultak a legstabilabbnak. Az egyes fafajok közti különbségek szintén kirajzolódnak. A ferdeség paraméter is a gyűrűslikacsú lombosok felületeit jelöli a legstabilabbnak, a fenyő felületeket a leginstabilabbnak.

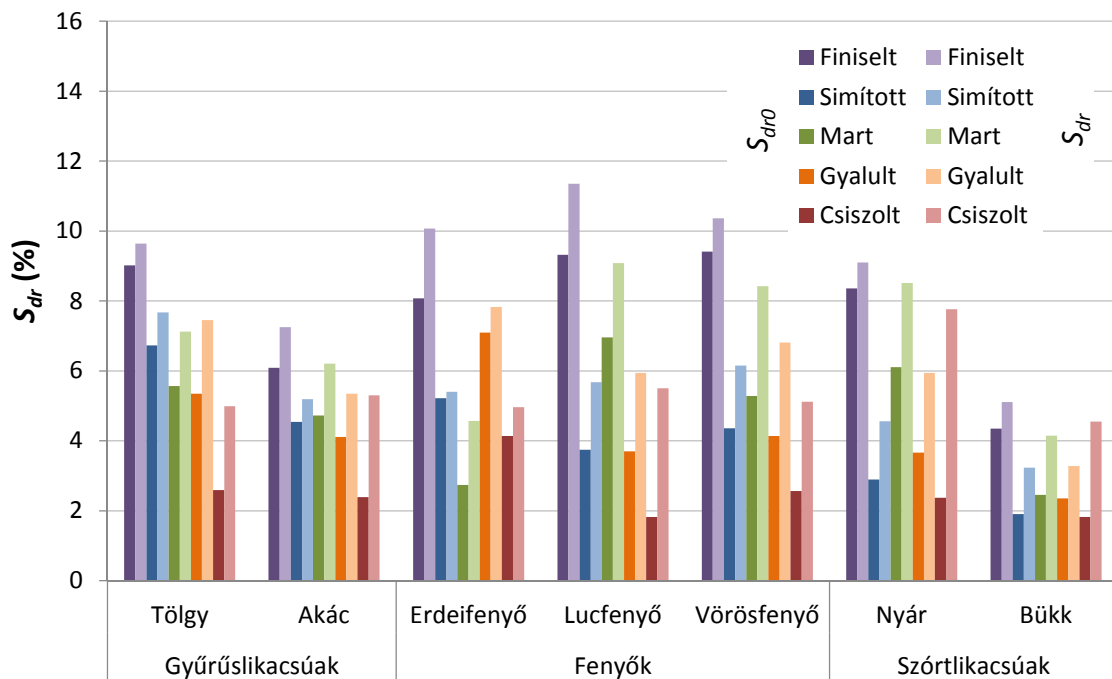


71. ábra A kezdeti és a nedvesítést követő két óra eltelte utáni S_{sk} paraméter értékei 10 mérési felület átlagából

6.2.2.4 Felületarány (S_{dr})

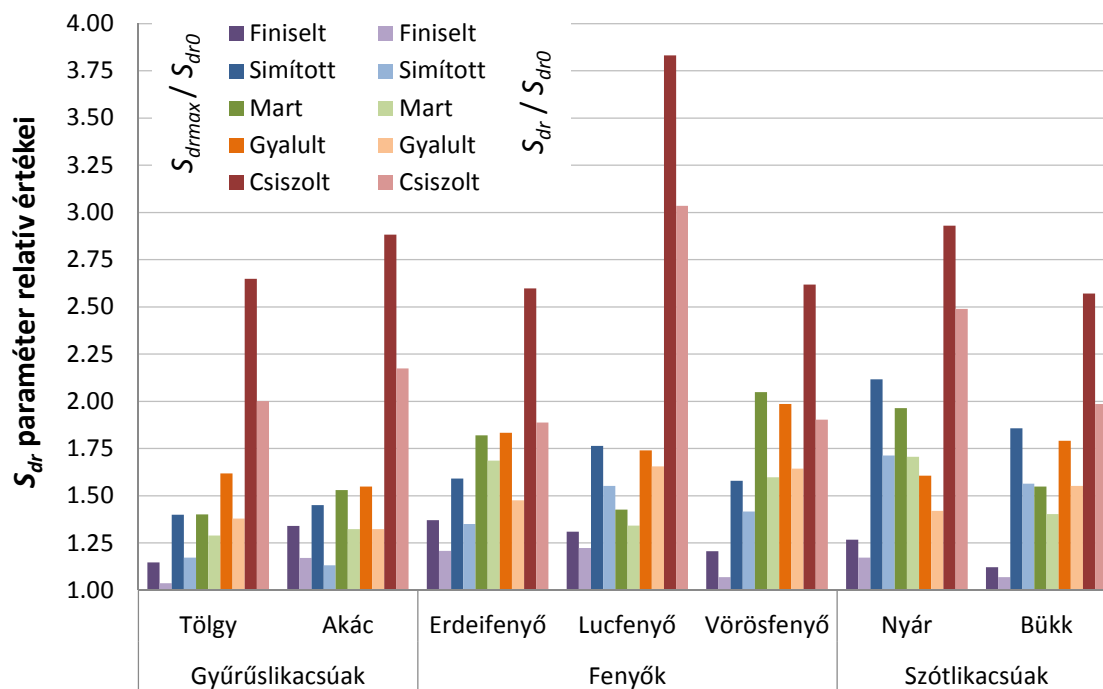
Kevésbé ismert és használt paraméter az S_{dr} , azaz a felületarány. A paraméter magas értéke a felület egyenetlenségét jelzi. A 72. ábrán rögtön szembetűnik a finiselt és csiszolt felületek nedvesítés előtti (kezdeti) értékei közti jelentős különbség. Minden fafajnál a finiselt felületek rendelkeznek a legmagasabb S_{dr} értékkel, míg a csiszoltak a legalacsonyabbal. Ennek oka a finiseléskor kialakuló „tisztán vágott” felület. Az üregek illetve edények ilyenkor teljesen nyitottak, így növelik annak a területnek a nagyságát, amelyet az S_{dr} paraméter a definíciójából adódóan, a mérési felülethez viszonyít (30. ábra). Más megmunkálásoknál (termikus simítás, marás, gyalulás) a felületi réteg deformációjának következtében az átvágott edényfalak már nem képeznek akkora területet, mint tiszta vágáskor, ebből következően alacsonyabb a paraméter értéke. Csiszolt felületeknél adódik a két terület aránya a legalacsonyabbra, hiszen a megmunkálás következtében az anatómiai érdesség jelentősen redukálódik. A faanyagok felületére helyezett nedvesség hatására az előző érdességi paraméterekhez hasonlóan gyorsan emelkedik az értéke, majd a maximumot elérve lassan csökken az állandóságig.

Nedvesítés után tehát minden felület „érdesebbé” válik, és a száradást követően is érdesebb marad a kezdeti állapothoz képest. Az S_{dr} paraméter is a csiszolt felületeket mutatja a leginstabilabbnak, hiszen ezen értékek nőttek a legnagyobb mértékben (72. ábra), míg a finiselt és simított felületekről származó eredmények a legkevésbé.



72. ábra A kezdeti és a nedvesítést követő két óra eltelte utáni S_{sk} paraméter értékei 10 mérési felület átlagából

Az S_a paraméterhez hasonlóan az S_{dr} paraméter kezdő, maximális és száradás utáni értékeiből is képeztem viszonyszámokat a mozgások összehasonlíthatósága érdekében. A kapott értékeket a 73. ábrán láthatók. A diagramot összevetve az S_a paraméternél kapott diagrammal (60. ábra) az figyelhető meg, hogy a két diagram szinte teljesen megegyezik. Az adatokból leolvasható, hogy a csiszolt felületeken az S_{dr} paraméter értékei nedvesítés után minden esetben több mint 2.5-szeresére emelkedtek, de a leginstabilabbnak mutató csiszolt lucfenyőn majdnem 4-szeresére. A hányadosértékek száradás után is csak két esetben csökkennek kevéssel 2 alá, ami annyit jelent, hogy a háromszöglapocskákból képzett terület még száradás után is a duplája az eredeti, nedvesítés előtti értéknek. Ez azért meglepő, mert előzetesen azt vártam, hogy a nedvesítést követően csak kevéssel fog növekedni a paraméter. Nedvesítéskor ugyanis, mint ismert, a felület dagadni kezd, ezáltal az edények és üregek átmérője és mélysége csökken, így egy homogénebb felület jön létre. Ennek hatására csökkenni kell a háromszöglapocskákból képzett terület nagyságának is. Természetesen a szálfelhúzóadás, a felületek hullámosodása, érdesebbé, szálkásabbá teszik a felületeket, mely jelenségek viszont növelik a terület nagyságát. Az eredmények szerint ez a területnövekedés sokkal hangsúlyosabb, mint a dagadás okozta területcsökkenés.



73. ábra A felületi stabilitás jellemzésére az S_{dr} paraméterből képzett viszonyszámok fajfajonként és megmunkálásonként

A jóval stabilabbnak mutkozó finiselt felületeknél a hányadosértékek még közvetlenül nedvesítés után is csak 1.1 – 1.4 közé adódtak, míg száradás után 1.05 – 1.25 közé. Ezek szerint a felületeken alig történt változás.

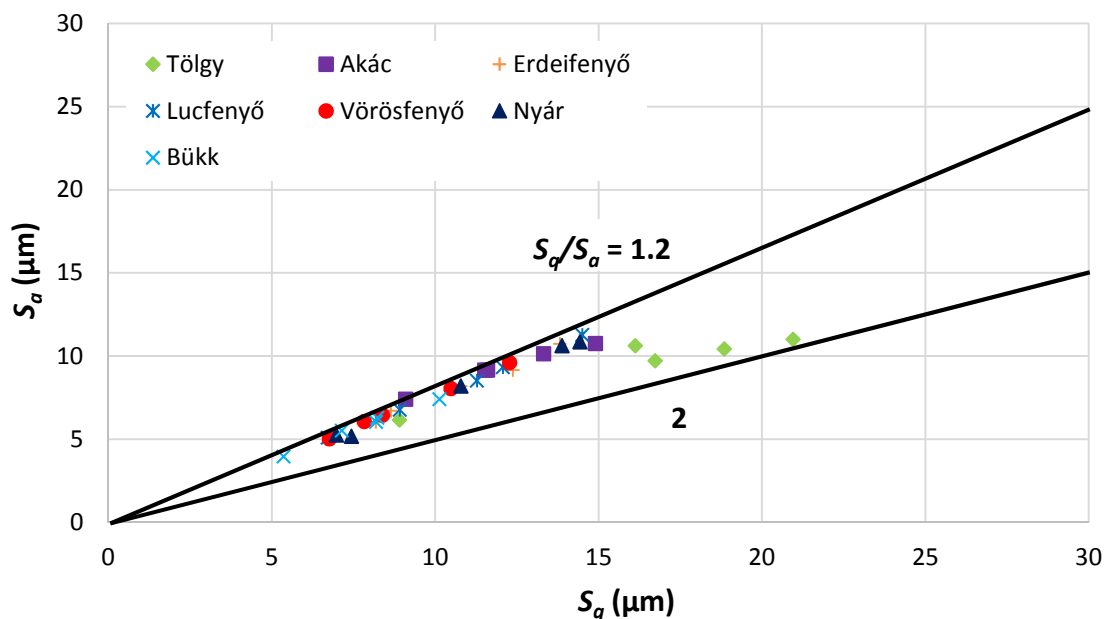
6.2.3 Összefoglalás

Összefoglalásként megállapítható, hogy a természetes faanyagok felületére helyezett nedvesség jelentősen átalakítja a felületek topográfiáját. A nedvesítés hatására bekövetkező felületi változások a kidolgozott mérési eljárással jól követhetők, a 3 dimenziós érdességi paraméterekkel pedig jól jellemezhetők. Az egyes megmunkálási eljárásokkal kialakított fafelületek stabilitása jelentősen eltér. A vizsgált megmunkálások közül a csiszolt felületek mutatkoznak a leginstabilabbnak, a finiselt és termikusan simított felületek pedig a legstabilabbnak. A vizsgált 7 faj is eltérő felületi stabilitással rendelkezik. A mérési sorozat eredményei alapján az akác felületek bizonyultak a legstabilabbnak, a lucfenyő felületek pedig a legkevésbé stabilnak. A három eltérő anatómiai csoport felületi stabilitás szerinti sorrendje, a legstabilabbtól a legkevésbé stabilig: gyűrűslikacsú lombosok, szörtlikacsú lombosok, fenyők.

6.3 A háromdimenziós érdességi paraméterek belső összefüggései

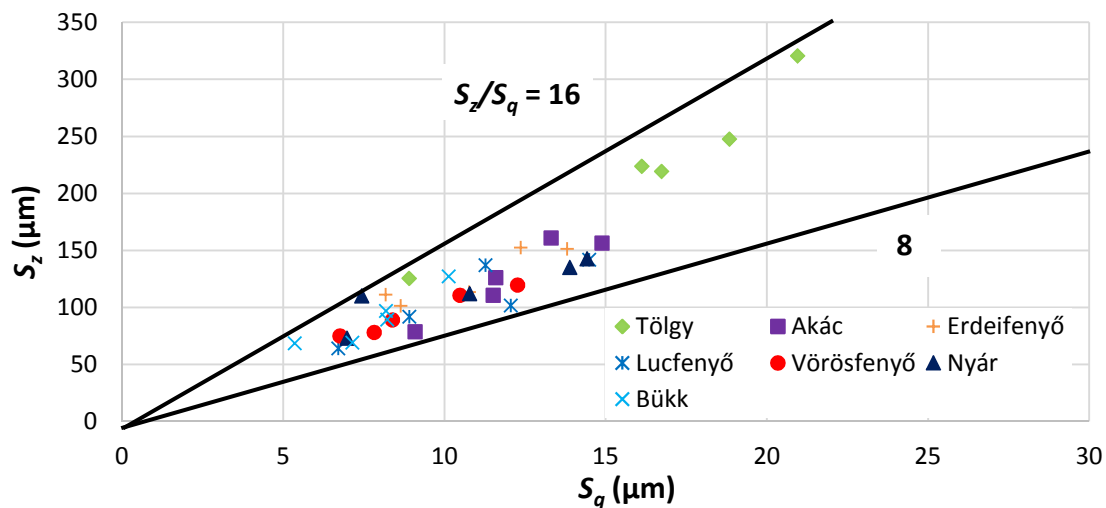
Az első összefüggéseket az érdességi paraméterek között a homogén (fém, műanyag, üveg stb.) felületekről származó 2D-s paraméterekkel igazolták. Ez nem túl meglepő, hiszen ezek az eredmények álltak rendelkezésre legkorábban. Később a 2D-s paraméterek közt feltárt kapcsolatokat az 1980-as évektől rendelkezésre álló 3D-s paraméterekre is kiterjesztették, elsőként szintén homogén felületekről származó eredményekből. A faanyagok felületének változékonysága azonban jelentősen megnehezítette a kutatók dolgát, hogy bármilyen általános szabályszerűséget is fel tudjanak állítani az egyes érdességi paraméterek közt. További hátráltató körülmény, hogy az egyes paraméterek különböző aspektusból jellemzik a felületeket. Ennek ellenére 2D-s paraméterekre sikerült néhány a fémiparból átvett törvényszerűséget igazolni, azonban 3D-paraméterekre mindeztől nem. Ez annak is köszönhető, hogy eddig nem álltak rendelkezésre megfelelő mérési eredmények. A nedvesítésmérések során nyert nagymennyiségű adathalmazból lehetőségem nyílt a 3 dimenziós érdességi paraméterek közti belső összefüggések feltárására és faanyagokra való igazolására.

A fémiparban felvetődött, hogy az S_a és S_q paraméterek egyike szükségtelen, mivel ezek összefüggnek egymással, illetve az S_a kifejezhető az S_q -ból. Néhány kutató szerint az egyik paraméter felesleges, így akár el is távolítható a paraméterkészletből. Ez a kijelentés azonban inhomogén felületeknél, mint például a természetes faanyagok felülete, nem igaz. A megmunkálás utáni felületekről származó eredmények azt mutatják, hogy az S_q/S_a hányados értéke 1.2 és 1.9 közé adódik, ami jelentős eltérés. A hányadosértékek különösen a nagyedényes tölgy felületek esetén magasabbak. Egyedi méréseknél azonban még ennél magasabb, akár 2.2 értékek is előfordulhatnak. A hányadosértékek nedvesítés hatására jelentősen nem változtak, mint ahogy a száradást követően is az 1.2 és 1.9 közötti tartományban maradtak. A kapott eredmények fafelületek esetén tehát nem egyeznek meg a fenti kijelentéssel, ezért a kérdés megválaszolása további kutatásokat igényel.



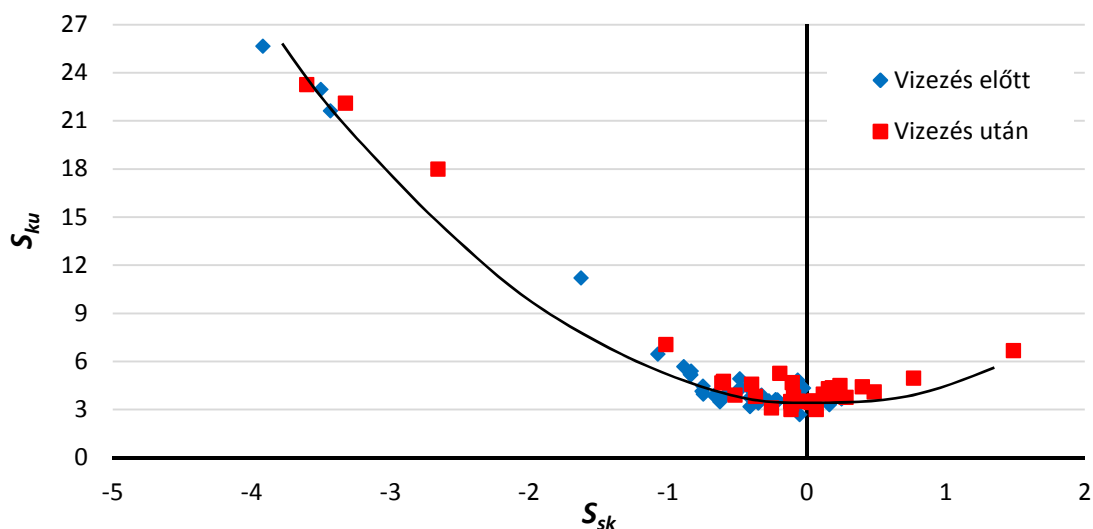
74. ábra Az S_q és S_a érdességi paraméterek közti kapcsolat a nedvesítés előtti felületekről, 10 mérési felület átlagából

Az S_z és az S_q paraméterek közti arány a fémiparban 6.5 és 11 közé adódik. Hasonló arányt képezve a nedvesítés előtti fafelületekről az S_z/S_q hányadosértékek 8 és 16 közé esnek, amely meglehetősen gyenge kapcsolatot jelent a paraméterek közt. Ennek oka lehet, hogy az S_z paraméter sokszor mérési hiba miatt irreálisan magas értékre adódik, hiszen a paraméter definíciójából adódóan nagyon érzékeny a szélső értékekre. Homogén fém felületeknél kisebb a mérési hiba valószínűsége, míg inhomogén felületeknél, ahol ráadásul még színeltérések is tarkítják a felületet, jóval magasabb. A hányadosértékek a nedvesítés utáni felületeken is ebben a tartományban helyezkednek el.



75. ábra Az S_z és S_q érdességi paraméterek közti kapcsolat a nedvesítés előtti felületekről, 10 mérési felület átlagából

Szintén a fémiparból ismert a ferdeség S_{sk} és a kilengés S_{ku} paraméterek közti összefüggés. Korábban a faiparban ezen paraméterek használata egyáltalán nem volt általános, azonban érdemes rájuk több figyelmet fordítani, hiszen további hasznos információkat hordozhatnak a faanyagok felületéről. A különböző módon megmunkált fafajok felületéről származó adatok alapján a köztük lévő kapcsolat a 76. ábrán látható módon alakul.

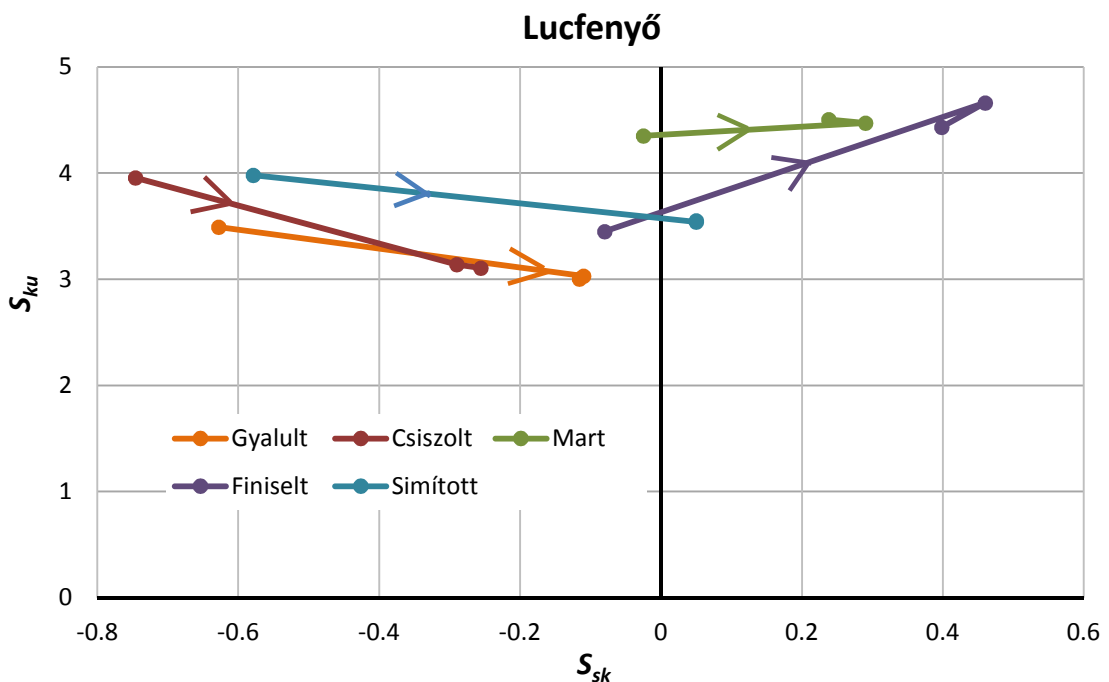


76. ábra Összefüggés a ferdeség (S_{sk}) és a kilengés (S_{ku}) paraméterek között a vizsgált fafajok nedvesítés előtti és utáni felületéről származó adatok alapján

Az eredmények alapján a ferdeség S_{sk} és a kilengés S_{ku} paraméterek fafajtól és megmunkálástól függetlenül szorosan kapcsolatban vannak. A grafikon pontjaira illesztett görbe közel a 3-as értéknél metszi az y tengelyt, amely majdnem tökéletes Gaussi eloszlást feltételez, hiszen a normál eloszlású felületeknél az S_{ku} értéke 3. A görbe egyenlete:

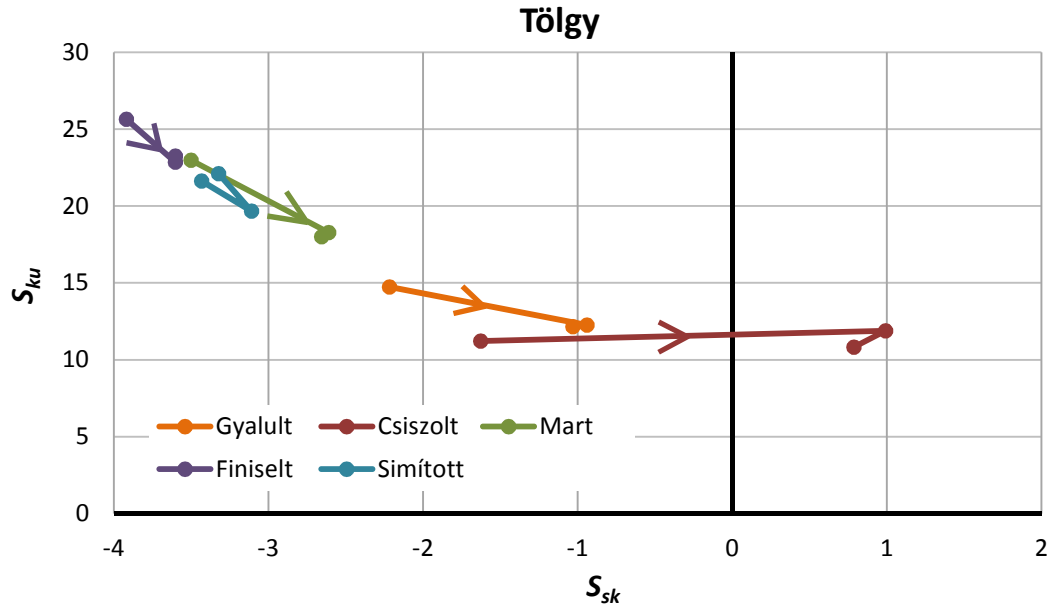
$$S_{ku} = 3 + 1.48 \cdot S_{sk}^2$$

Nedvesítés hatására a grafikon pontjai a negatív ferdeségtől egyértelműen pozitív irányba mozdulnak. Annak érdekében, hogy megtudjam van-e valamilyen kapcsolat a megmunkálások vagy a fafajok közt, elkészítettem fafajonként és megmunkálásonként is az előző grafikonot.



