

**SZENT ISTVÁN
EGYETEM**

Doktori értekezés

Lézer diffúz reflexiós módszer termények állapotjellemezésére

Készítette:

Dénes Lajos Dénes

Témavezetők:

Dr. Felföldi József egyetemi tanár

Dr. Baranyai László egyetemi docens

Szent István Egyetem
Élelmiszertudományi Kar
Fizika–Automatika Tanszék

Budapest, 2016

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

vezetője: Dr. Vatai Gyula
Egyetemi tanár
Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar
Élelmiszeripari Műveletek és Gépek Tanszék

Témavezetők: Dr. Felföldi József
Egyetemi tanár
Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék

Dr. Baranyai László
Egyetemi docens
Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék

A doktori iskola- és a témavezetők jóváhagyó aláírása:

A jelölt a Szent István Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, a műhelyvita során elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.

.....

Az iskolavezető jóváhagyása

.....

A témavezető jóváhagyása

.....

A témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	9
2	Irodalmi áttekintés	11
2.1	A KERTÉSZETI TERMÉNYEK RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATAI.....	11
2.2	SPEKTRÁLIS MÓDSZEREK	11
2.3	A NIR ALKALMAZÁSA ÉLELMISZEREK VIZSGÁLATÁRA.....	13
2.4	MULTISPEKTRÁLIS ÉS HIPERSPEKTRÁLIS KÉPALKOTÓ TECHNIKÁK.....	18
2.5	DIFFÚZ REFLEXIÓS MÓDSZER	19
2.5.1	Lézer fényforrások	25
2.5.2	Monte Carlo szimuláció.....	26
2.5.3	Lorentz (LD), módosított Lorentz modellek (MLD), Gompertz.(GF), módosított Gompertz (MGF) függvények alkalmazása mérési eredményeken.....	27
3	Célok	33
4	Anyagok és módszerek	34
4.1	A DIFFÚZ REFLEXIÓ ALAPULÓ MÉRŐRENDSZER FEJLESZTÉSE.....	34
4.1.1	A diffúz reflexiós képek feldolgozása, intenzitás profilok kinyerése.....	36
4.1.2	Az intenzitás profil paramétereit.....	36
4.2	MÓDSZERTANI VIZSGÁLATOK ÉS ESZKÖZEI.....	38
4.3	ALMASZÁRÍTÁSI KÍSÉRLET	39
4.3.1	A nedvesség meghatározása	40
4.3.2	A NIR spektrumok rögzítése.....	40
4.4	BURGONYA TÁROLÁSI KÍSÉRLET	40
4.4.1	A burgonya vizsgálati módszerei.....	41
4.5	KÖRTE TÁROLÁSI KÍSÉRLET	42
4.5.1	Roncsolásmentes keménységmérés.....	42
4.5.2	A klorofill fluoreszencia elemzése	43
4.6	MONTE CARLO SZIMULÁCIÓ	45
4.7	AZ ELMÉLETI ÉS A SZIMULÁLT DIFFÚZIÓS PROFILOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	48
4.8	FELHASZNÁLT SZOFTVEREK ÉS STATISZTIKAI MÓDSZEREK	49
5	Eredmények és értékelés.....	51
5.1	MÓDSZERTANI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEIT.....	51
5.1.1	Ismételhetőség értékelése.....	51
5.1.2	A diffúz reflexiós profilok sztenderdizálása.....	54
5.2	AZ ALMASZÁRÍTÁS KÍSÉRLET EREDMÉNYEIT.....	59
5.3	A BURGONYA TÁROLÁS EREDMÉNYEIT	67
5.4	A KÖRTE TÁROLÁSI KÍSÉRLET EREDMÉNYEIT	74
5.4.1	A tárolási idő és a keménység tényezők kapcsolata.....	78
5.4.2	A tárolási idő és a klorofill fluoreszencia kapcsolata	79
5.4.3	Az ekvivalens tárolási idő és a diffúz reflexiós paraméterek kapcsolata.....	81
5.4.4	A klorofill fluoreszencia és az FWHM (635 nm) értékek kapcsolata	82
5.4.5	A keménység és a diffúz reflexiós paraméterek kapcsolata	83
5.4.6	A módosított Gompertz (MGF) függvény illesztése	85
5.5	MONTE CARLO SZIMULÁCIÓ	87
5.6	AZ ELMÉLETI ÉS A SZIMULÁCIÓS PROFILOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	91
5.7	SVM MODELLEKKEL BECSÜLT OPTIKAI PARAMÉTEREK	92

6	Új tudományos eredmények	95
7	Javaslatok	96
8	Összefoglalás	97
8.1	ÖSSZEFOGLALÓ	97
8.2	SUMMARY	99
9	Köszönetnyilvánítás	101
10	Mellékletek.....	102
10.1	IRODALOMJEGYZÉK	102
10.2	PHOTON FOCUS MV1–D1312 TIPUSÚ CCD IP KAMERA.....	114
10.3	KAMERA VEZÉRLŐ PROGRAM	114
10.4	KAMERA ÉS RELÉKÁRTYA VEZÉRLŐ PROGRAM	115
10.5	8 CSATORNÁS RELÉKÁRTYA	115
10.6	FORRÁSKÓD.....	116
10.7	A DIFFÚZIÓS PROFILOK CV% ELTÉRÉSE AZ ELFORGATÁSI SZÖG FÜGGVÉNYÉBEN, VALAMINT AZ FWHM ÉRTÉKEK AZ ELFORGATÁSI SZÖG FÜGGVÉNYÉBEN.....	117

Rövidítések jegyzéke

<u>Rövidítés</u>	<u>Angol megfelelő</u>	<u>Magyar megfelelő</u>
AIC	Akaike information criterion	Akaike információs kritérium
ANN	Artificial Neural Network	mesterséges neurális háló
ANOVA	Analysis of variance	variancia analízis
CCD	Charge Coupled Device	töltés-csatolt eszköz
CV	Cross Validation	kereszt-validáció
DM	Dry matter	száranyag
DW	Durbin-Watson statistics	Durbin-Watson statisztika
FFNN	Feed-forward Neural Network	előre-csatolt neurális háló
FFT	Fast Fourier Transformation	Fast Fourier transzformáció
FWHM	Full Width at Half Maximum	félérték szélesség
ICA	Independent Component Analysis	független komponens analízis
IEP	Inverse Exponential Polynom	inverz exponenciális polinom
IP	Inflection Point	inflexiós pont
JMM	Joint Michaelis –Menten	kapcsolt Michaelis –Menten
LCTF	Liquid Crystal Tuneable Filter	folyadékkristályos hangolható szűrő
LDA	Linear Discriminant Analysis	lineáris diszkriminancia-elemzés
LLE	Locally Linear Embedding	lokális lineáris beágyazás
LV	Latent variable	látens változó
MC	Monte Carlo	Monte Carlo
MCML	Monte Carlo multi-layered tissues	Monte Carlo többrétegű szövetek
MLD	Modified Lorentzian Distribution	módosított Lorentz eloszlás
MLR	Multiple Linear Regression	többszörös lineáris regresszió
NAI	Normalized Anthocyanin Index	normalizált antocianin index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	normalizált vegetációs index
NIR	Near-Infrared	közeli infravörös
PCA	Principal Components Analysis	főkomponens-elemzés
PCs	Principal Components	főkomponensek
PLS	Partial Least Squares	parciális legkisebb négyzetek
R ²	Coefficient of determination	determinációs koefficiens
RGB	Red, Green, Blue	piros, zöld, kék
RMSEC	Root Mean Square Error of Calibration	a kalibráció hibája
RMSECV	Root Mean Square Error of Cross Validation	a keresztvalidáció hibája
RMSEP	Root Mean Square Error of Prediction	az előrejelzés hibája
RPD	Robust Parameter Design (eredetileg: Ratio of (standard error of) Prediction to (standard) Deviation	robosztussági paraméter

SE	Standard Error	sztenderd hiba
SEE	Standard Error of Estimate	sztenderd hiba becslése
SNV	Standard Normal Variate	szabványos normál változó
SPME	Solid-Phase Microextraction	szilárd fázisú mikroextrakció
SSC	Soluble Solid Content	oldható szárazanyag- tartalom
SVM	Support Vector Machines	tartóvektor-gép
TSS	Total Soluble Solid	összes oldható szárazanyag
UV-VIS	Ultraviolet-visible	ultraibolya és látható

1 Bevezetés

Napjainkban az egészséges táplálkozás kiemelkedően fontos része a nagy mennyiségű zöldség- és gyümölcsfogyasztás. A szezonális termények esetén általában friss, hazai árut fogyaszthatunk. Abban az esetben, ha valami különlegességre vágyunk, ami hazánkban nem terem meg, vagy olyan időszakban szeretnénk fogyasztani, amikor nincs szezonja és importálni kell, igen hasznos tudni, hogy még meddig fogyaszthatjuk el a terméket.

A kereskedelemben a zöldségek és gyümölcsök fogyasztói megítélését a termény minősége nagymértékben befolyásolja, ezt sok esetben a fogyasztók szemrevételezéssel és mechanikai vizsgálatokkal, tapintás útján ellenőrzik. A pultontarthatóság döntően meghatározza az áru értékesíthetőségi idejét. A zöldségek és gyümölcsök a betakarítás után továbbra is biológiaiaktívak maradnak (anyagcsere, sejtlégzés), ezért körültekintően kell eljárni a szállításuk, raktározásuk, kihelyezésük során az ellátási lánc teljes szakaszában. Minden esetben olyan körülményeket kell biztosítani, amelyek lassítják az érési folyamatot, ezt leginkább hűtéssel és a megfelelő páratartalom beállításával lehet elérni. Ez által a termények légzése lelassul, csökken a párolgás és a tömegvesztés, illetve hosszabb ideig elkerülhető a száradásuk és a romlási folyamatok bekövetkezése.

A zöldségek, gyümölcsök minőségének időbeli változása kulcskérdés az ellátási lánc során (termőföldtől az asztalig) beleértve a logisztikát is, mivel ennek ismerete elengedhetetlen a betakarítás utáni technológia folyamatokban és az állapotjellemzők becslésében.

A technológiák fejlődésével újabb módszerek kerültek előtérbe az élelmiszeripari alapanyagok vizsgálatára vonatkozóan. A korszerű berendezések alkalmasak arra, hogy gyors és megbízható minőségi előrejelzéseket kapjunk a terményekről. A hagyományos módszerekkel ellentétben az új módszerek környezetünk tudatosabb védelme érdekében nagy mennyiségű vegyszerfelhasználást nem igényelnek. A zöldségek és gyümölcsök külsejére vonatkozó minőségi jellemzők a színük, textúrájuk, méretük, formájuk és a látható sérülések aránya. Ezeknek a tulajdonságoknak a manuális vizsgálata igen idő- és munkaigényes folyamat. Az elmúlt évtizedekben egyre elterjedtebben alkalmazták a látórendszeres technikát a manuális technikák kiváltására és a folyamatok automatizálására, amely magában foglalja a klasszikus, a hiper- és multispektrális látórendszert is. Munkám előzményének tekinthető a diplomamunkám, melynek során automatizáltam egy szín szerint válogató modell gépsort, a termények külső tulajdonság alapján történő szelektálása érdekében.

Jelen kutatásomban a belső tulajdonságok, beltartalmi jellemzők becslésével foglalkoztam.

A beltartalmi jellemzők vizsgálatának egyik legelterjedtebb módszere a NIR technika. A módszer használata során a terméket közeli infravörös sugárzás éri, majd a visszaverődő vagy átreflektált sugárzást mérjük. Miközben a sugárzás behatol a termékbe, annak spektrális tulajdonságai a hullámhossz függő szóródás vagy az abszorpciós folyamatok révén változnak. A változások a termék kémiai összetételétől függenek, valamint annak fényszóródási tulajdonságaitól, amelyek a mikroszerkezethez kapcsolódnak. A mérés során a fény behatolási mélysége kb. 2mm. A másik, újszerű módszer a diffúz reflexiós mérés (optikai módszer), amelynek a termék fizikai szerkezetére és kémiai összetételére utaló információkat kaphatunk.

Kutatásom során, a metodikai vizsgálatokat követően a termények tárolása alatt bekövetkező változását vizsgáltam. A tárolás során hosszabb ideig tárolható terménnyel (burgonyával), valamint egy gyorsan romló és a szedést követően viszonylag rövid ideig eltartható kertészeti terménnyel (körtével) foglalkoztam. Ezek mellett méréseim tárgyát alma szeletek is képezték, melyeknek a szárítás során lejátszódó változását követtem nyomon különböző paraméterek segítségével.

2 Irodalmi áttekintés

A következő alfejezetekben a méréseimet megalapozó irodalmi adatokat mutatom be.

2.1 A kertészeti termények roncsolásmentes vizsgálatai

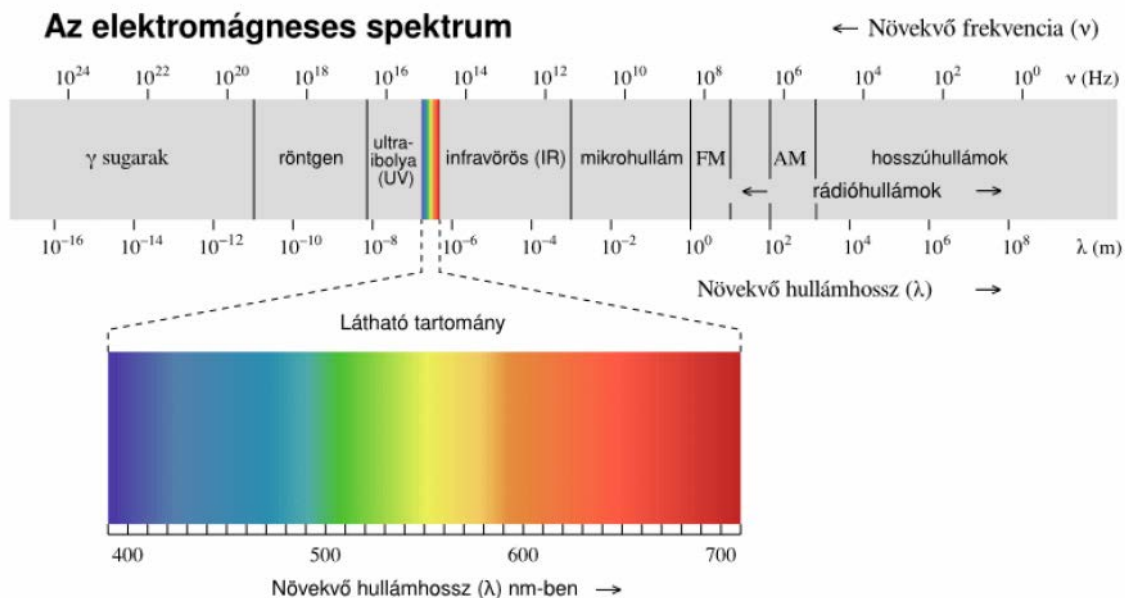
Az élelmiszerpiac leggyorsabban romló termékei közé tartoznak a zöldségek és gyümölcsök. Ezek szénhidrátokban gazdag és proteinben szegény anyagok, melyeknek pH értéke a 7,0-tól az enyhén savas tartományba tolódik el, és jellemzően nagy vízáktivással rendelkeznek. Ezek a feltételek megfelelő élőhelyet biztosítanak számos baktérium, élesztő- és penészgomba számára (Gómez-López et al. 2005; Del Nobile et al. 2008; Selma et al. 2008). A romlott gyümölcsöket és zöldségeket barnás elszíneződés, nekrozis, a textúra elvesztése, ráncosodás, lékiválás, kellemetlen szag és íz megjelenése jellemzi (Ponce et al. 2002). A friss zöldségek, gyümölcsök eltarthatósági ideje igen rövid, 4-7 nap, ha nem alkalmaznak semmilyen tárolási/tartósítási technológiát. Az eltarthatósági időt több tényező befolyásolja: a leszedett termény eredeti minősége, termesztési technológia, a mikrobiológiai csoportok száma és a köztük levő interakció (Watada and Qi 1999).

A gyümölcsök érettségi fokának meghatározására gyakran alkalmaznak optikai módszereket, melyek közül a fényáteresztési tulajdonságok vizsgálata a meghatározó. A módszerek másik csoportja a gyümölcsök klorofill tartalmának mérésén alapul, amely az érés során csökken. A vizsgálat során a teljes sötétségben levő gyümölcsöt nagyon erős fényvel világítják meg, majd kikapcsolják a fényt és egy szenzorral mérik a kibocsátott fény mennyiségét, amely arányos a klorofill tartalommal, így a gyümölcs érettségével (Barbosa-Canovas et al. 2003).

A mezőgazdasági és élelmiszer-technológiákban egyre jobban elterjedt a roncsolásmentes mérési módszerek alkalmazása a szedés utáni minőségi változások követésére. Ezeket a roncsolásmentes vizsgálati módszereket mutatom be a további fejezetekben.

2.2 Spektrális módszerek

A spektroszkópia az anyag és az elektromágneses sugárzás kölcsönhatását kísérő jelenségek (visszaverődés, fénytörés, optikai forgatás, diffrakció, fényelnyelés, fényszórás) alapján alkalmas a minta minőségi és mennyiségi vizsgálatára. Az elektromágneses sugárzás a hullámhossz alapján hat tartományra osztható (1.ábra: γ sugár, röntgen, ultraibolya-látható tartomány (UV/VIS), infravörös (IR), mikrohullám, és rádióhullám).



1. ábra Az elektromágneses spektrum (Kovács and Paripás 2011)

Az ultraibolya–látható tartomány három részre tagolódik (távoli ultraibolya (FUV), ultraibolya (UV) és látható (VIS) tartományokra). Az infravörös tartomány további öt részre (közeli infravörös (NIR), rövid hullámhosszú infravörös (SWIR), közepes hullámhosszú infravörös (MWIR), hosszú hullámhosszú infravörös (LWIR) és a távoli infravörös (FIR) tartományokra) bontható.

A spektroszkópia az egyik legelterjedtebb anyagvizsgálati módszer. Alapja, hogy az anyagok molekuláris és atomi szintű elektronátmenetei kvantáltak és ezek az energiaszintek anyagra jellemzőek. A Maxwell féle fényelmélet alapján tudjuk, hogy a fény elektromágneses hullám, számos energia-átmenethez meghatározott hullámhosszak tartoznak. A fotonok energiája és a sugárzás hullámhossza közötti összefüggést a Planck egyenlete írja le (1. egyenlet).

$$[1] \quad E = h\nu = h \times \frac{c}{\lambda}$$

ahol: h = a Planck féle állandó [$4,136 \cdot 10^{-15}$ eVs], c = a fénysebesség [$2,998 \cdot 10^{10}$ cm/s], ν = a sugárzás frekvenciája [s^{-1}], λ = a sugárzás hullámhossza [cm].

A spektrumból részben következtetni lehet anyagi minőségre és mennyiségre, de akár a molekula–szerkezetre is.

Fontos bemutatni a Wien-féle eltolódási törvényt, mely a fekete test sugárzásának hullámhossza és hőmérséklete közötti összefüggést (2. egyenlet) írja le.

$$[2] \quad \lambda_{\max} T = b$$

ahol: λ_{\max} a csúcs hullámhossza, T a fekete test abszolút hőmérséklete, és b az arányossági tényező

A feketetest-sugárzás egyik alapvető összefüggése (3. egyenlet) a Stefan–Boltzmann-féle sugárzási törvény

$$[3] \quad R = \sigma \times A \times T^4$$

ahol: R a teljes fajlagos kisugárzás vagy emittancia, T az abszolút hőmérséklet, és σ a Stefan–Boltzmann-állandó (4 egyenlet írja le)

$$[4] \quad \sigma = \frac{2\pi^5 K^4}{15c^2 h^3} = 5,672 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Két alapvető csoportot különböztethetünk meg, az emissziós spektroszkópiát és az abszorpciós spektroszkópiát. Az emissziós spektroszkópiánál a vizsgált anyagot gerjesztett állapotba hozzuk, (a legtöbb esetben ez termikus úton történik) majd elemezzük a kibocsátott sugárzást. Az elemzések során az anyagi minőségre a hullámhosszból, míg a komponensek mennyiségére az intenzitásból lehet következtetni. Az abszorpciós spektroszkópiánál egy meghatározott fényel világítják át az anyagot. Az abszorbeálódott fény a minta egyes komponenseit hozza gerjesztett állapotba. A csillapodás jelenségét a Lambert-Beer törvény írja le (5. egyenlet).

$$[5] \quad I = I_0 \times e^{-acd}$$

ahol: az a = moláris abszorpciós (extinkciós) koefficiens, c = moláris koncentráció és a d = optikai úthossz a mintában.

2.3 A NIR alkalmazása élelmiszerek vizsgálatára

A korszerű berendezések és technológiák alapkövetelménye, hogy gyors és megbízható minőségi előrejelzéseket kapjunk. Két irányvonal figyelhető meg az összetétel-vizsgálati eszközök fejlesztésében. Az egyik ilyen irányvonal a klasszikus analitikai módszereken alapuló automatizált és gyors műszerek fejlesztése. A másik az indirekt módszereken alapuló műszerek fejlesztése, ahol másodlagos fizikai paraméterek mérésével következtethetünk összetevőkre (pl.: bizonyos anyagoknál az optikai forgatóképesség értékét a cukortartalom, míg a törésmutató értékét a szárazanyag-tartalom változása befolyásolja nagymértékben).

Ezeknek a kvázi–szelektív fizikai jellemzőknek a mérése korlátozott pontosságú mérést tesz lehetővé, mert a mért minta többi komponense nagyban befolyásolhatja a mért értéket.

Ma már rutinszerűen alkalmazzák a NIR technikát olyan összetett biológiai anyagok, mint a gyümölcs, zöldség, hús és húskészítmények, valamint a tej és tejtermékek kémiai minőségi paramétereinek (pl. a nedvesség, az összes oldható szárazanyag-tartalom (TSS), a fehérje-, a zsír-, és az ergoszterol) vizsgálatára (Collell et al. 2010; Flores et al. 2009; Porep et al. 2015).

A közeli infravörös sugárzást (Near Infra-Red) Friedrich Wilhelm Herschel 1800-ban fedezte fel. A szakirodalomban nincs egyértelmű behatárolása az elektromágneses spektrum NIR tartományának. Egy korábbi kutatásban (Williams and Norris 1987) a 780 - 2500 nm tartományt, míg egy 2011-ben megjelent tankönyv szerint (Pokol et al. 2011) már 780 - 2000 nm tartományt tekintik a közeli infravörös résznek. A vizsgált termény optikai tulajdonsága, valamint kémiai összetétele alapján, a vizsgálat során a besugárzott fény egy része az anyagban szóródik és elnyelődik, másik része visszaverődik.

Az infravörös (IR) és NIR tartományban elsősorban a kémiai kötések vibrációja okoz elnyelést, (mint a C–H, O–H, N–H, S–H és P–H kötések), ezáltal jellemezhetőek a szerves molekulák (Hollas 1987; Bonanno et al. 1992; Baranyai and Zude 2009).

A NIR spektrumok rengeteg kémiai és fizikai információt hordoznak, de az adatokból az információ kinyerése bonyolult és összetett feladat. Ennek az egyik oka az, hogy a spektrum a számos felharmónikus és kombináció okozta elnyelési sáv összessége, melyben jelentős átfedések vannak, mivel a multikollinearitás igen erős (Ozaki et al. 2007). Bizonyos jellemzők a NIR spektroszkópiával precízen becsülhetőek, mint például az oldható szárazanyag-tartalom (SSC), a szárazanyag-tartalom (DM) vagy a keményítőtartalom. Más komponenseket (ill. jellemzőket) kisebb pontossággal tudunk becsülni úgy, mint a titrálható savtartalmat vagy a keménységet. A titrálható savtartalom meghatározását nehezíti, hogy a szerves savakra jellemző karboxil-csoportban (–COOH) viszonylag nagyméretű a szén és az oxigén atomok között lévő kovalens kötés dipólusmomentuma kisebb és sokkal kisebb az elnyelése, mint a szén–hidrogén vagy oxigén–hidrogén közötti kovalens kötéseké. Ezen felül a mintában lévő savak általában kevesebb, mint 2%–os koncentrációban vannak jelen (Sun 2008).