77. ábra A ferdeség (S_{sk}) és a kilengés (S_{ku}) paraméterek kapcsolatának változása nedvesítés hatására különböző módon megmunkált lucfenyő felületeken

A 77. ábrán a különböző módon megmunkált lucfenyő felületeken figyelhetők meg a nedvesítés hatására bekövetkező változások az S_{sk} és S_{ku} paraméterek kapcsolatában. Minden esetben a három pont közül az első jelöli a nedvesítés előtti, a középső a maximális és az utolsó a száradást követő értékeket. Jól látszik, hogy a nedvesítést követően az értékek a pozitív ferdeség felé mozdulnak, majd a maximumot elérve a száradásig kis mértékben ugyan bár, de a negatív ferdeség felé térnek vissza. Feltűnő, hogy a fenyők esetén (lucfenyő, vörösfenyő, erdeifenyő) a kezdeti értékeket figyelembe véve a csiszolt felületek rendelkeznek a legmagasabb negatív ferdeséggel, majd a nedvesítés hatására 0-hoz közeli értékeket vesznek fel. A finiselt felületek viszont mindhárom esetben kb. 0-tól indulnak és a pozitív irányba mozdulva 0.3 - 0.5 értékig. A lombos fafajoknál viszont némiképp másként alakultak az eredmények (78. ábra). A kezdeti ferdeség értékek jóval negatívabbak, akár -4 értéktől (finiselt felület) indulnak. A csiszolt felületek itt a legkisebb negatív ferdeséggel rendelkeznek és nedvesítés után egészen a pozitív tartományig mozdulnak. A vektorok hossza segítséget nyújt a ferdeség változásának vizuális, gyors becslésében. Általánosan elmondható, hogy a csiszolt felületek ferdeség értékei változtak a legnagyobb mértékben és a változás mindig a pozitív irányba történt.

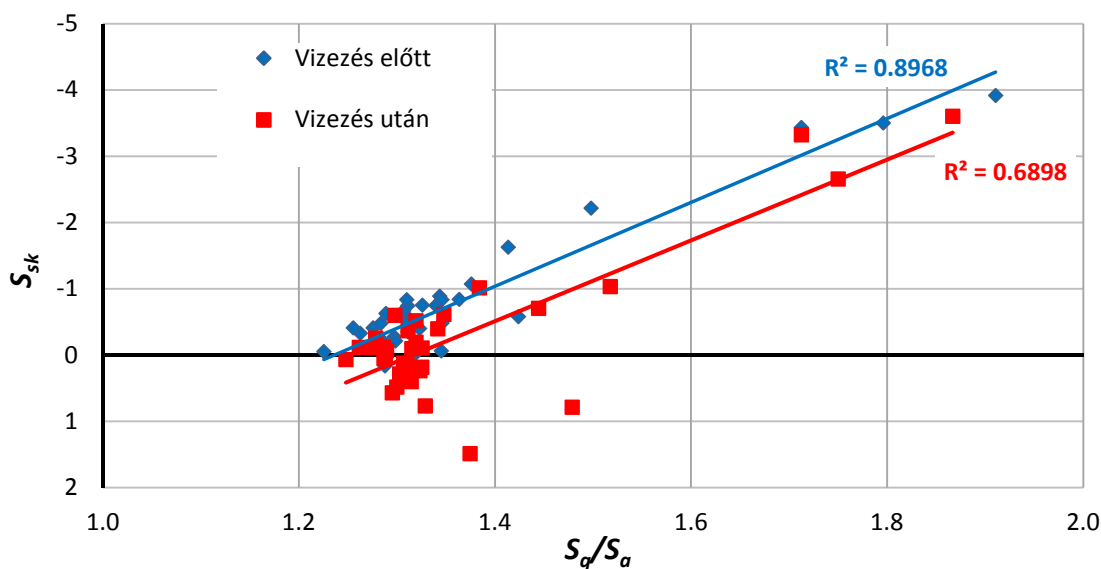


78. ábra A ferdeség (S_{sk}) és a kilengés (S_{ku}) paraméterek kapcsolatának változása nedvesítés hatására különböző módon megmunkált tölgy felületeken

További kapcsolatot sikerült találni a bevezetett S_q/S_a hányados és a ferdeség S_{sk} paraméterek között. A 79. ábrán látható, hogy a két tényező jól korrelál egymással, mind vizezés előtt, mind stabilizálódott állapotban. Ahogy a ferdeség értékei nőnek annak megfelelően emelkednek az S_q/S_a hányados értékei is. Nedvesítés hatására az értékek szisztematikusan tolnak el. A két jellemző közti kapcsolatot a következő egyenletek írják le:

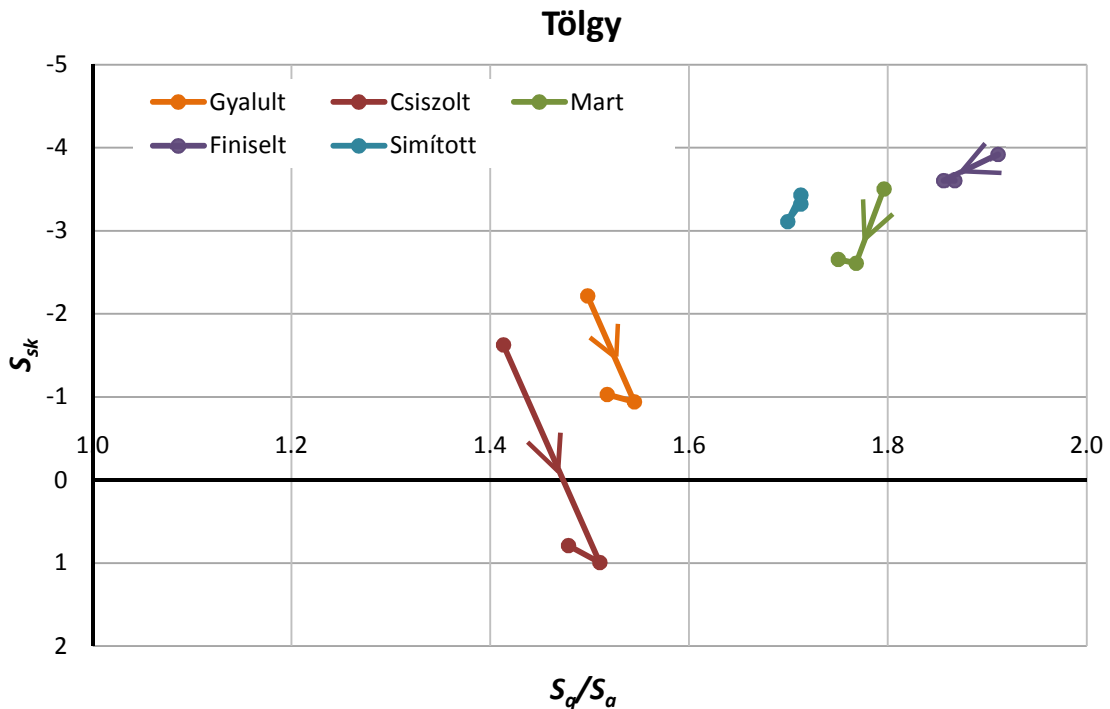
$$-S_{sk} = 4.69 \cdot (S_q/S_a - 1.22) \quad (\text{Vizezés előtt})$$

$$-S_{sk} = 4.69 \cdot (S_q/S_a - 1.3) \quad (\text{Vizezés után})$$



79. ábra Összefüggés a ferdeség (S_{sk}) és az S_q/S_a hányados között a vizsgált fafajok nedvesítés előtti és utáni felületéről származó adatok alapján

Jól látszik, hogy a pontokra illesztett egyenesek különböző helyeken metszik a vízszintes tengelyt habár a görbe elméletileg tart az 0 ferdeséghez, ha az S_q/S_a tart az 1-hez.



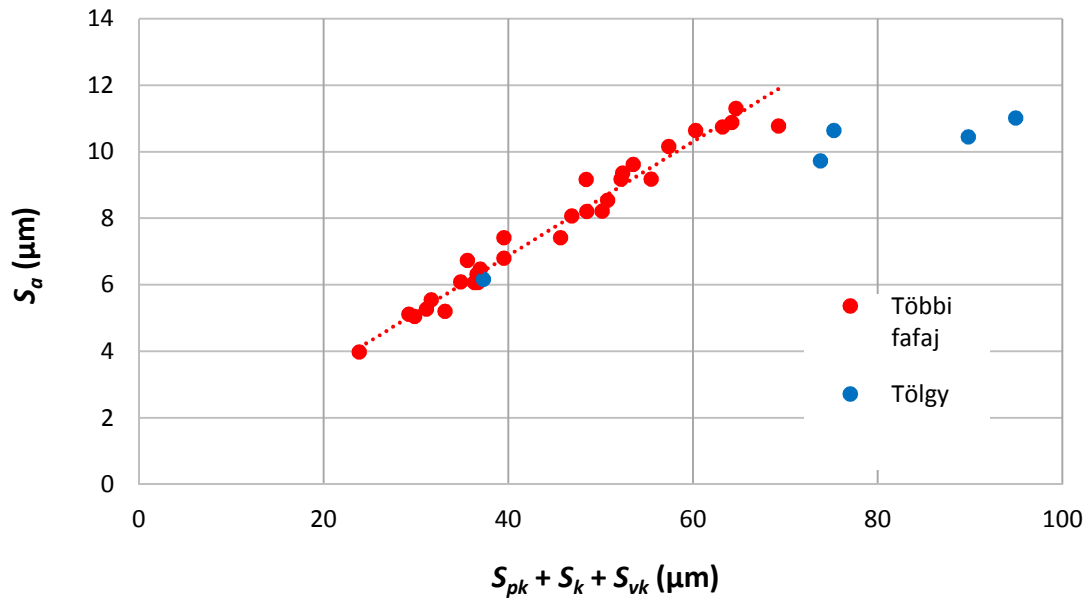
80. ábra A ferdeség (S_{sk}) és az S_q/S_a hányados kapcsolatának változása nedvesítés hatására különböző módon megmunkált tölgy felületeken

Korábban láthattuk, hogy az S_q/S_a hányados értékei természetes faanyagok felületén 1.2 és 2 közötti értékre adódnak. A hányados értékei különösen tölgy fafaj esetén magasak (1.4 – 1.9). Fenyők esetében ez az érték 1.2 – 1.5. A tölgy felületeken emellett a ferdeség értékek is kiugróak (-1.7 – -4). A két jellemző kapcsolatát a különböző módon megmunkált tölgy felületeken a 80. ábra mutatja. A finiselt tölgy felület rendelkezik a legnagyobb, míg a csizolt a legcsekélyebb aszimmetriával a magasság eloszlást illetően. Nedvesítés hatására az értékek minden esetben a pozitív tartomány felé mozdulnak, de csak a csizolt felület lép át a pozitív tartományba a többi a negatívban marad. A legkisebb mozgás a finiselt és termikusan simított felületeken figyelhető meg, míg a legjelentősebb a csizolt felületen.

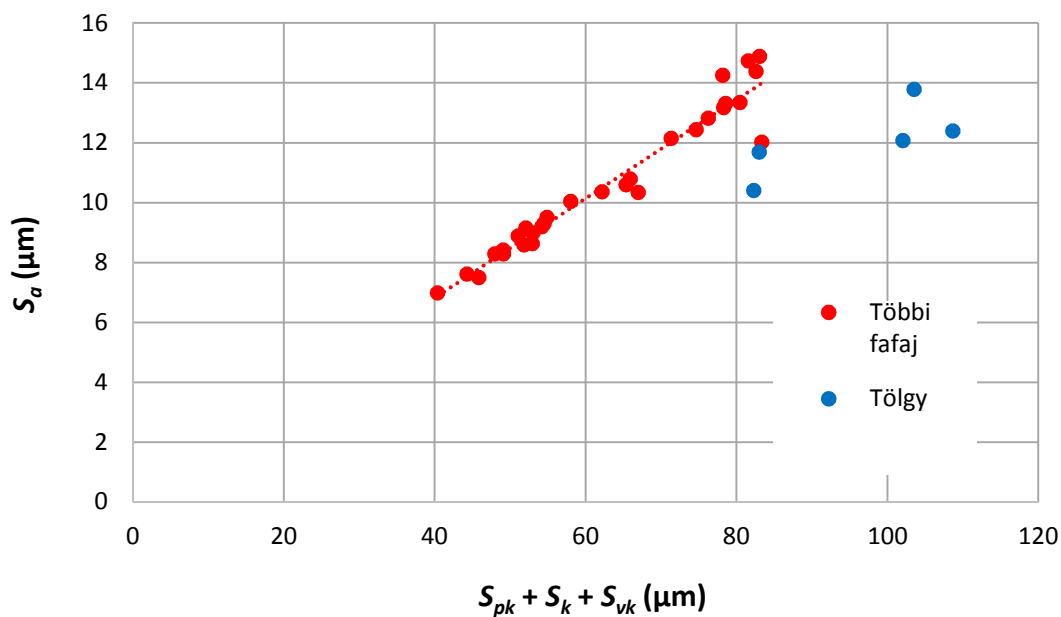
Érdekes kapcsolatot sikerült feltárni a 2D-s eredményekre, mely szerint a R_a paraméter szoros kapcsolatban van az Abbott görbe paramétereinek összegével ($R_{pk} + R_k + R_{vk}$). A paraméterek közti összefüggést a következő összefüggés írja le:

$$R_a = 0.275 \cdot (R_{pk} + R_k + R_{vk})^{0.85}$$

A paraméterek 3D-s megfelelői közti kapcsolat nedvesítést megelőzően illetve nedvesítés után a 81. és 82. ábrán látható. Szembetűnő, hogy a tölgy fafaj jelentősen eltér az összes többi vizsgált fafajtól.



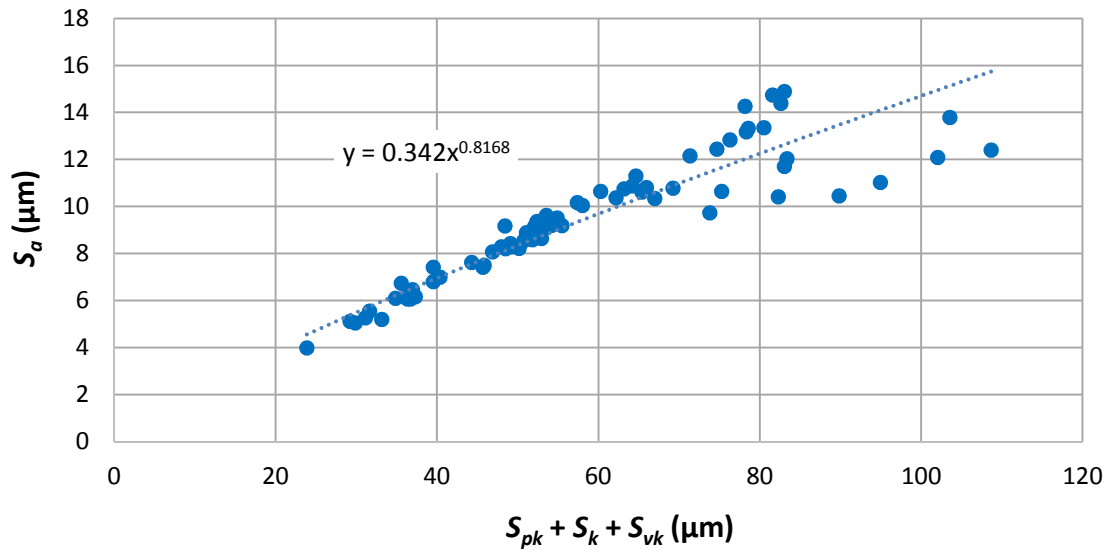
81. ábra Az S_a és az Abbott görbe paramétereinek közti kapcsolat a nedvesítés előtti felületekről, 10 mérési felület átlagából



82. ábra Az S_a és az Abbott görbe paramétereinek közti kapcsolat a nedvesítés utáni felületekről, 10 mérési felület átlagából

A kapott értékeket egy grafikonon ábrázolva a 2D-ben igazolt összefüggés rendkívül jól korrelált a 3D-s eredményekkel. A fenti összefüggés a következőképpen módosul:

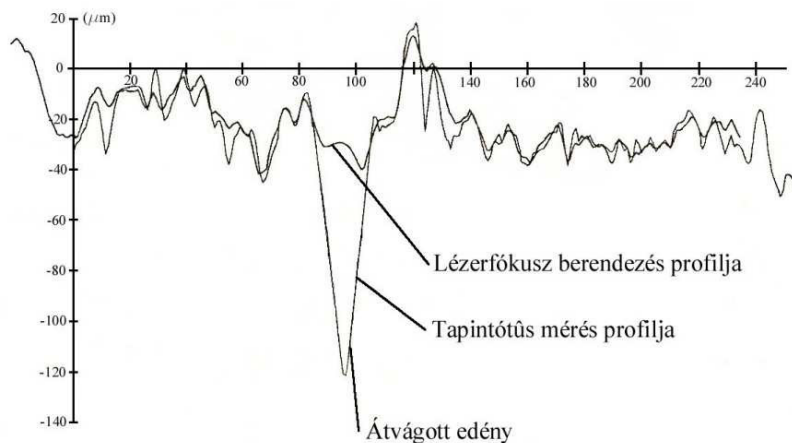
$$S_a = 0.342 \cdot (S_{pk} + S_k + S_{vk})^{0.82}$$



83. *ábra* Az S_α és az Abbott görbe paramétereinek közötti kapcsolat faanyagok esetén

6.4 A 2 és 3 dimenziós érdességmérés összehasonlítása

Számos publikáció bizonyítja, hogy az optikai elven működő felületi érdességmérő berendezések pontatlanabb mérést tesznek lehetővé, mint a mechanikus tús berendezések. 1995-ben Westkämper és Schadoffsky egy tapintótús és egy lézerfókuszos vonalmenti



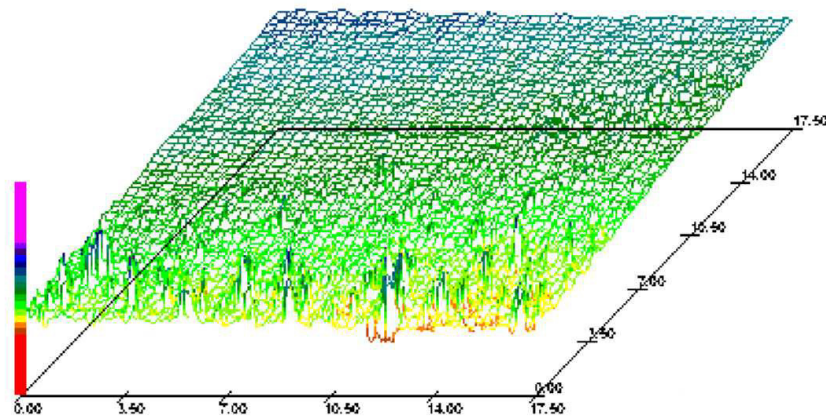
optikai berendezést hasonlítottak össze, és arra a megállapításra jutottak, hogy különösen nagyedényes fafajok esetén, a felületen elhelyezkedő mély völgyek (edények) alá a lézer „nem lát le”, azaz elveszti a fókuszpontot és a valóságostól eltérő jelet továbbít.

84. ábra Az érdességi profilok összehasonlítása optikai és mechanikus mérés esetén (Westkämper, Schadoffsky, 1995)

2004-ben Sandak és társai gyertyán mintákon hasonlítottak össze két optikai berendezés eredményeit a hagyományos tús érdességmérővel. Az ő eredményeik alapján lézeres szkennelt profilok hibaaránya 5-33% tartományban változik. Az ilyen jellegű összehasonlító kutatások szinte kivétel nélkül hasonló eredményeket publikálnak (Funck 1992).

A két rendszer tehát mérési elvéből adódóan ugyanazon mérési vonalról eltérő érdességprofilokat szolgáltat, így a belőlük számolt 2D-s paraméterek értékei is jelentősen eltérnek egymástól. Az érdességmérés térbeli kiterjesztése és a 3D-s paraméterek megjelenése felveti a kérdést, hogy ha az optikai rendszerektől származó mérési eredmények még a 2D-s paraméterek esetén is jelentősen eltérnek a tapintótús eredményektől, akkor milyen a kapcsolat az ugyanazon felületről származó 2 és 3 dimenziós érdességi paraméterek közt. A probléma tisztázása aktuális és feltétlenül szükséges feladat, hiszen a jelenlegi 3D-s érdességi paraméterek értékei nem összehasonlíthatók a 2D-s paraméterekkel. A 2D-s mérési módszerrel jelentős kísérleti eredményekkel rendelkezünk, és a belőlük származó, jól definiált, szabványokban rögzített, 2 dimenziós érdességi paraméterek jelentéstartalma pontosan ismert. A 3D-s paraméterek helyes értékelése céljából tehát mindenképpen szükséges kapcsolatot teremteni a 2 és 3 dimenziós paraméterek között.

A paraméterek összehasonlíthatósága akkor biztosított, ha a két mérőrendszerrel pontosan ugyanazt a felületet képezzük le. A tapintótús berendezésekkel, több egymással párhuzamos vonal mentén mérve az érdességet képezhető egy felület. Ugyanazt a felületet 3 dimenziós optikai érdességmérő berendezéssel mérve, a 2 és 3D-s paraméterek közti kapcsolat feltárható. Pierre és társai 2000-ben duglászfenyő mintákon egy Perthometer segítségével 50 mérési vonal egymás mellé sorolásával képezték felületeket, és az 50 mérési vonal eredményeinek átlagából következtetnek 3 dimenziós (S) paraméterekre.



85. ábra Perthometerrel készített duglászfenyő felület (Pierre et al. 2000)

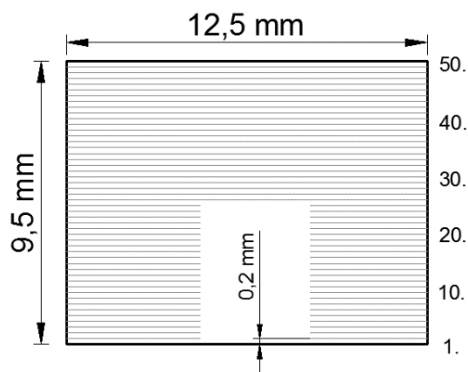
Arra jutottak, hogy minél hosszabb a mérési vonal, azaz a minél nagyobb területet vizsgálunk a felületen, a kapott érdességi értékek annál jobban közelítenek az átlagos értékekhez.

Annak érdekében, hogy kiderítsem, milyen kapcsolat van a faanyagok felületéről származó 2 és 3D-s érdességi paraméterek közt, ezt a mérési elvet követve saját méréseket végeztem. Az egyes fafajok anatómiai felépítésének különbözősége miatt a nedvesítéses vizsgálatoknál alkalmazott hét fafajt további hét fafajjal egészítettem ki, hiszen a célom az volt, hogy a faanyagok felületét a lehető legszélesebb tartományban vizsgáljam. Ehhez szükséges a lehető leghomogénebb és legváltozatosabb fafelület kialakítása, így olyan fafajokat is szükséges volt bevonni a vizsgálatokba, melyekkel a teljes spektrum lefedhető. A vizsgálatokba bevont fafajok:

- dió (*Juglans regia* L.)
- mezei juhar (*Acer campestre* L.)
- rózsafa (*Dalbergia cochinchinensis* P.)
- jatoba (*Hymenaea courbaril* L.)
- balsa (*Ochroma lagopus* SW.)
- vasfa (*Lophira alata* Banks & Gaertn.F.)

A vizsgálatokba újonnan bevont fafajokból egy-egy próbatest készült, melyek felülete gyalulással lett megmunkálva. A nedvesítéses vizsgálatoknál is használt fafajokból két próbatest készült, ezek felületet gyalulással és csiszolással lett kialakítva. Így egybevéve 14 fafajból és két megmunkálási eljárással (gyalulás, csiszolás) készültek próbatestek, összesen 21. A választott fafajok anatómiai sokszínűsége és az alkalmazott megmunkálási eljárások a kialakult felületek megfelelően széles skáláját eredményezték. A próbatestek kiválasztásának és kialakításának feltételei, a felületek előkészítése, és a megmunkálási paraméterek megegyeztek a nedvesítéses méréseknél alkalmazottakkal (5.2.1 illetve 5.2.2 fejezet). A mérések során a külső körülmények szintén megegyeztek a korábban ismertetett viszonyokkal (5.1 fejezet).

A 3D-s érdességmérésekhez ugyanazt a berendezést használtam, melyet a nedvesítéses méréseknél (MicroCAD Compact) (42. ábra), így a mérési felület is megegyezett a korábbival (12,5 x 9,5 mm). Minden próbatesten egy felület érdességét



határoztam meg, majd ugyanennek a területnek az érdességét egy 2D-s vonalmenti érdességmérővel (Perthometer PRK) (87. ábra) is bemértem. Első lépésben 50 párhuzamos vonallal képeztem felületet, mely vonalak közti távolság 0,2 mm, a mérési vonal hossza pedig 12,5 mm volt. A tű lekerekítési sugara 5 μm , kúpszöge 90° volt.

86. ábra A vonalmenti érdességmérés mente (Saját ábra)



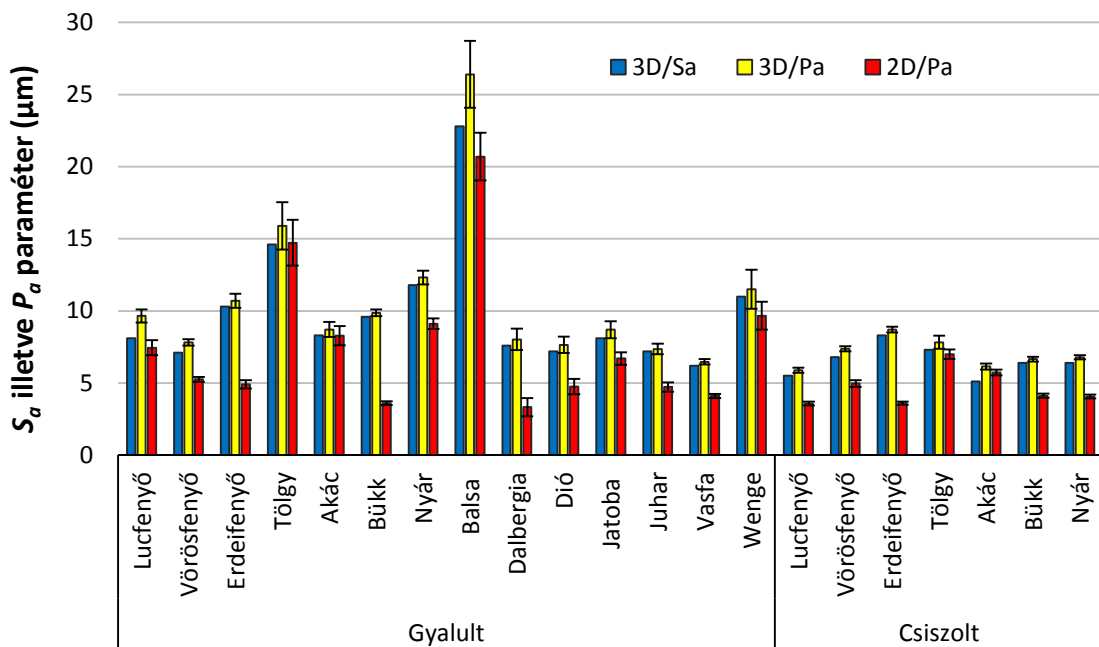
87. ábra Tapintótűs érdességmérő berendezés (Perthometer PRK)(Saját felvétel)

Minekután a 3D-s berendezés vízszintes irányú (12,5 mm) maximális felbontása kb. 8 μm (egészen pontosan 1624 Pixel), így a Perthometer felbontását is 8 μm -nek (egészen pontosan 1562 pont) választottam. A két berendezés felbontása tehát a mérések során megegyezett, ezzel is javítva az összehasonlíthatóságot, illetve kiküszöbölve az eltérő felbontásból adódó esetleges információvesztéseket. A mintatestek pontos pozícionálása itt is fontos részét képezte a kutatásnak, hiszen a két mérőrendszerrel pontosan ugyanazt a felületet kellett vizsgálni. Ezt a két mérőrendszerhez tartozó mozgatható raszterasztalok biztosították, melyek segítségével 0,1 mm-es pontossággal pozícionálhatók az egyes felületek.

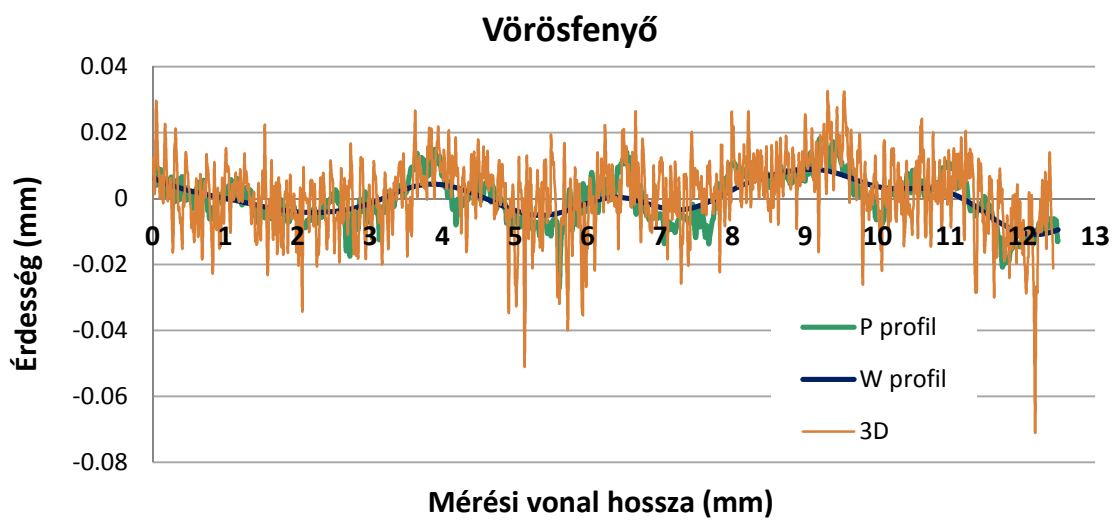
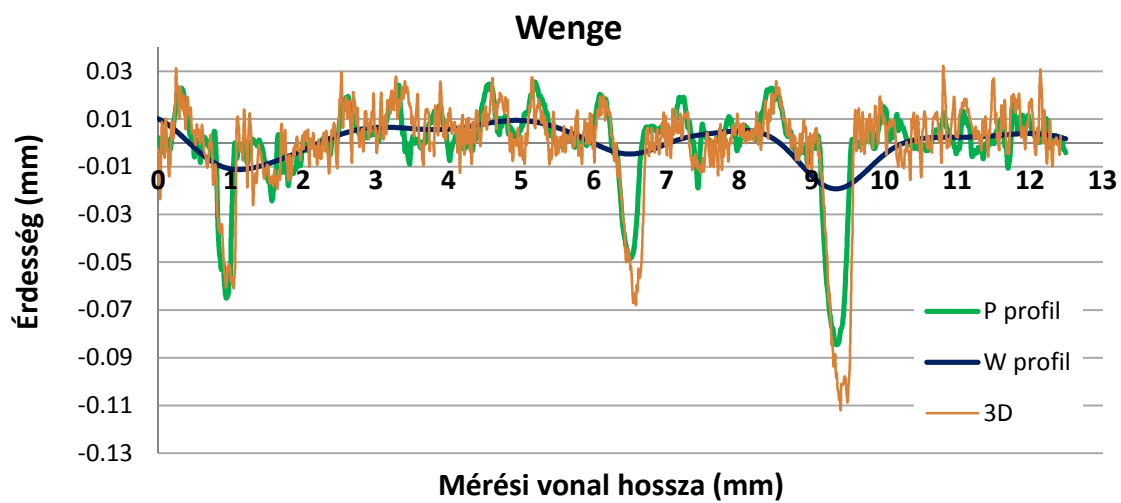
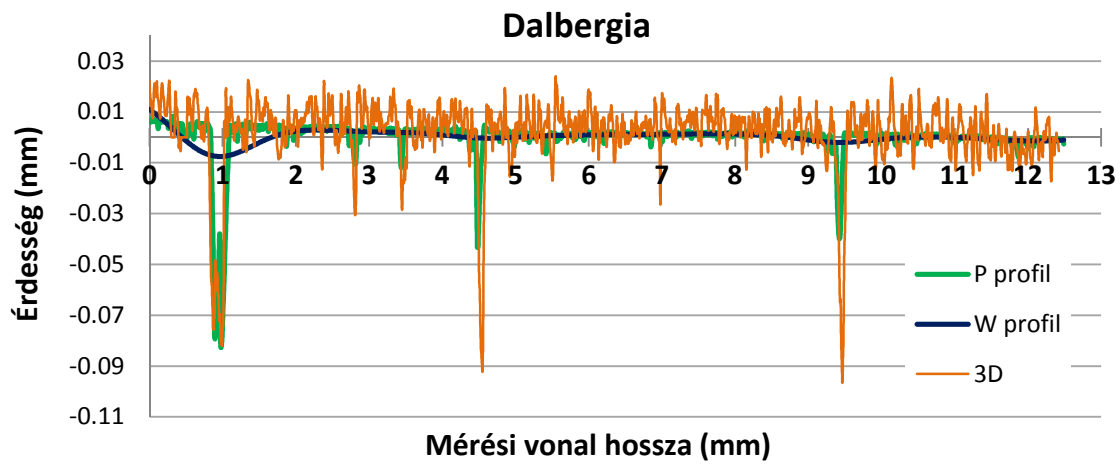


88. ábra A próbatetek pozícionálása (Saját felvétel)

A 3D-s érdességmérő berendezéshez tartozó kiértékelő szoftver lehetővé tette, hogy a mért felületről egy meghatározott vonal mentén elkészítsem az érdesség profilját. Ennek köszönhetően láthatóvá váltak az ugyanarról a mérési vonalról a két mérőberendezés által mért profilok. A 90. ábra grafikonjain jól látszik, hogy a próbatetek pozícionálását tökéletesen sikerült megoldani, illetve az is, hogy az optikai berendezés által szolgáltatott profilok jóval ingadozóbbak, „nyugtalanabbak” a Perthometeres méréshez képest. Mivel a 3D-s felületi profilok jól láthatóan tágabb határok közt mozognak, emiatt az ezekről a profilokból származó érdességi paraméterek is magasabbra adódtak. Ez természetesen magával vonja azt is, hogy az egész felületről származó 3D-s paraméterek értékei is mindig magasabbak, mint az ugyanarról a felületről származó 50 mérési vonal átlagából kapott 2D-s eredmények.



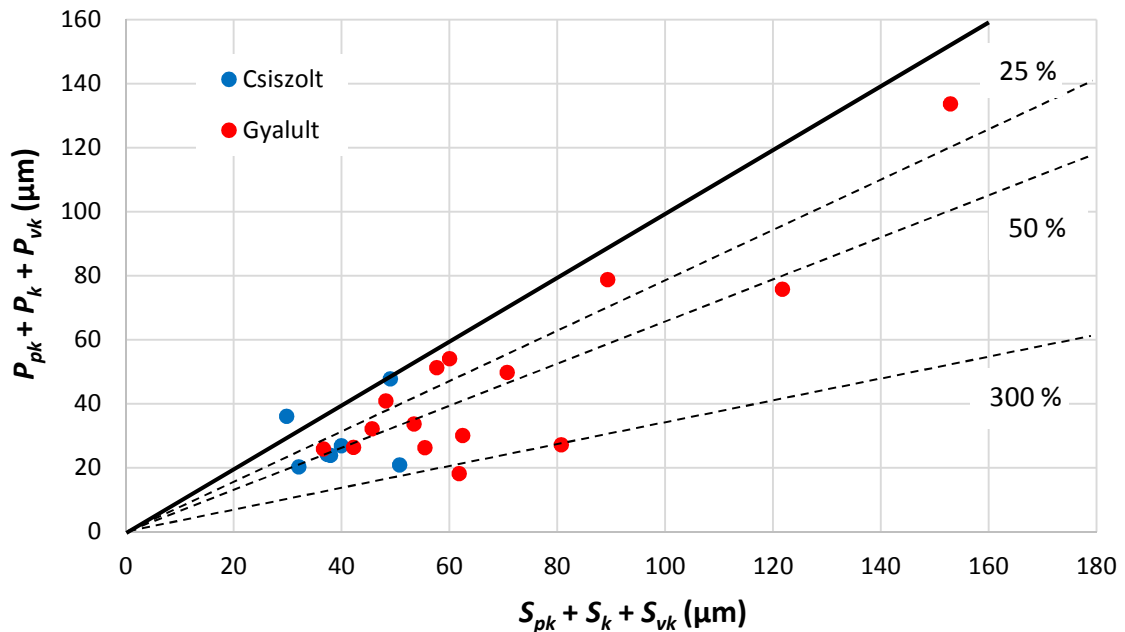
89. ábra Az ugyanarról a felületről származó S_a illetve P_a paraméterek értékei
 (- 3D/ S_a Az optikai érdességmérő által szolgáltatott 3D-s paraméter értékei
 - 3D/ P_a Az optikai érdességmérő által a felületre fektetett 50 mérési vonalból származó 2D-s paraméter átlag és szórásértékei
 - 2D/ P_a A Perthometer által szolgáltatott 50 mérési vonalból származó 2D-s paraméter átlag és szórásértékei)



90. ábra A 2 és 3D-s érdességmérésből származó profilok összehasonlítása dalbergia, wenge és vörösfenyő fafajokon

A 89. ábrán látható eltérések azon paraméterek esetén, melyek a profil valamelyik szélső értékéhez kötődnek ($S_p - P_p$, $S_v - P_v$, $S_z - P_z$) jóval hangsúlyosabbak. Az anyagtartalom görbe paraméterei ($S_{pk} - P_{pk}$, $S_k - P_k$, $S_{vk} - P_{vk}$) szintén jelentős különbségeket mutatnak, különösen igaz ez az összegükből képzett értékekre ($S_{pk} + S_k + S_{vk} - P_{pk} + P_k + P_{vk}$). A vonalmenti mérésekből kapott 2 dimenziós paraméterek átlagértékeit meghatározva, az ugyanarról a felületről nyert 2 és 3 dimenziós paraméterek értékei összehasonlíthatóvá váltak (91. ábra).

Jól látszik, hogy a 3D-s mérésből származó Abbott paraméterek milyen jelentősen eltolódnak az ugyanarról a felületről származó 2D-s eredményekhez képest. Igen kemény és sűrű fafajoknál (pl. *Dalbergia cochinchinensis*) a hiba elérte a 300%-ot is.

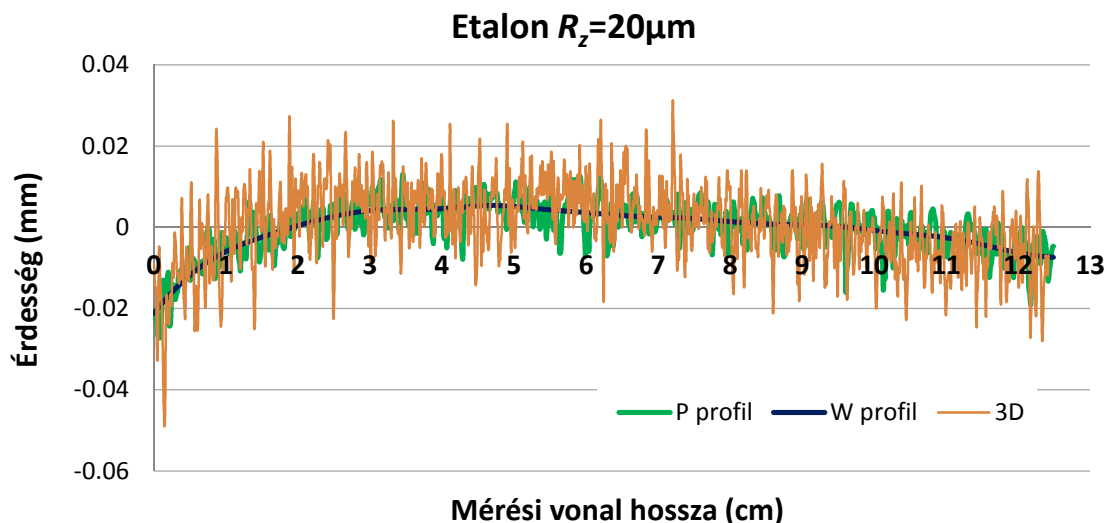


91. ábra Tűs (2D) és optikai (3D) mérési módszerek összehasonlítása (minden pont egy fafaj)

Annak kiderítésére, hogy ezek a különbségek csak természetes fafelületek mérésénél jelentkeznek vagy más felületeknél is, ugyanezt a mérési sorozatot elvégeztem két (a Perthometerhez tartozó) etalon fémfelülettel is. A kapott érdességi profilokon a faanyagokhoz hasonló eltérések figyelhetők meg, így egyértelművé vált, hogy a különbségek a két mérőberendezés mérési elvéből adódnak. Emiatt a profilokból számolt érdességi paraméterek közvetlenül nem összehasonlíthatóak, hiszen bár a felületi profilok ugyanarról a mérési vonalról származnak azonos mérési hossz és felbontás mellett mégis jelentősen eltérőek. Ezáltal bizonyossá vált, hogy az optikai berendezések már eleve pontatlanabb mérést tesznek lehetővé, így ezen berendezések mérési pontosságának javítása aktuális és rendkívül fontos feladat, mely a mai napig nagy kihívást jelent a berendezéseket gyártó cégek számára. A felületek pontos feltérképezése létfontosságú a modern faipar számára.



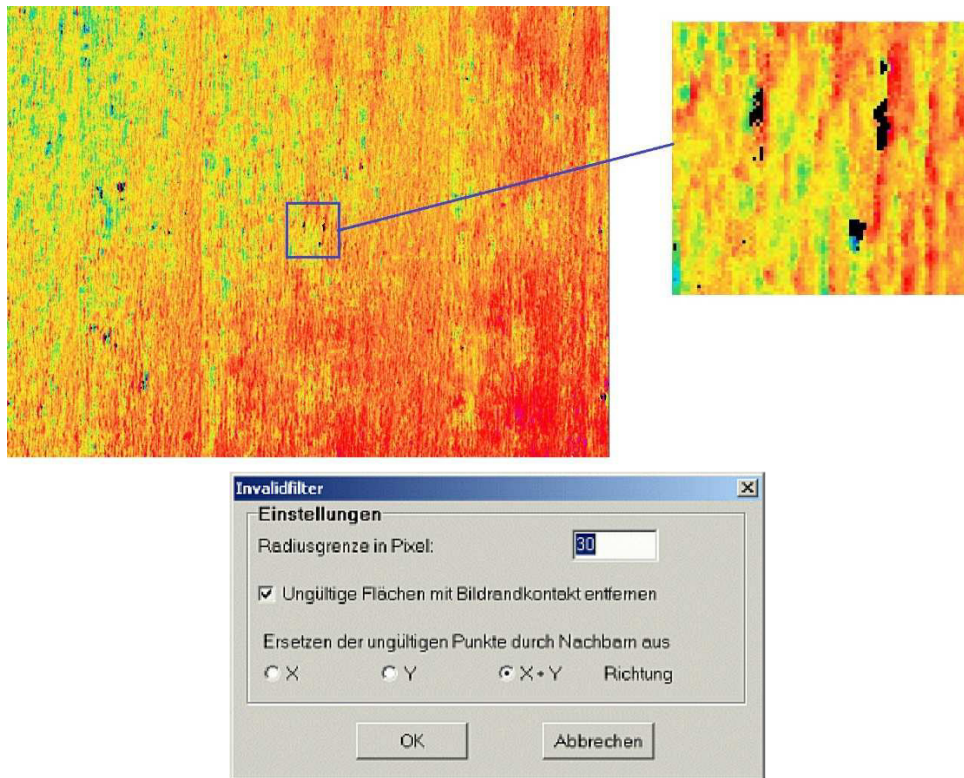
92. ábra A vizsgálatokba bevont etalon felületek (Saját felvétel)



93. ábra A 2 és 3D-s érdességmérésből származó profilok összehasonlítása etalon felületen

A paraméterek összehasonlítását tehát közvetlenül nem tettem meg, hiszen azok teljesen más felületi profilokból származnak. Az optikai mérőberendezéshez tartozó kiértékelő szoftver azonban számos lehetőséget nyújt a mért adatok további feldolgozására. Többféle szűrési eljárás áll rendelkezésre melyek közül egyesek alkalmasak a tapasztalt mérési hiba redukálására. A rendelkezésre álló szűrők közül a következőket alkalmaztam:

- **Invalid-filter:** A szűrő segítségével azokhoz a pontokhoz is adatokat rendelhetünk, amelyekről a méréskor - reflexiók vagy egyéb más probléma miatt - nem sikerült információt kapni. A magasságkülönbség képen, ezeken a helyeken fekete foltok láthatók. A parancs kiadása után meg kell adni egy értéket 1-100 között. Ez az érték tulajdonképpen egy pixelszám, amely annak a körnek a sugarát jelenti, amelyet a program a fekete foltok értékeinek meghatározásához figyelembe vesz. Ha a megadott érték 10, akkor a környező (10 x 10 x 3.14) 314 pixel értékéből határozza meg a hiányzó adatot. Értelemszerűen, minél nagyobb a hiányzó terület mérete a számolt értékek annál pontatlanabbak.



94. ábra Az Invalid-filter működése (Saját ábra)

- **Spitzen filter:** A szűrő a profilból erőteljesen kiugró csúcsokat vágja le automatikusan. Kiugró csúcsnak a 10 pixelnél nem szélesebb, ugyanakkor 10 pixelnél hosszabb kitéréseket számítja pozitív és negatív irányban egyaránt.

- **Gauss filter:** A szűrő a felületek simítására, „a zajok kiszűrésére” szolgál. A parancs kiadása után meg kell adni egy értéket 2-50 között. Ez a szám az ismétlések számát jelenti, azaz azt, hogy a program hányszor futtassa le egymás után a parancsot. Matematikailag úgy dolgozik a szűrő, hogy mindig az egymás mellett lévő 3 pixelértéket figyeli. Ebből az első 1, a középső 2, a harmadik megint 1 súlyozást kap. Így számolja a három érték összegét, majd osztja 4-gyel. Ez lesz az új középső érték. Aztán lép eggyel tovább, megint veszi a három értéket. Ezt az egész mátrixra végiglépteti, amely egy ciklusnak számít. A parancs kiadásakor megadott értéknek megfelelően a ciklusok számát megismétli. Magas értéket adva akár teljesen sík felületet is eredményezhet.

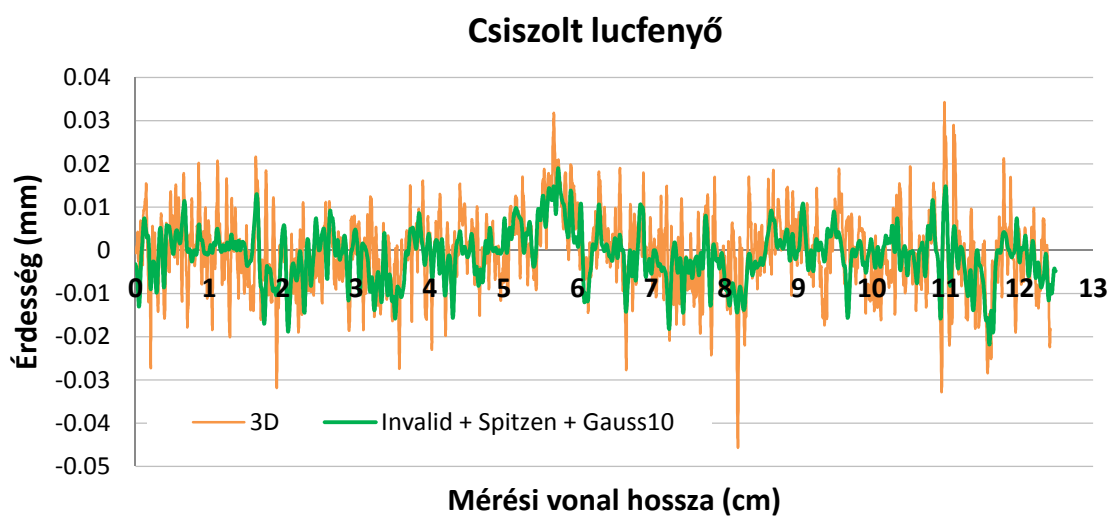
- **Median filter:** A szűrő a Gauss szűrőhöz hasonlóan a felületek simítására használható. A parancs kiadása után itt is meg kell adni egy értéket 3-49 között, de ebben a tartományban is csak páratlan számok adható meg. Kicsit másként működik, mint a Gauss szűrő. Az itt megadott érték nem a ciklusok ismétlésének számát jelenti, hanem az egy lépésben vizsgálandó pixelértékek számát. Azaz, ha például 9 a megadott érték, akkor a 9 egymás mellett lévő pixelérték mediánját számolja a program, és ez a szám lesz a 9 pixel középső új értéke. Aztán egyet lép tovább és ezt ismétli az egész mátrixra. Mindig csak egy ciklusban dolgozik.

- **Mittelwert filter:** Ugyanúgy dolgozik, mint a medián szűrő, csak nem mediánt, hanem átlagot számol.

Minden egyes szűrési eljárásnál pontosan meghatároztam, hogy milyen hatással van az érdességi paraméterekre, azaz használatával hogyan módosulnak a paraméterek értékei. Ezen ismeretek birtokában sikeresen dolgoztam ki egy szűrési módszert (három különböző szűrési eljárás megfelelő sorrendjének alkalmazása), melynek segítségével, nagymértékben eltávolíthatók a felületi profilból ezek a kiemelkedő csúcsok és völgyek. A három szűrési eljárás az alkalmazás sorrendjében:

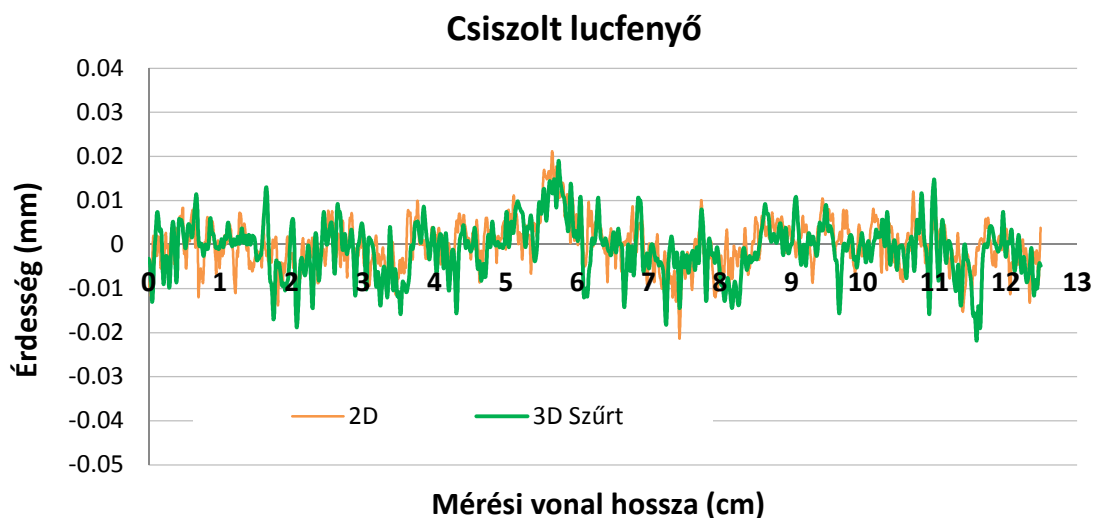
1. Invalid filter (100)
2. Spitzen filter
3. Gauss filter (10)

A kidolgozott eljárásnak köszönhetően az eddig rendkívül hektikus profilok jóval letisztultabbá váltak (95. ábra), aminek következményeként a 3 dimenziós érdességi paraméterek értéke is jelentősen csökkent.