Ennek a technikának számos előnye és hátránya van. Előnyei közé tartozik a gyorsasága, pontossága és a reprodukálhatósága, ami megegyezik a referenciamérés pontosságával, viszont szükség van ezek ellenőrzésére. Kiemelendő még a rugalmasság és hatékonyság, melynek köszönhetően számos összetevő mérhető egyszerre, a minta-előkészítés minimális vagy szükségtelen is lehet, valamint a műszer kicsi és akár hálózatba építhető.

Hátrányai közé tartozik, a magas beszerzési ára mellett az igazán hatékony működtetéséhez elengedhetetlen általános ismeretek megléte.

A minta hőmérséklete megváltoztatja a spektrumot, így, ha a minta hőmérséklete eltér a kalibráció során meghatározott hőmérséklettől, akkor eltérést okoz a mért jellemzőkben is (Ozaki et al. 2007).

A NIR spektroszkópiát először Norris (1964) használta gabona nedvesség mérésére. A technika számos termék nedvesség-, fehérje-, zsírtartalmának, stb. mérésére terjedt el a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban (Davies and Grant 1987; Gunasekaran and Irudayaraj 2001).

Az első alkalmazások kertészeti termények esetében pl. hagymák (Birth et al. 1985) és almaminták oldható szárazanyag-tartalmának (SSC) (Bellon-Maurel 1992), valamint gombák víztartalmának (Roy et al. 1993) mérésére irányultak. Jelentős számú publikáció született a NIR technikával mért gyümölcsökkel, melyekben többek között almát (Bellon-Maurel 1992; Lammertyn et al. 1998; Liu and Ying 2005; Lovász et al. 1994; Lu et al. 2000; Nicolai et al. 2006; Alamar et al. 2007), sárgadinnyét és ananászt (Guthrie et al. 1998), kivit (Osborne et al. 1999; Schaare and Fraser 2000; McGlone et al. 2002), citrom-és narancsféléket (Kim et al. 2004), mangót (Saranwong et al. 2003; Saranwong et al. 2004; Teerachaichayut et al. 2007; Schmilovitch et al. 2000), a mandarint (McGlone et al. 2003; Guthrie et al. 2005; Gómez et al. 2006), őszibarackot (Carlomagno et al. 2004), szőlőt (Chauchard et al. 2004; Ferrer-Gallego et al. 2011), banánt (Tarkosova and Copikova 2000) és körtét (Cavaco et al. 2009; Han et al. 2006; Nicolai et al. 2008) vizsgáltak.

Bellon-Maurel munkája (1992) nyomán számos publikáció született a gyümölcsök, mint alma (Bellon et al. 1993; Lu et al. 2000; Ji 2000; Zude et al. 2006; Bobelyn et al. 2010; Mendoza et al. 2012), körte (Fu et al. 2006; Jiang and Zhu 2013; Machado et al. 2012), banán (Zude 2003; Walsh et al. 2004; Subedi and Walsh 2011) szárazanyag-tartalmának mérésére.

A SSC és a keménység olyan kulcsfontosságú paraméterek, melyek meghatározzák a gyümölcsök minőségét. Mitchell és munkatársai (Mitchell, FG and Mayer 1987; Mitchell et al. 1989; Mitchell 1990) erős kapcsolatot találtak az érett kivi gyümölcsben mért SSC és a fogyasztói elfogadottság között.

Bobelyn és munkatársai (2010) a fajta, az évszak, és az eltarthatóság hatását tanulmányozták a közel hatezer (különböző fajtájú, eredetű, eltarthatósági idejű, eltérő évszakban szedett) almaminta oldható szárazanyag-tartalmára és keménységére. A NIR mérésekkel kapott nagy spektrális adathalmaz segítségével kalibrációs modelleket készítettek, a spektrumok elemzéséhez funkcionális variancia analízist (FANOVA) alkalmaztak. Az elemzés során arra a következtetésre jutottak, hogy a fajta, az évszak és az eltarthatósági idő hatása a NIR spektrumokban jelentős. A legnagyobb különbségeket a spektrumokban a víz abszorpciós csúcsok körül (970, 1170 és 1450 nm) találták.

Az egy hetes tárolás alatt csökkent az abszorbanca a vízesúcsoknál, ami annak tudható be, hogy a víztartalom a tárolás során csökken. A fajtabecslés jóságát mutató RMSEP értékek az oldható szárazanyag-tartalomnál 0,6–0,8 Brix°, míg a Magness Taylor keménységek becslésénél az 5,9–8,8 N tartományban voltak. Kimutatták, hogy a nem tipikus adatok nagy kalibrációs hibához vezethetnek, ezért a kalibrációs adatsornak reprezentálnia kell a jövőbeni analizálandó mintákat.

Jiang és munkatársai (2013) sértetlen körte keménységét és SSC értékét határozták meg Fourier transzformációs NIR spektroszkópiával (FT-NIR) és többváltozós statisztika felhasználásával. Főkomponens (PCA) és független komponens analízis (ICA) alkalmazásával nyerték ki a látens vektorokat az eredeti spektrumadatokból. Extrém tanulógépet (ELM) alkalmaztak a regressziós modell kalibrálásához. Az ELM modell néhány paraméterét a keresztvalidáció legalacsonyabb RMSECV értéke alapján optimalizálták. A keménységtartalom becslése gyengébbnek bizonyult ($R^2_p = 0,81$ és $RPD = 2,28$, ahol a független komponensek (ICs) száma 6), mint az SSC értéké ($R^2_p = 0,91$ és $RPD = 3,43$, ahol ICs = 5).

Machado és munkatársai (2012) körteminták minőségi jellemzőit roncsolásmentes módszerrel állapították meg. Háromféle körtemintán ('Williams', 'Packams' és 'Carrick') végezték vizsgálataikat abból a célból, hogy a NIR spektrumokból kalibrációs egyeneseket készítsenek az SSC és a velő-keménység meghatározására. A kalibrációt körtemintánként végezték, előzetesen mért NIR (roncsolásmentes), SSC és velő keménység (roncsolással járó módszerrel nyert) adatok felhasználásával. Az eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a VIS/NIR technika lineáris regresszióval megbízható a minőségi jellemzők, kiemelten az SSC becslésére.

Cavaco és munkatársai (2009) parciális legkisebb négyzetek (PLS) módszerén alapuló becsléssel modellt alkottak "Rocha" körteminták (*Pyrus communis* L.) tárolás közben bekövetkező keménységének változására. A körtéket három különböző gyümölcsösből szerezték be. Az első helyről származó mintákat sötét szobában 20 ± 2 C°-on és 70%-os relatív páratartalom mellett tárolták rögtön szedés után, az ezekkel kapott eredményeket használták a modell kalibrálásához és a belső validáláshoz. A külső validációhoz a maradék két helyről származó mintákat alkalmazták, amelyeket különböző körülmények között tároltak az eltarthatósági időn belül. Gyümölcsöket a tárolás során a látható és közeli infravörös tartományban (400–950 nm) reflexiós spektrofotométerrel (VIS/NIR) követték. A keménység és a bizonyos hullámhosszúságú sávok között a korreláció jelentősen eltér attól függően, hogy az érés mely szakaszában van a gyümölcs. A PLS modellek finomításához kétfajta modellt használtak, az éretlen/érett körtékre (nagy keménység), vagy a túlérétt körtékre (alacsony keménység) készített modelleket. A becslés két lépésből állt, először egy teljes tartományú modellt (teljes modell) alkalmaztak.

Ha a teljes minta becslése alacsony keménység értéket ad, akkor a túlrejtett modellt alkalmazzák a becslés finomítására. Ez a módszer javítja a sima PLS modelleket. Végezetül azt vizsgálták, hogy a klorofill méréssel kapott adatok önmagukban elégnak bizonyulnak-e a keménység becsléséhez, de az eredmények azt mutatták, hogy a klorofill elnyelés önmagában nem magyarázza a keménységet.

Subedi és Walsh (2011) mangó és banán érését követték nyomon a látható és rövidhullámú közeli-infravörös tartományban végzett spektroszkópiás mérésekkel (VIS–SWIR, 500–1050 nm), valamint részben áteresztő optikai geometriát használva mérték a minták szárazanyag (DM) és az összes oldható szárazanyag (TSS) értékeiket (a banán esetében a mezokarpium szövetben). PLS modelleket alkottak a kétféle szárazanyag-tartalom becslésére. Az érés során a hámozatlan banán vizsgálata kevés eredménnyel járt a héj vastagsága miatt. A mangó esetében a TSS az érés különböző fázisaiban nem mutatott szignifikáns változást, csak az érett gyümölcs esetében nőtt meg. Ez arra enged következtetni, hogy nem különböztethető meg egymástól a keményítő- és az oldható cukortartalom az ép gyümölcs spektrumai alapján. A kapott eredmények alapján a VIS–SWIR alkalmazható a mangó és banán érésének nyomon követésére és az ép mangó szárazanyag tartalmának meghatározására (a banánnak nem). Ez a módszer nem alkalmazható sem a banán, sem a mangó érettségi állapotának nyomon követésére a TSS értékek alapján.

Lu és munkatársai (2000) munkájukban 3 féle almamintát ('Empire', 'Golden Delicious', és 'Red Delicious') vizsgáltak hámozva és hámozatlanul. Megállapították a keménységüket (Magness-Taylor keménységmérővel) és cukortartalmukat, valamint felvették a NIR spektrumokat (800–1700). PCA és PCR modelleket állítottak fel a NIR spektrumokból a cukortartalom és a keménység becslésre. Alacsony korrelációt mutatott ($r=0,38 - 0,58$; $SEP=6,6 - 10,1$ N) a NIR és MT keménység között keménységre irányuló becslés a hámozott és hámozatlan minták esetében. Jobb eredményeket kaptak, mikor az erő-deformáció görbék meredekségét vették figyelembe. Kiváló eredmények mutatkoztak a cukortartalom becslésénél ($r=0,93 - 0,97$; $SEP=0,37 - 0,42$ °Brix), és a fajta hatása sem volt jelentős a becslésre.

Nem csak a gyümölcsök és a zöldségek mérésére terjedt el ez a módszer. Cozzolino és munkatársai (2004) a látható (VIS), és a közeli infravörös spektroszkópiát (NIRS) használták a különböző húsok azonosítására. Marhahús ($n=100$), bány- ($n=140$), sertés ($n=44$) és csirke ($n=48$) húsmintákat homogenizáltak, majd látható (VIS) és közeli infravörös (NIR) tartományokban (400–2500 nm) vizsgáltak. PCA és PLS modellt készítettek mesterséges (dummy) változókkal az izomfajták azonosításra. A felállított modellekkel jól osztályozták a minták több mint 80%–át. Eredményeik azt mutatták, hogy a VIS és a NIR spektrumok használata célszerű az izomfajták gyors hitelesítésére és azonosítására, viszont további mérésekre és nagy mennyiségű adatra van szükség a módszer validálásához.

2.4 Multispektrális és hiperspektrális képalkotó technikák

A hiperspektrális képalkotás szerepe az utóbbi évtizedben egyre nagyobb az élelmiszerek és a mezőgazdasági termékek minőségének megítélésében, valamint a biztonságuk ellenőrzésében. Ez a technika egyesíti a spektroszkópiát a képalkotással, így spektrális és térbeli információkat egyaránt nyerhetünk a vizsgált mintáról. Lehetőséget nyújt a kémiai komponensek és a minőségi jellemzők mérésére, függetlenül attól, hogy az eloszlásuk nem egyenletes a vizsgált mintán. A hiperspektrális képek térbeli (x, y) és spektrális (λ) dimenziókat tartalmaznak. A számítógépes látórendszerekhez hasonlóan a hiperspektrális képalkotó rendszereknél is megfigyelhetők ugyanazok a problémák, mint pl. a rossz megvilágítás, a zaj jelenléte, a megfelelő terület kiválasztásának nehézsége, stb. A problémák nagy része előfeldolgozási lépésekkel javítható. A számos hullámhossz vizsgálata miatt az információk feldolgozása is komplexebbé válik. A legszélesebb körben elterjedt statisztikai módszerek ezen a területen a PCA, a PLS, az LDA és az ANN módszerek (Lorente et al. 2012).

Lleó és munkatársai (2009) munkájuk során háromféle vörös húsú barackot ('Kingcrest', 'Rubyrich' és 'Richlady') kétféle multispektrális rendszerrel osztályoztak. Mérték a barackok kétféle keménységét (impakt és Magness-Taylor keménységmérő), SSC tartalmát és színét (Minolta, 450-700 nm tartományban). A multispektrális képek rögzítésekor háromféle szűrőt alkalmaztak (800 nm, 675 nm és 450 nm, melyek 20 nm sáv szélességűek). A gyümölcs érése során a referenciamérések is szignifikánsan változtak (a keménység és a látható relatív reflektancia spektrumok), a keménység csökkent, miközben a reflektancia 680 nm-en nőtt (klorofill abszorpciós csúcs).

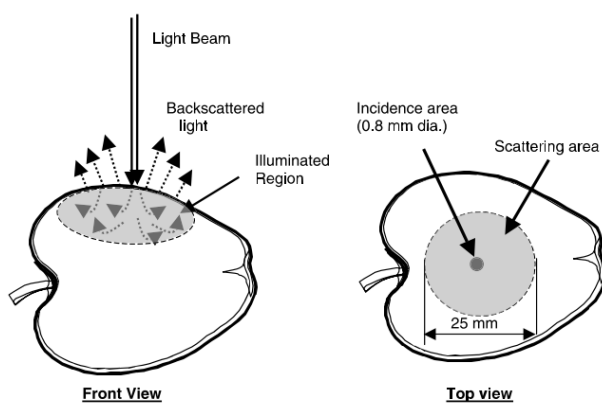
Különböző érettségi állapotú paradicsomokat különítettek el Polder és munkatársai (2003) hiperspektrális módszerrel és ICA (független komponens analízis) alkalmazásával. Az ICA-t arra használták, hogy megbecsüljék a legfontosabb vegyületeket, amelyek szerepet játszanak a paradicsom érése során. Az abszorpciós spektrumok alapján két fontos független változót találtak, melyek a likopin és a klorofill tartalomra utaltak. A módszer alkalmazásával valós idejű, érzékeny felügyelet nélküli válogató berendezések fejleszthetők, melyek adott komponens koncentrációját, illetve térbeli eloszlását használják kritériumként.

Qiao és munkatársai (2007) a sertéshús minőségét gyors, pontos és objektív módon meghatározó hiperspektrális módszerrel vizsgálták, mindemellett a márványosságot is meghatározták. A kapott spektrumok második deriváltjával statisztikai értékeléseket (PCA, majd klaszter analízis) végeztek a csoportok elkülönítése céljából. A vizsgálat után előrecsatolt (hurokmentes) hálókkel (FFN) modellezték az összefüggéseket, a bemeneti változók a főkomponensek, a kimeneti változók a minőségi szintek voltak.

Noh és Lu (2007) hiperspektrális képalkotó technikát alkalmazott lézer-indukált fluoreszcencia mérésre almamintákon, a gyümölcs -különböző minőségi paramétereinek meghatározása érdekében. Gerjesztő forrásként egy 408 nm hullámhosszú lézert alkalmaztak, amivel 0-5 percig egy perces lépésközzel megváltoztatva végezték a besugárzásokat 'Golden Delicious' almamintákon. A mintákat 5 hónapig szabályozott légkörben (2% O₂ és 3% CO₂, 0°C-on), a vizsgálat során 1°C-on hűtőben és a fluoreszcenciás mérések előtt sötét szobában -22°C hőmérsékleten tárolták. A hiperspektrális fluoreszcenciás képek átlagát, maximum és szórás spektrumát számolták. Mérték az almák hús - és fedő színét, keménységét, SSC tartalmát, valamint titrálható sav tartalmát. Egy hibrid eljárás kombinálásával a PCA és az ANN modelleket felhasználva becsülték a gyümölcs minőségi paramétereit mind a hat különböző megvilágítási idővel kapott adatokkal. A három perces megvilágítás alatt csökkent, míg az öt perces alatt stabil volt a fluoreszcenciás kibocsájtás. Összességében a felületi szín becslésére kapott $r=0,94$ értéket jónak ítélték meg. Jó becsléseket kaptak a fedőszín telítettségének becslésére ($r=0,94$) és viszonylag jót a keménység ($r=0,74$) esetén az egy perces vagy annál hosszabb megvilágításnál, viszont a becslés alacsonyabb korrelációt mutatott az SSC tartalom, titrálható savtartalom és a hús színezeti értékeivel. Az eredmények biztatóak, de további méréseket igényel, hogy ez a mérési módszer alkalmazható legyen az alma minőségi paramétereinek előrejelzésére.

2.5 Diffúz reflexiós módszer

A diffúz reflexió egy régóta ismert jelenség a spektroszkópiában (Williams and Norris 1987), bár azon a területen zavaró hatásként foglalkoztak ezzel a jelenséggel (Geladi et al. 1985; Barnes et al. 1989).



2. ábra A beeső fénysugár terjedése és visszaverődése termény szövetében (forrás:Lu 2004)

A gyümölcsök és zöldségek reflektancia mérését a minták felületi görbülete befolyásolja. Ahhoz, hogy egyenletes reflektancia jeleket kapjunk a mintáknál, figyelembe kell venni a gyümölcs felszíni görbületének hatását a diffúz reflexiós profilra. Feltételezzük, hogy egy adott pontban a minta felületéről visszavert fény követi a Lambert-féle koszinusz törvényt (Kortüm 1969), ezt Kienle és társai (1996) is megerősítették.

Egyre több kutatás jelenik meg, amelyben a termények diffúz reflexiós méréssel kapott információiból valamilyen fizikai és/vagy beltartalmi paraméterek becslésével foglalkoznak. A publikációk többségében a keménység- és az oldható szárazanyag vagy a víztartalom (száradás során) becslését tűzik ki célul.

A vizsgálatok során egy fókuszált fényvel vagy egybefüggő fénysugárral (lézer) megvilágítanak egy terményt és a fölötte elhelyezett képalkotó rendszerrel (monokromatikus, RGB vagy hiperspektrális kamerával) rögzítik a felületen megjelenő fényudvart. Az úgynevezett „scattering” jelenség során a megvilágító fény kisebb része visszaverődik a felületről, a többi pedig belép a szövetbe, ahogyan a 2. ábrán is látható. A szövetben a fotonok egy része elnyelődik (abszorbeálódik), a többi foton a szóródás miatt különböző irányokba halad, egy része a felület irányába szóródik és ezzel egy fényudvart hoz létre a felületen (halo-nak, azaz glóriának is szokták nevezni), míg a fennmaradó hányad a szövetek belseje felé terjed tovább. Az abszorpció a kémiai összetételre utalhat (pigmentek, cukor, víztartalom, stb.) (Williams and Norris 1987). A fény szóródása egy fizikai jelenség, amely függ a sejtek méretétől és a szöveti mátrixok intra- és extracelluláris tulajdonságaitól. A termény felületén megjelenő fényudvart rögzítjük, a rögzített kép feldolgozása után információhoz juthatunk a termény textúrájáról és mechanikai tulajdonságairól (Lu 2004). Amennyiben spektrális információkat is nyerünk a mintáról, a vízdoldható szárazanyag tartalomra is következtetni tudunk (Qing et al. 2007)

Tu és munkatársai (2000) He-Ne típusú 670 nm hullámhosszúságú lézert használtak 8 napon keresztül szobahőmérsékleten tárolt paradicsom minőségváltozásának követésére. A diffúz reflexiós fényfolt össz pixelszáma jelezte a paradicsom keménységét, aminek a meghatározására akusztikus és hagyományos kompressziós próbát használtak. A keménység értékek negatív korrelációt mutattak a fényfolt területéhez képest. Egy másodfokú polinom egyenlet kifejezte a kapcsolatot a keménység és a fényudvar nagysága között ($R^2=0,62$), ezért kijelentették, hogy a rendszer alkalmazható paradicsom érettségének megállapításához.

Qing és munkatársai (2007) ‘Elstar’ és ‘Pinova’ almák keménységét és SSC értékét mérték, és diffúz reflexiós módszerrel kapott eredményekkel próbálták becsülni azokat. Fényforrásként szilárd-test lézer dióda modulát alkalmaztak, melyek öt különböző hullámhosszúságú (680, 780, 880, 940 és 980 nm) fényt emittáltak.

A diffúzan visszavert fényt RGB képeken rögzítették, majd a képeket monokromatikus képpé transzformálták Gonzalez és Woods (1992) képlete alapján. A fény intenzitást a gyakoriságuk függvényében ábrázolva hisztogramot kaptak. A háttér szegmentálásánál három módszert hasonlítottak össze: a bimodális, az iteratív aritmetikai és az Otsu (Smith et al. 1979) küszöbölési módszert. A szóródási profilok korrekcióját is elvégezték az almák eltérő átmérője miatt. A háttér okozta zajt átlagoló szűréssel csökkentették. A leghatékonyabb szegmentálást az első módszerrel érték el, ahol a hisztogram első inflexiós pontja szerint választották meg a küszöb értékét. A kalibrációs modellt PLSR módszerrel állították föl, majd megállapították, hogy a keménység és az SSC az intenzitás-értékek gyakorisága alapján jobban becsülhető, mint a pixelek száma alapján.

Az 'Elstar' és 'Pinova' almaminták további mérési eredményeivel foglalkoztak Qing és munkatársai (2008) publikációjukban. A szegmentálást az előző eredményeikre alapozva bimodális küszöböléssel végezték. Az intenzitás-értékek gyakorisága alapján háromféle módszerrel állítottak fel kalibrációs modellt: PLSR, SMLR, és PCR. A különböző kísérleti kondíciók alapján kapott eredmények közötti szignifikanciát háromtényezős varianciaanalízissel vizsgálták. A különböző fizikokémiai tulajdonságú csoportok közötti szignifikáns differencia összehasonlítását Student–Newman–Keuls (SNK) teszttel végezték. A kapott kalibrációs modellek között kevés eltérést tapasztaltak, mindkét almafajta esetében a PLSR módszerrel érték el a legnagyobb korrelációs együtthatót és a legkisebb validációs hibát.

Romano és munkatársai (2008) banán szeleteket szárítottak 53, 58 és 63 °C hőmérsékleten, 5 órán keresztül, óránként 15 szeletet mértek színmérővel és diffúz reflexiós módszerrel. A diffúz reflexiós rendszerük egy 670 nm hullámhosszon működő lézer diódából és egy digitális kamerából állt. A nedvességtartalom és a diffúz reflexiós rendszerrel kapott paraméterek összefüggéseit vizsgálták, ahol a megvilágított terület nagysága (pixelek száma) és a nedvességtartalom között lineáris kapcsolatot találtak. A szárítás hőmérséklete befolyással volt a mérés eredményességére, alacsonyabb hőmérsékleten nagyobb volt a korreláció értéke. Magasabb hőmérsékleten a minta fokozott barnulása megváltoztatta a szövet abszorpcióját, így a lézerefény eloszlása is megváltozott.

Romano és munkatársai (2010) a banánszeletek szárítása közben a szín és a nedvességtartalom változását vizsgálták diffúz reflexiós módszerrel. A mintákat háromféle előkezeléseknek vetették alá: hűtésnek (4°C, 18 óra), 0,2%-os aszkorbinsavas/citromsavas áztatásnak (1 percig) és desztillált vizes áztatásnak (30 másodpercig). A 2008-as publikációjuk eredménye alapján a 63°C-os szárítás hőmérsékletet választották. A szárítás folyamán óránként mintát vettek, ezeket színmérővel és egy 670 nm hullámhosszon emittáló lézer diódával

felszerelt diffúz reflexiós rendszerrel mérték, illetve szárítószekrényben tömegállandóságig szárították.

A diffúz reflexiós folt nagysága az idő szerint a nedvességtartalom változásának megfelelően csökkent, bár a szárítás kezdetén az értékek varianciája nagyobb volt, amit az előkezelés nem befolyásolt jelentősen. A 670 nm hullámhosszon mért diffúz reflexiós mérési adatokat a szövet barnulása nem befolyásolta, de a szerzők megjegyezték, hogy a barnulás folyamatát a szövet struktúrájának változása kíséri, ezért további vizsgálatokat javasolnak.