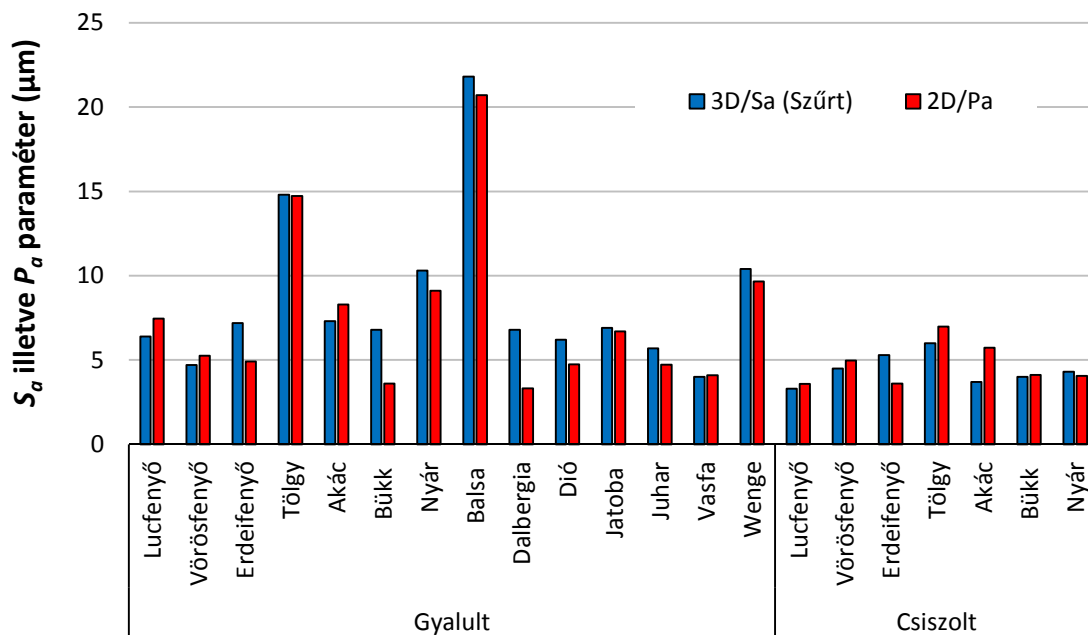


95. ábra Csiszolt lucfenyő szűrés előtti és utáni érdességi profilja

Az így kapott profilokat összevetve a Perthometer által mért profilokkal (96. ábra) szinte elenyésző különbségek tapasztalhatók. A szűrést követően az ugyanarról a felületről származó 2 és 3D-s paraméterek közti különbség is nagymértékben redukálódott (97. ábra).



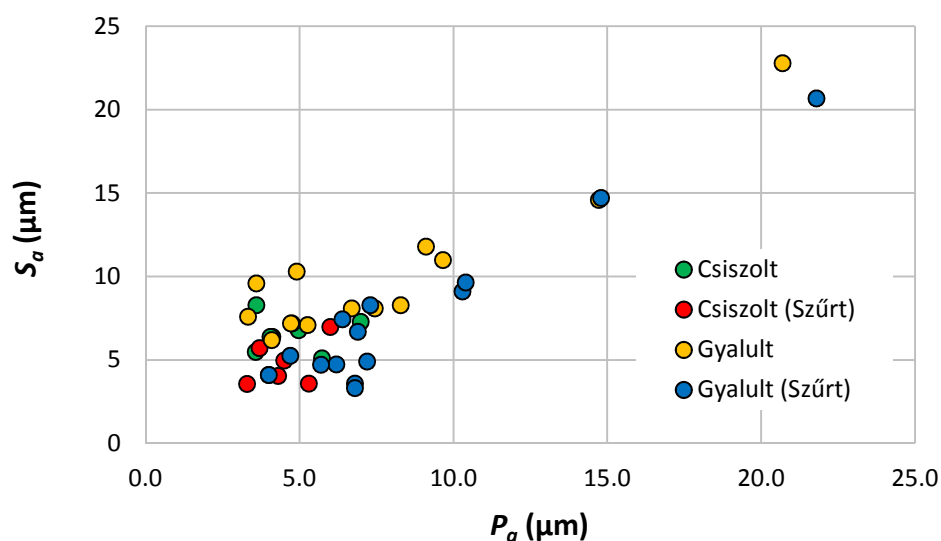
96. ábra Csiszolt lucfenyő 2D-s és szűrt 3D-s érdességi profilja



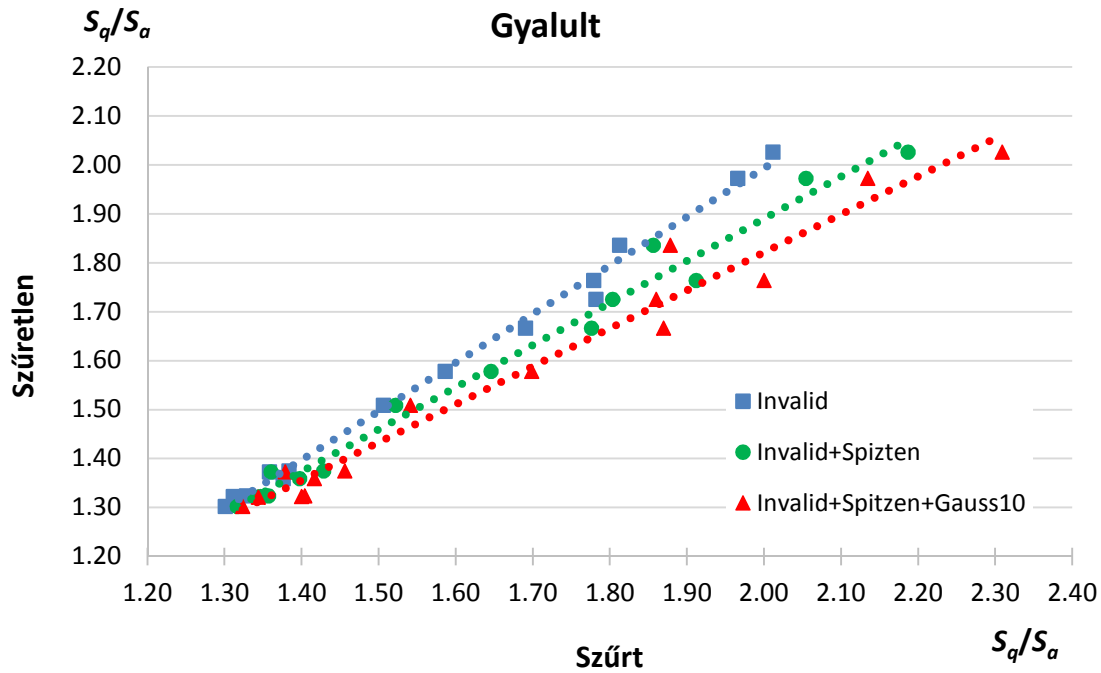
97. ábra Az ugyanarról a felületről származó szűrt S_a illetve P_a paraméterek értékei

Egyértelművé vált, hogy természetes faanyagok felületéről nyert 3 dimenziós érdességi paraméterek pontos értékelése, csak a kidolgozott szűrés módszer használatát követően lehetséges. Ez a gyakorlatban annyit jelent, hogy az optikai mérőműszert „kalibrálni” kell egy fa felületre jól alkalmazható, bevizsgált mérési eljárással, jelen esetben egy hitelesített Perthométer adataival, a fenti gondolatmenetnek megfelelően.

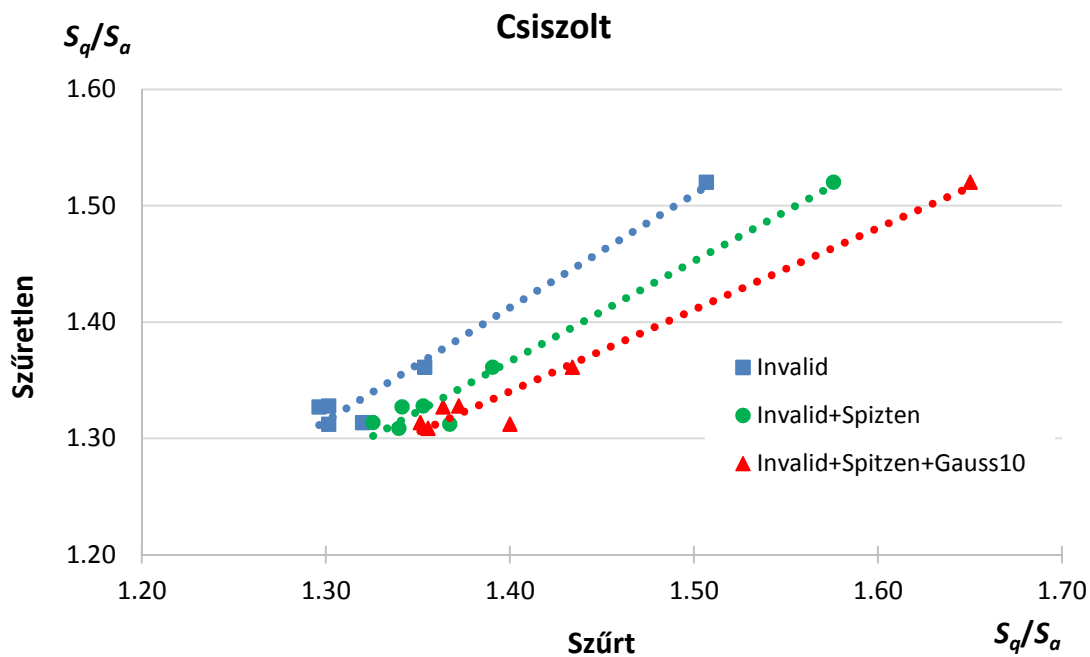
Mivel a korábbi nedvesítési kísérleteknél az adatokat főként összehasonlításra alkalmaztam a 2D-s eljárás alapján validált optikai mérőmódszert nem alkalmaztam újból a korábbi kísérletekre, azonban szeretném hangsúlyozni, hogy természetes faanyagok esetén az optikai mérőrendszerek beállításainak meghatározása nagy körültekintést igénylő feladat (pl. az általam alkalmazott Perthométeres validálás).



98. ábra Az ugyanarról a felületről származó S_a illetve P_a paraméterek összehasonlítása szűrés előtt és után

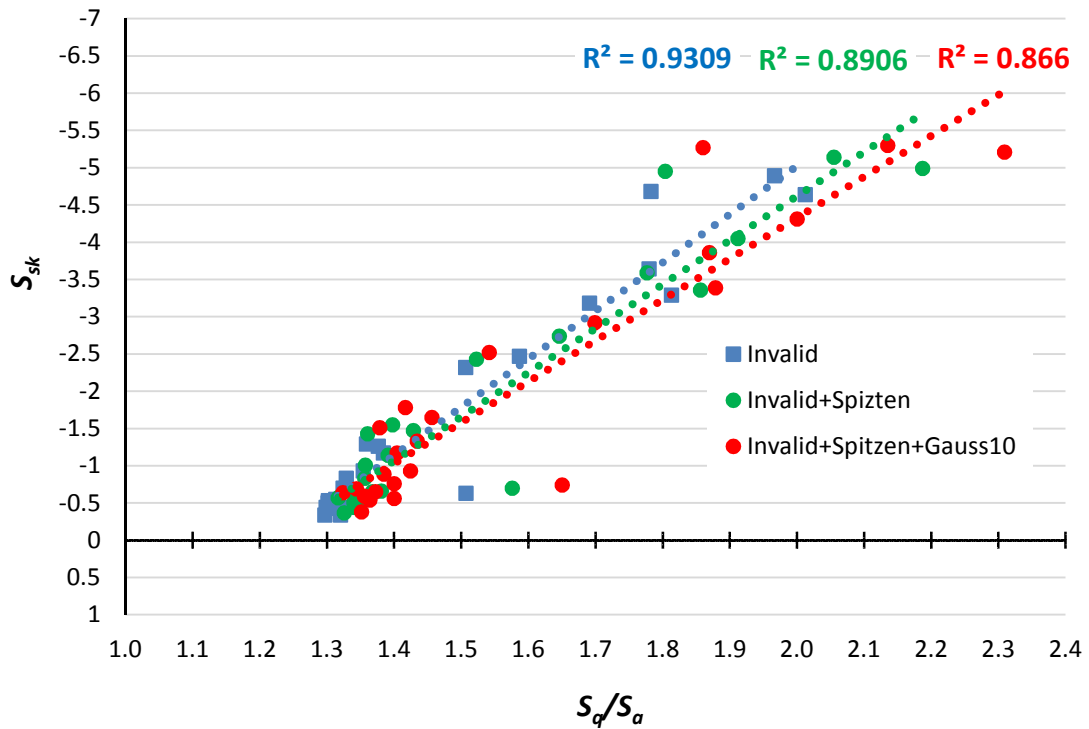


99. ábra Az S_q/S_a hányados alakulása szűrés hatására gyalult fafelületeken

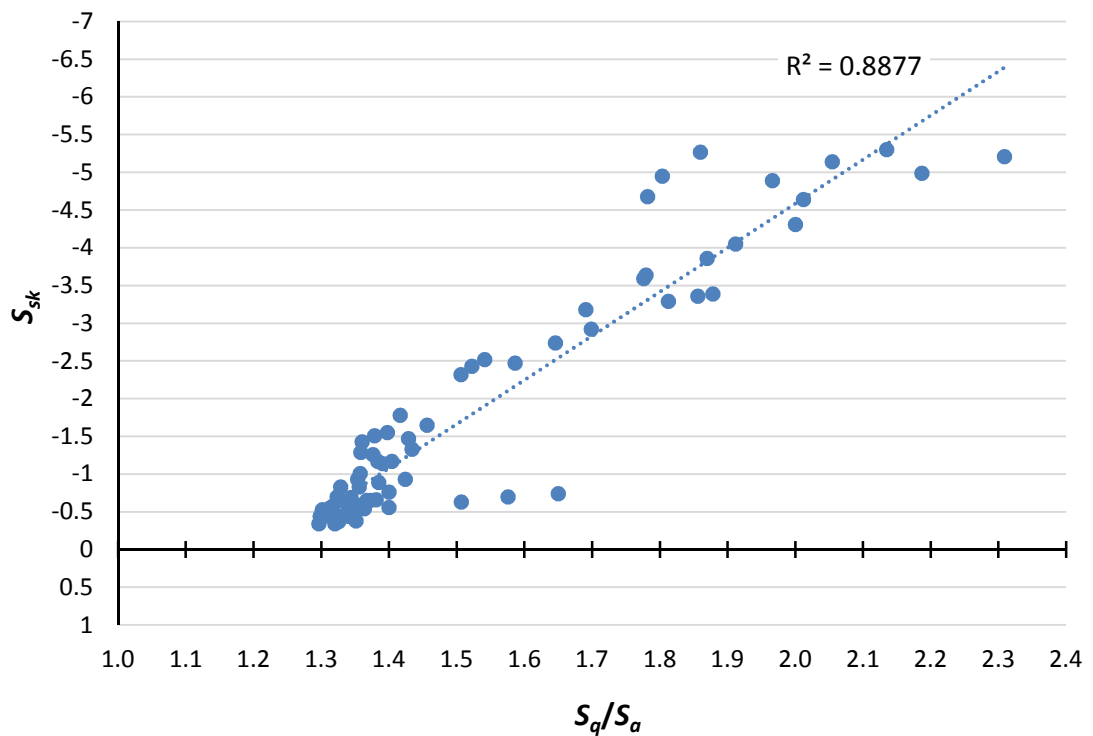


100. ábra Az S_q/S_a hányados alakulása szűrés hatására csiszolt fafelületeken

A szűréseket minden egyes esetben alaposan meg kell fontolni, mert a fenti kísérletek szerint a különböző megmunkálási módok esetén is a szűrés módosítja az eredeti P profilt, így a jellemző S_q/S_a , (R_q/R_a) hányados szisztematikusan a nagyobb értékek felé tolódik el. A kísérleti eredmények alapján az általam bevezetett S_q/S_a , (R_q/R_a) hányados alkalmas az alkalmazott szűrés hatásának megítélésére az eredeti P profilhoz viszonyítva.



101. ábra A ferdeség (S_{sk}) és az S_q/S_a hányados közötti összefüggés alakulása szűrések hatására



102. ábra A ferdeség (S_{sk}) és az S_q/S_a hányados közötti összefüggés

A ferdeség S_{sk} és az S_q/S_a hányados értékei szintén a nagyobb értékek fel tolódnak szűrés hatására (101. ábra). A korreláció azonban ekkor is megmarad a két tényező közt (102. ábra).

7. Összefoglalás

Összefoglalva a kísérleti eredményeket megállapítható, hogy a természetes faanyagok felületén nedvesítés hatására bekövetkező változások egészen eltérőek.

A szakirodalomban nem található a természetes faanyag stabilitását szisztematikusan feldolgozó kutatás bemutatása, egyes megmunkálások esetén találhatóak érdességi adatok, általában a nedvesítés utáni stabilizált állapotról. Kutatómunkám során ezért célul tűztem ki a nedvesítés utáni felületmozgások számszerűsíthető leírását, illetve az egyes megmunkálások egyes fafajokon létrehozott felületi instabil réteg számszerűsített jellemzését.

A szakirodalmi adatok feldolgozása után - kutatási tervemnek megfelelően - nedvesítési eljárást dolgoztam ki, mely alapjául a gyakorlatban alkalmazott felületkezelő anyagok nedvességtartalma szolgált az ajánlott felviteli mennyiség esetén, illetve egyenletes eloszlást és reprodukálhatóságot tesz lehetővé. Meghatároztam az egyes végmegmunkálásokra, illetve a vizsgált fafajokra a felület stabilizálódásának időpontját is.

A vizsgált végmegmunkálások közül, a csiszolt felületek mozogtak a legnagyobb mértékben, ami magyarázatul szolgál arra a korábbi gyakorlati és a szakirodalomban is fellelhető megfigyelésre, miszerint fafajtól függetlenül a csiszolt felületek rendelkeznek a legmegfelelőbb feltételekkel a különböző bevonatok alkalmazásához és a legalacsonyabb mennyiséggel a legjobb minőségű fedettség érhető el.

A természetes faanyag érdességének mindig van szórása a véletlen vágási síkok és a fafaj anatómiai felépítése miatt. Ezért dolgozatomban korrelációs összefüggéseket állapítottam meg, a szoros kapcsolatot jelentő egyenletekkel szemben.

A szakirodalom szintén csak részeredményeket közöl a természetes faanyag felületi érdesség mérő berendezések alkalmazhatóságával kapcsolatban. Ezért kutatómunkám során szisztematikusan vizsgáltam meg, hogy a jelenlegi mérés technikai lehetőségek, azaz a 2 dimenziós tús felületi profilmérés, és a 3 dimenziós optikai felületi szkennelés eredményei milyen feltételek mellett alkalmazhatóak, illetve feltártam a 2 dimenziós és 3 dimenziós felületi érdesség paraméterek összefüggéseit.

Kutatómunkám eredményeinek tézisekben történő összefoglalása a következő, 8. fejezetben, a gyakorlat szempontjából fontos következtetések a 9. fejezetben találhatóak.

8. Tézisek

A részletes kísérleti vizsgálatok eredményei alapján a következő tudományos megállapításokat teszem:

1. tézis: 3D érdességmérésen alapuló mérési és kiértékelési módszert dolgoztam ki a f felületek nedvesítésére bekövetkező felületmozgások időbeli mérésére és az érdességi paraméterek változásának jellemzésére.
2. tézis: Kísérletileg meghatároztam és elméletileg magyaráztam az érdesség időbeli lefolyását 7 fafajra [lucfenyő (*Picea abies* Karst.), vörösfenyő (*Larix decidua* Mill.), erdeifenyő (*Pinus sylvestris* L.), kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* Liebl.), fehér akác (*Robinia pseudoacacia* L.), bükk (*Fagus sylvatica* L.), rezgőnyár (*Populus tremula* L.)], a nedvesedés és száradás dinamikájának figyelembevételével. A nedvesítés utáni stabilizálódott állapot (120 perc) érdessége ($S_a, S_{pk}, S_k, S_{vk}, S_{sk}, S_{dr}$) mindig nagyobb a kezdeti értéknél.
3. tézis: Bevezettem a felületi stabilitás fogalmát, amelyet elsősorban a nedvesítés előtti és utáni S_k vagy R_k viszonyszámmal jellemeztem. Használhatók az S_a, S_{pk}, S_{sk} jellemzők is.
4. tézis: Különböző végmegmunkálásokkal vizsgáltam és a vizsgált fafajokra meghatároztam a felületi stabilitást a megmunkálások függvényben. Minden fafaj esetében a csiszolt felület mutatta a legnagyobb deformációs mozgást, legkisebb stabilitást. A finiselt felületek rendelkeztek a legjobb stabilitással.
5. tézis: A faanyag diffúziós tényezője befolyásolja a száradás sebességét, a víz felületbe való behatolását, és ezzel a felület érdességének változását. Ezt különösen az akác és lucfenyő közötti lényeges különbség mutatja (51. ábra).
6. tézis: Bevezettem az S_q/S_a (R_q/R_a) viszonyszám használatát és korrelációs kapcsolatot találtam az S_{sk} ferdeséggel (79. ábra), amelyet empirikus egyenlettel is leírtam.

$$-S_{sk} = 4.69 \cdot (S_q/S_a - 1.3)$$
7. tézis: Nagyszámú mérés alapján relatív érdességi paraméterekkel számszerűsítettem a vizsgált fafajokra a nedvesítés okozta változás várható értékét. (60. 70. 73. ábrák)

9. A gyakorlat számára levonható következtetések

A téziseken kívül a következő gyakorlati észrevételeket teszem:

1. A felületbe beszivárgó nedvesség a felső rétegek dagadását okozza, amely száradás után visszazsugorodik. A fa anizotrópiája és a nem folytonos anyageloszlás következtében maradó deformáció és helyi alakváltozások maradnak vissza, megváltoztatva az eredeti érdességet is.

2. Az egyidejű beszivárgás és a felületről való elpárolgás együttes hatásaként a víz mennyisége, az anyag vezetési (diffúziós) tényezője és a levegő oldal jellemzői (hőmérséklet, relatív páratartalom, sebesség) határozzák meg alapvetően a várható érdesség romlását.

3. A megmunkálás elsősorban a felső 20 μm -es réteget módosítja, ezért ez a beszivárgást és az elpárolgást jelentősebben nem módosítja. Az érdesség viszont ebben a zónában alakul ki, ezért a megmunkálás jelentősen befolyásolhatja a végső érdességet.

4. A csiszolt felület nagy deformációs mozgása növeli a diffúziós tényezőt a felső 10 – 20 μm -es rétegben, ezért felületkezeléskor (lakkozás) javítja a lakk egyenletes behatolását a felületbe. Ezt a pozitív hatást néhány kutató már korábban észlelte, részletesebb magyarázat nélkül. Nagy viszkozitású anyagok (ragasztók) ugyanakkor a lassú diffúzió miatt nem mutatnak jobb eredményt a csiszolt felületen és nem javítja a terjedést.

5. Az S_q és S_a (R_q és R_a) érdességi jellemző számok, a fémiparban hangoztatott egyes véleményekkel ellentétben függetlenek egymástól, ezért a viszonyszámuk a faiparban fontos jellemző érték, amely a ferdeséggel S_{sk} (R_{sk}) egyértelmű kapcsolatban van.

6. Az optikai érdességmérési módszer, az optika belső törvényszerűségeinek következtében hibás mérési adatokat is szolgáltathat. Ha a felület reflexiója elegendően diffúz, akkor a mérési eredmény jó lehet. Ha azonban tükröző és különbözőképpen konkáv (véletlenszerűen elvágott edények), akkor előfordulhat, hogy a mérőjel nem kerül vissza az érzékelőre megfelelően és hibás mérési eredményt kapunk. A csiszolt felület a leginkább diffúz, ezért a mérési eredmények itt a legmegbízhatóbbak. Igen kemény és sűrű fafajoknál (pl. *Dalbergia cochinchinensis*) a hiba elérte a 300%-ot is.

10. Publikációs munkáim

Idegen nyelvű lektorált tudományos folyóiratban megjelent szakcikkek

1. Tolvaj, L.; Molnár, Zs.; Németh, R. (2013): Photodegradation of wood at elevated temperature: Infrared spectroscopic study, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 121 pp. 32-36
2. Tolvaj, L.; Magoss, E.; Molnár, Zs. (2014): Measurement of photodegradation-caused roughness of wood using a new optical method, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 134 pp. 23-26
3. Molnár, Zs.; Magoss, E.; Fuchs, I.; Rosta, T. (2015): Einfluss von Bearbeitung und Befeuchtung auf die Oberflächentopologie von Vollholz, *Holztechnologie* 56(2): 10-19
4. Tolvaj, L.; Popescu, C.M.; Molnár, Zs.; Preklet, E. (2016): Effects of Air Relative Humidity and Temperature on Photodegradation Processes in Beech and Spruce Wood, *BIORESOURCES* 11(1) pp. 296-305
5. Molnár, Zs.; Magoss, E.; Fuchs, I.; Csiha, Cs. (2017): Stability of thermosmoothed and precision planed solid wood surfaces, *European Journal of Wood and Wood Products, Holz als Roh- und Werkstoff*, DOI: 10.1007/s00107-017-1174-y
6. Molnár, Zs.; Németh, G.; Héjja, S.; Magoss, E.; Tatai, S. (2017): The effect of the Position of 2D Roughness Measurement on the Roughness Parameters by natural Wood material, *Wood Research*, 62(6): 895-904
7. Magoss, E.; Molnár, Zs.; Fuchs, I.; Tatai, S. (2018): Stability of planed and precision planed solid wood surfaces, *European Journal of Wood and Wood Products, Holz als Roh- und Werkstoff*, (*Megjelenés alatt!*)

Idegen nyelvű konferencia kiadványban megjelent szakcikkek

1. Reisz, L.; Molnár, Zs.; Tatai, S.; Magoss, E. (2012): Correlation between the wood cutting parameters and the distribution of the wood particles, *Trieskové a Beztrieskové Obrábanie Dрева 2012, VIII. Medzinárodná Vedecká Konferencia* 8(1) pp. 285-290, ISBN 978-80-228-2385-2

Magyar nyelvű lektorált tudományos folyóiratban megjelent szakcikkek

1. Molnár, Zs.; Magoss, E.; Tolvaj, L. (2013): A fotodegradáció okozta felületérsedés vizsgálata, *Faipar* 61(2) pp. 26-32

2. Molnár, Zs.; Magoss, E.; Tolvaj, L. (2013): Fotodegradáció hatására fellépő felületérdesedés vizsgálata az infravörös színek segítségével, Faipar 61(3) pp. 11-16

Magyar nyelvű konferencia kiadványban megjelent szócikkek

1. Molnár, Zs.; Magoss, E. (2012): A fotodegradáció okozta felületérdesedés vizsgálata hagyományos és spektroszkópiai módszerekkel, Hallgatói Tudományos Konferencia 2012, Tanulmánykötet, 108-115
2. Molnár, Zs.; Tolvaj, L.; Magoss, E. (2013): A faanyag foto-degradálódásakor fellépő felületi érdességváltozás követése az infravörös színek segítségével, Tavaszi Szél Konferenciakötet 2013, 323-330

11. Köszönetnyilvánítás

Munkám végére érve szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Magoss Endrének, a sokéves szakmai támogatásáért, a dolgozat elkészítése során kapott iránymutatásokért, a hasznos észrevételekért és nem utolsósorban mérhetetlen türelméért, emberi megértéséért.

Külön köszönettel tartozom Prof. Dr. Sitkei György akadémikus Úrnak, aki komoly szakmai tudásával és tapasztalatával segítette munkámat, még a sokszor lehetetlennek tűnő problémák felmerülése esetén is.

Köszönettel tartozom továbbá Dr.-Ing. Ingrid Fuchs Asszonynak, aki, mint külföldi témavezető, különösen nagy segítséget nyújtott a mérésekhez szükséges feltételek megteremtésében és emellett számos hasznos tanáccsal segítette munkám.

Ezúton köszönöm mind a soproni Faipari Gépészeti Intézet, mind a drezdai Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH azon munkatársainak segítségét, aki bármilyen módon is hozzájárultak ezen dolgozat elkészüléséhez.

Köszönettel tartozom a Campus Hungary Ösztöndíj Programnak, mely segítségével, két alkalommal is 5 hónapot töltöttem Németországban. Ezen időszak alatt olyan méréseket végezhettem el, melyekre a megfelelő eszközök hiányában a hazai kutatóintézményekben nem lett volna lehetőségem.

A szakmai segítség mellett ki kell emelnem azt a rengeteg baráti támogatást, biztatást és bátorítást, amelyet a dolgozat készítése alatti időszakban kaptam, hiszen a mai „folyton rohanó” világban egy ilyen dolgozat a sok lemondás és számtalan nehézség miatt, még töretlen lelkesedés mellett is, csak roppant nehezen készíthető el. Hálás vagyok minden elismerő gesztusért, buzdító szóért, melyek adott esetben nagyban segítettek túllendülni egy-egy nehezebb időszakon. Biztosan állíthatom, hogy nélkületek nem sikerült volna.

Végül, de nem utolsósorban szeretném kifejezni köszönetemet családomnak a dolgozat megírása alatt nyújtott mindennemű támogatásukért.

„Az életet egyetlenegy alapérzéssel lehet boldogan leélni – pedig éppen erre gondolnak legkevésbé az emberek – a hála érzésével.”

(Ravasz László)

12. Irodalomjegyzék (idézett forrásmunkák)

- [1]. Aguilera, A.; Rolleri, A.; Burgos, F. (2016): Cutting distance as factor to evaluate the quality of wood machined surfaces: A preliminary study, *Maderas-Cienc Tecnol* 18(1) Ahead of Print
- [2]. Ayadi, N.; Lejeune, F.; Charrier, F.; Charrier, B. ; Merlin, A. (2003): Color stability of heat-treated wood during artificial weathering, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(3), pp. 221-226
- [3]. Babiak, M.; Németh, R. (1998): Effect of steaming on the sorption isotherms of black locust wood, *Environment and Wood Science, Acta Facultatis Ligniensis, Sopron*, 64-68
- [4]. Bak, M. (2012): *Növényi olajokban hőkezelt nyár faanyag tulajdonságainak vizsgálata, Doktori (PhD) értekezés, Sopron*
- [5]. Baronas, R.; Ivanauskas, F.; Juodeikienė, I.; Kajalavicius, A. (2001): Modelling of Moisture Movement in Wood during Outdoor Storage, *Nonlinear Analysis, Modelling and Control* 6(2):3-14
- [6]. Bodschwinna, H.; Seewig, J. (2013): Surface Statistics and Probability Density Function, *Encyclopedia of Tribology*, pp. 3465-3472
- [7]. Bosshard, H. (1984): *Holzkunde Bd.3, Aspekte der Holzbearbeitung und Holzverwertung, Birkhäuser Verlag, Basel*
- [8]. Christy, A. G.; Senden, T. J.; Evans, P. D. (2005): Automated measurement of checks at wood surfaces, *Measurement* 37(2): 109–118
- [9]. Czifra, Á.; Palásti K.; B.; Farkas, G. (2007): Tribological behaviour of machined surfaces, *The 6th International Scientific Conference, Development of metal cutting DMC, Kosice*, pp. 1087-1098
- [10]. Csanády, E.; Magoss, E.; Tolvaj, L. (2015): *Quality of Machined Wood Surfaces, Springer International Publishing*
- [11]. Csiha, Cs. (2003): *Faanyagok felületi érdességének vizsgálata P és R profilon, különös tekintettel a nagyedényes fajokra, Doktori értekezés, Sopron*
- [12]. Csupor, K. (2004): *A faanyag károsodása és károsítói, In. Németh, L. (szerk): Faanyagok és faanyagvédelem az építőiparban. Agroinform Kiadó, Budapest, 6. fejezet*
- [13]. Danzl, R.; Helmlí, F.; Scherer, S. (2011): Focus Variation – a Robust Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology, *Strojníški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 57(3), 245-256

[14]. De Chiffre, L.; Lonardo, P.; Trumpold, H.; Lucca, D.A.; Goch, G.; Brown, C.A.; Raja, J.; Hansen, H.N. (2000): Quantitative Characterisation of Surface Texture, Original Research Article, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 49(2) s.: 635-642, 644-652

[15]. Derbyshire, H.; Miller, ER. (1981): The photodegradation of Wood During Solar Irradiation, Holz als Roh- und Werkstoff, 39 (8): 341-350

[16]. Derbyshire, H.; Miller, ER.; Turkulin, H. (1995): Investigation into the photodegradation of wood using microtensile testing, Part 1: The application of microtensile testing to measurement of photodegradation rates, Holz als Roh- und Werkstoff 53, 339-345

[17]. Dirol, D.; Guyonnet, R. (1993): Durability by rectification process, In: International Research Group on Wood Preservation, IRG/WP 93-40015

[18]. Dong, W. P.; Sullivan, P. J.; Stout, K. J. (1994): Comprehensive study of parameters for characterising three- dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties, WEAR 178, 29-43

[19]. Dowson, D. (1979): History of tribology, Longman Inc., New York

[20]. Engelund, E.T.; Thygesen, L.G.; Svensson, S.; Hill, C.A.S. (2013): A critical discussion of the physics of wood-water interactions, Wood Science and Technology, 47(1), pp. 141-161

[21]. Evans, P. (2009): Reducing grain raising during the finishing of wood with water-based coatings, Report, University of British Columbia, Vancouver, Canada

[22]. Evans, PD.; Michell, AJ.; Schmalz, KJ. (1992): Studies of the degradation and protection of wood surfaces, Wood Science and Technology 26, 151-163

[23]. Feist, WC.; Mraz, EA. (1978): Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected softwoods, Forest Products J. 28 (3), 38-43

[24]. Fisher, R.; Schuster, C. (1993): Zur Qualitätsentstehung spanend erzeugter Holzoberflächen; Mitteilung TU Dresden

[25]. Frandsen, H.L. (2007): Selected constitutive models for simulating the hygro-mechanical response of wood, Dissertation, Aalborg University, Denmark

[26]. Frankowski, G. (1999): Optische 3D-Meßtechnik für Forschung und Produktion mit digitaler Mikrospiegel-Streifenprojektion, GF Messtechnik GmbH, Teltow/Berlin – Firmenschrift

[27]. Fuchs, I. (2011): Thermo-Smoothing of wood and wood materials - Recent Results, 20th International Wood Machining Seminar, Skellefteå Sweden, pp. 61-64

[28]. Fuchs, I.; Devantier, B.; Emmeler, R.; Sandig, C.; Weinert, M. (1997): Kriterium rauheit - Einfluß der Bearbeitungsverfahren auf die Oberfläche von Kanteln aus Holz, HK - Holz- und Kunststoffverarbeitung, DRW-Verlag, 10/1997 s.: 56-58

- [29]. Fuchs, I.; Raatz, C.; Peter, M.; Pflüger, T. (2007): Thermo-mechanical processing of wood materials and effect on the surface roughness, Proceedings of 3rd International Symposium on Wood Machining, pp. 11-21
- [30]. Fujiwara, Y.; Fuji, Y.; Okumura, S. (2003): Effect of removal of deep valleys on the evaluation of machined surface of wood, Forest Products Journal, 53(2):58-62
- [31]. Funck, J.W.; Forrer, J.B.; Butler, D.A.; Brunner, C.C.; Maristany, A.G. (1992): Measuring surface roughness on wood: a comparison of laser scatter and stylus tracing approaches, SPIE 1821:173–184
- [32]. Futó, L.P. (1974): Der photochemische Abbau des Holzes als Präparations- und Analysenmethode, Holz als Roh- und Werkstoff, 32(8), 303-311
- [33]. Futó, L.P. (1976): Einfluss der Temperature auf den photochemischen Holzabbau, Holz als Roh- und Werkstoff, 34(1), 31-36
- [34]. GFMesstechnik (2008): MikroCAD Optisches 3D-Messgerät, Software ODSCAD 6.0, Handbuch
- [35]. Gilewicz, A.; Warcholinski, B.; Myslinska, P.; Szymanski, W. (2010): Anti-wear multilayer coatings based on chromium nitride for wood machining tools, Wear, 270(1-2): 32-38
- [36]. Gindl, W.; Gupta, H.S.; Schöberl, T.; Lichtenegger, H.C.; Fratzl, P. (2004): Mechanical properties of spruce wood cell walls by nanoindentation, Applied Physics A, Materials Science & Processing, 79(8), pp. 2069-2073
- [37]. Gottlöber, C. (2008): Grundlagen des Verarbeitens der HFW, Grundprozesse Kapitel
- [38]. Grzesik, W.; Warant, T. (2005): Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis, Journal of Materials Processing Technology 169(3): 364-371
- [39]. Gühring, J. (2002): 3D Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Dissertation
- [40]. Gyarmati, B.; Igmándy, Z.; Pagony, H. (1964): Faanyagvédelem, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [41]. Hirata, S.; Ohta, M.; Honma, Y. (2001): Hardness distribution on wood surface, Journal of Wood Science, 47(1), pp. 1-7
- [42]. Hoffmeister, H.W.; Riegel, A. (1998): Oberflächenfinish mit rotierenden Schleifmittelstreifen, HOB, Teil:I (2):80-83, Teil II: (3):46-48
- [43]. Horváth, N. (2008): A termikus kezelés hatása a faanyag tulajdonságaira, különös tekintettel a gombaállóságra, Doktori (PhD) értekezés, Sopron

[44]. Horváth, S. (2008): A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése, a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálat és elemzése, Doktori (PhD) értekezés, Budapest

[45]. Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (2012): Bedienung der KÜNDIG Breitbandschleifmaschine, AA_30_01_Bedienung BBSM, Arbeitsanweisung

[46]. Koehler, A. (1932): Some observations on raised grain, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 54: 17-30

[47]. Kokkonen, A. (2007): The Visual Roughness of Prints and Unprinted Papers, Helsinki University of Technology, Department of Automation and Systems Technology, Finland

[48]. Korkut, D.; Akgü, M.; DüNDAR, T. (2008a): The effects of heat treatment on some technological properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) wood, Bioresource Technology, 99, pp. 1861-1868

[49]. Kovács, I. (1979): Faanyag-ismerettan, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest

[50]. Kovács, T. (2011): 3D szkennelés kódolt fényvel, Szakdolgozat, Debreceni egyetem, Mérnök Informatika

[51]. Landry, V.; Blanchet, P. (2012): Surface Preparation of Wood for Application of Waterborne Coatings, Forest Products Journal, 62(1), pp. 39-45

[52]. Landry, V.; Blanchet, P.; Cormier, L.M. (2013): Water-Based and Solvent-Based Stains: Impact on the Grain Raising in Yellow Birch, BioResources 8(2): 1997-2009

[53]. Leach, R. (2013): Characterisation of Areal Surface Texture, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Kapitel 2, s. 29-30

[54]. Magoss, E. (2008): General Regularities of Wood Surface Roughness, Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 2008(4), pp.81-93

[55]. Magoss, E. (2001): Természetes faanyag anatómiai felépítésének hatása a felületi minőségre marási művelet esetén, Doktori (PhD) értekezés, Sopron

[56]. Magoss, E. (2013): General regularities of the surface roughness sanding solid woods, 21st International Wood Machining Seminar, Tsukuba, Japán, pp. 325-332. (ISBN:[978-4-9903467-9-9](https://www.isbn-international.org/product/978-4-9903467-9-9))

[57]. Magoss, E. (2015): Evaluating of the surface roughness of sanded wood, Wood Research, 60(5): 783-790

[58]. Mahr Gesamtkatalog (1998): Fertigungsmeßtechnik – Systeme, Mahr GmbH, Göttingen, s.: 11-23

- [59]. Marra, G. G. (1943): An analysis of the factors responsible for raised grain in the wood of oak, following sanding and staining, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 65: 177-185
- [60]. Molnár, S. (2004): Faanyagismeret, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- [61]. Molnár, S.; Bariska, M. (2005): Magyarország ipari fáí, Szaktudás Kiadó Ház Rt., Budapest
- [62]. Molnár, Zs. (2011): A mért felület nagyságának hatása a természetes faanyag felületi érdességére, Diplomamunka, NymE-SKK Gépészeti és Mechatronikai Intézet, Sopron
- [63]. Molnár, Zs.; Magoss, E.; Tolvaj L. (2013): A fotodegradáció okozta felületérdesedés vizsgálata, Faipar 61 (2): 26-32
- [64]. Moon, R.J.; Jakes, J.E.; Beecher, J.F.; Frihart, C.R.; Stone, D.S. (2009): Relating nanoindentation to macroindentation of wood. In: Hse C-Y, Jiang Z, Kuo M-L (eds) Advanced biomass science and technology for bio-based products, Beijing, China, 2009. Chinese Academy of Forestry & USDA Forest Service, Southern Research Station, pp 145–159
- [65]. Murmanis, L.; River, B.H.; Stewart, H.A. (1986): Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions, Wood and Fiber Science 18: 107-117
- [66]. Nakamura, G. I.; Takachio, H. (1961): An experiment on the roughness and stability of sanded surface, Mokuzai Gakkaishi, 7(2): 41-45
- [67]. Németh, K. (1998): A faanyag degradációja, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- [68]. Pahlitzsch, G. (1996): Internationaler Stand der Forschung auf dem Gebiet des Hobelns und Fräsens von Holz und Holzwerkstoffen, Holz als Roh- und Werkstoff 24: 579-593
- [69]. Pfriem, A.; Grothe, T.; Wagenführ, A. (2007): Einfluss der thermischen Modifikation auf das instationäre Sorptionsverhalten von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Holz als Roh- und Werkstoff, 65(4), 321-323
- [70]. Pierre Larricq; Jean-philippe Costes; Patrick Le Breton; Gérard Cassou (2000): Quality Surface Characteristics in high speed Machining, Proceedings of the International Symposium on Wood Machinig, Vienna, 203-209
- [71]. Pinkowski, G.; Szymanski, W.; Krauss, A. (2010): Impact of the cutting edge condition on the results of oak wood milling, Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology 72: 147-152

[72]. Pozsgai, I. (1995): A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest

[73]. Raatz, C.; Sandig, C. (1999): Smoothing of wood and wood based materials, In: 14th International Wood Machining Seminar, pp. 83-87

[74]. Sahin, H. T. (2008): Wood-water interactions as affected by chemical constituents of woods, Asian Journal of Chemistry 20(4), 3267-3276

[75]. Sahin, T. U.; Mantanis, G. I. (2011): Nano-based surface treatment effects on swelling, water sorption and hardness of wood, Maderas. Ciencia y tecnología 13(1): 41-48

[76]. Sandak, J.; Tanaka, C.; Ohtani, T. (2004): Evaluation of surface smoothness by a laser displacement sensor II: comparison of lateral effect photodiode and multielement array, Journal of Wood Science, 50(1):22-27

[77]. Sander, M. (1993): Oberflächenmeßtechnik für den Praktiker, 2. Auflage, Feinprüf Perthen GmbH, Göttingen

[78]. Schadoffsky, O. (1996): Objektive Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenqualitäten, Seminar für die Holz- und Möbelindustrie, Bielefeld

[79]. Siau, J. F. (1984): Transport Processes in Wood, Springer Series in Wood Science

[80]. Simpson, W.T. (1973): Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models, Wood and Fiber., 5(1):41-49

[81]. Skaar, C. (1988): Wood-Water Relations, Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg

[82]. Stamm, A.J. (1929): The fiber-saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurements, Ind Eng Chem 1(2):94-97

[83]. Stamm, A.J. (1950): Bound water and hydration, Tappi 33:435-439

[84]. Stamm, A.J. (1956): Diffusion of water into uncoated cellophane from steady-state diffusion measurements, J Phys Chem 60:83-86

[85]. Steinhilper, W.; Sauer, B. (Hrsg.) (2012): Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, Springer-Lehrbuch, Kapitel 2, s. 58

[86]. Stewart, HA.; Crist, JB. (1982): SEM examination of subsurface damage of wood after abrasive and knife planing, Wood Sci, 14(3): 106-109

[87]. Stout, K.J.; Sullivan, P.J.; Dong, W.P.; Mainsah, E.; Luo, N.; Mathia, T.; Zahouani, H. (1993): The development of method for the characterisation of roughness in three dimensions, Commission of European Report EUR 15178 EN, ISBN 0 7044 1313 2

- [88]. Szabó, I. (2003): Ragasztási és felületkezelési folyamatok (Technológia szakirány), Nyugat-Magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Egyetemi jegyzet
- [89]. Takáts, P. (2004): Szárítás és Gőzölés, Sopron, Egyetemi jegyzet, 1-121
- [90]. Thomas, T. R. (1998): Rough Surface, Imperial Collage Press, London
- [91]. Thomas, T. R.; Charlton, G. (1981): Variation of roughness parameters on some typical manufactured surfaces, Precision Engineering 3(2): 91-96
- [92]. Tolvaj, L. (2005): Lombos fafajok gőzöléssel történő faanyagramesítése és a faanyagok fotodegradációjának vizsgálata, MTA doktori értekezés 2005
- [93]. Tolvaj, L. (2013): A faanyag optikai tulajdonságai, Doktori iskola szakkönyv, Sopron
- [94]. Tolvaj, L.; Faix, O. (1995): Artificial Ageing of Wood Monitored by DRIFT Spectroscopy and CIE L*a*b* Color Measurements, Holzforschung 49, 397-404
- [95]. Tolvaj, L.; Papp, Gy. (1999): Outdoor Weathering of Impregnated and Steamed Black Locust, ICWSF'99 Conference, Missenden Abbey (UK) 112-115
- [96]. Tze, W.T.Y.; Wang, S.; Rials, T.G.; Pharr, G.M.; Kelley, S.S.; (2007): Nanoindentation of wood cell walls: Continuous stiffness and hardness measurements, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38(3), pp. 945-953
- [97]. Verma, R.; Raja, J. (2005): Characterization of engineered surfaces, 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Journal of Physics, Conference Series 13, pp. 5-8
- [98]. Vincent, M.; Tong, Q.; Terziev, N.; Daniel, G.; Bustos, C.; Gacitua Escobar, W.; Duchesne, I. (2014): A comparison of nanoindentation cell wall hardness and Brinell wood hardness in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.), Wood Science and Technology, 48(1), pp. 7-22
- [99]. Westkämper, E.; Riegel, A.; Kisselbach, A.; Schadoffsky, O. (1997): Gefügeschädigungen als Standzeitkriterium, Teil I-II-III, Holz- und Kunststoffverarbeitung 9/1997, s.:47-49; 10/1997, s.:43-45; 11/1997, s.:80-82
- [100]. Westkämper, E.; Schadoffsky, O. (1995): Oberflächentopographie von Massivholz, Teil 1. 2.; Holzbearbeitung 3-95 s.:74-78., 4-95 s.: 50-54
- [101]. Wimmer, R.; Lucas, B.N.; Oliver, W.C.; Tsui, T.Y. (1997): Longitudinal hardness and Young's modulus of spruce tracheid secondary walls using nanoindentation technique, Wood Science and Technology, 31(2), pp. 131-141

Internetes hivatkozások:

- [1]. Lassó, A. (2000): Lézeres távolságmérés
<http://3dmr.iit.bme.hu/edu/autroblab/3dscan/3dscanutmutato.pdf>
 Megtekintés: 2017. 03. 15
- [2]. <http://www.alicon.at/home/produkte/mex/technologie.html>
 Megtekintés: 2017. 04. 12
- [3]. http://www.michmet.com/3d_s_height_parameters.html
 Megtekintés: 2017.04.04
- [4]. <http://www.projektor.hu/a+dlp+technologia.html>
 Megtekintés: 2017.04.20
- [5]. <http://hu.wikipedia.org/wiki/Színhőmérséklet>
 Megtekintés: 2017.04.20
- [6]. <https://www.slideshare.net/dfoley2019/color-seminar>
 Megtekintés: 2018.01.31
- [7]. Dinamikus nano- és mikrokeménység mérése
<http://docplayer.hu/16941878-Dinamikus-nano-es-mikrokemenyseg-merese.html>
 Megtekintés: 2018.01.31
- [8]. Cohen, D. (2014): Michigan Metrology - Surface texture parameters glossary
https://www.michmet.com/Texture_parameters.html
 Megtekintés: 2018.02.25

Szabványokra történő hivatkozások:

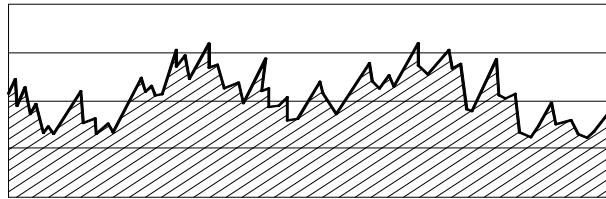
- [1]. MSZ 6786-1:1976 „Faanyagok mintavétele és a fizikai-mechanikai tulajdonságok vizsgálatának általános előírásai”
- [2]. MSZ EN ISO 13565-1:1998 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties – Part 1: Filtering and general measurement conditions
- [3]. MSZ EN ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- [4]. MSZ EN ISO 3274:1996 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments
- [5]. MSZ EN ISO 4287:1998 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287:1997)

Mellékletek

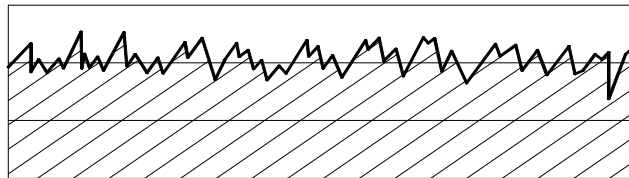
1. Melléklet: A 2D-s érdességi paraméterek (3.2 fejezet)

Ahhoz, hogy a mért felületi profilt értékelni tudjuk, külön kell választani a tényleges érdességet és a hullámosságot. A hullámosság és érdesség szétválasztása leggyakrabban hullámhosszaik alapján, szűréssel történik. Ehhez különböző szűrőket vezettek be, melyek segítségével többféle profil különböztethető meg (MSZ EN ISO 4287:1998):

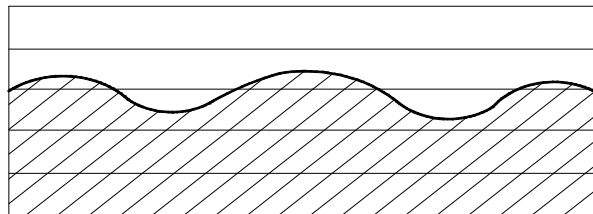
- Totál profil: A mért profil. Ez a profil azonban még tartalmazza a mérőrendszer hibájából származó pontatlanságot is.
- Elsődleges (P) profil: Ez a profil már nem tartalmazza azokat a rövidebb hullámhosszúságú egyenetlenségeket (zaj, rezgés stb.), amelyek a mérőrendszer hibájából adódóan jönnek létre, de az érdesség kiértékelése során nem kell őket figyelembe venni.



- Érdesség (R) profil: A felületi érdesség a megmunkált felület mikrogeometriájának sajátos mintázatot mutató, az alkalmazott szerszám kinematikai nyomát magánviselő kis térközű egyenetlensége, amelyet még olyan tényezők is befolyásolnak, mint a munkadarab anyagának szerkezete, a szerszám élének pontatlanságai.