Romano és munkatársai (2011) almászeleteket szárítottak konvekciós módon 50, 60 és 70 °C hőmérsékleten és 30 percenként 3 órán keresztül 16 mintát vizsgáltak. A szárítás során a diffúz reflexiós módszer alkalmazhatóságát vizsgálták a keménység, nedvességtartalom és az SSC minőségi paraméterek ellenőrzésére. A rendszerük egy 635 nm hullámhosszon működő lézer diódát és egy RGB kamerát tartalmazott. Figyelembe vették a megvilágított terület nagyságát és a fényességét, melyet Gonzalez és Woods (1992) képlete alapján számoltak ki. Ezen paraméterek változásának összefüggését a nedvességtartalom és az SSC változásával különböző függvényekkel tudták leírni. A nedvességtartalmat egy logaritmikus- ($R^2=0,84$), míg a lumineszcenciából egy lineáris egyenlettel ($R^2=0,89$) közelítve becsülték a terület nagyságából. Az oldható szárazanyag tartalmat a terület nagyságából egy exponenciális- ($R^2=0,80$), míg a lumineszcenciából egy lineáris egyenlettel ($R^2=0,74$) közelítve becsülték. A keménységet nem sikerült ezzel a mérési módszerrel becsülniük, viszont a nedvességtartalom és az SSC esetén a módszer megfelelőnek bizonyult számukra.

McGlone és munkatársai (1997) kivi keménységét becsülték egy 864 nm hullámhosszú lézer szóródása segítségével, ahol a terményt átvilágították, a fény kilépő szöge 20 és 55 fok közötti volt a beeső sugárhoz viszonyítva. A gyümölcsben szórt fény intenzitásának növekedésével fordított arányosságban volt a keménység változásával. Az intenzitás változást modellezték egy reciproknak hatványfüggvény összefüggés felhasználásával, ami az intenzitás és egy távolság faktor ($D = \sin(\theta / 2)$) között írható le, ahol a θ a kilépő szög. A keménység az arányossági konstanssal (S) növekszik és a D kitevője csökken. A logaritmizált S adatok adták a legjobb lineáris regressziós eredményeket a kétféle gyümölcs keménységgel ellentétben (stiffness $R^2=0,83$; és $R^2=0,79$).

Lu (2001) kétféle cseresznyeminta ('Hedelfinger' és 'Sam') keménységét, SSC tartalmát mérte NIR tartományban (800-1700 nm). PLS módszerrel becsülte a NIR spektrumadatokból a keménységet, valamint az SSC értéket. A modell viszonylag jó keménységbecslést adott a 'Hedelfinger' ($r=0,8$; SEP=0,55) és a 'Sam' ($r = 0,65$; SEP = 0,44 N) cseresznyeminta esetében, az SSC becslése pedig már igen jónak bizonyult (Hedelfinger $r=0,97$; SEP=0,71 °Brix és Sam $r=0,89$ and SEP=0,65 °Brix). Ez a vizsgálat azt is kimutatta, hogy nem egyetlen hullámhosszon

van szoros összefüggés a keménységgel vagy az SSC-vel, így nehéz a kijelölt hullámhosszon vagy sávokon pontosan megbecsülni a cseresznye két minőségi paraméterét.

Lu (2004) 'Delicious' almaminták keménységét és SSC értékét mérte, valamint egy multispektrális rendszerhez öt különböző sávszűrőt alkalmazva (680, 880, 905, 940 és 1060 nm) a mintákról képeket készített. Szórás profilokat számolt (fényudvar középpontjából radiális átlagolással) a képekből és a különböző kombinációjú arányokkal a két minőségi paramétert becsülte. A kísérlet megkezdése előtt a mintákat 4-5 hónapig szabályozott légterben tárolták. A vizsgálatok 4 hétig tartottak és vizsgálatonként kb. 40 mintát használtak fel (összesen 550 mintát). Minden gyümölcsöt a kísérlet alatt hűtve (5°C-on), de a vizsgált egyedeket 15 órával a mérések előtt sötét szobában, 24°C hőmérsékleten tárolták. A keménység és az SSC becsléséhez egy visszacsatolt neurális hálót rejtett réteggel és egy szigmoid függvényt alkalmazott. A legjobb keménység becslést ($r=0,87$; $SEP=5,8N$) négy szűrővel kapott profilok háromféle arányával (680/940, 880/905, és 905/940), míg az SSC tartalom becslésénél ($r=0,77$; $SEP=0,78\%$) három szűrő kétféle arányával (880/905, és 905/940) érte el.

Huang és Lu (2010) 'Red Delicious' almaminta lisztesség osztályozását hiperspektrális (fókuszált halogén fényforrás; 400-1000 nm mérésstartomány) szóródási képek adataival végezték. A mintákat 5 hónapig szabályozott légterű technológiával (2% O₂ és 3% CO₂, 0 °C-on) tárolták a kísérlet megkezdése előtt, majd két csoportra osztották (I.cs.= 240 és II.cs.= 340). Az első csoportot a lisztszerűség kialakulása számára nem ideális hideg helyen (4°C), a második csoportot a lisztszerűség kialakulásához előnyös körülmények között (20°C; 95% RH) tárolták 0-5 hétig. A hiperspektrális mérések mellett, lédúságot és keménységet is mértek. A PLS regressziós módszerrel a roncsolásmentes vizsgálatok eredményeit akarták becsülni, ami alacsony korrelációt eredményezett (keménységre $r \leq 0,76$ és a lédúságra $r \leq 0,54$). PLS-DA osztályozó modelleket készítettek kettő (lisztes, nem lisztes), három (lisztes, félig lisztes és friss), és négy (lisztes, puha, száraz és friss) osztályú besorolásra. Kétosztályú besorolással $\geq 74,6\%$ pontosságot értek el, de a három vagy négyosztályú besorolásnál a hiperspektrális technika nem képes jó eredményt adni. A legnagyobb osztályozási pontosságot ($\geq 93\%$) a hosszú idejű lisztes puhulásnál tapasztalták.

Huang és munkatársai (2012a) korábbi cikküket kiterjesztve (Huang and Lu 2010), az alma lisztességének mérési eredményeit újabb módszerekkel dolgozták fel. Lokális lineáris beágyazási (LLE) algoritmust fejlesztettek ki a hiperspektrális adatokból. A statisztikai feldolgozáshoz a PLS-DA és az SVM módszereket alkalmazták, hogy osztályozáson alapuló modelleket fejlesszenek LLE, átlag LLE és átlag hiperspektrális spektrumokból. A kétosztályú (lisztes, nem lisztes) osztályozás a PLS-DA modellek alapján az LLE spektrumosztályozási pontossága (80,4%), míg a másik kettő ennél rosszabbnak bizonyult (átlag LLE=76,2%; átlag=73%).

Az SVM módszerrel az osztályozások jobbnak mutatkoztak mindhárom esetben (LLE=82,5%; átlag LLE=79,4% és az átlag spektrummal 78,3%), mint a PLS-DA-nál. A kutatók véleménye szerint az LLE algoritmus és a hiperspektrális képalkotó technika alkalmas lisztszerűség osztályozására.

Cho és Han (1999) egy lézer technikát fejlesztettek ki az alma keménységének jellemzésére, amely azon a hipotézisen alapul, hogy a lézer szóródását a keménység befolyásolja. A telített terület arányát és a relatív területeket lézerszóródási paraméterként definiálták és ezeket a paramétereket mérték almamintákon ('Tugaru' és 'Fuji' fajtájú). Vizsgálták a lézer hullámhosszak és az optikai teljesítmény-szintek hatását. Amikor egy kisebb 1,7mW teljesítményű 632,8 nm hullámhosszú lézert alkalmaztak, a lézer paraméterek szignifikáns korrelációt mutattak a keménység paraméterekkel. A fajták közötti különbség szignifikáns hatással volt a különböző kompressziós tulajdonságok és a lézerszóródási paraméterek közötti korrelációra. Tugaru fajta almák esetén a biofolyás- és a szakadás erő értékei szoros korrelációt mutattak a lézer jellemzőkkel, miközben a Fuji almák biofolyás- és szakadás deformációi szignifikánsabbak voltak, mint a biofolyás- és szakadás erők. A kezdeti és metsző meredekségek (szekáns modulus) szoros korrelációt mutattak a lézer jellemzőkkel a fajtától függetlenül.

Mendoza és munkatársai (2010) publikációjukban az alma keménységének és SSC értékének meghatározásával foglalkoztak. Előző kutatási eredményeikre alapozva az almákról hiperspektrális szórás profilkat rögzítettek, melyekből kinyerték az átlagos reflektancia spektrumokat. A kísérletük a keménység és az SSC becsléseire irányult, úgy hogy a 'Golden Delicious' (GD), 'Jonagold' (JG) és a 'Red Delicious' (RD) almamintákon végzett vizsgálatokon keresztül integrálták a hiperspektrális (500-1000 nm) scattering képelemzési és a képfeldolgozási technikát. A szóródási profilkok elemzése az átlagos visszaverődési módszeren és a diszkrét és folytonos wavelet-dekompozíció alapján, míg a képfeldolgozás elsőrendű statisztikán alapuló mintázat-jellemzőket eredményezett. Összesen 294 paramétert nyertek ki ezekkel a módszerekkel minden almáról, majd a PLS módszerhez kiválasztottak néhányat a keménység és az SSC meghatározásához. A becslések minőségi paraméterei a három almamintánál (GD, JG, és RD) a keménység esetén $R = 0,87; 0,95$ és $0,84$ és az $SEP = 5,9; 7,1$ és $8,7$ N, míg az SSC esetén $R=0,88; 0,78$ és $0,66$ az $SEP = 0,7; 0,7$, és $0,9$ °Brix adódtak. Összességében a javított módszerrel a SEP értékek = $6,6; 16,1; 13,7\%$ -al csökkentek.

Mendoza és munkatársai (2012) négy technikát használtak fel (akusztikus keménység, biológiai folyás határ keménység, látható és rövid hullámhosszú NIR (VIS-SWIR), és spektrális szóródás) alma keménység és/vagy SSC tartalmának becslésére. A koncepciójuk az volt, hogy több szenzoros adatfúziót hajtanak végre, amiatt hogy a különböző szenzorok egymást segítve és kiegészítve javítsák az alma minőségi paramétereinek becslését.

Ebben a kutatásban a négy módszert különböző kombinációban használják és egyesítik az összesen 6535 db háromféle alma mintát ('Jonagold' (JG), 'Golden Delicious' (GD), és 'Red Delicious' (RD)) a keménységük és SSC értékük becslése céljából. Az adatokat két év alatt gyűjtötték össze.

A szenzorok fúziójával jobb becslést értek el a keménység (SSC) értékekre, mint az egyéni szenzorok esetén, a korrelációs együttható és az SEP alapján. Mindkét év adatainál két szenzor felhasználásával a háromfajta almából az RD becslései bizonyultak a legjobbnak.

Qin és Lu (2008) kutatásukban foglalkoztak friss zöldségek és gyümölcsök a NIR tartományban mért (500-1000 nm) optikai tulajdonságaival diffúz reflexiós technikát használva. Hiperspektrális képképző rendszert alkalmaztak, hogy diffúz reflexiós képeket nyerjenek alma (háromfajta), barack, körte, kivi, szilva, uborka, cukkini és paradicsom (három érettségi állapotban) mintákról. Ezekből a scattering profilokból a diffúziós elméleti modell fordított algoritmusát felhasználva meghatározták a minták abszorpcióját és a csökkentett scattering koefficienseit. A spektrumok abszorpciós koefficienseinek jellegét a nagymolekulájú pigmentek (klorofill, antocianin és karotin) határozták meg. Az abszorpciós tényező (μ_a) és a szóródási tényező (μ_s') értékei a jelentősen eltérést mutatottak a tesztminták között. Nagy különbségek voltak megfigyelhetők a három érettségi fázisú (zöld, rózsaszín és piros) paradicsom minták abszorpciós spektrumában, és az érettségük megfelelően lett osztályozva az abszorpciós koefficiensek (a 675 nm (klorofill) és az 535 nm (antocianin) egymáshoz viszonyított) arányát használva. A μ_s' értéke pozitívan korrelált a paradicsomok keménységével az egyes hullámhosszakon 500-1000 nm-ig és a korreláció maximuma (0,66) 790 nm hullámhossznál volt tapasztalható. A fény behatolási mélysége, amit úgy definiálunk, hogy az a mélység amin a belső fény 99%-kal csökken, az 0,97 és 6,52cm közötti értékre volt becsülhető a gyümölcs és zöldség mintákon 500-1000 nm hullámhossztartományban. Ezeket a növényi szövetben levő nagyobb pigmentek befolyásolták.

2.5.1 Lézer fényforrások

A LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) mozaikszó magyarosításából alakult ki a lézer kifejezés. A lézer olyan egybefüggő fénysugarat adó fényforrás, amelynek emittált fénye stabil nagy pontossággal beállítható (kb. ± 5 nm), ezért alkalmazzák diffúz reflexiós mérésekhez. Theodore Maiman szabadalmazta 1960-ban az első működő rubint lézert. A szabadalom után rohamos iramban jelentek meg az újabbnál újabb anyagú és emittált hullámhosszú lézerek, valamint a mérési eredményeikből készült publikációk. A lézer emittált fényének hullámhosszát meghatározza a lézer típusa, melyekből 4 fajtát különböztetünk meg, szennyezett ionkristály-lézert, félvezetőlézert, gázlézert és festéklézert.

A diffúz reflexió mérési módszer nem alakulhatott volna ki a lézertechnika rohamos fejlődése nélkül. Számos alkalmazási területe van, pl. a humán egészségügyben a rákos megbetegedések vizsgálatában (pl.: Tan et al. 1995), meteorológiai mérésekben, Raman spektroszkópiában (pl.: Osticioli et al. 2009), stb..

2.5.2 Monte Carlo szimuláció

Wilson és Adam (1983) voltak az elsők, akik bevezették a Monte Carlo (MC) szimulációt a lézer és a szövet közötti kölcsönhatás vizsgálatának területére, annak érdekében, hogy a modellel megbecsüljék a különböző abszorpciós/scattering arányok abszorbeált dózisának eloszlását homogén szövetekben. A szövetbe detektorként elhelyezett optikai szálakban a fotonok áramlását szintén vizsgálták. Ezt a szimulációs módszert széles körben használták a szöveti fénytranszport szimulálására, és közben számos fejlesztésen ment keresztül.

Prahl és munkatársai (1989) tanulmánya szerint a MC lehetővé teszi a szövetben a visszaverődés, a transzmisszió és a fényáram kiszámítását. Két eltérő határfeltételt és az anizotrópiás szóródást számításba véve növelték a modell pontosságát.

Keijzer és munkatársai (1989) MC módszer felhasználásával szimulálták a fény eloszlását az argon lézerrel (476 nm) besugárzott artériás szövetben. A fény sugárirányú diffúziója által okozott peremhatás az egységesen beeső sugárnyaláb kerületén $\pm 1,5\text{mm}$ -en érvényesül. A 3mm-nél nagyobb átmérőjű fényudvarnál a fény eloszlása a központi tengely mentén leírható egy egydimenziós megoldással egy végtelen szélességű sugárnyalábként. Az átfedő peremhatások a 3mm-nél kisebb átmérőjű fénynyalábok esetén redukálják a besugárzás behatolását a szövetben. A sugárnyaláb profilja szignifikánsan befolyásolja a fény eloszlását. A felszín közelében a fényáram egy Gauss-i sugárnyaláb esetén kétszer nagyobb a központi tengelyen és sugárirányban gyorsabban csökken, mint egy lapos profil esetén. Az optikai szálból érkező fény hasonló módon hatol be a szövetbe, mint a párhuzamosított fénysugár.

Wang és munkatársai (1995) a többrétegű szövetben az egyensúlyi fénytranszport MC modelljét (MCML) ANSI standard C-ben programozták, így a programot különböző gépeken is használni tudták. Dinamikus adatkiosztást alkalmaztak az MCML-hez, így a szövetrétegek és a rácsrendszer elemeinek száma felhasználó és futási idő szerint változtatható. A szimulált adatok koordinátáit minden rácselemre a sugár- és szög irányban optimalizálták. Az MCML néhány számított eredményét más elméletekkel vagy vizsgálatokkal magyarázták. A program a forráskóddal együtt már 1992 óta nyilvános. A Farrell modell (Farrell and Patterson 1992) alapja egy egyensúlyi diffúziós elmélet, amely leírja a fény sugárirányú diffúz reflektancia függését a szövetben. A diffúziós elméleti modell a sugáriránytól függő diffúz reflektancia analízisére csak a reflektancia görbe alakját használja a szövet optikai tulajdonságainak meghatározására.

A scattering forrásnak két különböző geometriája van: a korábban használt egyszerű izotróp szóródási hely, a másik az izotróp szóródási hely exponenciálisan súlyozott vonal forrása. A modell becslésének jóságát Monte Carlo szimulációs adatokkal, illetve kísérleti adatokkal szövetet szimuláló anyagon vetette össze.

A modell a reflektancia adatok sugárirányú távolságát 0,5mm pontossággal írta le a Monte Carlo szimulációs adatok esetében, a kísérleti adatoknál 1mm pontossággal volt képes a meghatározására. Nemlineáris legkisebb négyzet illesztéssel valósult meg a szövet optikai tulajdonságainak meghatározása a sugárirányú reflektancia adatokból mind a szimulált, mind pedig az in vivo szövetek esetén. A szimulált mintákra vonatkozó optikai tulajdonságok a más kutatók által meghatározott értékek 5-10%-án belül voltak. Az in vivo értékek is összhangban vannak a más kutatók által talált eredményekkel.

Baranyai és Zude (2009) lézer terjedését mérték kivi szövetében diffúz reflexiós technikával és összehasonlították a Monte Carlo (MC) szimulációval kapott eredményekkel. A szövet optikai tulajdonságainak (szórási állandó, abszorpciós állandó, anizotrópia faktor) hatását vizsgálták a foton-fluxusra a MC szimuláció alapján. A többtényezős ANOVA vizsgálat rámutatott, hogy a legnagyobb jelentőséggel ($p < 0,001$) a szimulációval kapott anizotrópiatényező bír a szóródási és abszorpciós együtthatók mellett. Trigonometrikus függvényvel tudták leírni a modellezett profil kiválasztott szegmense és az anizotrópia faktor közötti kapcsolatot. A szimuláció alapján a három különböző érettségi csoportba sorolt kereskedelmi kivi minta (éretlen, optimális érettségű és túlrett) anizotrópia figyelembevételével el tudták különíteni az optimális érettségű mintát a túlrettől.

2.5.3 Lorentz (LD), módosított Lorentz modellek (MLD), Gompertz.(GF), módosított Gompertz (MGF) függvények alkalmazása mérési eredményeken

Lu és Peng (2004) kutatása szerint a keménység egy fontos tulajdonság az őszibarack étkezési minőségének jellemzésében. Ennek a publikációnak a célja a hiperspektrális képalkotó technikának, mint a barackok keménységének meghatározására szolgáló lehetőségnek a vizsgálata volt. A diffúz reflexiós profilok rögzítéséhez hiperspektrális kamerát (500-1040 nm) alkalmaztak és 'Red Haven' őszibarackokon végezték a méréseket. A szóródási profilokra Lorentz-függvényt illesztettek, melyből két függvényparamétert használtak a statisztikai kiértékeléshez. PCA-t alkalmaztak a két Lorentz együttható spektrumaira. Az előrecsatolt neurális hálózathoz (FFNN) a PC score-okat használták fel a keménység becslésére. A Lorentz paraméterekkel érték el a legjobb becslést, ahol $r=0,90$ és a $SE=12,7N$ -nak adódott. Az eredményeik alapján leírták, hogy a hiperspektrális szóródási profilok alkalmasak a barack keménységének becslésére.

Két évvel későbbi publikációjukban Lu és Peng (2006) Magness-Taylor-féle penetrometriás és hiperspektrális módszerrel már kétféle őszibarack ('Red Haven' és 'Coral Star') keménységét vizsgálták. A mérések során 153 spektrális szórás profilt készítettek 500-1000 nm hullámhossztartományban. A fény szóródása alapján az adott hullámhossz értékeken kétparaméteres Lorentz-féle eloszlásfüggvényt illesztettek. A determinációs együtthatók átlagos értéke 0,99-nél nagyobb volt. A keménységet multi-lineáris regressziós modellel becsülték, melyen keresztvalidációt végeztek. A legjobb keménység becsléshez 10 vagy 11 hullámhosszon mért intenzitás értékek kellettnek. A becslések során kapott determinációs együtthatók 'Red Haven' esetén $r^2=0,77$, míg a 'Coral Star' esetén $r^2=0,58$ -nak adódtak. A Lorentz-féle függvény paramétereit használták fel a becslésekhez független változóként, melyek leírták a profilok csúcs értékeit és a szóródás teljes szélességét. Az eredmények alapján a kutatók úgy gondolták, hogy a hiperspektrális rendszerrel felvett szóródási profilok potenciálisan alkalmasak roncsolásmentes keménység becslésére barackok esetében.

Peng és Lu (2007) szerint a hiperspektrális szóródás vizsgálati technika ígéretesnek bizonyul almák minőségének jellemzésére. A munka bemutat egy új továbbfejlesztett módszert a multispektrális szóródási profilok feldolgozására és elemzésére, ami almán valós idejű keménység és SSC méréseket tesz lehetővé. A tanulmány összehasonlítja a hiperspektrális szóródási profilokra illesztett különböző matematikai modelleket (módosított Gompertz és Lorentz függvények). Golden Delicious almamintákról szóródási képeket készítettek négy különböző hullámhosszon (680, 800, 900 és 950 nm). A szóródási intenzitásokat és a távolságokat matematikai egyenletekkel korrigálták, figyelembe véve az alma méretét. Az új módszerrel lehetőség nyílik a szóródási képből számolt profilok korrekciójára, mellyel a fényforrás változékonyságának a szóródási paraméterekre eső hatása minimalizálható. A módosított Gompertz és Lorentz függvényekből nyert négy paraméterrel és azok variánsaival értékelték ki és hasonlították össze, hogy megbecsüljék a gyümölcs keménységét és SSC tartalmát multilineáris regresszió és keresztvalidáció felhasználásával. A módosított Gompertz függvény paramétereivel bizonyultak a legjobbnak a keménység ($r=0,896$; SEP=6,50 N) és SSC ($r=0,816$; SEP=0,92%) becslésére.

Peng és Lu (2008) munkájukban is hiperspektrális rendszerrel vizsgálták az almák minőségi paramétereit. Ez a tanulmányuk összehasonlítja a hiperspektrális szóródási profilokra illesztett különböző matematikai modelleket (módosított Lorentz függvények). Kiválasztották a megfelelő modellt, amivel becsülni tudták 'Golden Delicious' almaminták keménységét és az SSC tartalmát. Tíz módosított Lorentz eloszlásfüggvényt (MLD) illesztettek a spektrális szóródási profilokra (450-1000 nm), ahol az átlagos korreláció $r=0,995$ volt.

A spektrális szóródási intenzitásokat és a távolságokat matematikai egyenletekkel korrigálták, figyelembe véve az alma méretét és a műszer válaszát. A profilok illesztésével kapott három paraméter felhasználásával (szóródási csúcsérték, félértékszélesség és meredekség) többváltozós lineáris regressziós modelleket állítottak fel a keménység és az SSC tartalom becslése céljából. A becsléséhez szükség volt a keménység esetén 21, míg az SSC-nél 23 hullámhosszra és így az illesztett paraméterek felhasználásával a keménység ($r = 0,894$; $SEP=6,14N$) és az SSC tartalom ($r = 0,883$; $SEP=0,73\%$) modellezés jónak bizonyult.