- Hullámosság (W) profil: A felületi hullámosság a megmunkált felület mikrogeometriájának viszonylag nagy térközű egyenetlensége, amelyet az jellemez, hogy annak amplitúdója sokkal kisebb a hullámhosszához képest. A hullámosság, a felület mechanikai megmunkálásból (gyalulás, csiszolás stb.) származik.

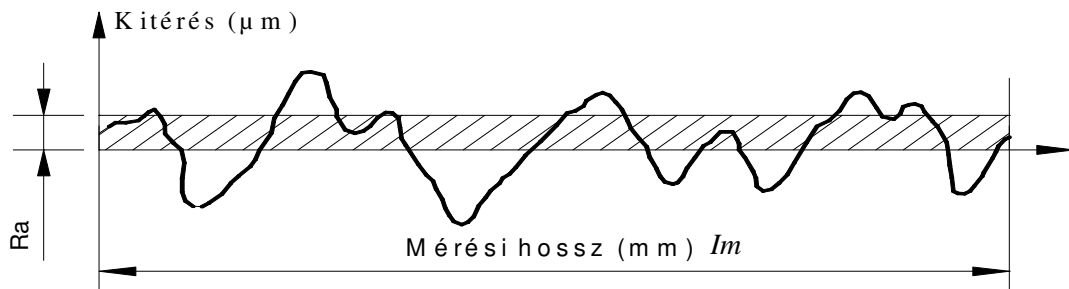


Természetesen a különböző szűrésekkel kapott profilok mindegyikből számolhatók az egyes érdességi paraméterek (pl. P_a , R_a , W_a). A következőben az érdességprofilból származó R paramétereken keresztül mutatom be a legfontosabb paraméterek jelentését.

R_a Átlagos érdesség (MSZ EN ISO 4287:1998)

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |z(x)| dx$$

A profil pontjainak a középvonaltól mért átlagos távolságát adja meg. A középvonaltól az érdességi jelalakot úgy osztja, hogy a fölötte lévő kiemelkedések és alatta lévő bemélyedések területének előjelhelyesen vett összege éppen 0.



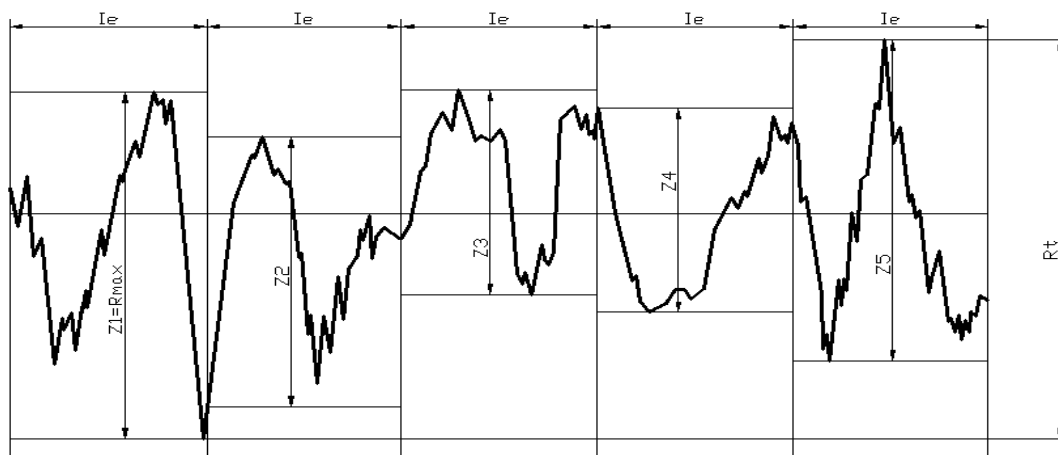
R_q Az eltérések négyzetes közepe

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} z^2(x) dx}$$

A profil pontjainak a középvonaltól mért négyzetes távolságát adja meg.

R_z Egyenetlenség magasság (MSZ EN ISO 4287:1998)

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5}$$



A paraméter értékének meghatározásához az alaphosszt (l_m) 5 egyforma mintavételezési (l_e) hosszra kell osztani. Az egyes mintavételezési hosszokon kapott legnagyobb profilmagasságok számtani közepe adja a paraméter értékét.

R_{sk} Ferdeség

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left(\frac{1}{I_m} \int_0^{I_m} z^3(x) dx \right)$$

Az érdességprofil eloszlásának a középsíkhoz viszonyított aszimmetriáját (ferdeségét) jelenti.

R_{ku} Kilengés

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left(\frac{1}{I_m} \int_0^{I_m} z^4(x) dx \right)$$

Az érdességprofil eloszlásának a meredekségét jelenti.

Az anyagtartalom görbe jellegzetes paramétere: (MSZ EN ISO 13565-2:1996)

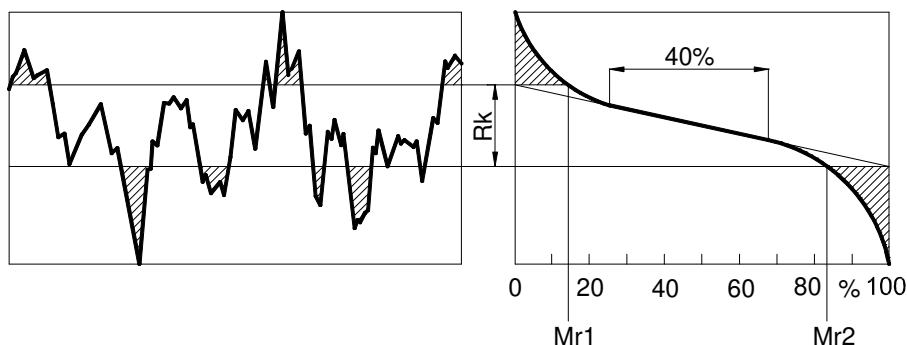
R_k : magprofil magassága.
A magprofilon az érdesség profil azon részét értjük, amely a legmagasabb csúcsokat és a legmélyebb völgyeket már nem tartalmazza.

R_{pk} : redukált csúcsmagasság

R_{vk} : redukált völgymélység

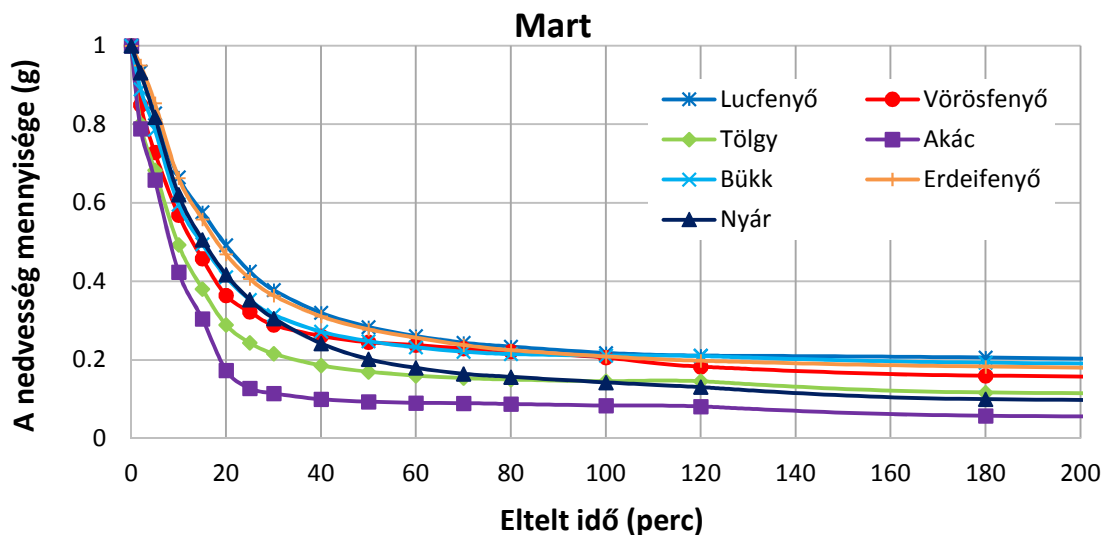
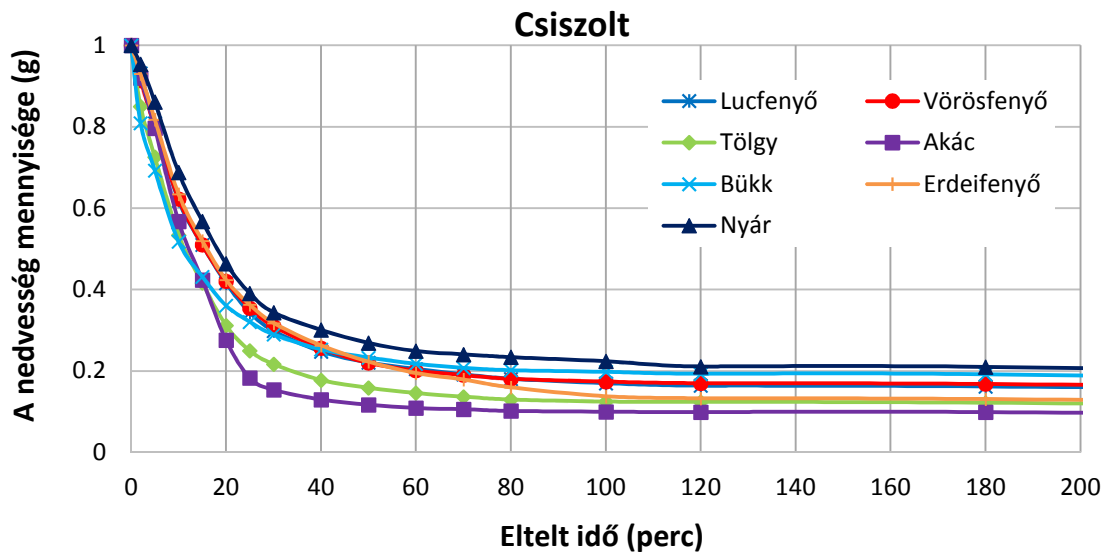
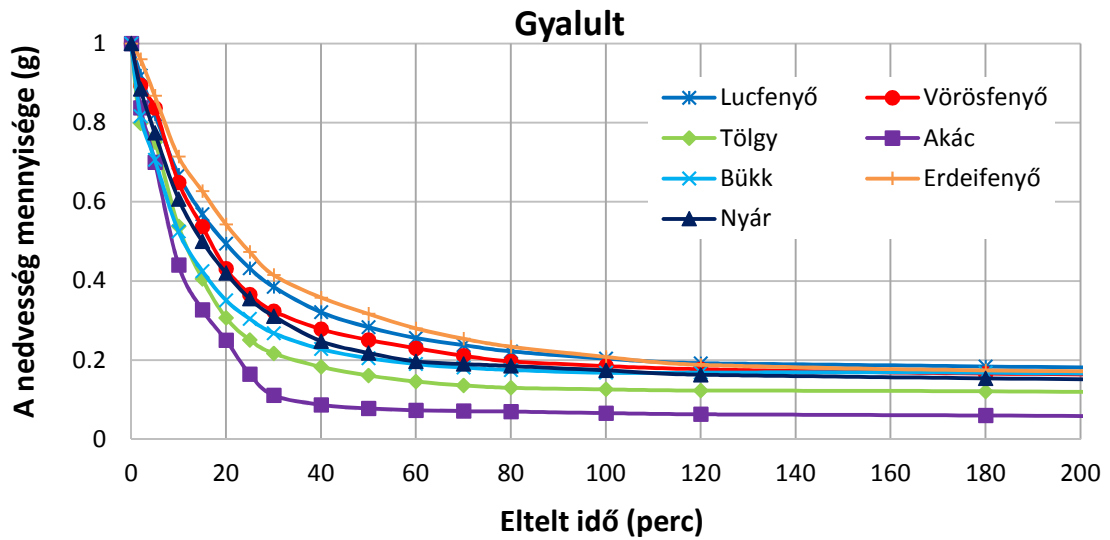
Mr_1 : a redukált csúcsmagassághoz tartozó anyagtartalmi pont
Az a pont az anyagtartalmi görbén, amellyel a felületen elhelyezkedő csúcsok jellemezhetők.

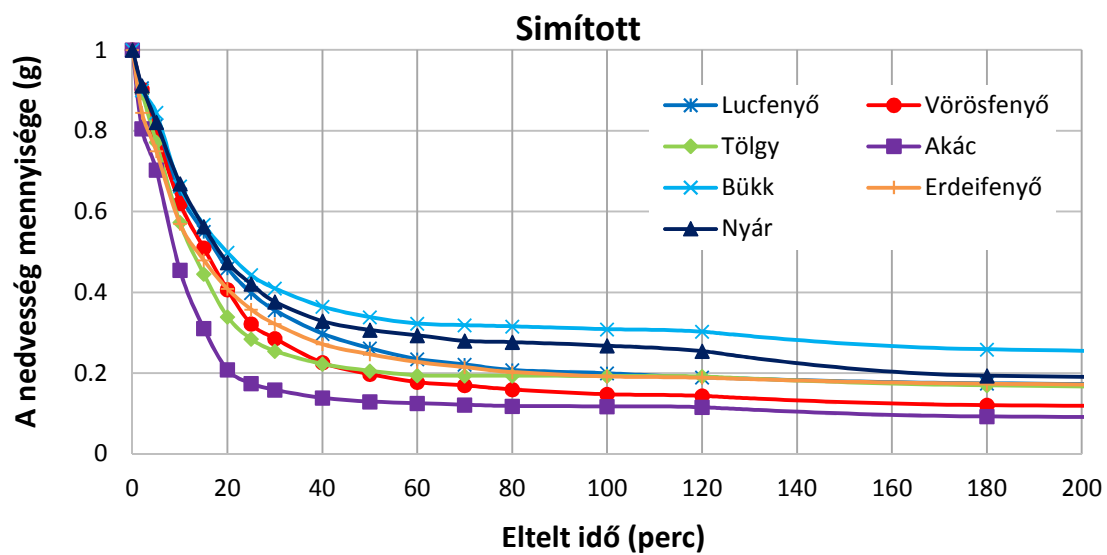
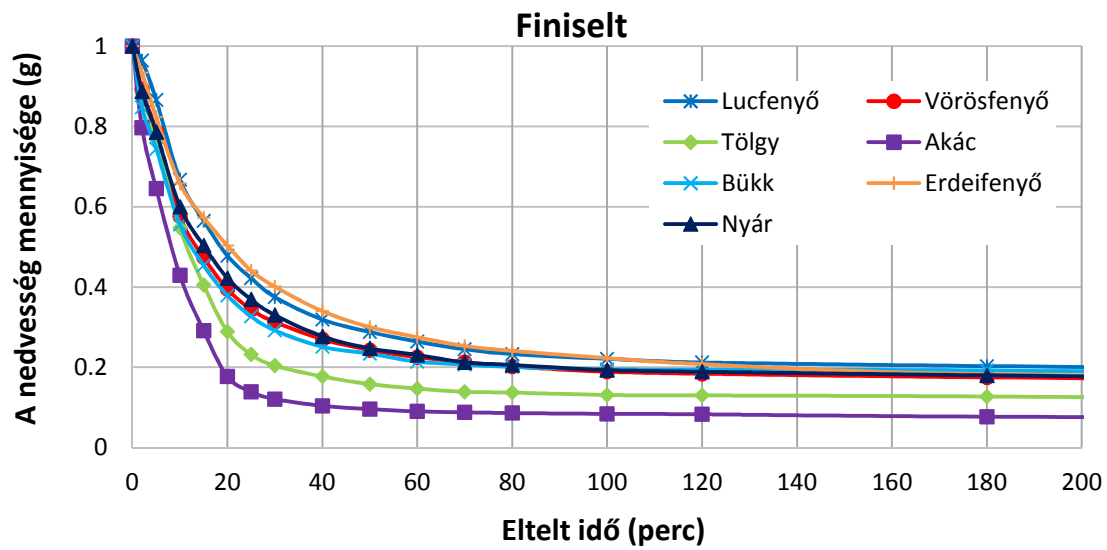
Mr_2 : a redukált völgymélységhez tartozó anyagtartalmi pont
Az a pont az anyagtartalmi görbén, amellyel a felületen elhelyezkedő völgyek jellemezhetők.



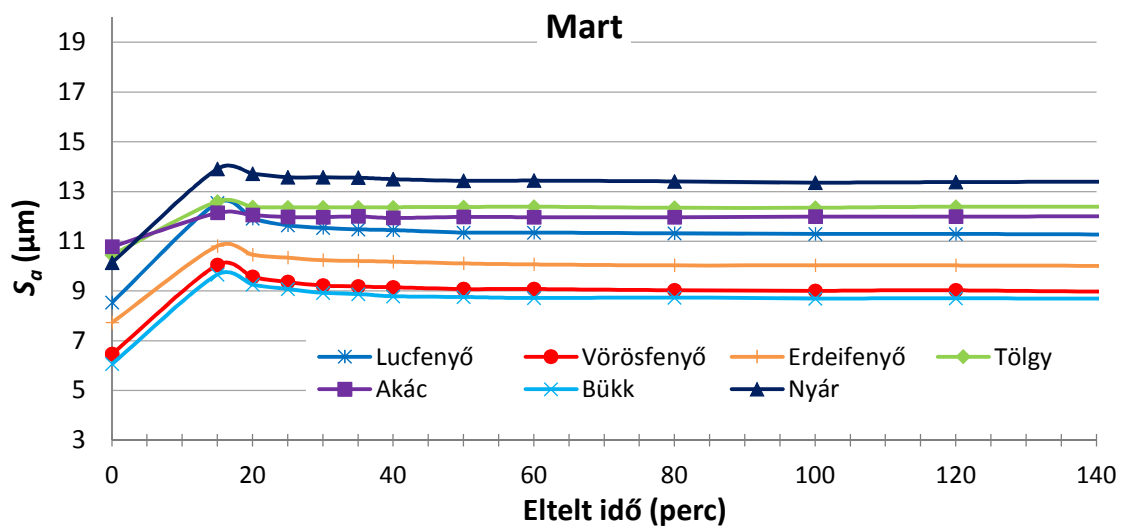
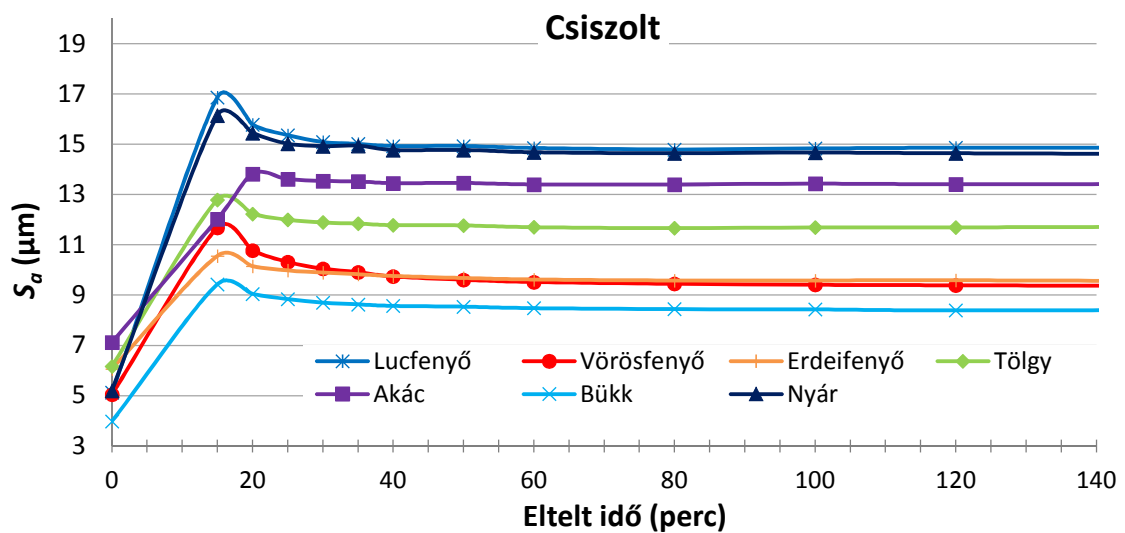
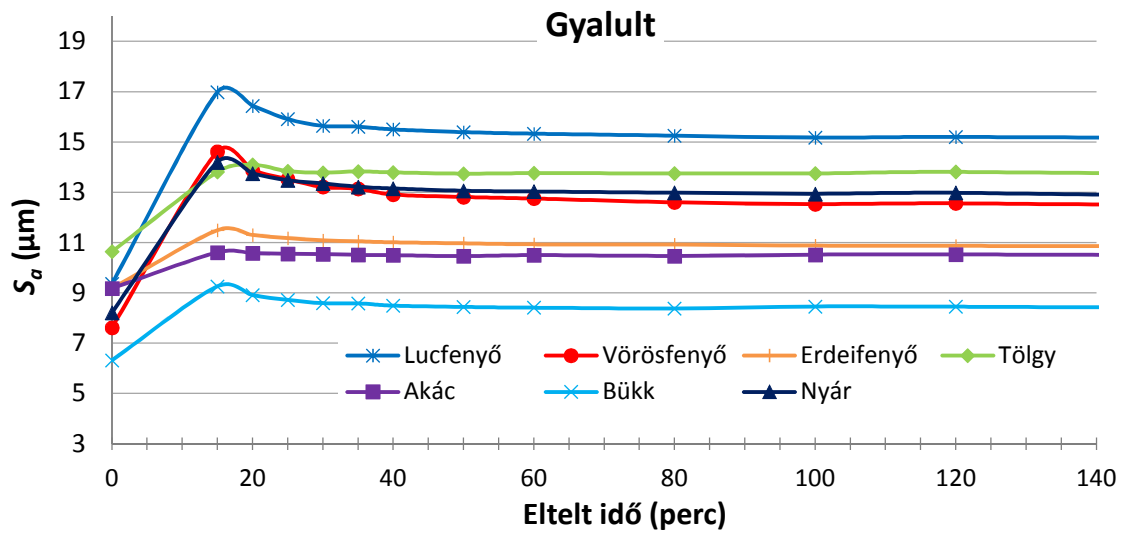
Az érdességi profilon belül a tér egy részét anyag, míg a maradék részt levegő tölti ki. A kettő viszonyát az anyagtartalom görbe (Abbott-görbe) fejezi ki. Az anyagtartalom, az anyag és a hozzá tartozó elemek arányát jelenti egy adott „c” szinten. Az Abbott-görbe ennek a definíciónak a grafikus ábrázolása. Az anyagtartalom görbe mindig „S” alakú görbe, amelynek egy inflexiós pontja van.