Leiva-Valenzuela és munkatársai (2013) publikációjukban problémaként vezetik fel, hogy az áfonyát szín szerint, valamint méret és / vagy keménységre válogatják és ellenőrzik. Felvetik, hogy új módszerre lenne szükség a külső (keménység) és a belső (oldható szárazanyag-tartalom SSC) jellemzők gyors meghatározásához. Az áfonya keménység és SSC becsléséhez, 'pushbroom' hiperspektrális képalkotó technikát alkalmaztak. A roncsolásmentes mérések után a keménység meghatározáshoz állományvizsgáló berendezést (Texture Analyzer) és az SSC meghatározásához digitális refraktométert alkalmaztak. 302 mintáról készítettek 500-1000 nm hullámhossztartományon képeket, melyeket korrigáltak a referencia képpel. Megállapították, hogy a gyümölcsök helyzete nem volt hatással a keménység és az SSC előrejelző modellekre. A keménység becslése jobbnak bizonyult ($R^2 = 0,87$) mint az SSC becslése ($R^2 = 0,79$). További elemzések azt mutatták, hogy a keménység alapján két csoportot lehet elkülöníteni. A kutatás bebizonyította, hogy a hiperspektrális képalkotó technika alkalmas az áfonya online válogatására, keménység és SSC tartalmának becslésére. Viszont azt is említi, hogy további kutatásokra van még szükség, a további minőségi jellemző (pl.: antioxidáns vegyületek) becsléséhez és a zavaró hatások (mint a zúródás, gombás rothadás, és a ráncosodás) csökkentéséhez, melyek nagymértékben rontják a becslés jóságát.

Wu és munkatársai (2012) hiperspektrális lézer diffúziós módszert alkalmazott főtt marhahúsok porhanyósságának vizsgálatára. A hiperspektrális rendszer 922-1739 nm mérési tartományon 3,3 nm felbontással rögzítette a képeket, a holt pixeleket a mediánszűréssel korrigálták. Először elkészítették a képeket a 472 mintáról, majd szeleteken vágási erőt (SSF) mértek és ezek alapján két csoportra osztották a mintákat. Porhanyós ($SSF < 206N$) és rágós ($SSF \geq 206N$) kategóriákat hoztak létre. A kapott diffúziós profilokra minden hullámhosszon módosított Lorentz függvényt (MLD) illesztettek. A minták 75%-a tanulómintaként szolgált ($n=354$) míg a maradék minta ($n=118$) a validációhoz lett felhasználva. Ezt úgy valósították meg, hogy az aktuális SSF érték alapján válogatták szét a mintákat és minden negyedik mintát a validációhoz használtak fel. Minden paramétert standardizáltak úgy, hogy nulla legyen az átlaguk és egységnyi legyen a szórásuk, így a paraméterek különböző skáláihoz és tartományaihoz jutottak.

Korrelációs mátrixokat hoztak létre és azokat a változókat, amelyek szoros korrelációkat mutattak ($R^2 \geq 0,9$) egymással, azokat kizárták a további feldolgozásból és csak azon változók egyike maradt meg, amely képviselte a korreláló változókat. Az adatmátrixban fennmaradó változókon PCA-t hajtottak végre és a főkomponensek pontjait (score) használták lineáris diszkriminancia modell kifejlesztésére, hogy különbséget tegyenek a porhanyós és rágós minták között. Az LDA egy olyan többváltozós statisztikai modell, amely olyan matematikai szabály felállítására alkalmas, ami két vagy több csoportot képes elválasztani egymástól. A matematikai szabály alapján új megfigyeléseket tehetünk az osztályozás során. A tanulmány alapján a módszer alkalmas lehet húsminták rágósság szerinti osztályozására. A felállított modell képes volt osztályozni a szeleteket 83,3%-os pontossággal a rágós minták esetén és 75%-os pontossággal a porhanyós minták esetén a validáció során. A legfontosabb tény ebben a tanulmányban, hogy amikor nagyobb átmérőjű megvilágító fényt használtak a steak teljes hosszában akkor a zsírfoltok jelenléte nem befolyásolta a porhanyósság becslésének pontosságát, így ez a tanulmány alátámasztja a technika robusztusságát, amely nem igényel speciális minta előkészítést.

Benge és munkatársai (2000) tanulmánya alapján a 'Hayward' kiviminták 0 °C-os tárolás során fellépő puhulását már korábban leírták különböző empirikus matematikai modellekkel. Kezdetben három egyszerű modellt használtak a keménység jellemzésére (kiegészítő Michaelis–Menten, exponenciális és kiegészítő Gompertz típusúakat), azonban ezek nem voltak kellő pontosságúak sem a korai, középső vagy az utolsó szakasz jellemzésére. Két összetett modell adódott a legjobbnak (Kapcsolt Michaelis –Menten (JMM) és az Inverz Exponenciális Polinom (IEP)). JMM modellnél különböző funkcionális kapcsolat van a különböző régiók időtartományában, bár a paramétereit nehéz volt megbecsülni pontosan, amikor az adatok száma a felvett időtartományban korlátozott volt. A keménység adatokat IEP modell írja le a legjobban annak ellenére, hogy korlátozott adat állt rendelkezésre. A korábbi tanulmányokban leírt egyenletek tanulmányozása után elmondható, hogy nem született olyan modell, ami leírná a kivi keménység változását a tárolás során. Mindazonáltal, a komplexebb egyenletek pontosan jellemezték a keménység adatokat és lehetőséget adtak a kezelések hatásainak összehasonlítására kísérleti programban.

Peng és Lu (2005) a fogyasztói elégedettség növelése érdekében roncsolásmentes méréseket végeztek keménységmérések mellett almákon ('Red Delicious'). Multispektrális képalkotó rendszerrel készítették el a szóródási képeket (680, 880, 905 és 940 nm, melyek sáváteresztése 10 nm volt). A képekből számolt szóródási profilokra Lorentz eloszlásfüggvényt illesztettek.

A céljuk a szóródási profilok matematikai modellel leírt paramétereit és a keménység közötti összefüggés keresése volt. A keménység becsléséhez MLR-t alkalmaztak, minden mintáról négy hullámhosszon felvett profilra illesztett Lorentzian paramétereket használtak (három paraméter). A modell jóságát a korrelációs együttható ($r = 0,82$) és a validáció standard hibája ($SEV = 6,39N$) is igazolta.

Peng és Lu (2006a) ebben a munkájukban is almamintákon ('*Red Delicious*' és '*Golden Delicious*') végeztek multispektrális szóródási és keménységmérés vizsgálatokat. A minták keménységének meghatározásához Magness-Taylor penetrométert alkalmaztak és a diffúz reflexiók képek 650-1000 nm hullámhossztartományon 10 nm-es spektrális felbontású multispektrális képalkotó rendszerrel készültek. A multispektrális látórendszer összeállításához egy olcsó CCD kamerát és egy folyadékkristályos hangolható szűrőt (LCTF) alkalmaztak. MLD függvényt illesztettek a szóródási profilokra, melyekkel négy paramétert kaptak meg profilonként. A profilokra illesztett MLD függvények illeszkedési jóságát mutatta, hogy az átlagos korrelációs értéke szoros ($r = 0,99$) volt. A legjobb becslésnél a keménység a *Red* esetén $r = 0,58$ és $SEE=8,81 N$, míg a *Goldennél* $r = 0,50$ $SEE = 8,64 N$ -nak adódott. A tanulmány írói szerint az MLD illesztés módszere az optimális hullámhossz megválasztása után az illesztési paraméterek felhasználásával a legjobb becslést tudja adni a gyümölcs keménységére.

Peng és Lu (2006b) folytatva előző eredményeik feldolgozását optimális hullámhossz kiválasztása céljából. A cél elérése érdekében MLR –t alkalmaztak keresztvalidációt módszerrel. Red mintáknál 9 db (690, 770, 790, 810, 920, 980 és 1000 nm), míg Golden esetén 10 db (650, 690, 740, 750, 820, 880, 910, és 990 nm) optimálist választottak ki az MLR eredmények alapján. A kiválasztott hullámhosszak felhasználásával jó keménység előrejelző modelleket alkottak Red ($r = 0,82$ és $SEV = 6,64 N$) és Golden ($r = 0,81$ és $SEV = 6,58 N$) esetében is.

A szakirodalmi feldolgozást követően úgy tapasztaltam, hogy csak néhány kutatócsoport foglalkozik a diffúz reflexiós módszer adaptációjával kertészeti termények minőségi jellemzőinek becslésére. Főként hiperspektrális kamerát alkalmaztak, mely lehetőséget nyújt a kamera spektrális érzékenységi tartományán mérni, így egy fókuszált fényforrás segítségével nagy spektrális részletességgel készíthetők mérések. Úgy gondolom, hogy a hiperspektrális kamerával összeállított rendszerek az árukból kifolyólag nem tudnak elterjedni. Az ezekkel végzett mérések megalapozzák a tipikus hullámhosszak kiválasztásának módszerét, melyek segítik olcsóbb mérőrendszerek megépítését, megteremtve egy kézi műszer kialakításának lehetőségét. A profilok feldolgozása eltérő és nem kiforrott, több módszer segítségével próbálják leírni a méréssel kapott profilokat. Többek között különböző modellek illesztésével, melyek időigényesek és sok számítást igényelnek. A szimulációs profilok ismert optikai paramétereinek becslésére vonatkozó adat az általam felkutatott szakirodalmakban (Scopus, Science direct és Google scholar) nem volt fellelhető. Érdekesnek tartom, hogy milyen összefüggéssel írható le egy meghatározott tartományon a kertészeti terményekre jellemző paraméterek a változása.

Peng és Lu (2008) a profilok feldolgozása során figyelembe vették az 1,5 mm átmérőjű fókuszált fényt és elhagyták a profilok platóját (középponttól 1,6 milliméterig). Azért alkalmazták ezt a plató levágást, mert a Lorentz függvények illesztését megkönnyíti. Véleményem szerint így a mért értékek fizikai tartalmát torzítják, mert a profiloknál a levágott résztől tekintik a kezdő (0 mm) távolságot. Sajnos az sem derül ki a publikációból, hogy mi alapján vágták le a platót abban a tartományban.

3 Célok

Doktori kutatásom során a zöldségek és gyümölcsök tárolása, feldolgozása során bekövetkező jellemző változások nyomonkövetését és modellezését tűztem ki célul. Ezekkel a mérésorozatokkal és a hozzájuk tartozó eredményekkel kívánom megalapozni a diffúz reflexiós in vivo mérési technikát. Céljaim elérése érdekében a következő feladatokat határoztam meg:

A világban kevés helyen alkalmazott diffúz reflexiós mérési módszer magyarországi honosítása, az ehhez szükséges mérőberendezés megtervezése és megépítése.

Az elkészült mérőrendszer módszertani vizsgálatainak elvégzése, annak érdekében, hogy megállapítsam a módszer robusztusságát.

A módszer sztenderdizálása a záridő és a felbontás függetlenítésével, hogy tetszőleges hardver háttér esetén összevethető profilt kaphassunk.

Profilra jellemző paraméterek vizsgálata, függvény illesztése, amelynek segítségével a pontsorból álló profil néhány jellemző számadattal leírható.

A kapott eredmények összevetése referencia módszerek eredményeivel (dinamikus- és akusztikus keménység, száraz- és nedves bázisra vonatkoztatott nedvességtartalom, klorofill fluoreszencia, NIR).

A leíró paraméterek alkalmazása tárolt és szárított minták mérési adatain, az alkalmazhatóság megállapítása érdekében.

A fotonok terjedésének szimulációjával (Monte Carlo szimuláció) ismert optikai tulajdonságokkal rendelkező profilok létrehozása, a profilokra illesztett módosított Gompertz függvények paramétereivel (MLR és SVM) becslések elvégzése. Ez által meghatározásra kerül az egyes optikai paraméterek becsülhetősége.

4 Anyagok és módszerek

4.1 A diffúz reflexión alapuló mérőrendszer fejlesztése

Kísérleteim során egy saját tervezésű és összeállítású diffúz reflexiós mérőrendszerrel dolgoztam (3. ábra). Az automatizált mérőrendszer fő része egy 12 bit felbontású monokróm CCD IP kamera (10.2 melléklet) (Photon Focus MV1–D1312), melynek maximális térbeli felbontása 1312×1082 pixel és spektrális érzékenysége 320 nm-től 1080 nm-ig terjed. A kamerát egy gigabit Ethernet porttal ellátott személyi számítógéppel kötöttem össze, ami a képek digitális rögzítésére szolgált. A rendszer része továbbá a kamerára szerelt objektív (VS Technology Corporation, SV–L5014MP), melyet vizuális és közeli infravörös tartományra optimalizáltak. A lencse blendéjét maximálisan zárt állásban (1/32) használtam és fókuszálás után rögzítettem. Fényforrásként 7 db szilárdtest lézer dióda modult építettem be a rendszerbe, melyek állandó hullámhosszú 1 mm átmérőjű nyalábot bocsátottak ki (1. táblázat).

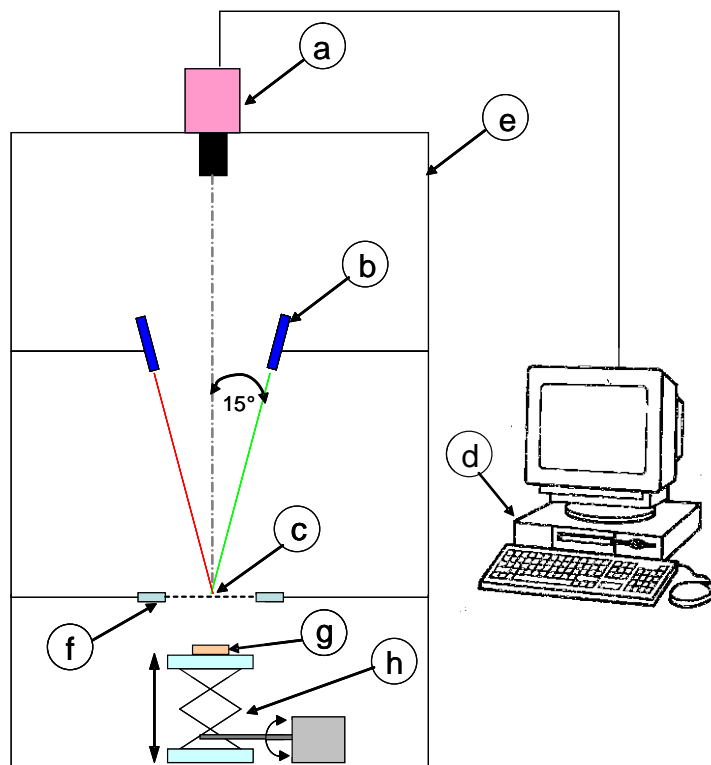
A rendszert egy fekete matt festékkel belülről bevont dobozba helyeztem, ami arra szolgált, hogy a képalkotás során a külső fényforrások befolyásoló hatását elkerüljük és javítsuk a jel–zaj arányt. A lézer fényforrások szimmetrikusan, kör alakban találhatók a mérendő minta felett, 15° beesési szöggel. Ez a beállítás tette lehetővé, hogy a sugárzott fotonok nagy többsége behatoljon a szövetekbe és a fókuszpontjuk ugyanabba a körülbelül 2 mm átmérőjű körbe essen, valamint a tükrözésből származó problémákat kiküszöbölje. Miután a lézernyaláb belép a vizsgálandó anyag szövetébe, diffúz visszaverődés révén, a felületen megjelenik egy fényudvar, ami a minta fölött függőlegesen 75cm távolságban pozícionált kamerával rögzíthető. Az előzetes mérések és beállítások után a rögzített képek mérete 512×512 pixel, az ehhez tartozó térbeli felbontás 0,11268 mm/pixel volt.

1. táblázat: Beépített lézer diódák adatai

Hullámhossz (nm)	Teljesítmény (mW)	Típus
532 ± 5	3	RLDD 532–3–3
635 ± 5	3	LDM 635/3LJ
650 ± 5	3	LDM 650/3LJ
780 ± 5	3	LDM 780/3LJ
808 ± 5	3	LDM 808/3LJ
850 ± 5	3	LDM 850/3LJ
1064 ± 5	3	PiL–Vi–1064–3

A képrögzítés és a lézer modulok összehangolása egy egyedi fejlesztésű célszoftverrel (10.4 melléklet) és egy kereskedelmi forgalomban kapható, soros portti kommunikálóval ellátott nyolc csatornás relé kártyával (10.5 melléklet) valósult meg. Ennél az összeállításnál alkalmazott

fényforrás (lézerek) és a kamera összehangolása nagyon fontos a gyors és automatizált adatgyűjtés érdekében. A mérések reprodukálhatósága szempontjából elengedhetetlen, hogy minden mintának a felülete az objektív fókuszsíkján helyezkedjen el és a lézerek fókuszpontja egy pontba essen a felületen, ezért egy félautomata emelőrendszert állítottam össze. Az emelőrendszer tartalmaz egy saját készítésű laboratóriumi emelőt, az emeléshez szükséges motort, 2 db végállaskapcsolót (emelőszerkezet végállásait érzékeli) és egy optikai kaput, amivel elérhető volt, hogy a minta felülete mindig a fókuszsíkon helyezkedjen el.



3. ábra Saját fejlesztésű diffúz reflexiós képalkotó berendezés elméleti összeállítása: CMOS IP kamera (a); lézerforrás (b); kamera fókuszsíkján a lézerek fókuszpontja (c); számítógép gigabit Ethernet kártyával (d); sötétített kamra (e); optikai kapu (f); mintatartó (g); emelő szerkezet (h).

A gyártó a kamerát saját szoftverrel (eBus PURE GEV Player) (10.3 melléklet) együtt értékesíti, amelyen keresztül a kamera vezérlése és beállítása megoldható. A diffúz reflexiós mérések szempontjából nagyon fontos a záridő (integrálási idő) és a LinLog® mód (Photon Focus saját fejlesztése). A LinLog® technológia lehetővé teszi a nagy intenzitású pixelek logaritmikus kompresszióját, de ez nem a teljes intenzitás skála logaritmikus normálását jelenti, hanem csak a kameragyártó cég által meghatározott intenzitásintervallumét. A logaritmikusan tömörített intervallum pontos ismerete hiányában ezt az opciót nem használtam a diffúz reflexiós méréseknél.

4.1.1 A diffúz reflexiós képek feldolgozása, intenzitás profilok kinyerése

Az elkészült 12 bit felbontású szürkeskálás képek kiértékelése az intenzitás profiljainak elkészítésével kezdődik. A lézerfolt középpontjának meghatározásánál (intenzitással súlyozott átlag), szükséges volt a szegmentálás (0-val való helyettesítés). A kép szegmentálása intenzitásérték alapján történik, ahol 50%-os threshold (küszöb) értéket állítottam be és a küszöbérték alatti pontokat nullával helyettesítettem. Az így kapott redukált adatmátrix (512×512 pixel) súlypontjának kiszámítva megkaptam a fényfolt középpontját. A szegmentálás nem befolyásolta a mért profilokat.

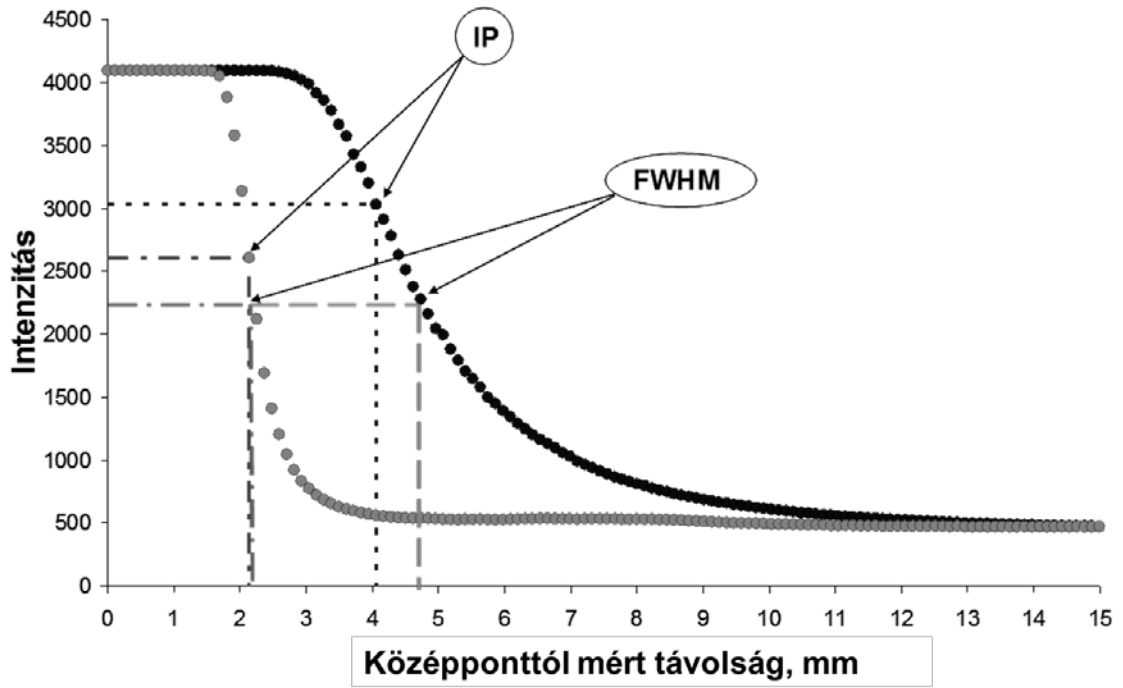
A fényudvarra jellemző intenzitásprofilot úgy készítettem el az eredeti képekből, hogy a középponttól pixelenként növelt átmérőjű gyűrűben átlagoltam az intenzitás értékeket. Az átlagolások végén a diffúziós képből a legnagyobb intenzitású középpontból induló koncentrikusan átlagolt intenzitás görbét kaptam. Ezzel a profilalkotással csökkenthetők a felszíni inhomogenitások (pl. kivi szőrös felszíne) által okozott hiba. A 12 bit felbontású képek feldolgozását nehezítette, hogy az ismert képszerkesztő/képnézegető szoftverek a mentett bináris adatfájlokat nem tudták kezelni. A képek megtekintéséhez és feldolgozásához saját fejlesztésű – R nyelven készített – algoritmust használtam (10.6 melléklet).

4.1.2 Az intenzitás profil paraméterei

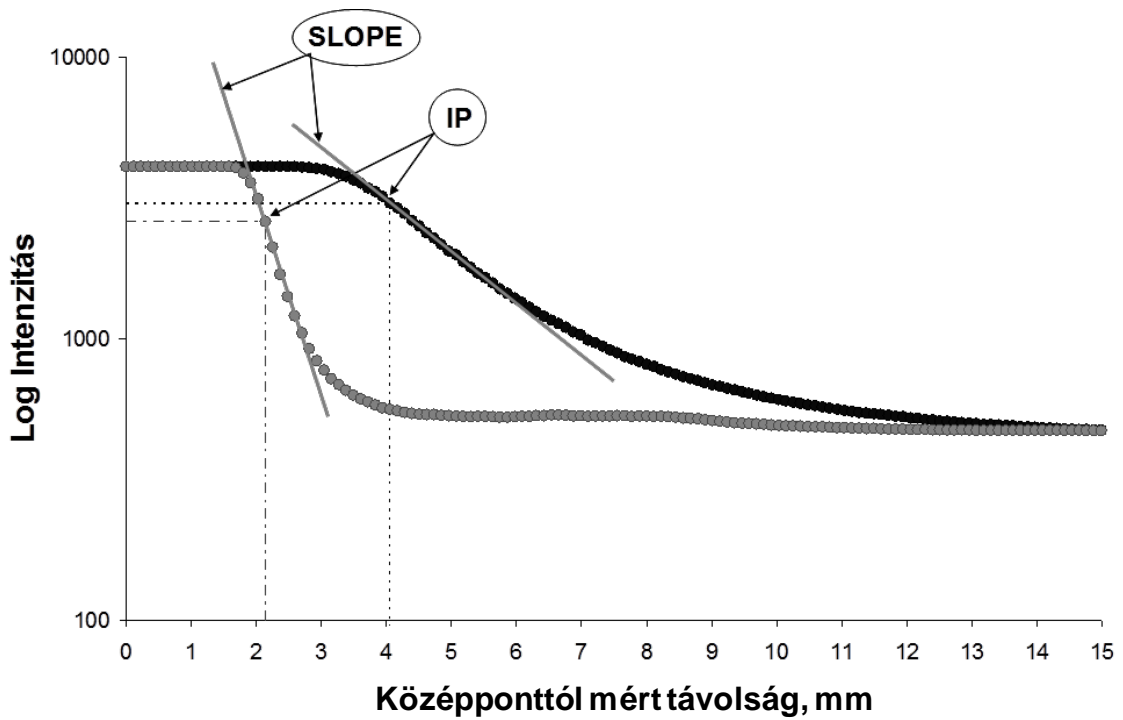
Számos kutató, aki spektrum jellegű (pl. radiokromatográfiás spektrumok (Van Eijk et al. 1988) vagy haranggörbe (Wätzig és Westmeister 1979) lefutású adatokkal dolgozik, régóta ismert és alkalmazott profilelemzési módszereket használ a feldolgozáshoz. Ilyen az úgynevezett félérték szélesség (Full Width at Half Maximum, FWHM) számítása. Az FWHM a profilon meghatározott távolság a minimum és maximum intenzitás középértékén mérve.

Fontos szempont a profilok feldolgozásánál, hogy olyan objektív paramétereket alkalmazzunk, melyek jól definiálhatóak és a profilra jellemző eredményt adnak. Az előzetesen elkészült intenzitás görbékből meghatároztam ezt a paramétert. Jelen esetben ez azért érdekes, mert a behatolási mélységgel arányos az FWHM. Minél hosszabb útvonalat tesz meg a fény a biológiai szövetben, annál nagyobb területre szóródik, ezzel nagyobb diffúziós foltot hoz létre.

Meghatározható a profil inflexiós pontja (IP) (első derivált minimumának helye) (4. ábra), valamint a logaritmikus (természetes alapú) profil lefutásának meredeksége. Ezt a meredekséget a logaritmikus görbék inflexiós pontjának 1 mm környezetére (előtte 3 és utána 5 pixel) illesztett egyenes meredekségével határoztam meg (SLOPE) (5. ábra).



4. ábra Intenzitás görbék IP és FWHM értékei



5. ábra Logaritmikus intenzitás görbék IP és SLOPE értékei

4.2 Módszertani vizsgálatok és eszközei

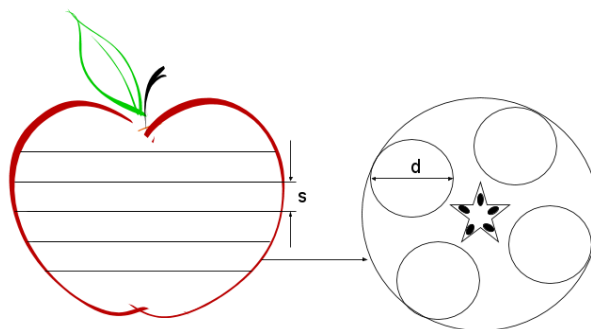
A módszertani vizsgálatok célja az eszközök optimális beállítása, valamint a rendszer stabilitásának (reprodukálhatóság) elemzése. Az ismételhetőség vizsgálatához felhasználtam egy Programozható Logikai Vezérlőt (PLC, Zelio Logic SR3), valamint egy léptető motort (Robotron SPA 42/100-558) a diffúz reflexiós képalkotó berendezésen kívül. A PLC vezérelt pozicionáláshoz szükség volt előzetes szoftverfejlesztésre, amely program kommunikált a lézereket vezérlő relé-kártyával is. Ez a program C# nyelven, a PLC vezérlő programja létra-diagrammal készült. A léptetőmotorok legjellemzőbb tulajdonsága a felbontás, amely megmutatja, hogy egy teljes körbeforduláshoz hány lépés szükséges. Az alkalmazott léptetőmotor $n=100$ lépés/teljes fordulatra volt képes, ami $3,6^\circ$ lépésenkénti elfordulásnak felel meg.

A mérések során használt gyümölcsöt (Idared alma) egy tengelyre szúrtam, amelyet a léptetőmotor forgatott. A léptetőmotor akadálymentes működése érdekében a forgatótengely két végére csapágyakat helyeztem és a csapágyakkal ellátott tengelyt feltámasztó bakon rögzítettem. A körbemérést hét ismétléssel végeztem el, léptetésenként készítettem lézerrel indukált diffúz reflexiós képeket mind a hét hullámhosszon (532-1064 nm). Ezáltal összesen 4900 db kép készült. A kiértékeléshez a 6. egyenletnél látható variációs koefficiens (CV%) használtam. Mind a hét hullámhosszra kiszámoltam a CV% értékeket minden elforgatási szöghöz.

[6]
$$CV\% = \frac{SD}{MEAN} \times 100$$

4.3 Almaszárítási kísérlet

A modellezés során két különböző optikai módszerrel követtem nyomon az almaszeletek nedvességtartalmának változását szárítás során. A mintaelőkészítésnél a Budapesti Corvinus Egyetem (jelenleg a Szent István Egyetem) soroksári tanüzeméből származó, szedési érettségű almamintákat a hámozást követően 3 cm átmérőjű és 1 cm vastagságú korongokra vágtam (6. ábra). A szárítás Venticell 222 laboratóriumi szárítóberendezésben történt 65°C-on, maximális légáram mellett (cirkuláció légsebessége 45 cca/óra), óránkénti mintavételezéssel (0–7 óra). A mérés során törekedtem a sztenderd körülmények kialakítására, ezért a szárítószekrényből kivéve kb. 5 percig szobahőmérsékleten tároltam a mintákat. Az almaszeletek nedvességtartalmát az adott mérési időpontokban mért és a tömegállandóságig (24 órán keresztül) szárított tömegből határoztam meg. A különböző mérési időpontokban az eltérő nedvességtartalmú almaszeleteket első lépésben lézerdiffúziós technikával, majd ezt követően közeli infravörös (NIR) reflexiós alapuló technikával mértem. A NIR spektrum rögzítését 1000-1700 nm tartományban végeztem MetriNIR (Metrika Kft, Budapest) készülékkel. Kalibráláshoz a készülék beépített etalonját használtam.



6. ábra Alma minta előkészítés sematikus rajza, forrás: (Dénes et al. 2012)

A diffúz reflexiós technikán (4.1 fejezetben) kívül a következőkben ismertetett mérési módszereket alkalmaztam.

4.3.1 A nedvesség meghatározása

Az anyagban lévő víz mennyiségét százalékosan fejezik ki, amit kétféle módon értelmeznek, az egyik a száraz bázisra (7. egyenlet), a másik a nedves bázisra (8. egyenlet) vonatkoztatott nedvességtartalom (Wihelm et al. 2005).

$$[7] \quad MC_{sz\acute{a}raz} = \frac{m_{aktu\acute{a}lis} - m_{v\acute{e}gs\acute{o}}}{m_{v\acute{e}gs\acute{o}}} \times 100$$

$$[8] \quad MC_{nedves} = \frac{m_{aktu\acute{a}lis} - m_{v\acute{e}gs\acute{o}}}{m_{aktu\acute{a}lis}} \times 100$$

ahol: $m_{aktu\acute{a}lis}$ = minta tömege, g
 $m_{v\acute{e}gs\acute{o}}$ = tömegállandóságig szárított minta tömege, g

Mindkét egyenlet számlálója a mintában található víz mennyiségét tartalmazza.

4.3.2 A NIR spektrumok rögzítése

A vizsgálataimhoz referencia módszerként egy hazai gyártmányú nagy felbontású NIR spektrométert, METRINIR 10-17 (Metrika Kft., Budapest) használtam. A műszer az 1000-1700 nm hullámhossztartományban és 2 nm spektrális lépésközzel működik. A mérések előtt a műszerben található belső sztenderddel kalibráltam.

A minták adatpontjainak normálása céljából SNV-t (Standard Normal Variate) alkalmaztam, amely gyakran használt a NIR adatok feldolgozásában (Balázs et al. 2011). Az SNV normálás (9. egyenlet) a spektrumban mind az additív, mind a multiplikatív hatást csökkenti, így minden egyes spektrum centralizált lesz és a megfelelő szórás alapján skálázódik az adatok jelentős mértékű transzformációja nélkül (Barnes et al. 1989).

$$[9] \quad S_i^{SNV} = \frac{S_i - \bar{S}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n-1}}}$$

4.4 Burgonya tárolási kísérlet

A kísérlet során 110 db kereskedelmi forgalomból származó burgonyát használtam fel. A mintákat (2. táblázat) szobahőmérsékleten tároltam 33 napig, roncsolásmentes mérési

módszerekkel (lézer diffúziós, akusztikus, ütésvizsgálati méréssel) vizsgáltam heti két alkalommal. A roncsolásmentes fizikai módszereket referenciaként alkalmaztam, az optikai diffúz reflexiós módszer mellett.

2. táblázat Burgonyaminták méreteinek statisztikai adatai

tárolási idő, Nap	mintaelem, db	Tömeg, g		Hosszúság, mm		Szélesség1, mm		Szélesség2, mm	
		átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
1	110	97,95	17,22	77,97	6,51	49,55	2,99	42,13	2,86
5	110	96,48	16,96	77,97	6,51	49,55	2,99	42,13	2,86
8	100	95,52	16,57	77,73	6,26	49,60	2,97	42,16	2,88
12	90	94,33	16,14	77,81	6,34	49,62	2,97	42,20	2,77
15	80	92,82	16,15	77,70	6,46	49,46	2,90	42,18	2,80
20	70	89,27	15,86	77,22	6,28	49,38	2,91	42,14	2,80
22	60	88,23	16,68	77,40	6,59	49,35	3,04	42,05	2,97
26	50	87,75	16,78	77,55	6,97	49,52	3,14	42,12	3,06
29	40	88,03	16,12	77,65	6,77	49,78	3,15	42,37	3,00
33	30	86,18	14,31	77,28	6,37	49,70	3,14	42,41	2,88

A diffúz reflexiós technikán (4.1 fejezetben) kívül a 4.4.1 fejezetben lévő roncsolásmentes keménység meghatározást is alkalmaztam.

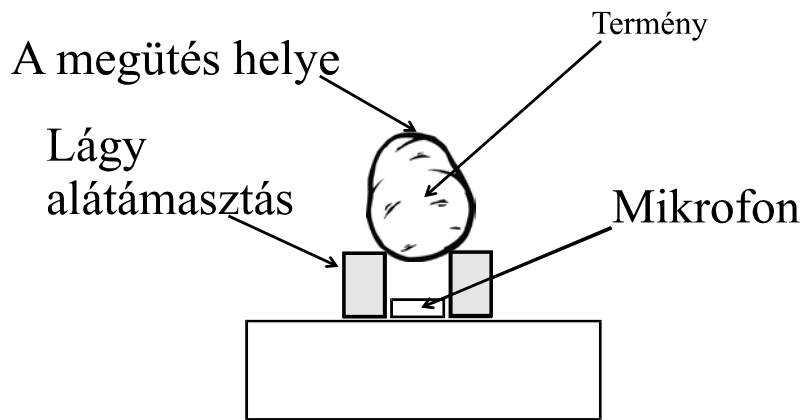
4.4.1 A burgonya vizsgálati módszerei

Az előmérések alapján azt a következtetést vontam le, hogy az akusztikus módszernél (8. ábra) az optimális mérési elrendezés egy lágy alátámasztásra helyezett burgonya felső csúcsának kis energiájú megütése és az átellenes oldalon történő hangrögzítés. A dinamikus módszernél ugyanazon pontban végeztem a méréseket, ahol a diffúz reflexiós módszernél is (kis átmérőjű egyenlítő mentén). Az alkalmazott akusztikus keménységtényezőt (S1 és S2) a 10. egyenlet és a 11. egyenlet alapján alkalmaztam.

$$[10] \quad S1 = f^2 \times m^{\frac{2}{3}}; g^{2/3} s^{-2}$$

$$[11] \quad S2 = f^2 \times m \times 10^{-6}; N / mm$$

ahol: m a minta tömege, g és
f frekvencia, Hz.



7. ábra Akusztikus módszer mérési elrendezése (Felföldi 1996 nyomán)

4.5 Körte tárolási kísérlet

Egy nagy tárolási kísérlet kutatócsoportjának tagjaként vettem részt az alábbi kísérletben, mely kísérlet során 120 db körte minta (*Pyrus communis* cv. *Bosc kobak*) lett vizsgálva, melyeket véletlenszerűen négy csoportra lettek osztva. A mintákat optimális hőmérsékleten ($0-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) betárolásra került és kéthetente egy csoport lett kitérő, amely szobahőmérsékleten ($22\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) további két hétig lett tárolva. A teljes tárolási kísérlet 60 napig tartott. A kitérő mintákon kétnaponta (hétvégéket kivéve) roncsolásmentes mérések lettek végezve (lézer diffúziós, klorofill fluoreszcenciás, akusztikus, ütészvizsgáló mérés).

A körtemintákon a diffúz reflexiók technikán (4.1 fejezetben) kívül az alábbiakban részletezett mérési módszereket alkalmaztam.

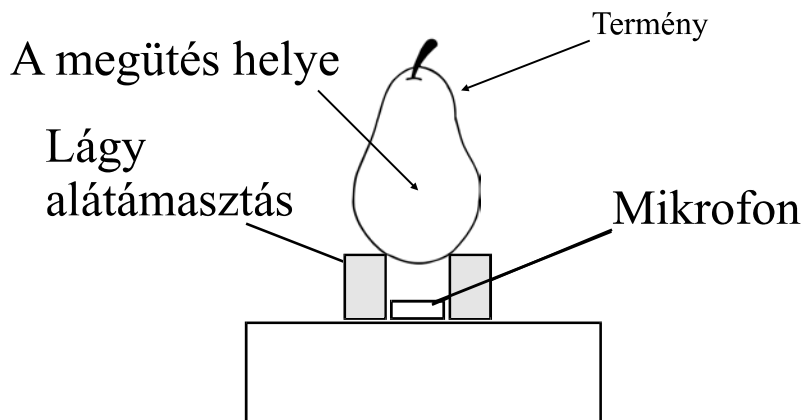
4.5.1 Roncsolásmentes keménységmérés

4.5.1.1 Az akusztikus keménység meghatározása

Az akusztikus módszer segítségével információt kaphatunk a minta globális keménységéről (Muha 2008). Az akusztikus mérés során a terményt egy mikrofon fölé, rugalmas alátámasztásra helyezük és kis energiájú megütéssel rezgésbe hozzuk. A megütésre adott hangválaszt mikrofonnal rögzítjük (8. ábra). A rögzített hangválasz jellemző frekvenciáját (f , Hz) Fast Fourier Transzformációval (FFT) kapjuk, majd ennek segítségével számolhatjuk az akusztikus keménységtényezőt (S1 és S2) a 10. egyenlet és a 12. egyenlet alapján.

[12]

$$S_2 = f^2 \times d^2; m^2 s^{-2}$$



8. ábra Akusztikus módszer mérési elrendezése (Felföldi 1996 nyomán)

4.5.1.2 A dinamikus keménység meghatározása

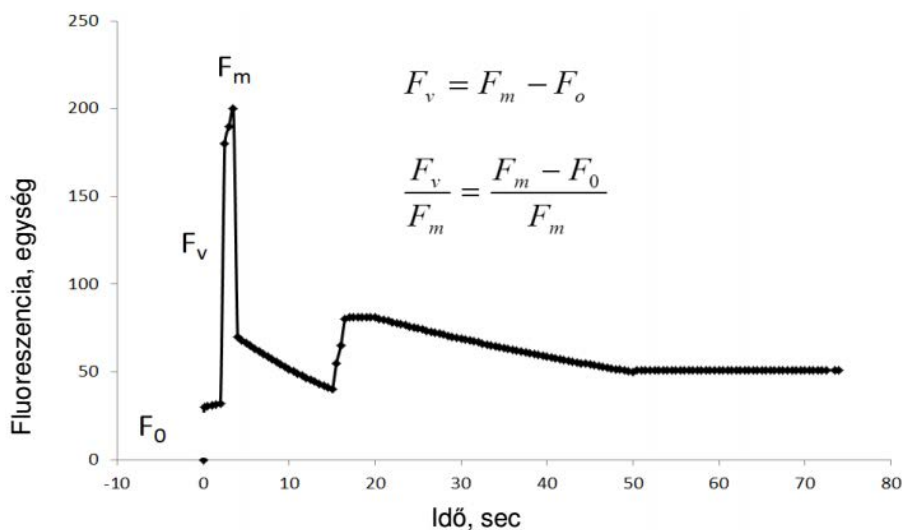
Az ütésvizsgálati módszerrel a termény felületi keménysége jellemezhető. A mérés során a terményt egy erő- vagy egy gyorsulásérzékelőt tartalmazó, kis tömegű kalapáccsal megütjük. A kapott erő vagy gyorsulás görbe időbeli lefutását rögzítjük. A mérés során kapott erő-idő vagy gyorsulás-idő görbe kezdeti pontjától a maximális értékig terjedő időkülönbség (ΔT , ms) felhasználásával számolható az ütésvizsgálati keménységtényező (D) a 13. egyenlet segítségével (Felföldi and Ignáth 1999; Felföldi and Fekete 2000):

[13]
$$D = \frac{1}{\Delta T^2}; ms^{-2}$$

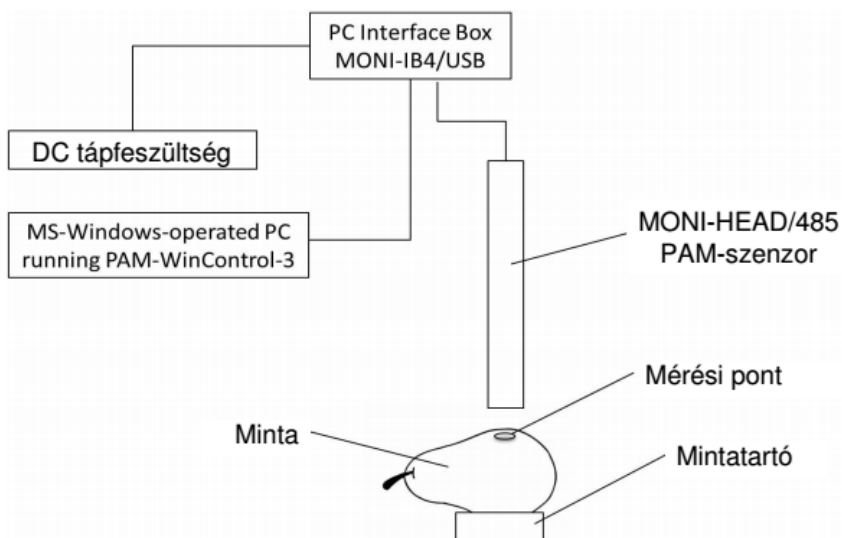
4.5.2 A klorofill fluoreszencia elemzése

A klorofill tartalom a teljes utóérési szakaszban jó jellemző paraméterként használható pl. paprika tárolás során (Zsom Tamás 2007). A színváltozás (zöld-sárga színátmenet) jellemezhető a fotoszintetikus klorofill aktivitásának változásával. Ennek objektív meghatározásához egy Monitoring PAM – többcsatornás klorofill-fluorométert használtam (MONI-PAM, Heinz Walz GmbH, Germany).

A mérés során a következő klorofill-fluoreszcenciás jellemzők (9. ábra) kerültek meghatározásra: maximum és minimum fluoreszcencia (F_m és F_0), melyekből a szakirodalom alapján számolható (Kosson 2003; van Kooten and Snel 1990; Maxwell and Johnson 2000) a változó fluoreszcencia ($F_v = F_m - F_0$) és a maximális fotokémiai hatékonyság (F_v/F_m). A körte egyenlítője mentén, két átellenes oldalon mértem a mintákat a betárolás előtt és a kitérítés alatt a 10. ábrán látható mérési elrendezésben.



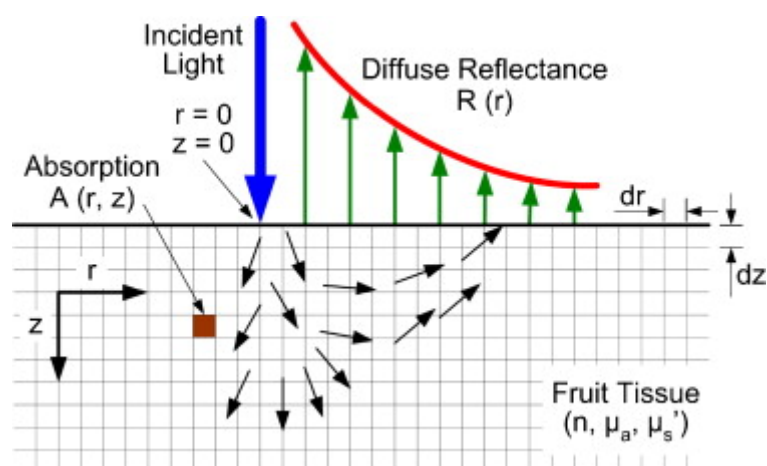
9. ábra Fluoreszcencia változása az idő függvényében (<http://www.psi.cz>)



10. ábra Klorofill fluoreszcencia mérési elrendezése

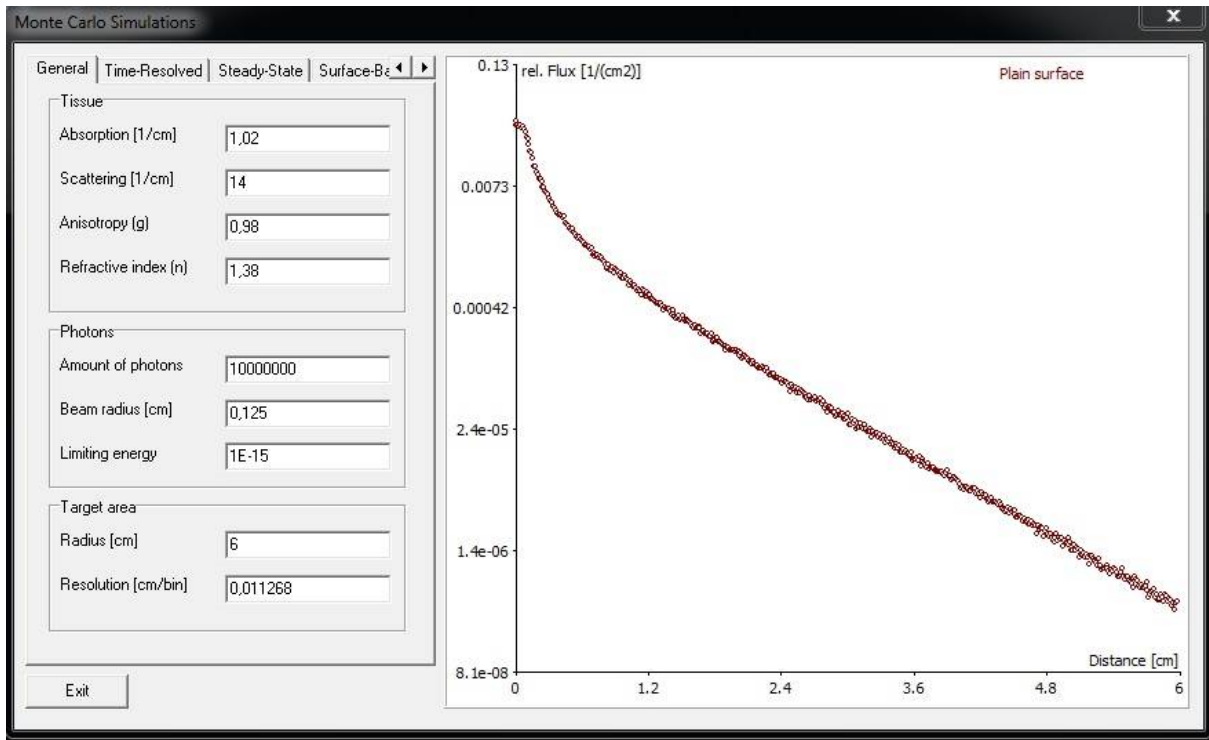
4.6 Monte Carlo szimuláció

A Monte Carlo (MC) szimuláció során a foton útját és irányát valószínűségi változókkal határozzák meg (11. ábra), amit a szöveti tulajdonságok nagyban befolyásolnak. A Monte Carlo elmélet alapján számos kutató foglalkozott a szövetbe bejutó fény útjának modellezésével (Prahl et al. 1989; Wilson and Adam 1983; Wang et al. 1995; Qin and Lu 2009; Baranyai and Zude 2009).



11. ábra Diffúz reflexió sematikus ábrája (Qin and Lu 2009)

A disszertációban bemutatott szimulációs profilok elkészítéséhez egyedi fejlesztésű (Baranyai and Zude 2009) Monte Carlo szimulációs programot használtam, melynek beállító paneljét a 12. ábra mutatja be. A programot sikerrel validálták banánszeletek és almaminták mérési eredményeinek elemzésével (Baranyai 2011).