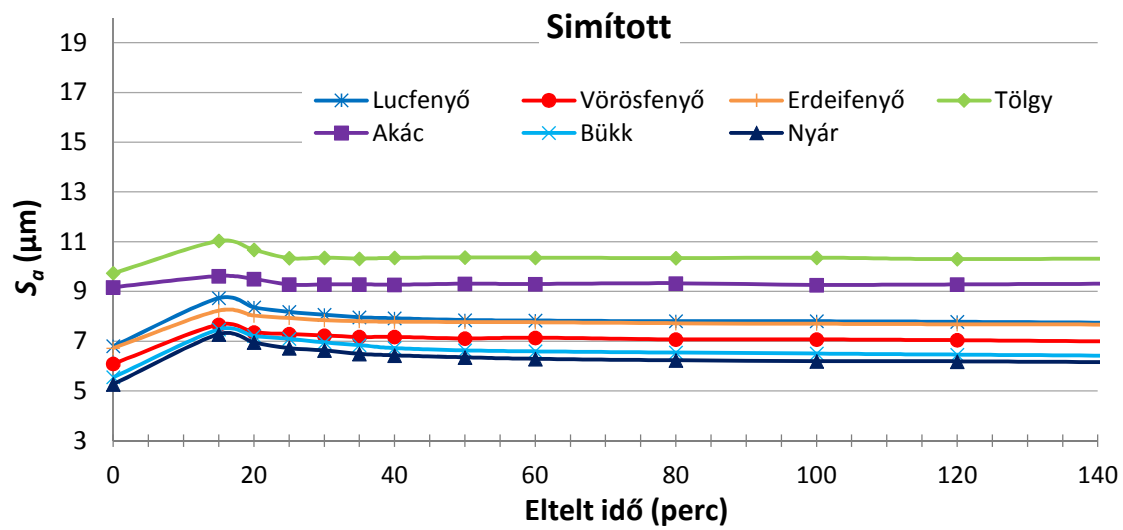
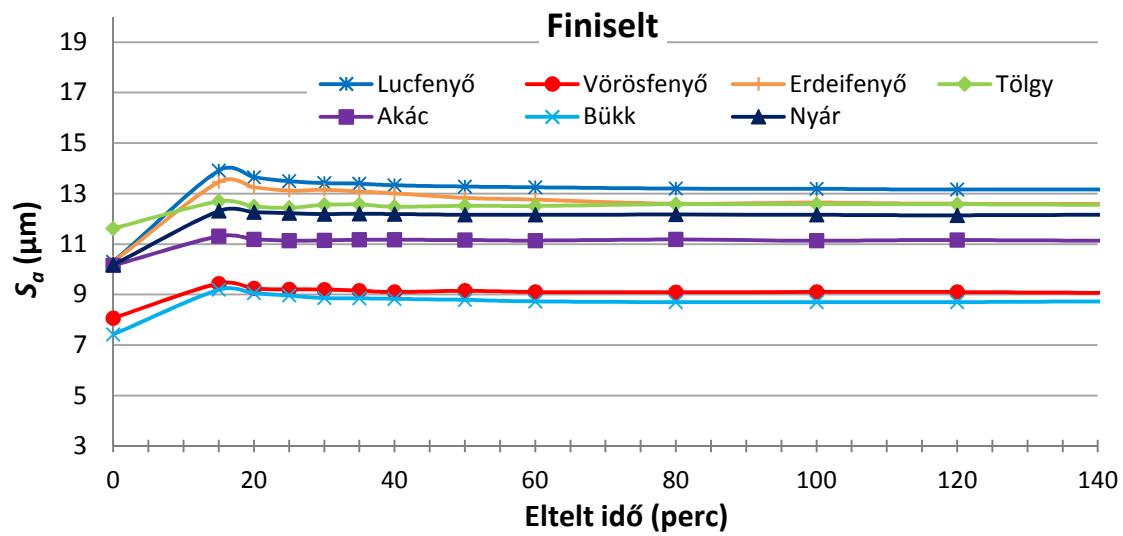
2. Melléklet: A nedvesség elpárolgása megmunkálásonként (6.1 fejezet)



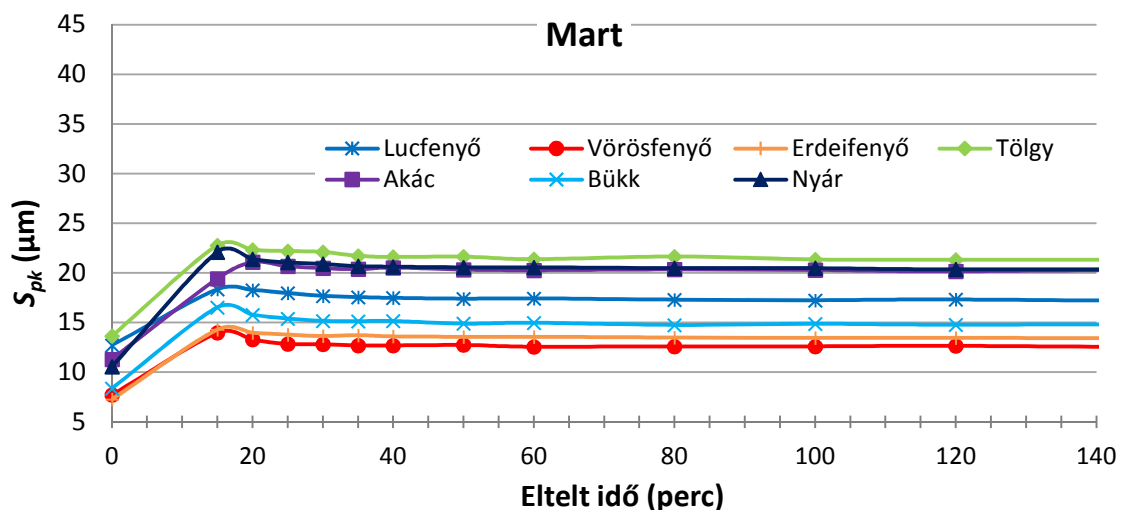
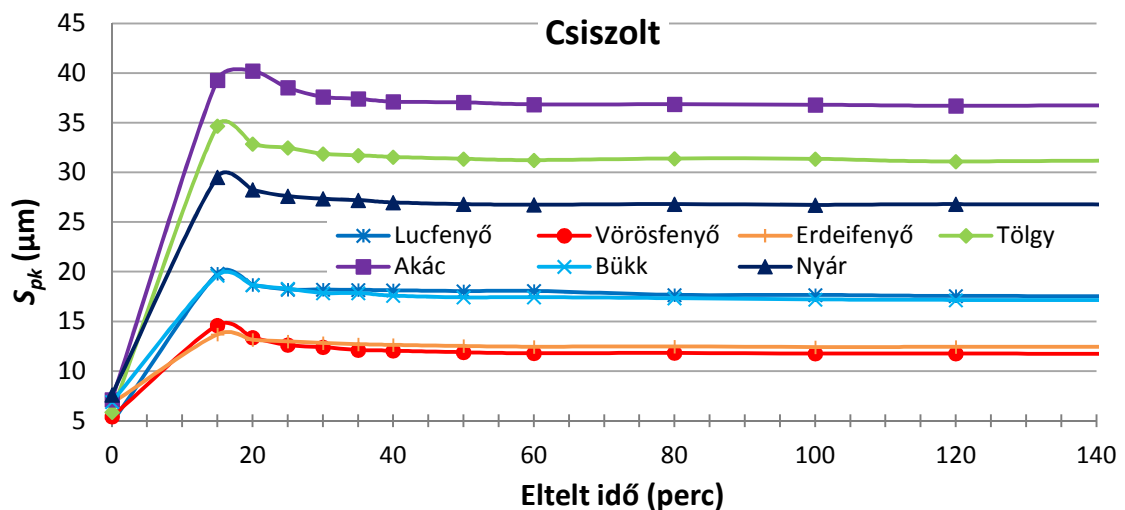
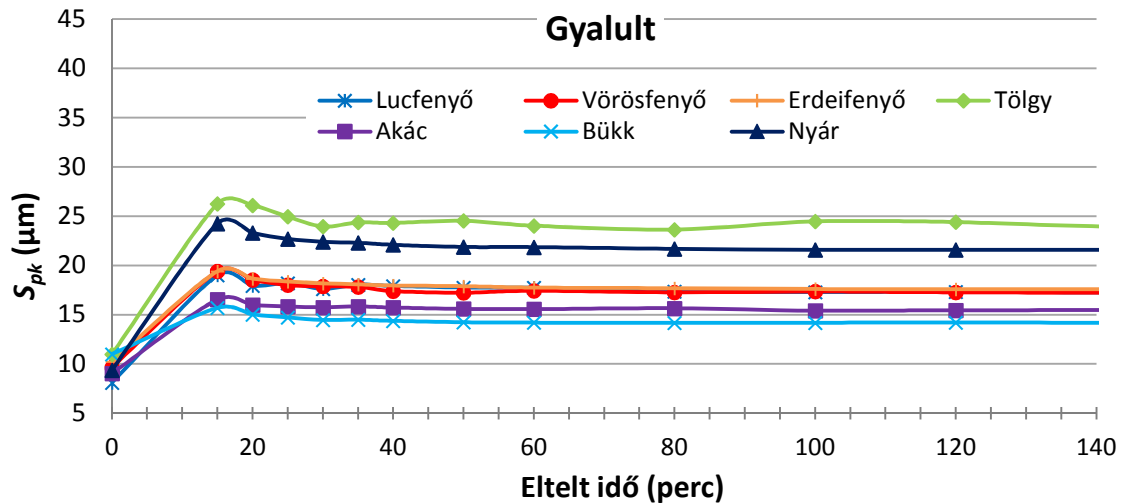


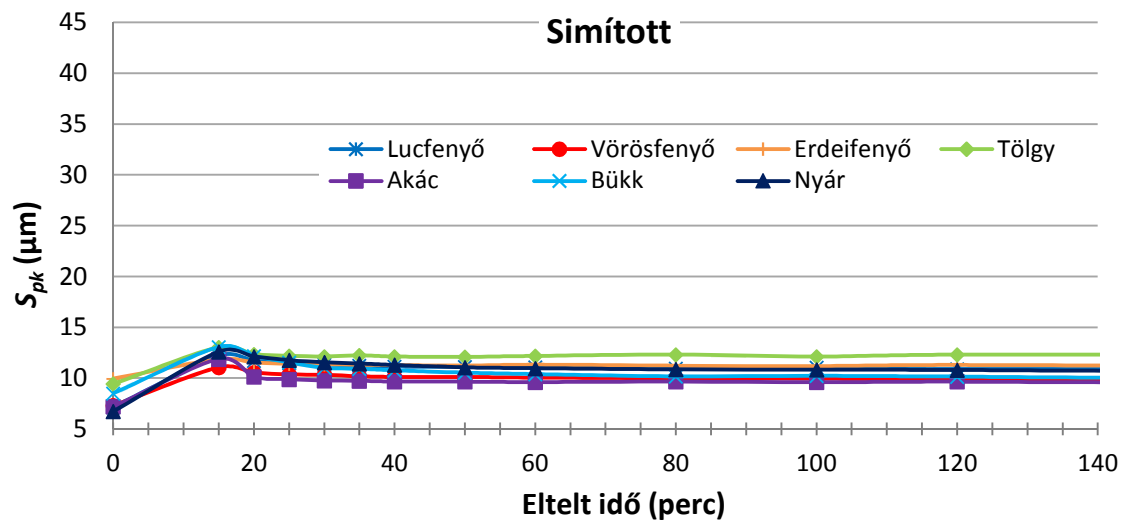
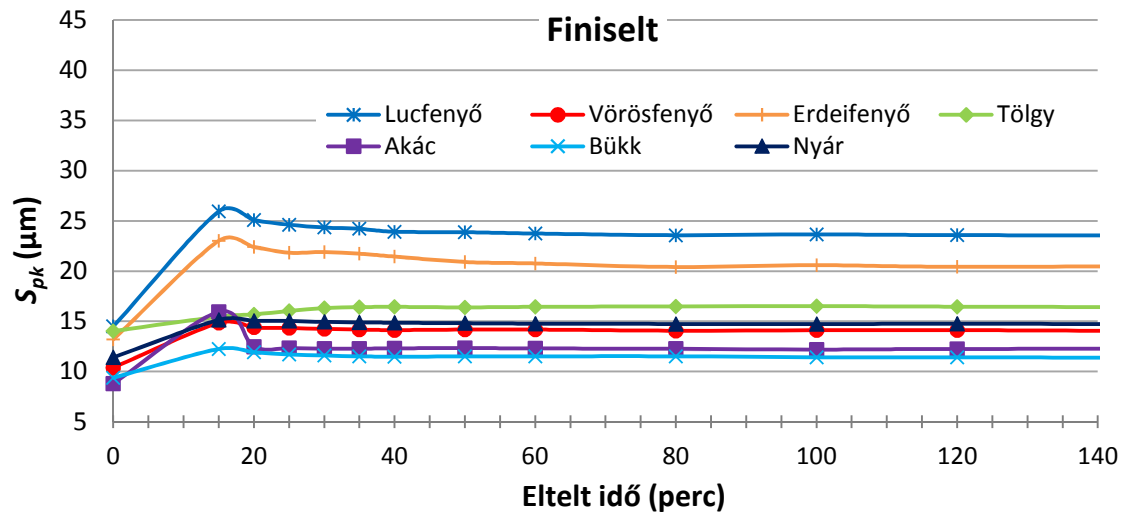
3. Melléklet: Nedvesítést követően az S_a paraméter értékeinek változása megmunkálásonként, 10 mérési felület átlagából (6.2.2.1 fejezet)



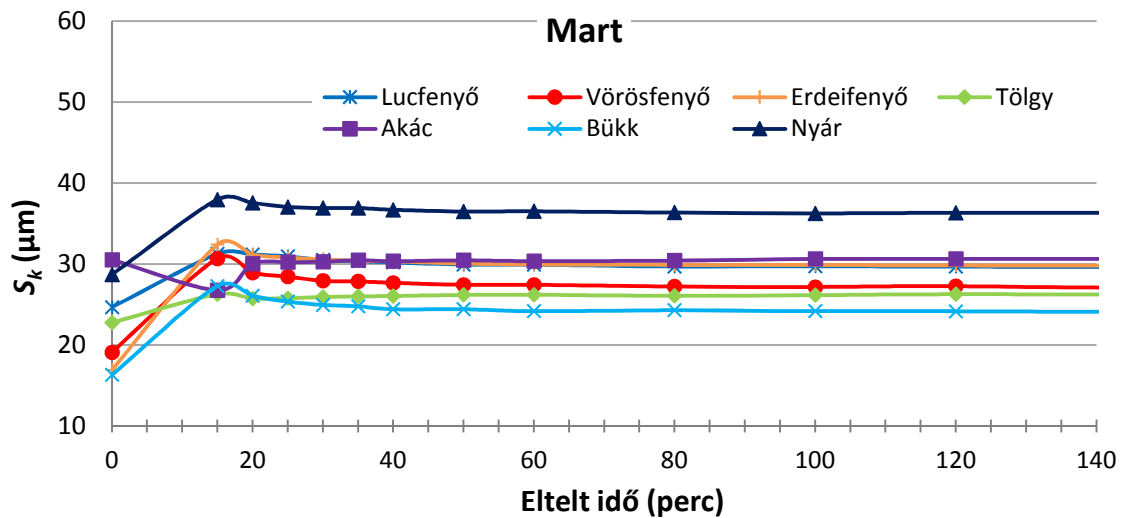
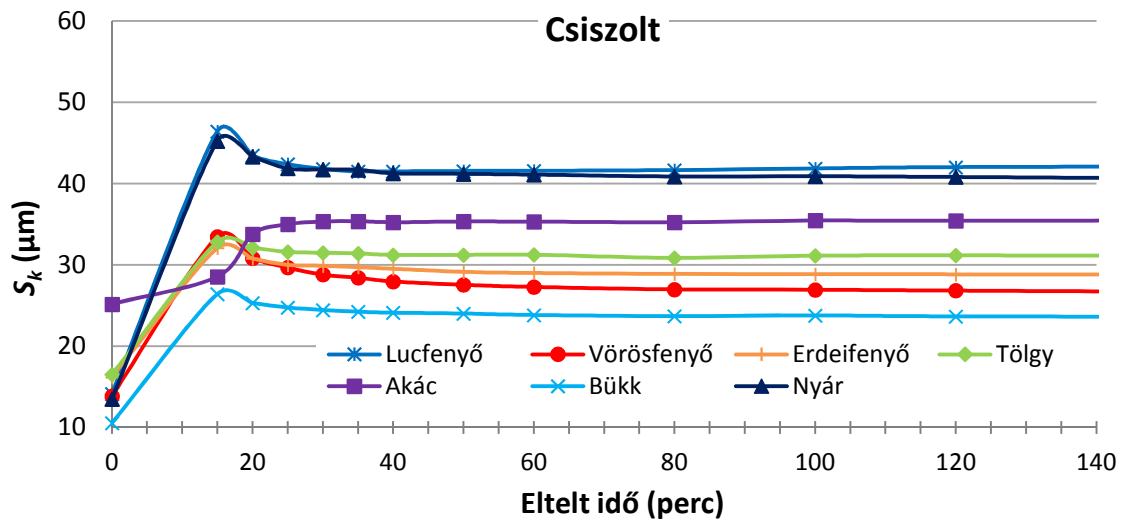
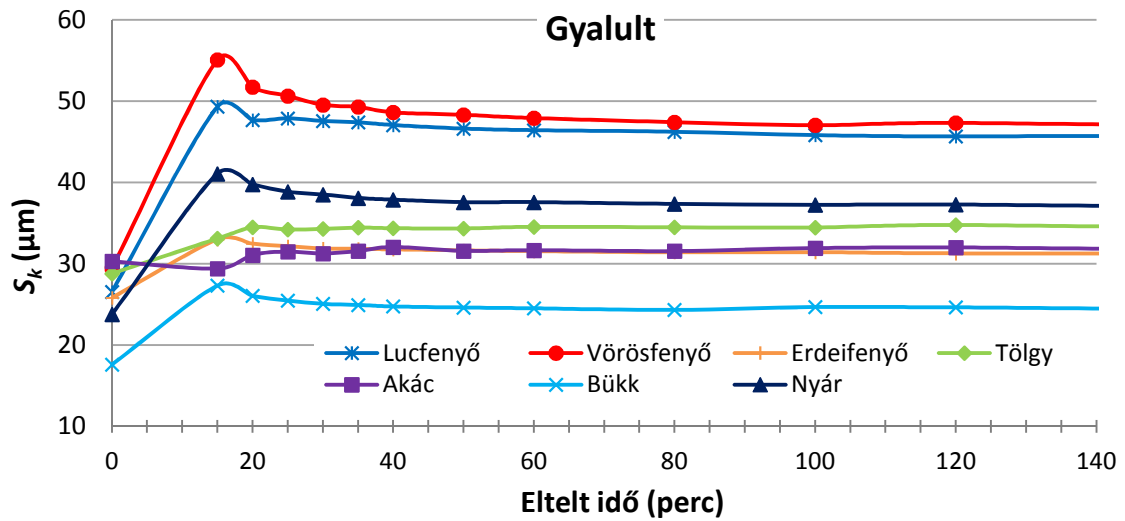


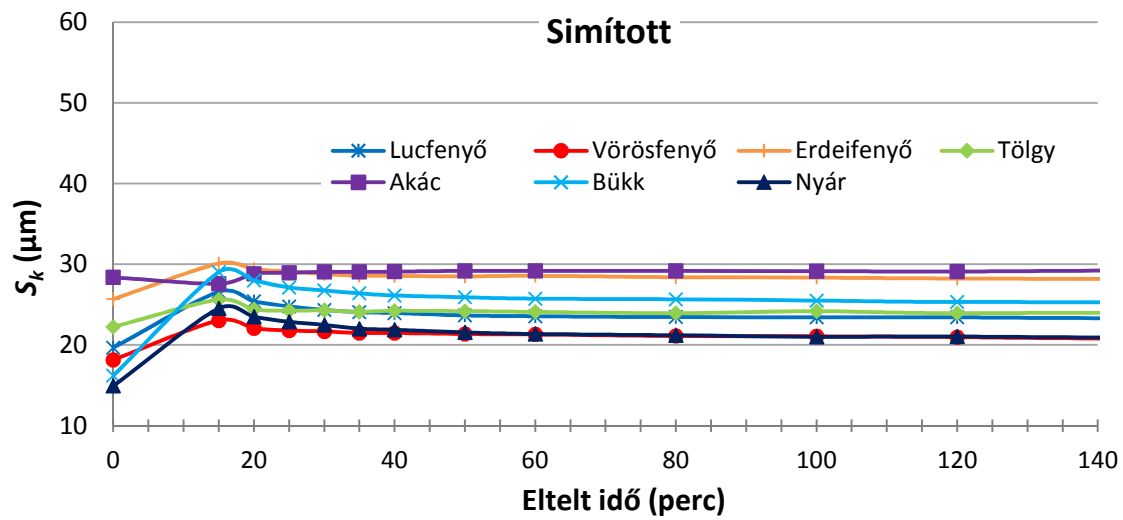
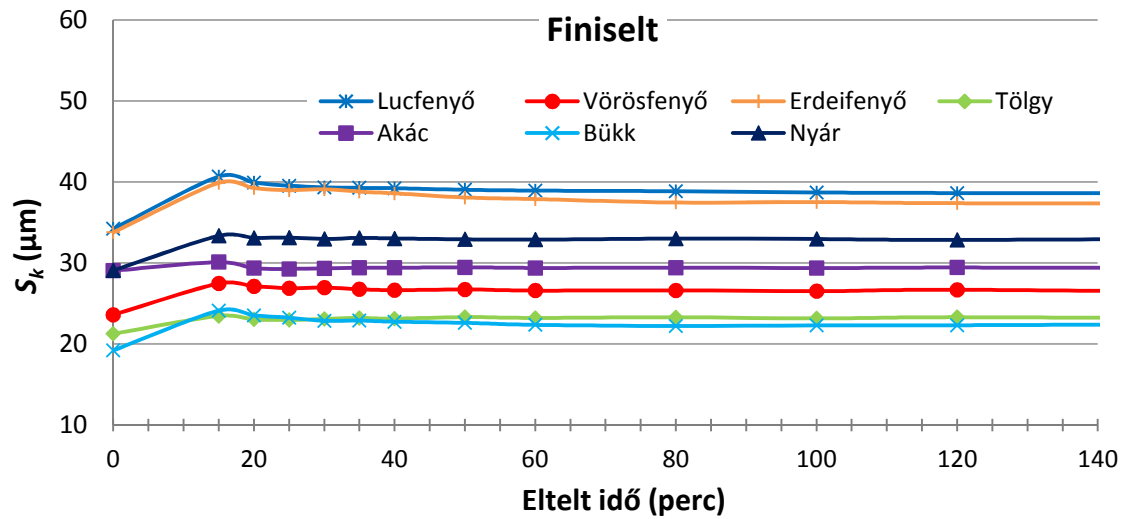
4. Melléklet: Nedvesítést követően az S_{pk} paraméter értékeinek változása megmunkálásonként, 10 mérési felület átlagából (6.2.2.2 fejezet)



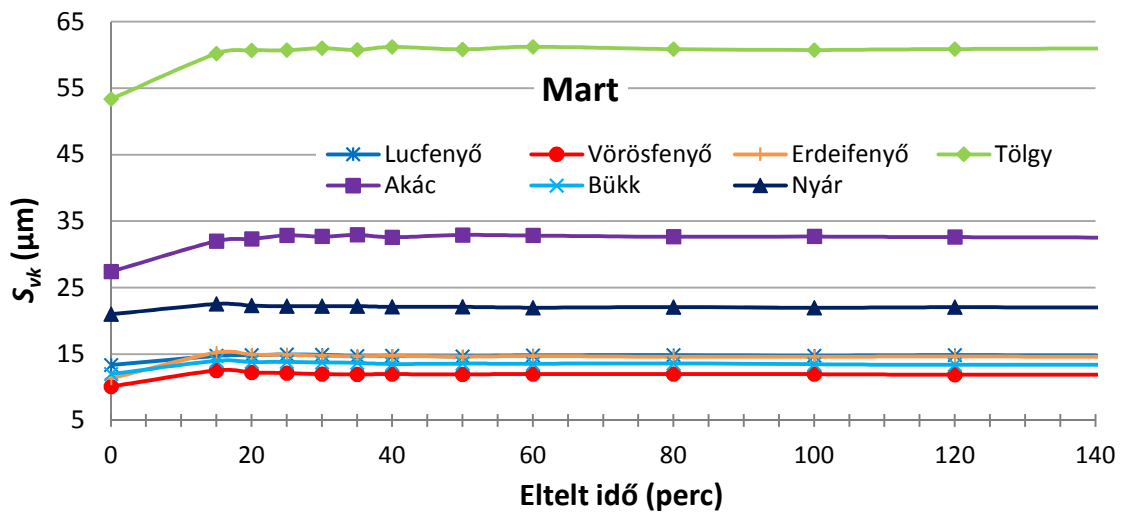
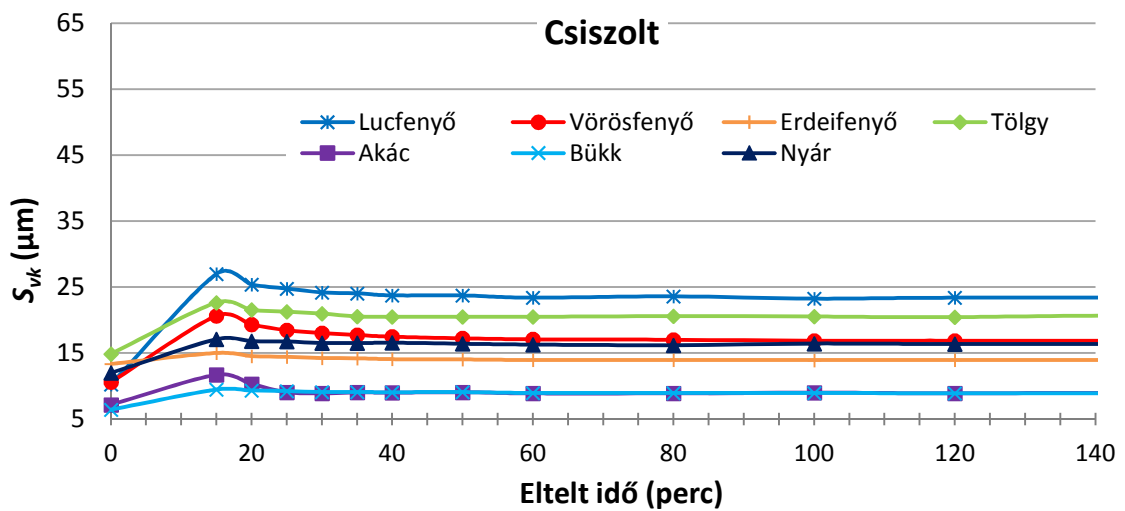
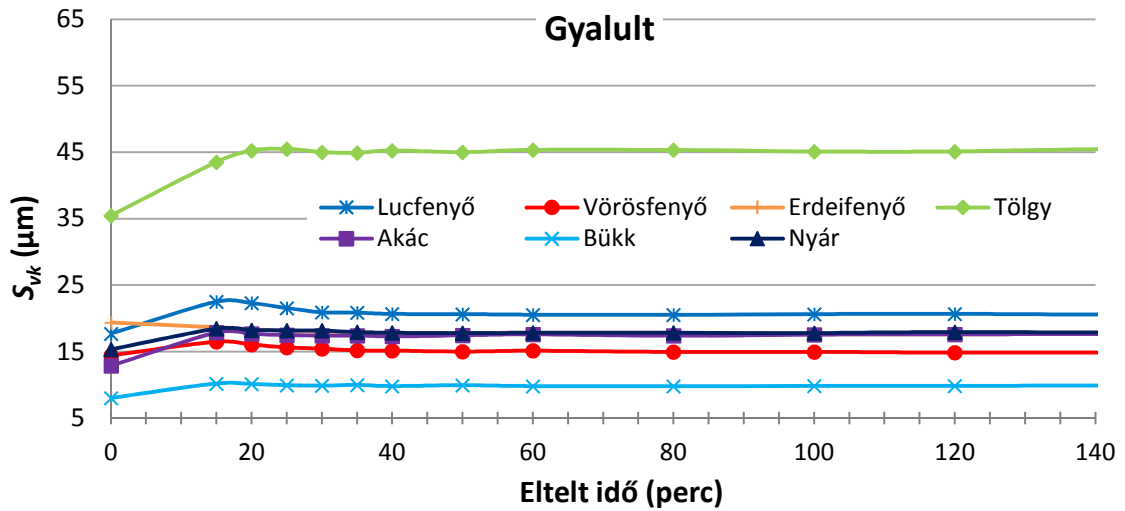