12. ábra Monte Carlo szimulációs program képe

A beállító panelről készített 12. ábra bal oldalán a szimulációhoz szükséges paraméterek adhatók meg, a jobb oldalon a szimulációval elkészített profil ábrája látható logaritmikus (\log_{10}) léptékben. A szimuláció során fix paramétereket határoztam meg, amelyek a mérési eredményekhez hasonló körülményeket teremtenek, úgymint foton csomag 10^7 db foton, a fénynyaláb átmérője 0,125 cm, a szimuláció 10^{-15} energiaszintig követi a foton útját és 6 cm távolságig a középponttól, valamint 0,011268 cm felbontással (~ 225 DPI) számítja a profil görbéjét. Az MC szimuláció során a szövet szerkezetére és anyagi minőségére jellemző három paraméter (abszorpció = μ_a [cm^{-1}], scattering tényező = μ_s [cm^{-1}] és anizotrópia = g) nagymértékben befolyásolja minden foton teljes útját, ezért a szimuláció során ezt a három tényezőt változtattam, így szimuláltam le a diffúziós profilokat.

Minden profil esetén ismertek ezek az értékek és ezeken felül számolható a behatolási mélységgel egyenértékű $1/\mu_{eff}$ (Wilson and Jacques 1990) (14. egyenlet segítségével) és a diffúziós tényező $1/\mu_t$ (Wilson and Jacques 1990) (15. egyenlet segítségével).

$$[14] \quad \frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{1}{\sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu_s')}}; [\text{cm}^2]$$

$$[15] \quad \frac{1}{\mu_t} = \frac{1}{\mu_s' + \mu_a}; [\text{cm}].$$

$$\text{ahol: } \mu_s' = \mu_s(1 - g)$$

A profilkészítés során szakirodalmi adat alapján (13. ábra) a kertészeti termények mért μ_a és μ_s' értékeit a következő intervallumban választottam ki (Qin and Lu 2008): a μ_s' érték 5-15 cm^{-1} tartományban mozog, míg a μ_a 0,02-1,2 cm^{-1} .

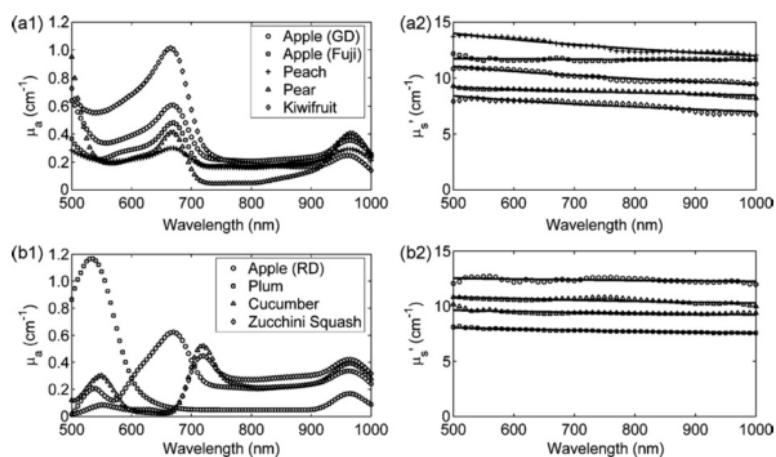


Fig. 7. Optical properties of fruit and vegetable samples: (a1) absorption and (a2) reduced scattering coefficients of Golden Delicious (GD) and Fuji apple, peach, pear, and kiwifruit; (b1) absorption and (b2) reduced scattering coefficients of Red Delicious (RD) apple, plum, cucumber, and zucchini squash. Solid lines in (a2) and (b2) are the best fits of μ_s' using the wavelength-dependent function $\mu_s' = a\lambda^{-b}$, where λ is the wavelength in nm and a and b are constants.

13. ábra Zöldségeken és gyümölcsökön mért μ_a és μ_s' értékeinek változása a hullámhossz függvényében (forrás: Qin and Lu 2008)

A szimuláció során beállított paraméterekkel összesen 350 profilt számítottam a következő optikai paraméterekkel:

g = anizotrópia 0;

μ_s' = szóródási (scattering) tényező/tartomány 5-14 és 1 lépésközzel

μ_a = abszorpciós tényező /tartomány 0,18-1,23 és 0,03 lépésközzel

A szimulációval elkészített profilokra 4 paraméteres módosított Gompertz függvényt (MGF) (16. egyenlet) illesztettem MS[®] Excel[©] Solver segítségével.

[16]
$$R = \alpha + \beta(1 - e^{-e^{(\epsilon - \delta \times D)}})$$

4.7 Az elméleti és a szimulált diffúziós profilok összehasonlítása

A Monte Carlo (Wang et al. 1995) szimulációs és a diffúziós modellel (Farrell and Patterson 1992) számított elméleti profilok (17. egyenlet alapján) elkészítése során fix paramétereket határoztam meg. Az MC szimuláció során a következő beállításokat alkalmaztam: foton csomag 10^7 db foton, a fénynyaláb átmérője 0,125 cm, a szimuláció 10^{-15} energiaszintig követi a foton útját és 6 cm távolságig a középponttól, valamint 0,011268 cm/pixel felbontással. A szövet szerkezetére és anyagi minőségére jellemző három paraméter (abszorpció= μ_a [cm^{-1}], szóródási tényező = μ_s [cm^{-1}] és anizotrópia = g) nagymértékben befolyásolja minden foton teljes útját, ezért a szimuláció során ezt a három tényezőt változtattam és így számítottam ki a diffúziós profilokat.

$$\begin{aligned}
[17] \quad R(p, z_0) &= \frac{\mu_s'}{4\pi \times \mu_t'} \left[\frac{1}{\mu_t'} \left(\mu_{eff}' + \frac{1}{r_1} \right) \frac{e^{-\mu_{eff}' r_1}}{r_1^2} + \left(\frac{1}{\mu_t'} + \frac{4A}{3\mu_t'} \right) \left(\mu_{eff}' + \frac{1}{r_2} \right) \frac{e^{-\mu_{eff}' r_2}}{r_2^2} \right] \\
r_1 &= \left[(z - z_0)^2 + p^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
r_2 &= \left[\left(z + z_0 + \frac{4A}{3\mu_t'} \right)^2 + p^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
\mu_t' &= \mu_a + \mu_s' \\
\mu_{eff}' &= \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu_s')} \\
A &= \frac{(1 + r_d)}{(1 - r_d)}
\end{aligned}$$

ahol $z = 0$; p = origóból mért távolság és $r_d = -1,440n_{rel}^{-2} + 0,710n_{rel}^{-1} + 0,668 + 0,0636n_{rel}$

A diffúziós modellel (14. egyenlet) készült profiloknál a μ_a és μ_s' paramétereket az MC szimulációnál használt értékekkel vettem figyelembe. A modell törésmutatóból számítható szöveti optikai paraméterét – 'A' jellemzőt - a szakirodalmi adatok alapján 2,2 értéken alkalmaztam.

4.8 Felhasznált szoftverek és statisztikai módszerek

A képek feldolgozására, intenzitás profilok számítására, és az adatok statisztikai kiértékelésére R project programban fejlesztett (version 3.2.2, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) saját készítésű programokat használtam. A statisztikai feldolgozás során PLS, SVM és MLR kiegészítő csomagokat alkalmaztam. Az adatkezeléshez és az egyes diagramok elkészítéséhez Excel (Microsoft® Office Excel 2010) szoftvert használtam. NIR spektrumok PLS becslése az Unscrambler statisztikai programban (v9.1, CAMO Process AS) történt.

A Photon Focus kamera vezérlő szoftverét (eBus PURE GEV Player) kiegészítettem egy Mavridisz Vaszilisz segítségével fejlesztett kommunikációs programmal (RS232 kapcsolat relés kártyával, makró vezérlés a kamera kezeléséhez), amely jelentősen meggyorsította a méréseket. Ocean Optics mérések elkészítéséhez saját fejlesztésű makrót használtam.

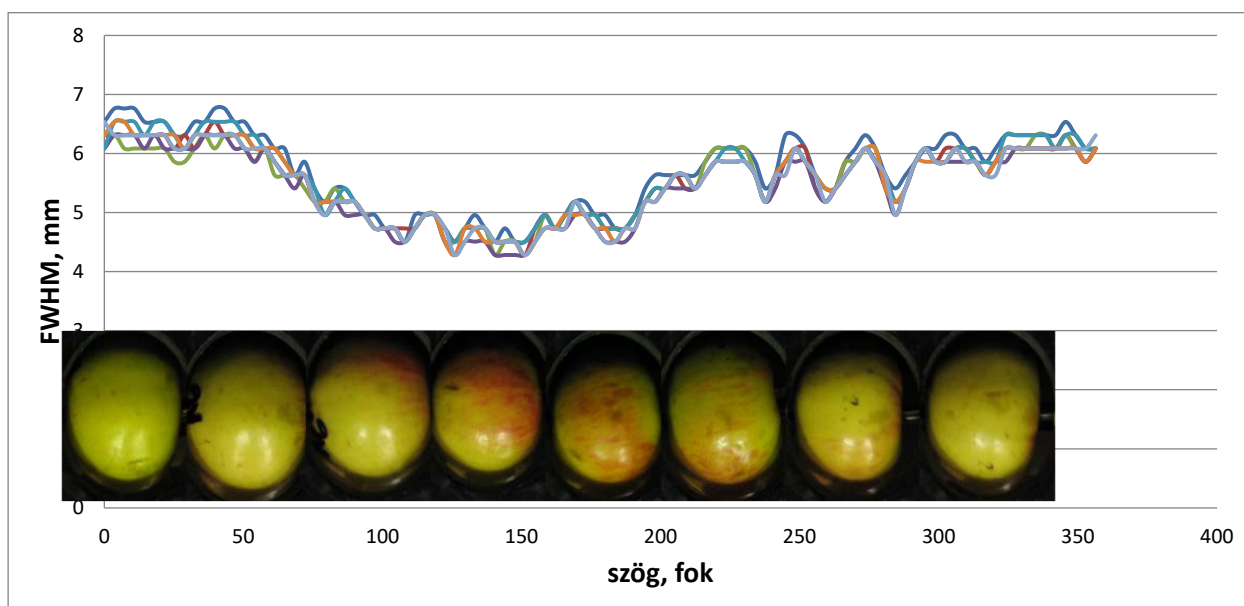
A modellek minőségi jellemzésére minden esetben kiszámoltam determinációs együtthatót (R^2), az autokorrelációs teszthez DW statisztikát (20 elemszám felett), az RMSE értékét, valamint a robusztussági paramétert (RPD értéket) (Porep et al. 2015), ahol Y adatok szórását osztjuk a becslés RMSE értékével, itt a hányados azt mutatja meg, hogy a szórás hányad része a becslési hibának, tehát mekkora a becslés tényleges pontossága. Abban az esetben, amikor azonos minta-elemszámú modelleket hasonlítottam össze, az AIC számot (Sakamoto et al. 1986) alkalmaztam a modellek összehasonlíthatósága érdekében.

5 Eredmények és értékelés

5.1 Módszertani vizsgálatok eredményei

5.1.1 Ismételhetőség értékelése

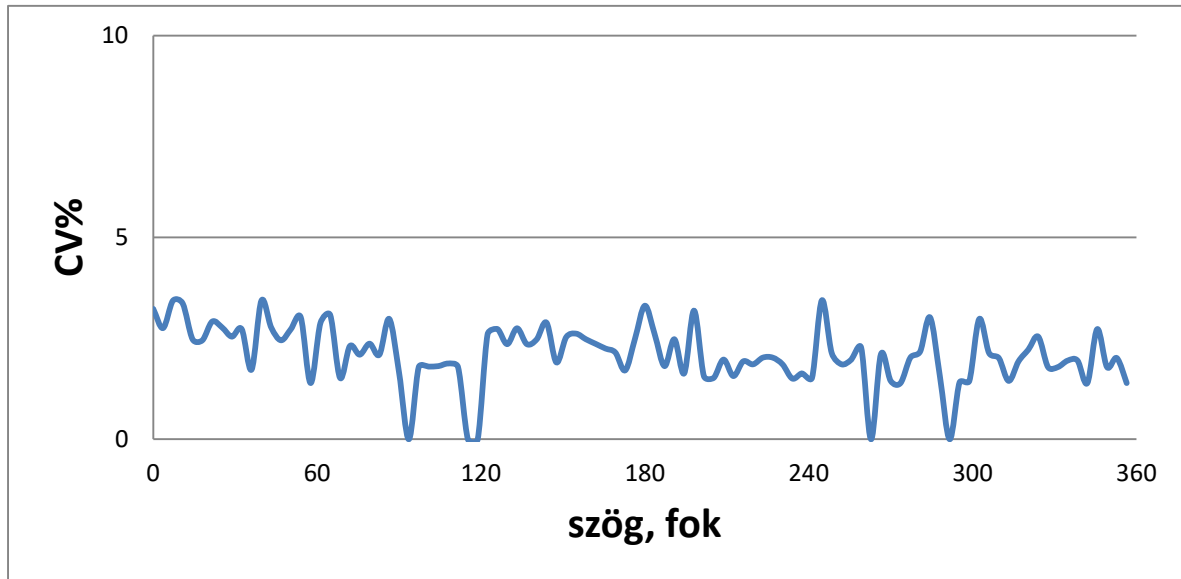
Inhomogén fedőszínű almamintát használtam, hét ismétléssel és $3,6^\circ$ -os lépésközzel készültek a lézerrel indukált diffúz reflexiós képek mind a hét alkalmazott hullámhosszon (532-1064 nm). Ezáltal összesen 4900 db felvételt elemeztem. A képekből készült intenzitás profilok felhasználásával vizsgáltam a minta ugyanazon pontján meghatározott tulajdonságait. A profilok jellemzésére az FWHM paramétert használtam. A 14. ábrán az 532 nm hullámhosszú lézerrel rögzített képekhez tartozó FWHM értékek (y tengely) láthatók, ahol a vízszintes tengely mutatja az elforgatás szögét. Az ábrán jól látható, hogy a hét ismétléssel felvett görbék közel azonos lefutásúak, valamint azt is, hogy az érettebb részeken az elnyelés nagyobb (az antocianin elnyelési hullámhosszán végzett mérés miatt), így kisebb fényudvar keletkezett a nagyobb mértékű elnyelésből eredően. Az ábrán látható almaképek az egyes pozíciókat demonstrálják, melyek a görbe értelmezhetőségét segítik.



14. ábra 532 nm hullámhosszhoz tartozó diffúziós profilok FWHM értékeinek változása a pozíció függvényében

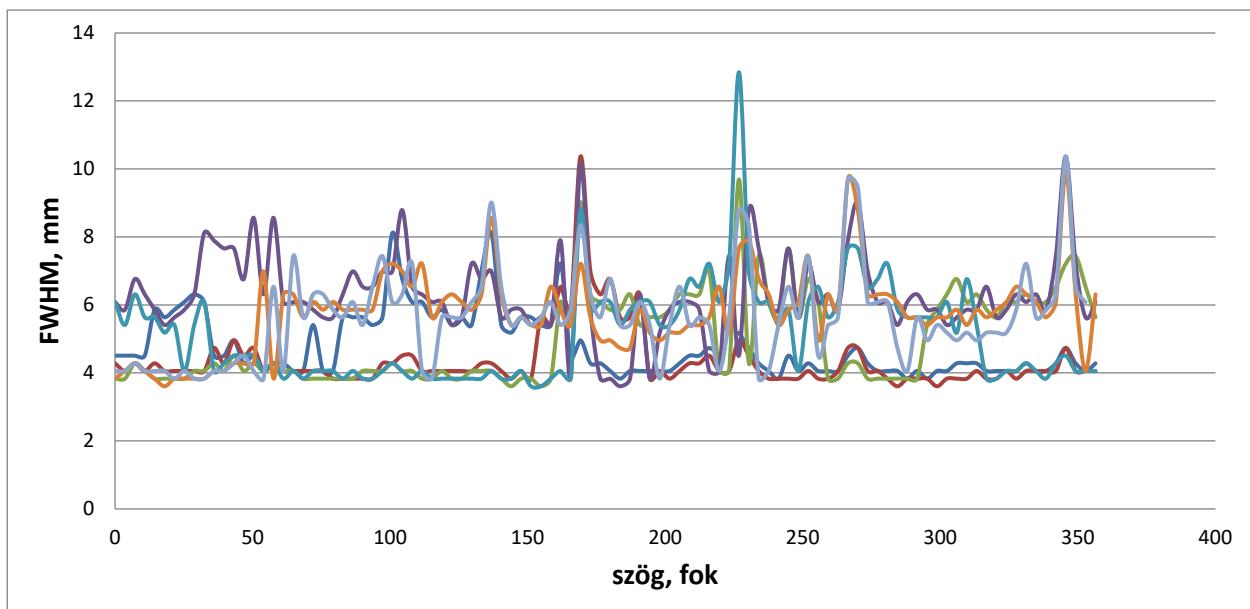
Az eltérések számszerűsítése érdekében kiszámítottam a 4.1 fejezetben bemutatott 6. egyenlet alapján a százalékos szórást minden elforgatási szögnél. Az egyenlet alapján kiszámolt és a 15. ábrán bemutatott értékekből leolvasható, hogy milyen nagyságú a hét ismétlésnél az egyes elfordulási szögeknél a mérési bizonytalanság. Az FWHM értékek százalékos eltérése

kisebb, mint 5% ($2,37 \pm 0,67$ % a teljes ismétlés során), ami elfogadható, figyelembe véve, hogy ez a mérés a léptetőmotor pozícionálási hibájával is terhelt.



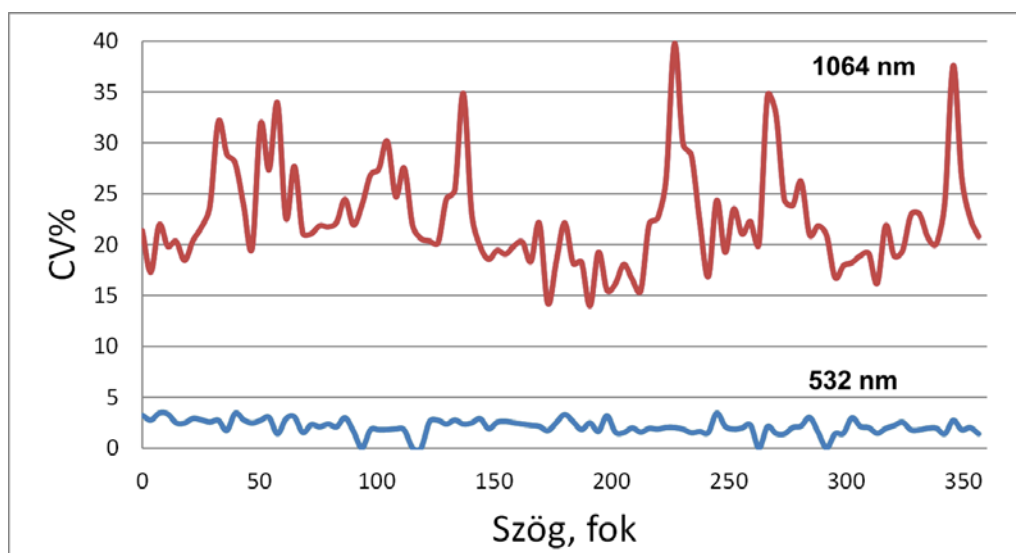
15. ábra 532 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok CV% eltérése az elforgatási szög függvényében

Az 1064 nm hullámhosszú lézerrel indukált képekhez tartozó FWHM értékek változásait ábrázoltam az elforgatási szög függvényében a 16. ábrán. Az 532 nm eredményeitől eltérően ezek az FWHM görbék nincsenek átfedésben.

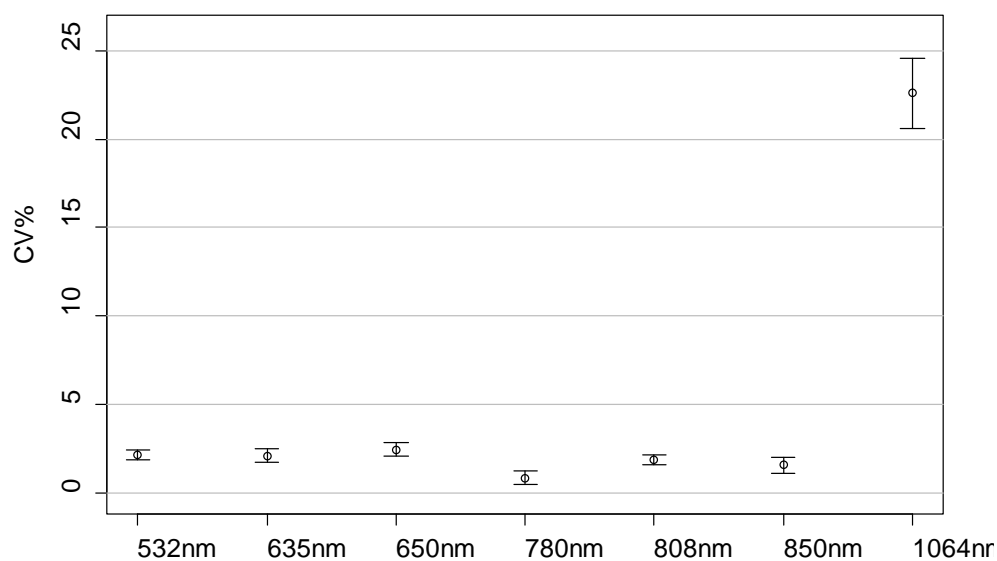


16. ábra 1064 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok FWHM értékeinek változása az elforgatási szög függvényében

A 17. ábrán az 532 és 1064 nm hullámhosszhoz tartozó görbén látható, hogy a mérés bizonytalansága jelentősen megnőtt, ami a 95%-os megbízhatósági szinten készített error bar grafikonon is (18.ábrán) demonstrál. A további öt lézerral kapott eredmények a 10.7 mellékletben található. Az 1064 nm hullámhosszon a variációs koefficiens megfigyelt eltérése 14-39,8 CV% tartományban mozgott, átlagosan $22,6 \pm 4,9$ CV%. A mérési eredmények alátámasztják a feltételezést, hogy a kamera érzékenységi határán (1080 nm) az ismételhetőség jelentősen romlik, 1064 nm hullámhosszon a kamera a többi alkalmazott hullámhossztól jelentősen eltérő hibával dolgozott.



17. ábra 1064 és 532 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok CV% eltérése az elforgatási szög függvényében



18. ábra A hullámhosszak CV% értékeinek változása error bar grafikonon

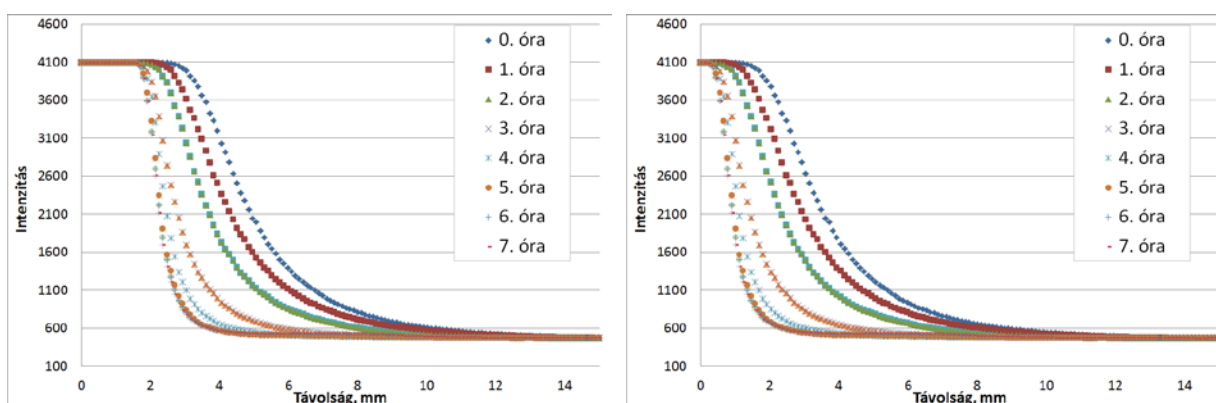
5.1.2 A diffúz reflexiós profilok sztenderdizálása

Az ismételhetőség vizsgálata és a kutatás során végzett méréseim eredményei megerősítettek abban, hogy a módszer alkalmazható kertészeti termények jellemzésére. Ugyanakkor a mért profilok sztenderdizálása elengedhetetlen a mérés körülményeitől független objektív értékeléshez.

A záridő megválasztásával a kamera CCD mátrixára jutó foton mennyiségét változtathatjuk, azaz az érzékelő integrálási idejét, ami a kamerával készített kép világosságára hat. A rövid záridő sötétebb képet eredményez csökkentve a túlvezérelt (telítésbe lépő) pixelek számát. Ez a beállítás nagyon fontos a diffúziós képek elkészítésénél, mert a túlvezérlés következtében a diffúziós folt közepén egy túltelített rész alakulhat ki, ami az elkészített intenzitás görbéken felső platót eredményez, amely a mérések szempontjából nem hordoz információt (19. A ábra). A mérések során arra fektettem hangsúlyt, hogy a jel-zaj arány minél nagyobb legyen, ezért a bemutatott vizsgálatok során a tényleges záridőt 100 ms értékűre állítottam.

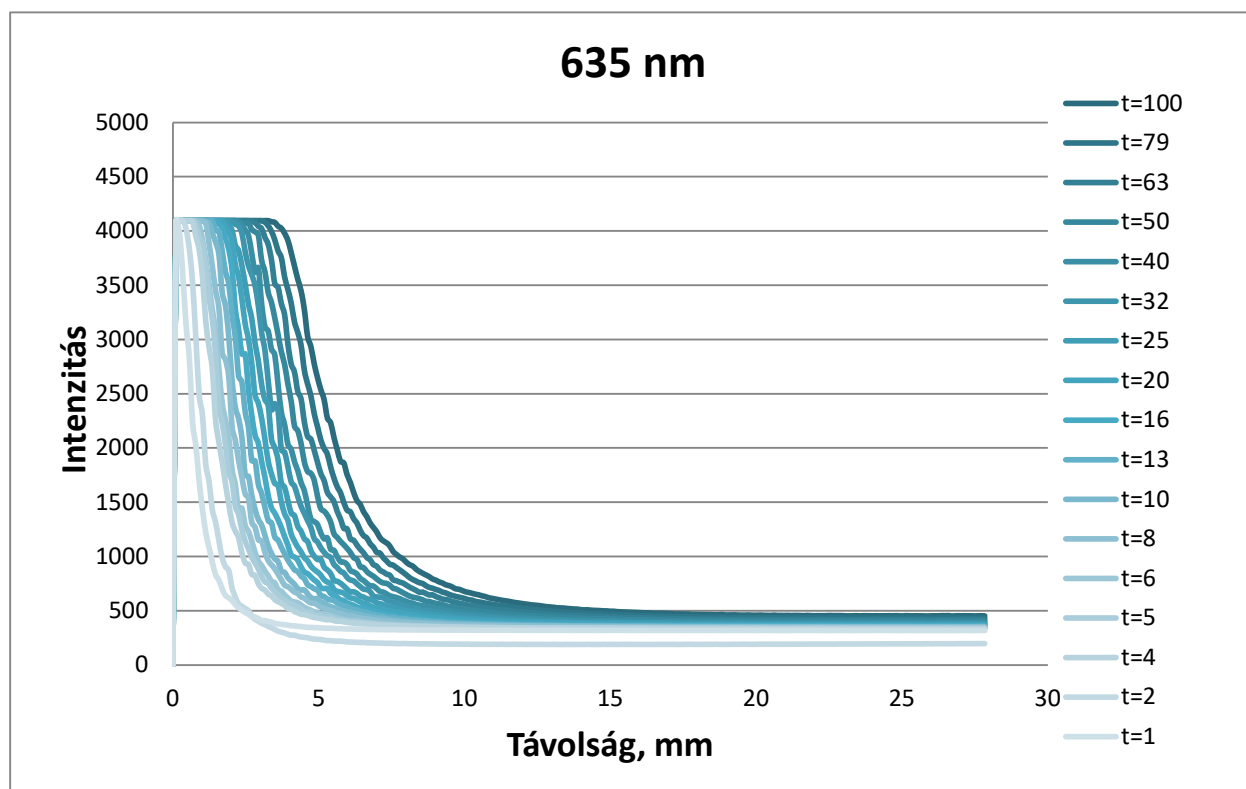
A szakirodalom feldolgozása során a kutatók a profilok platójának egy részétől eltekintettek és a profil maradék részével dolgoztak tovább (Lu 2004), bár ezeknél a méréseknél hiperspektrális kamerával készítették a képeket és annak beállításai nem ismertek.

Amennyiben a plató levágását eltolással végezzük, tehát a levágott résztől számítjuk a távolságot, úgy a görbék meredeksége nem változik, viszont a diffúz reflexiós folt átmérőjében rejlő információkat részben elveszíthetjük. A 19. ábrán ennek hatása látható száritott almaszeleteken mért profilokon (532 nm).



A B
19. ábra Intenzitás profil platóval (A) és korrekcióval (B)

Az diffúziós képek rögzítése során az integrációs idő (záridő) megválasztásának nagy jelentősége van, mert ha túl alacsonyra választjuk meg, akkor nagy zajt viszünk a mérésbe, viszont ha túl nagyra, akkor információt veszítünk, de az így kapott adatok mérési bizonytalansággal kevésbé terheltek. Első lépésként olyan transzformációkat alkalmaztam, melyekkel a különböző integrációs idővel készített diffúziós profilok azonosan kezelhetők. Ennek céljából sajtmintáról oly módon készítettem diffúziós képeket, hogy csak a záridőt (integrációs időt) változtattam logaritmikus (természetes alapú) léptékben 1-100 ms tartományban. A 20. ábra mutatja be a rögzített profilokat (635 nm). Megfigyelhető, hogy az integrációs idő csökkenésével csökkent a plató mérete és a profil szélessége is.



20. ábra Sajtmintáról különböző záridővel készített diffúziós profilok

Ennél a méréssorozatnál cél volt a különböző integrációs idővel kapott intenzitás profilok olyan transzformációja, mellyel függetleníteni tudjuk a záridőtől a méréseket, ezért a 20. ábrán bemutatott profilok transzformációjához a 18. egyenletet alkalmaztam. A transzformáció y irányú eltolást eredményez, azonban nem okoz torzulást a profil alakjában. A sötét rész alatt a 20. ábrán is látható profilok alsó platóját értem. Céлом volt a normalálás, hogy különböző felbontású kamerákkal készített képekre is alkalmazható legyen a módszer. Ezért az így kapott pontokat a maximális intenzitással is osztottam, majd az így elkészült sztenderdizált intenzitás profil természetes alapú logaritmusát számítottam.

$$I_y = \ln \left(\frac{I_x - MEAN(I_{sötét})}{\frac{t}{I_{max}}} \right)$$

[18]

I_y = kalkulált intenzitás érték;

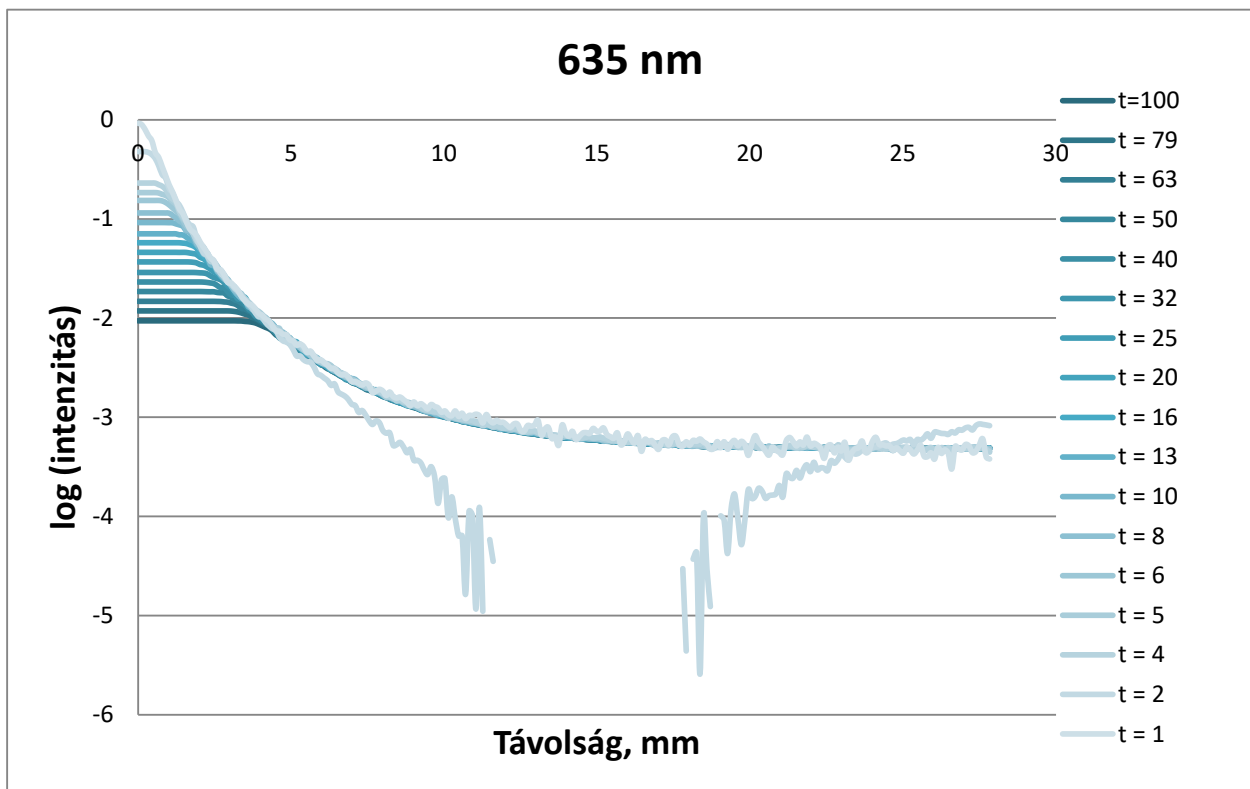
I_x = rögzített intenzitás érték;

$I_{sötét}$ = sötét háttér pontjainak intenzitás értékei;

I_{max} = kamera maximális intenzitás értéke (12 bit esetén 4096);

t = a profilhoz tartozó kép felvételhez alkalmazott integrációs idő

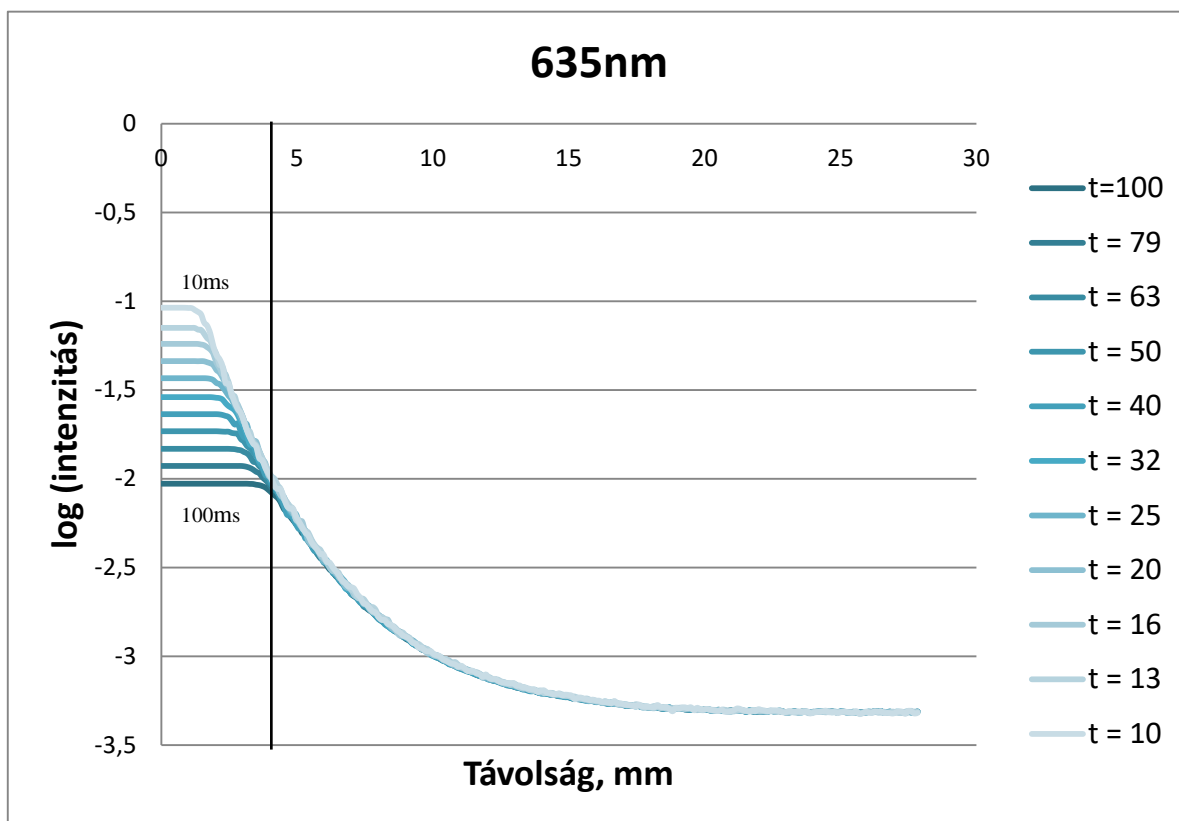
A 18. egyenlet alkalmazásával a 21. ábrán látható görbék készültek, ahol megfigyelhető, hogy az alacsony záridővel végzett mérések jelentős zajjal terheltek (segítette ezt a szemléltetést a logaritmizálás). A görbék vízszintes részei a túlteltetés okozta platókat jelzik. A nagy sötétzajra való tekintettel a 10 ms záridő alatt nem javaslok diffúz reflexiós képek rögzítését.



21. ábra Különböző integrációs idővel (1-100 ms) készített logaritmikus diffúziós profilok

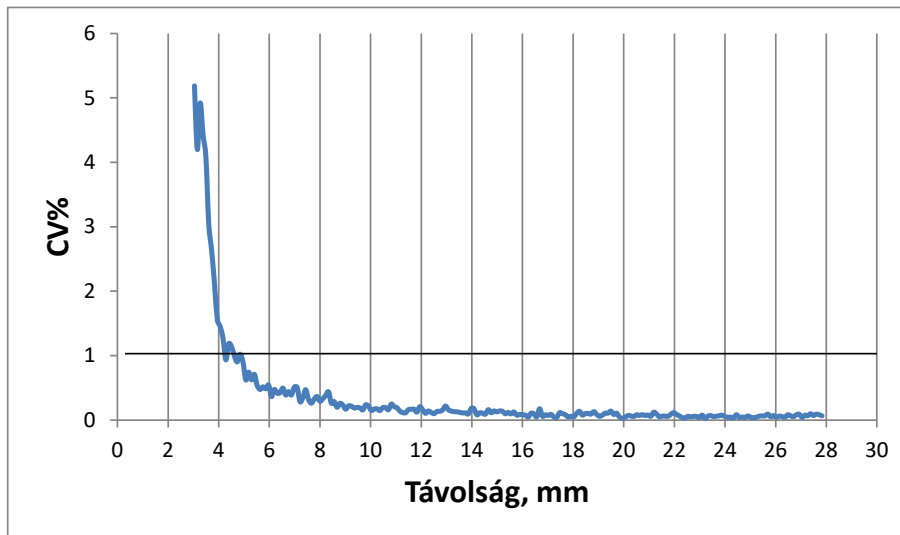
A javasolt 10 ms küszöb felett készített profilokat a 22. ábrán mutatom be, ahol megfigyelhető, hogy a különböző záridőkkel készített profilok a transzformáció után szemmel láthatóan szinte egy görbévé simultak.

Ennek statisztikai bizonyítása céljából távolságonként (0,11268 mm/px felbontással) az 5.1. pontban található 6. egyenlet alapján variációs koefficiens (CV%) számoltam. A 22. ábrára bejelölt távolságtól (100 ms záridővel kapott profil telítésben lévő plató vége) átfedésben lévő szakaszon számoltam ki a CV% értékeket, mert a teljes tartományon a profilok felső platói torzítják az értékelést.



22. Különböző záridővel (10-100ms) készített tartozó logaritmikus diffúziós profilok (sajt, 635 nm)

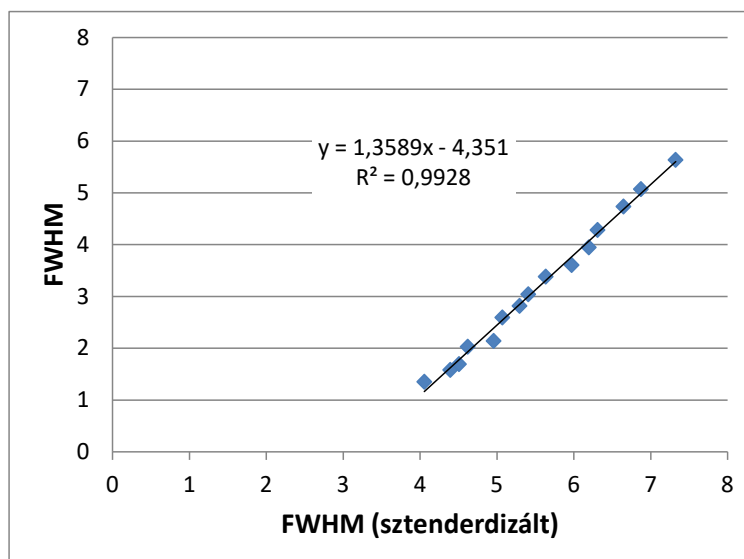
Az 23. ábrán mutatom be a transzformált profilok CV% eltéréseit a távolság függvényében, ahol 1% hibaküszöb értéket a 100 ms profil felső platója végétől kezdődő görbület eredményezett. Az értékelhető részek CV% $\leq 1\%$ eredménye alátámasztja, hogy a 18. egyenlet alkalmazásával a különböző integrációs idővel készített diffúziós profilok sztenderdizálhatóak a telítésben lépő részek figyelmen kívül hagyása mellett.



23. ábra Intenzitás profilok CV% eltérése a távolság függvényében (635 nm)

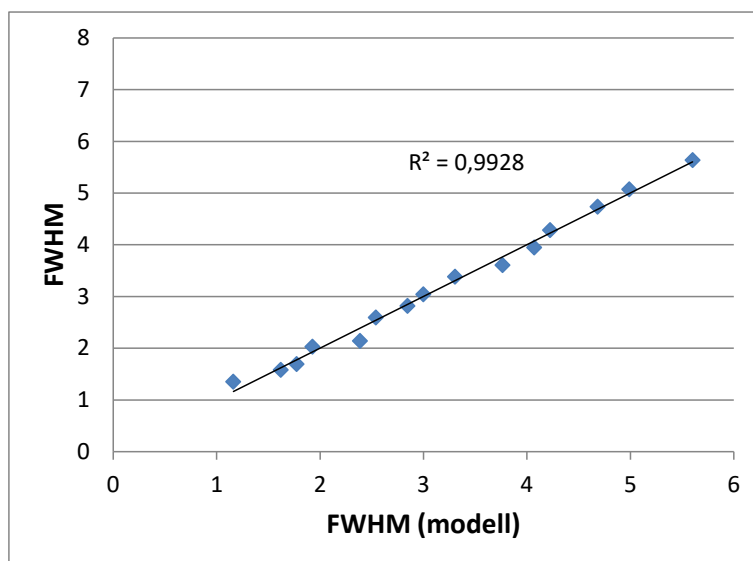
A bemutatott sajt minta esetében elhagyható a kezdeti plató (<4 mm) a mérésekből, amennyiben 100 ms záridővel dolgozunk. Mivel a plató nagysága anyagra jellemző, ezért javaslom különböző termékek mérési sorozata előtt hasonló elemzés elvégzését.

A sztenderdizálás után az FWHM értelmezése csak úgy lehetséges, ha normál és sztenderdizált FWHM értékek között függvénykapcsolatot találunk (24. ábra), mivel a maximum intenzitás változhat a különböző záridő megválasztásával. A 24. ábrán megjelenített kétféle FWHM pontok összefüggése lineáris, melynek felhasználásával visszszámolható a sztenderdizált FWHM értékből a normál FWHM érték (25. ábra).



24. ábra Normál és sztenderdizált profilok FWHM értékének változása

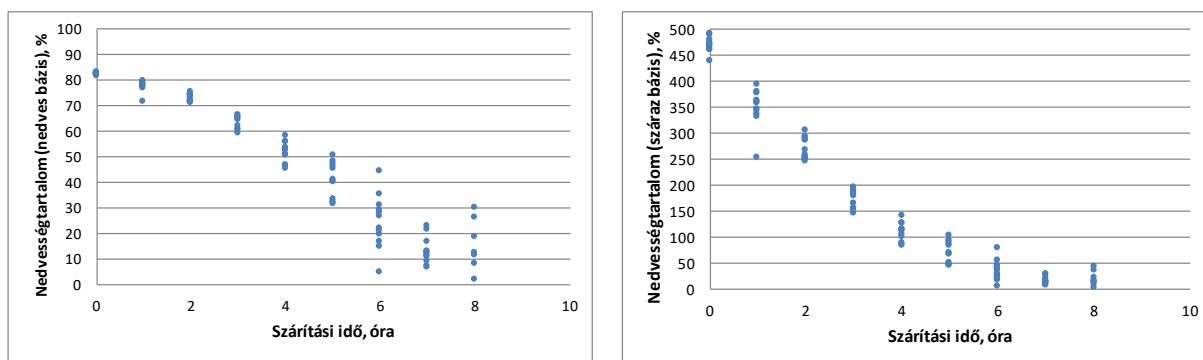
A becslés ábráján (25.ábra) látható, hogy magas determinációs együtthatóval ($R^2=0,9928$) és alacsony becslési hibával (RMSEP=0,11mm, ami 2,57% becslési hibát jelent) sikerült visszszámolni a felállított lineáris modellel a normál profilok FWHM értékeit.



25. ábra Lineáris modellel becsült és normál profilokból számolt FWHM értékek összefüggése

5.2 Az almaszárítás kísérlet eredményei

A szárítás nyomonkövetése két nedvességtartalom alapján értelmezhető (száraz és nedves bázisra vonatkoztatott). A 26.ábra mutatja a kétféle nedvességtartalom változását az alma szeletekre vonatkozóan, a szárítási idő függvényében. A két számolási módszerrel kapott nedvességtartalom időbeli változása (lefutása) eltérő, és más értéktartományon helyezkednek el. Egyértelmű különbségek jelennek meg a száradási idő előrehaladtával, melyeknek jellemző értékeit a 3. táblázat összesíti.