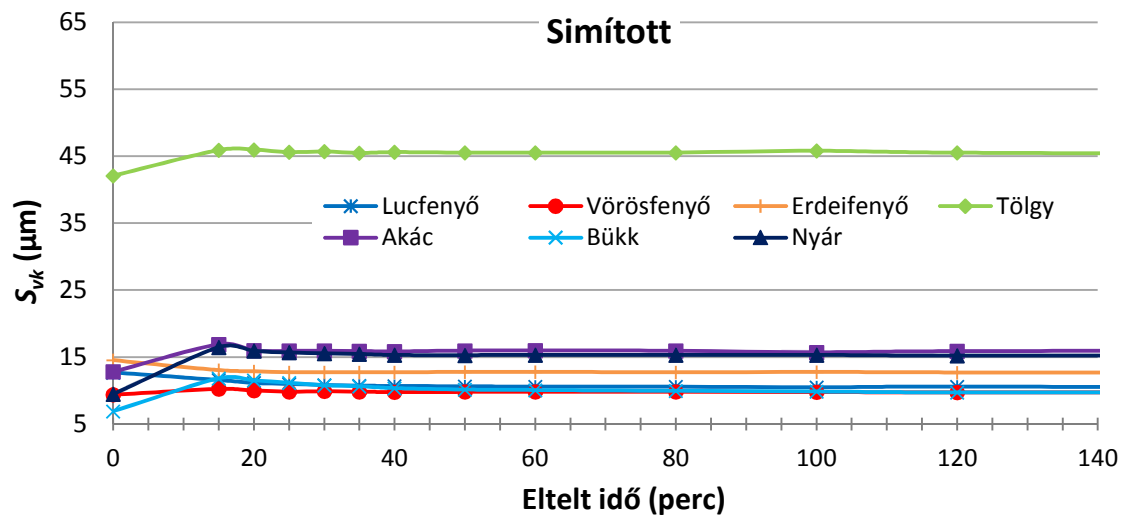
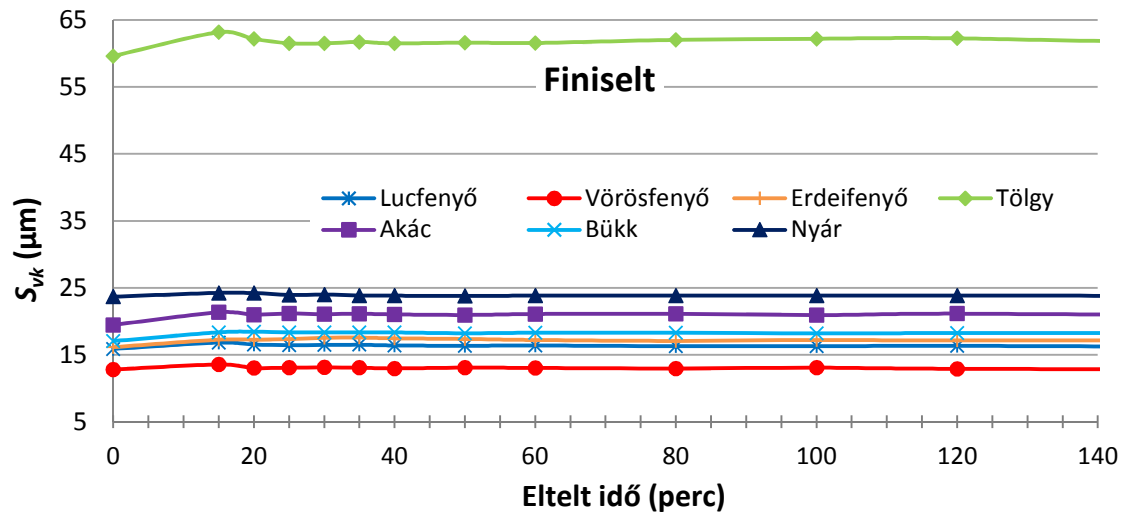
5. Melléklet: Nedvesítést követően az S_k paraméter értékeinek változása megmunkálásonként, 10 mérési felület átlagából (6.2.2.2 fejezet)



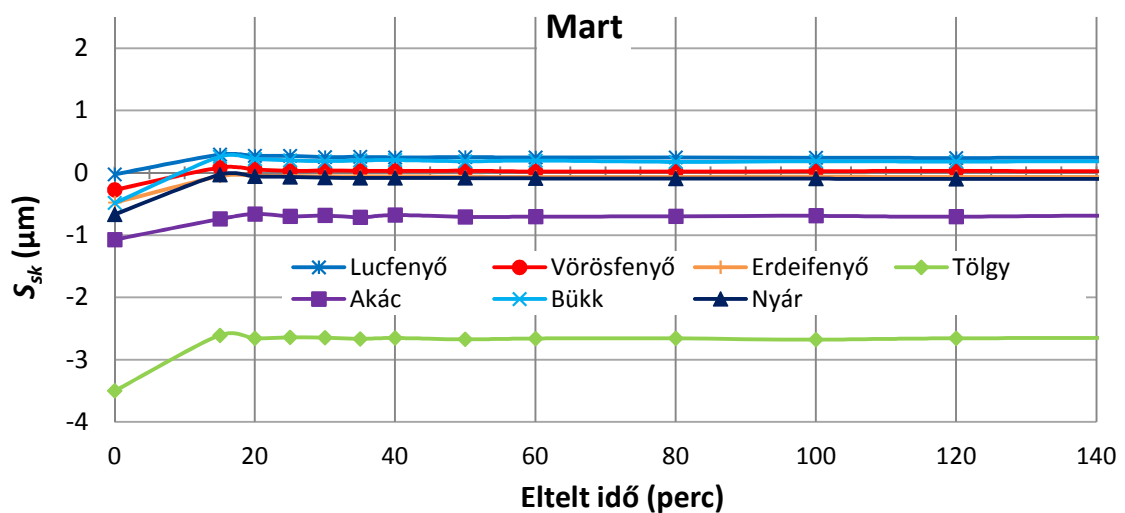
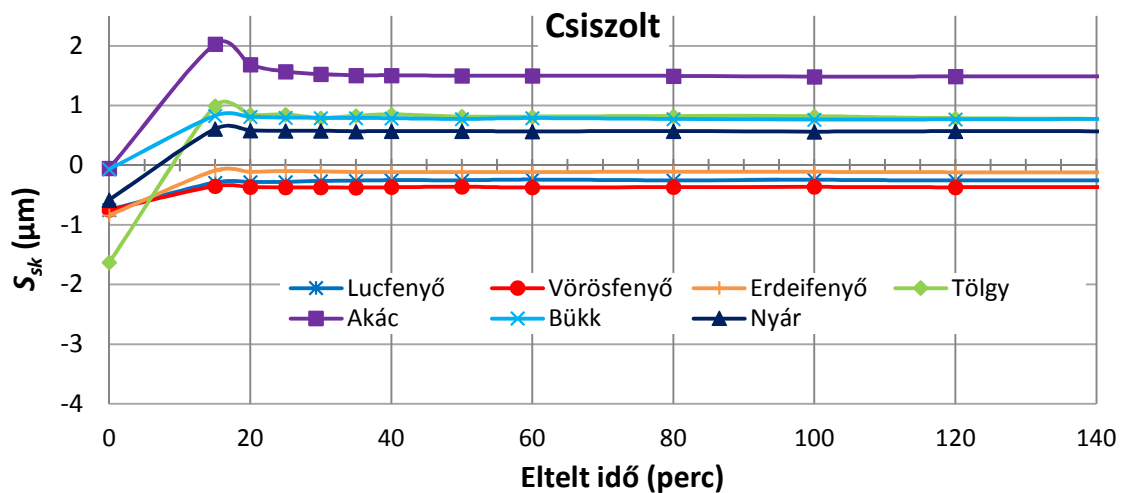
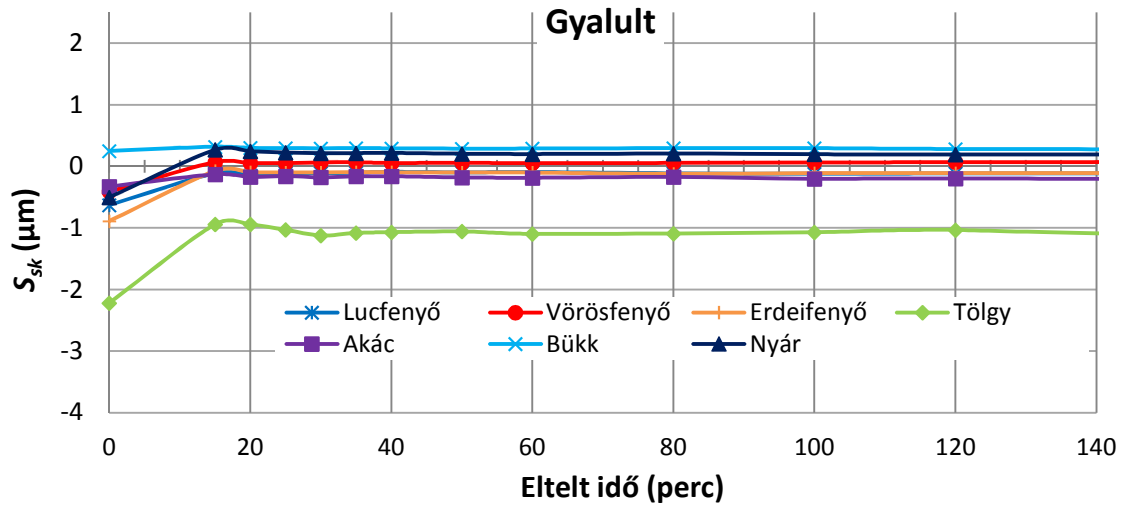


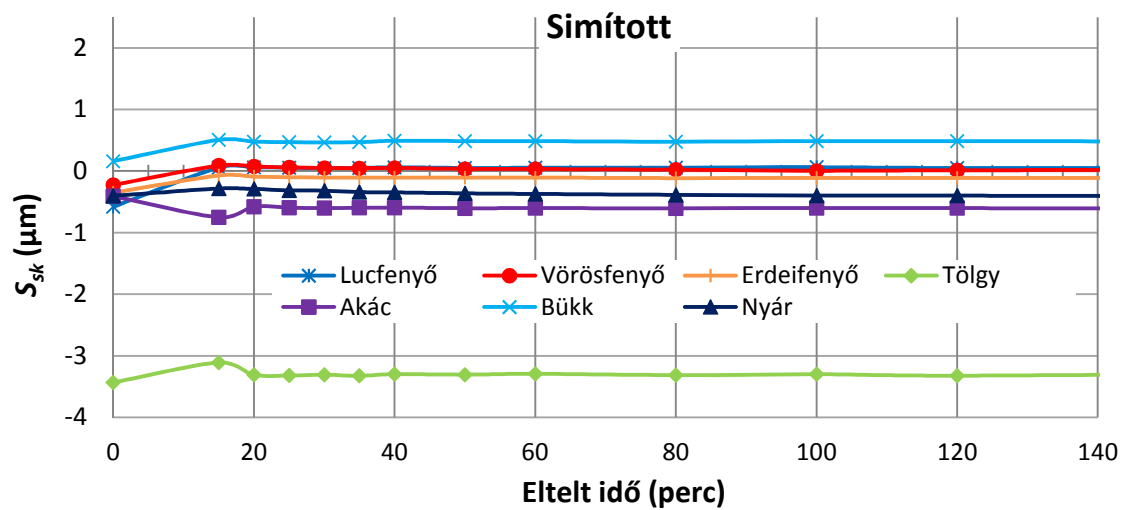
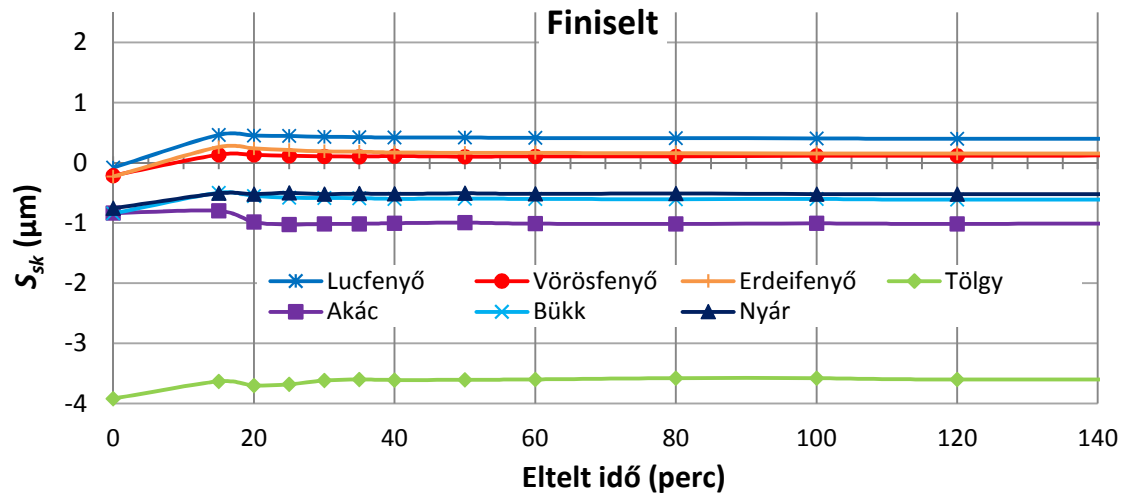
6. Melléklet: Nedvesítést követően az S_{vk} paraméter értékeinek változása megmunkálásonként, 10 mérési felület átlagából (6.2.2.2 fejezet)



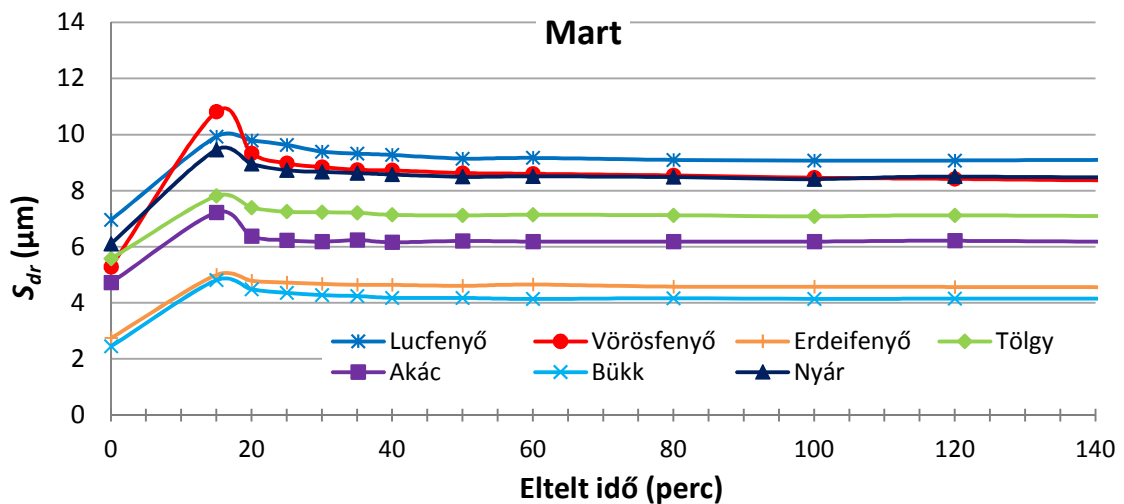
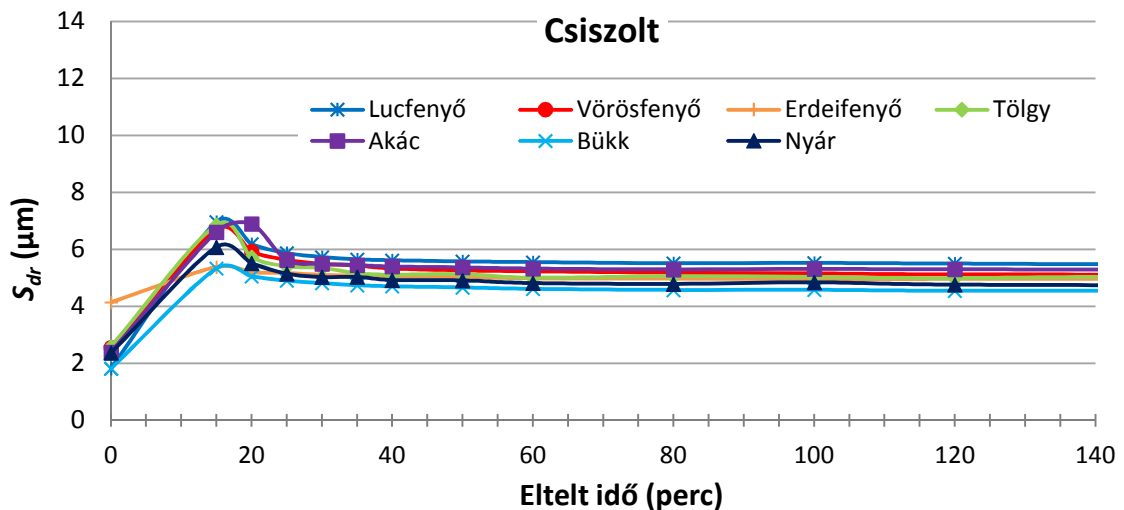
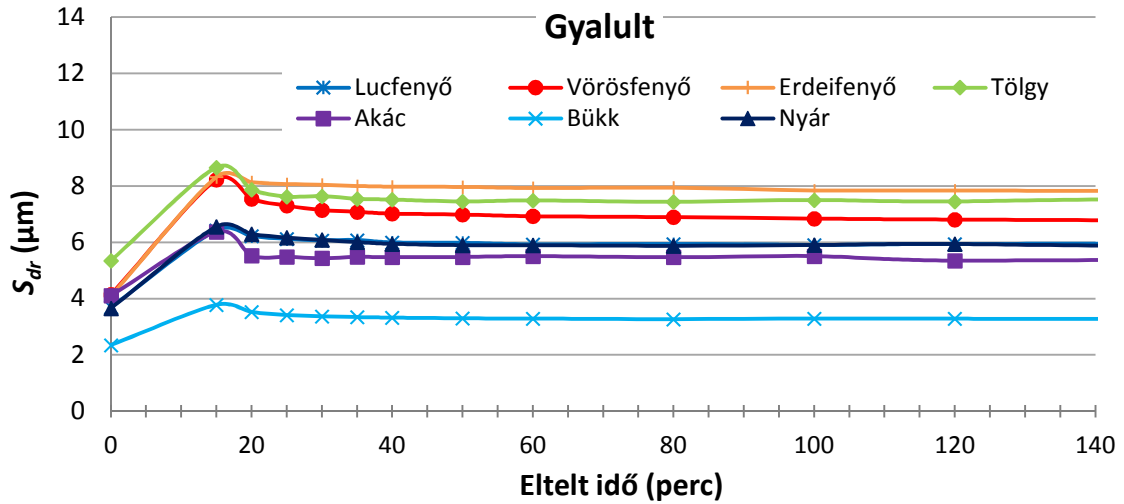


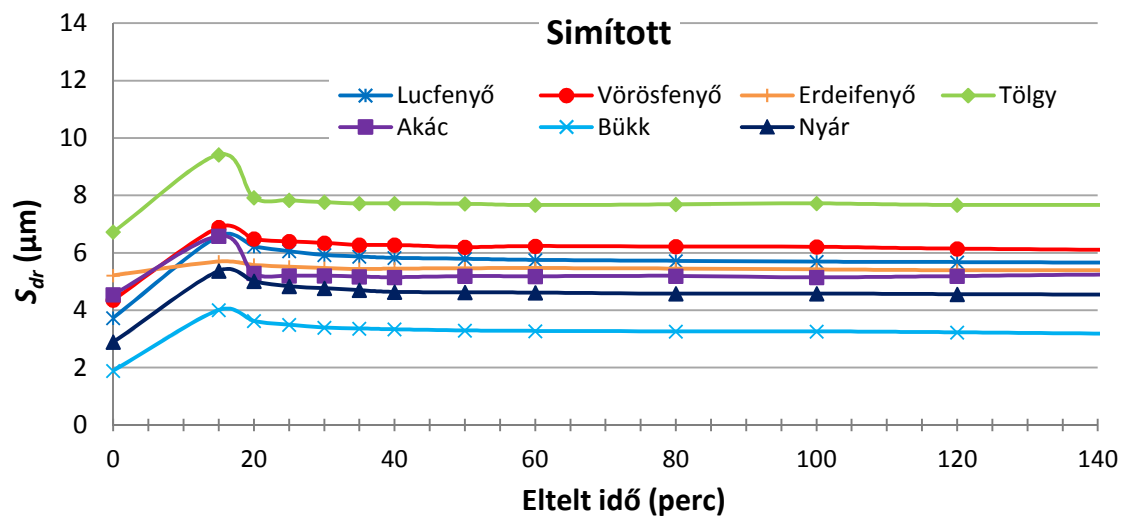
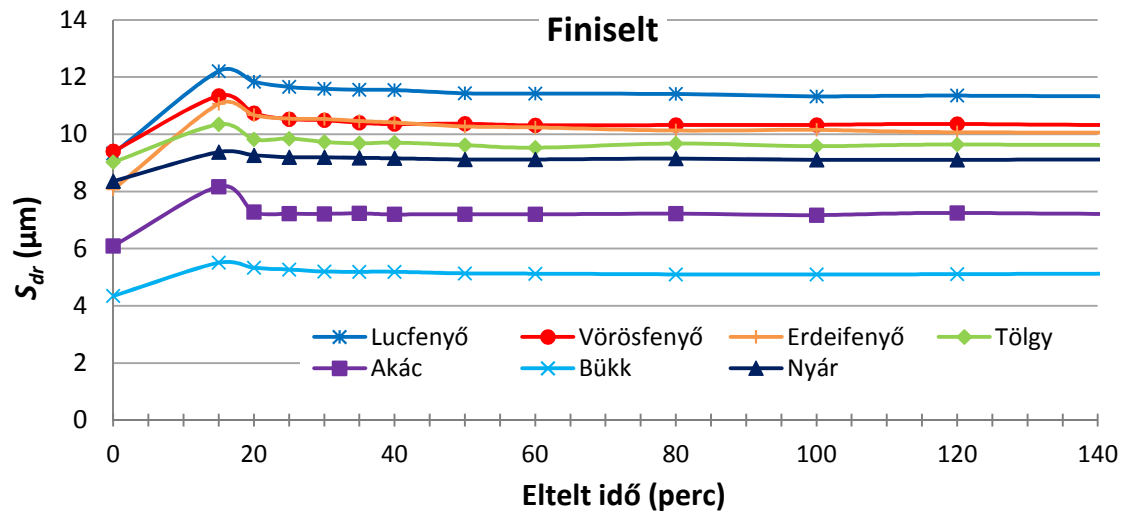
7. Melléklet: Nedvesítést követően az S_{sk} paraméter értékeinek változása megmunkálásonként, 10 mérési felület átlagából (6.2.2.3 fejezet)



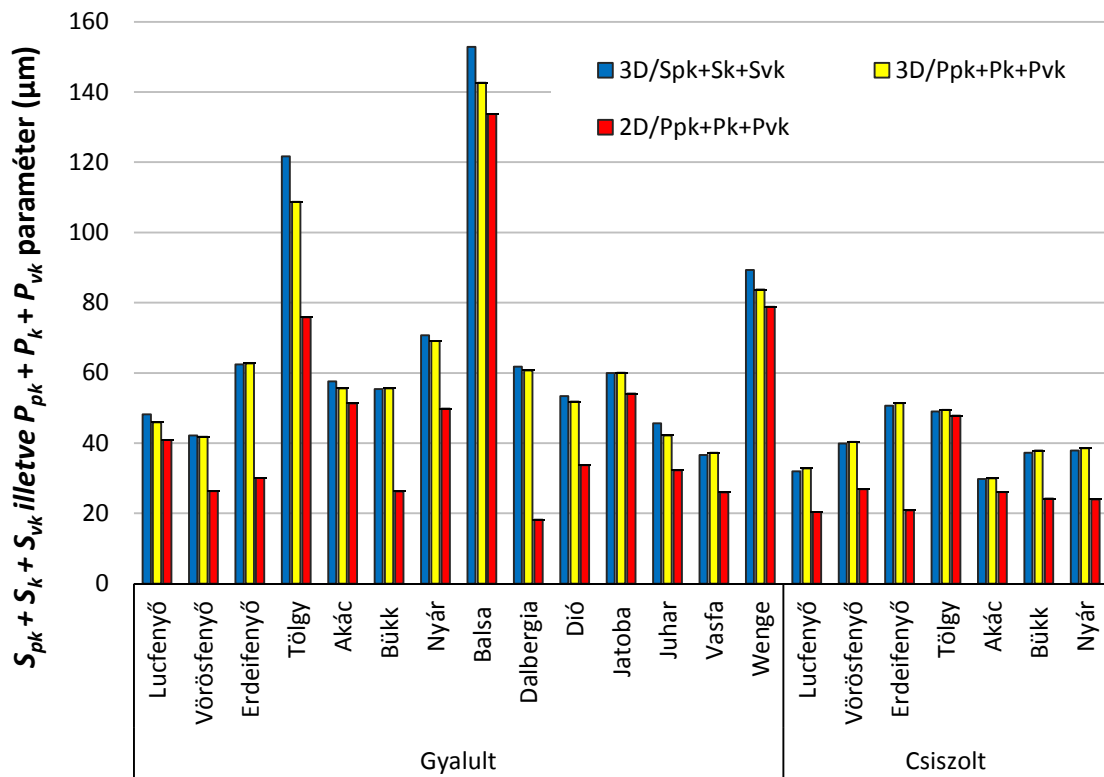


8. Melléklet: Nedvesítést követően az S_{dr} paraméter értékeinek változása megmunkálásonként, 10 mérési felület átlagából (6.2.2.4 fejezet)





9. Melléklet: Az ugyanarról a felületről származó $S_{pk}+S_k+S_{vk}$ illetve $P_{pk}+P_k+P_{vk}$ paraméterek értékei (6.4 fejezet)



- (- $3D/S_{pk}+S_k+S_{vk}$ Az optikai érdességmérő által szolgáltatott 3D-s paraméterek értékei
- $3D/P_{pk}+P_k+P_{vk}$ Az optikai érdességmérő által a felületre fektetett 50 mérési vonalból származó 2D-s paraméterek átlagértékei
- $2D/P_{pk}+P_k+P_{vk}$ A Perthometer által szolgáltatott 50 mérési vonalból származó 2D-s paraméterek átlagértékei)