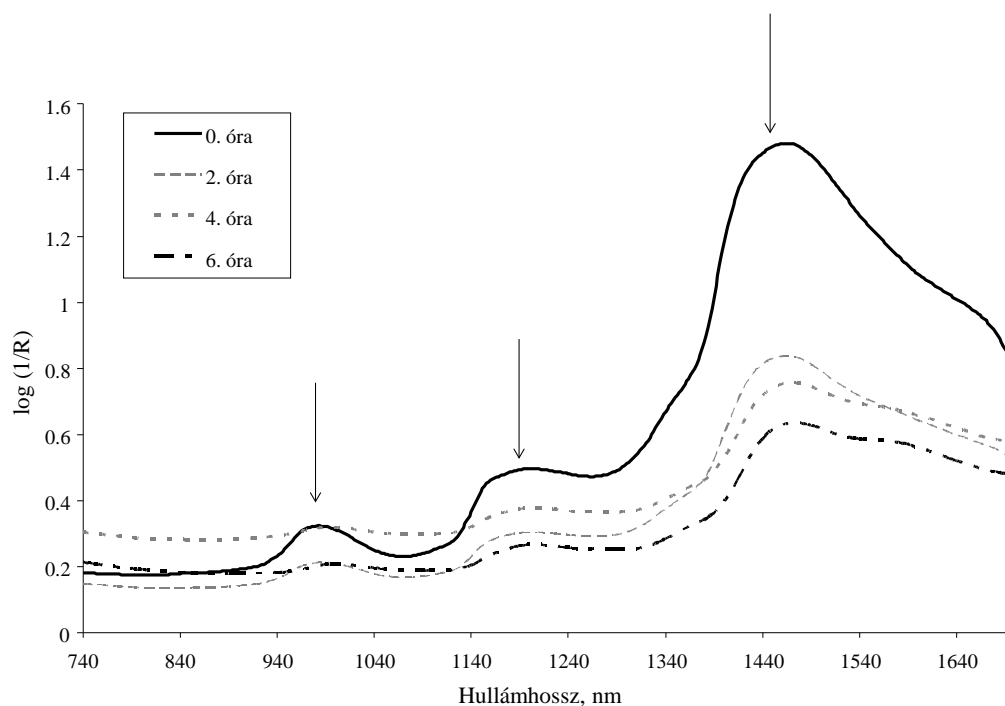


26. ábra A nedvességtartalom változása (nedves és száraz bázisra vonatkoztatott) a szárítás során

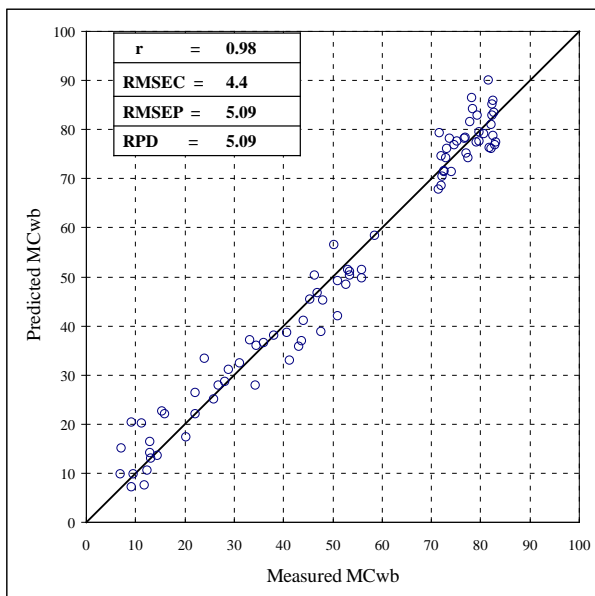
3. táblázat: Statisztikai adatok alakulása a kétféle nedvességtartalom eredményeiben MC_{nedves} és

Száritási idő	$MC_{száraz}$		MC_{nedves}	
	átlag	szórás	átlag	szórás
0	82.3	0.6	464.5	19.7
1	77.8	2.0	352.8	37.1
2	73.0	1.2	271.7	17.1
3	63.3	2.6	173.4	19.2
4	51.9	4.1	109.3	17.6
5	40.2	7.7	69.7	21.1
6	24.5	9.5	34.4	17.6
7	12.6	4.9	14.8	6.9

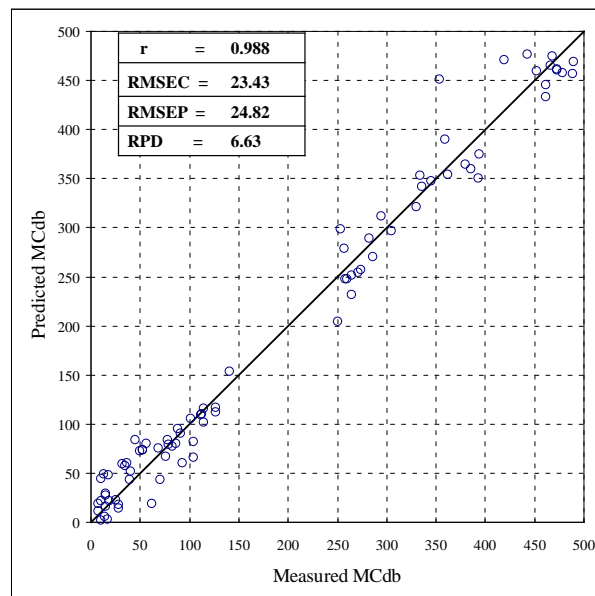
A minták spektrális változása a száradás közben követhető a mintacsoportok átlagos spektrumával a meghatározott száradási szakaszokban (27.ábra). A szakirodalmi feldolgozás alapján a száradás során lejátszódó vízvesztés a NIR technikával jól követhető és a három tipikus vízcsúcs (970, 1200 and 1470 nm) beazonosítható a kezdeti minták felvett átlagspektrumán (nyíllal jelölt). A vízvesztés és a teljes spektrum intenzitásának csökkenése a száritási idő előrehaladtával monoton folyamat, ami ezeken a 2 óránként felvett átlagspektrumokon is kivehető.



27. ábra Átlagos spektrumok $\log(1/R)$ a különböző száradási fázisokban



A

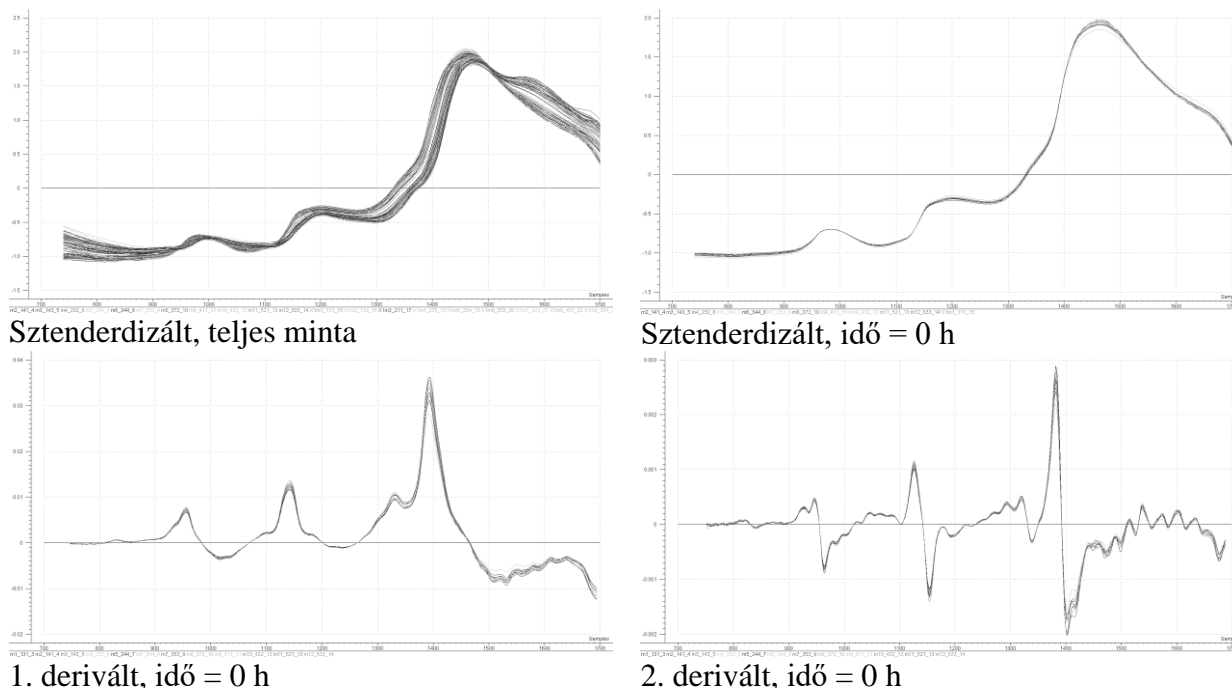


B

28. ábra Az almaszeletek nedvesség tartalmának (A: nedves bázisra vonatkoztatott, B száraz bázisra vonatkoztatott) PLS becslése a NIR spektrumok 740-1700 nm eredeti adatainak felhasználásával

A spektrumok nagy variabilitása szükségessé teszi a transzformációs módszerek használatát (1. és 2. derivált sztenderdizálást), csökkentve a globális variabilitást és relatíve növelve a spektrális különbségeket. A minták teljes mért spektrumának PLS becslése erős modellt eredményezett, mind a nedves és mind a száraz bázisra vonatkoztatott nedvességtartalom becslése esetében $p < 0,001$ (28. ábra A és B része). A becslés statisztikai paraméterei hasonlóak egymáshoz a nedves és száraz bázisra vonatkoztatott nedvességtartalom modellek esetén (5. táblázat). A száraz bázisra vonatkoztatott modell csak kicsit erősebb a korrelációs paraméterben (r), de az RPD értékek különbsége magasabb (6,63 MC_{db} ; 5,09 MC_{wb}), amely az MC_{db} pontosabb becslhetőségére utal. A valódi különbséget a két modell között a rezidumanalízis eredményei mutatják, ahol a Durbin Watson statisztika mérőszáma a nedves bázisra vonatkoztatottnál $DW=1,515$, ami nem elfogadható $p=0,05$ szignifikancia szinten. A száraz bázisú modellnél $DW=1,944$ volt, ami nagyon közel van az autokorreláció nélküli ideális modell optimumához ($DW=2$). Ez azt jelenti, hogy a kiváló r és RPD jellemzők ellenére az MC_{wb} modell szisztematikus hibával terhelt (a reziduumok autokorrelálnak), a nedvességtartalom nem-lineáris természete miatt. Az MC_{db} modell esetén csak véletlenszerű hibák fordultak elő, tükrözve a fizikailag lineáris kapcsolatot az optikai paraméterek és a száraz bázisra vonatkoztatott nedvességtartalom értékek között (összefüggésben a minták abszolút víztartalmára utalva).

A modell jóságának növelése érdekében különböző előfeldolgozási módszereket teszteltem. Mozgó átlag simítás (három pontra), amit az első és második derivált követett, majd Savitzky Golay algoritmus (másodfokú polinom illesztése két-két pontra jobbról és balról). A nyers spektrumokat SNV módszerrel sztenderdizáltam a 9. egyenletnek megfelelően. Az átalakított spektrumok a 29. ábrán láthatóak és a PLS modell paraméterei a 4. táblázatban vannak összefoglalva.



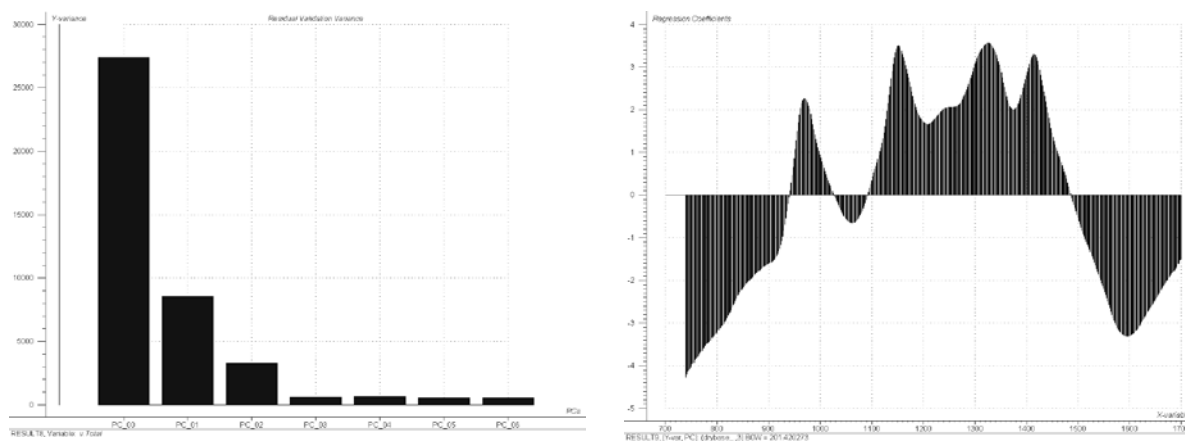
29.ábra Száradás előtt az almaszeletek transzformált spektrumának mintái

4. táblázat: NIR spektrumokkal készített PLS modellek statisztikai paraméterei

Modell adat	Eredeti spektrum									
	MC (nedves bázis)					MC (száraz bázis)				
	r	RMSEC	RMSEP	RPD	DW	r	RMSEC	RMSEP	RPD	DW
nyers spektrum	0,980	4,40	5,09	5,09	1,51	0,988	23,43	24,82	6,63	1,94
1 derivált spektrum	0,977	4,87	5,55	4,67	1,07	0,986	25,72	26,99	6,10	1,83
2. derivált spektrum	0,969	5,76	6,35	4,08	1,42	0,983	28,72	30,27	5,44	1,76

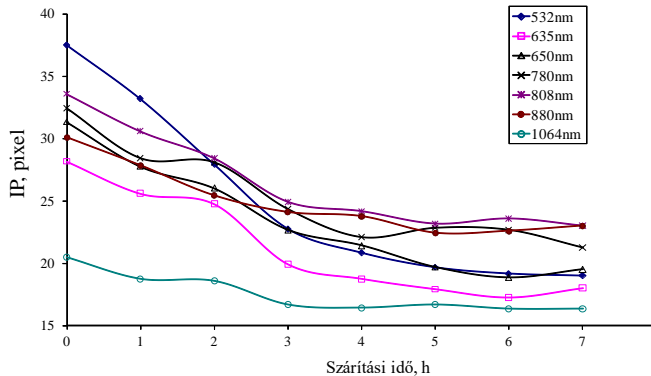
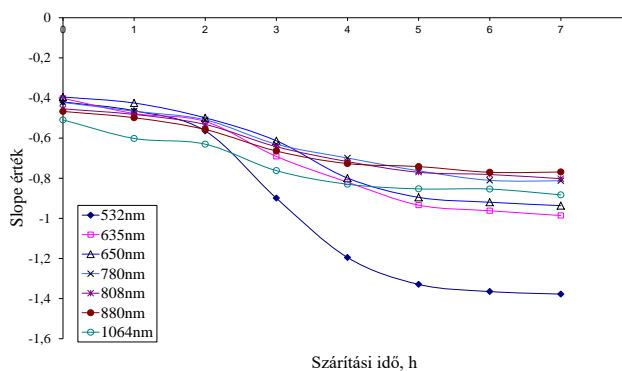
Modell adat	Sztenderdizált spektrum									
	MC (nedves bázis)					MC (száraz bázis)				
	r	RMSEC	RMSEP	RPD	DW	r	RMSEC	RMSEP	RPD	DW
nyers spektrum	0,979	4,32	5,27	4,92	1,52	0,989	21,72	23,71	6,94	1,85
1 derivált spektrum	0,977	4,96	5,54	4,68	0,94	0,988	23,90	25,00	6,58	1,94
2. derivált spektrum	0,971	5,83	6,15	4,22	1,15	0,989	23,17	24,39	6,75	1,89

Összefoglalva a NIR spektrumok PLS analízisének eredményeit, arra következtethetünk, hogy az adatok előfeldolgozásával kisebb javulást érhetünk el, de az eredeti nyers adatok analízise szintén megbízható következetes modellt eredményezett a nedvességtartalom becslésére (száraz bázisú). A 30. ábra a PLS regresszió jellemzőit mutatja, ahol a hegyomlás diagramm oszlopai azt mutatják, hogy az első három főkomponens a modell variációjának 97,5%-át írja le (A) és a sztenderdizált regressziós koefficiensek a hullámhossz relatív fontosságát mutatják a modellben.



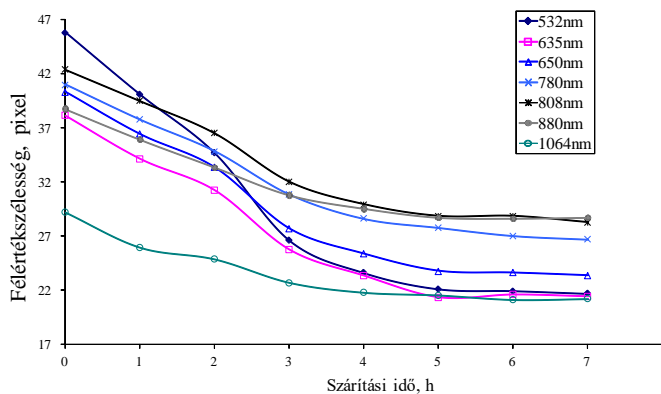
A B
30. ábra A PLS becslés hegyomlás diagrammja (A) és regressziós együtthatói (B)

A szárítás előrehaladtával a diffúz reflexiós fényudvar mérete monoton csökkent az időben, ami azt eredményezte, hogy a profilokból kinyert kvantitatív paraméterek hasonló módon változtak. A 31. ábra mutatja a profilokra jellemző értékek (SLOPE, IP és FWHM) változását az idő függvényében. Mind a hét lézert használtam a kísérletben. Multilineáris regressziót alkalmaztam a nedvesség tartalom értékek becslésére a profilok paramétereiből. A PLS modellek illesztésére az Unscrambler (v9.1) statisztikai programot használtam.



A

B



C

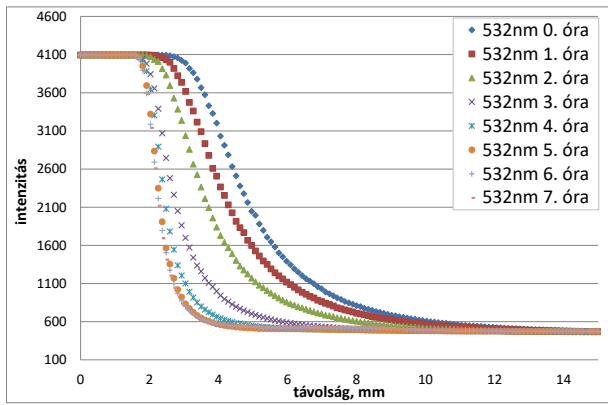
31. ábra Diffúziós profil mintavételenként átlagolt paramétereinek változása a szárítás során: SLOPE (A); IP (B); FWHM (C)

A különböző modellek eredményeit az 5. táblázat foglalja össze. A legösszetettebb modellt vizsgálva az összes paraméter figyelembevételével (a hét lézerforrás SLOPE, IP, FWHM adatai) a vizes és száraz bázisra vonatkoztatott nedvesség adatok becslései közötti különbség még egyértelműbb, mint a NIR spektrumok alapján. A vizesbázisú modell reziduuma egyértelműen autokorrelálnak, a becslés jelentős szisztematikus hibával terhelt. A Durbin Watson statisztika alapján a modellt elvettem ($DW=0,81$). A száraz bázisra vonatkozó modellek jobbak voltak mind az RPD, mind a Durbin Watson paraméterekben. Összehasonlítva az adatállomány alternatíváit, megállapítottam, hogy a száraz bázisú nedvességtartalom becslésének legjobb modellje az FWHM adatokból felépíthető. Ez a modell (33. ábra) nagyon jó becslési pontosságot eredményezett ($RMSEP < 3$) és szisztematikus hibát sem mutatott ($DW < 1,69$, elfogadási határa az autokorreláció nélküli modellek).

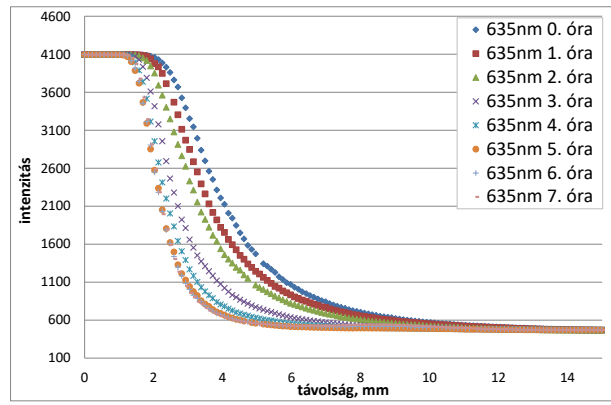
5. táblázat: A lézerrel indukált adatokkal készített PLS becslések minőségi paraméterei

Modell adat	MC (nedves bázis)					MC (száraz bázis)				
	r	RMSEC	RMSEP	RPD	DW	r	RMSEC	RMSEP	RPD	DW
Scattering-FWHM	0,845	12,26	13,08	1,88	1,05	0,969	37,40	38,14	4,04	1,70
Scattering-IP	0,812	13,00	14,24	1,72	0,82	0,948	47,60	48,60	3,17	2,02
Scattering-SLOPE	0,908	10,04	10,24	2,40	0,81	0,958	41,53	44,19	3,49	1,16
Scattering-(532 nm)	0,820	13,67	14,00	1,75	0,46	0,965	39,30	40,40	3,81	1,47
Scattering-teljes	0,841	12,13	13,24	1,85	0,81	0,969	34,51	38,05	4,05	1,53

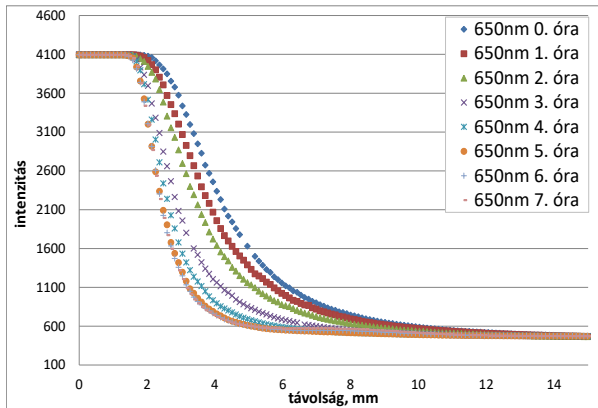
Az almaszeletek száradása során lejátszódó vízvesztés és zsugorodás következtében a diffúz reflexiós profilok meredeksége és szélessége is megváltozik. Továbbá monotonitás figyelhető meg a száradási idő hatására az összes lézerrel mért profilok esetében. A változást jól szemléltetik a 32. ábrán található hétféle lézerrel indukált képek átlagprofiljai. Egyértelmű változás mind a hét lézeres profiloknál tapasztalható. Megfigyelhető, hogy az 532 nm hullámhosszon mért profilok esetében a legnagyobb az átlag profilok közötti különbség.



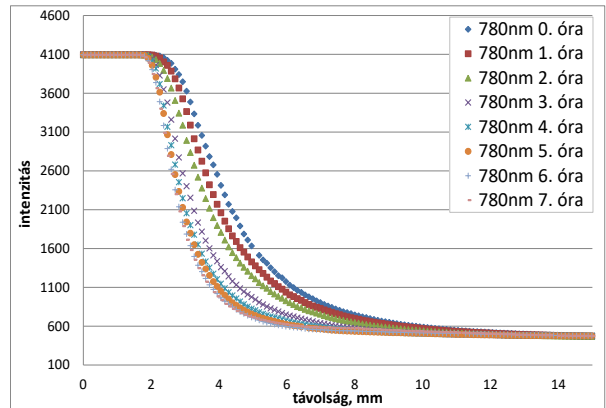
A



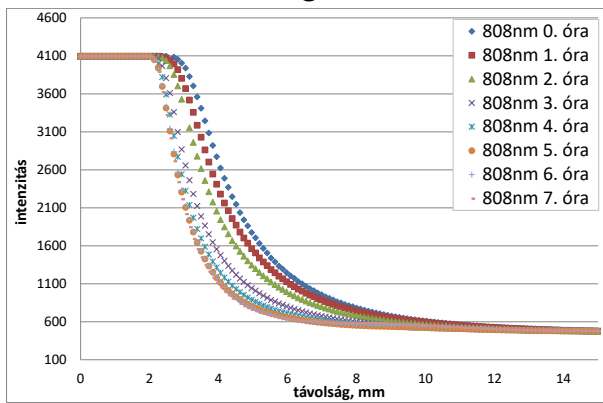
B



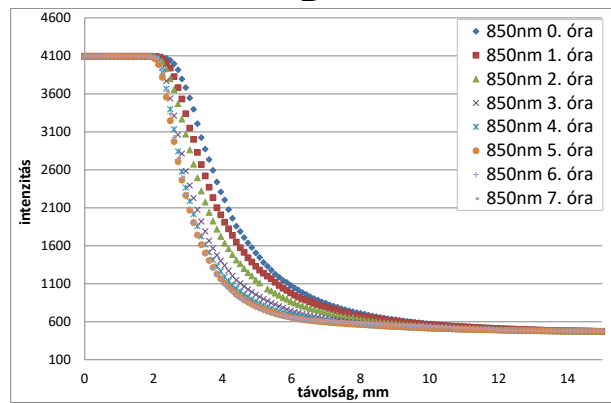
C



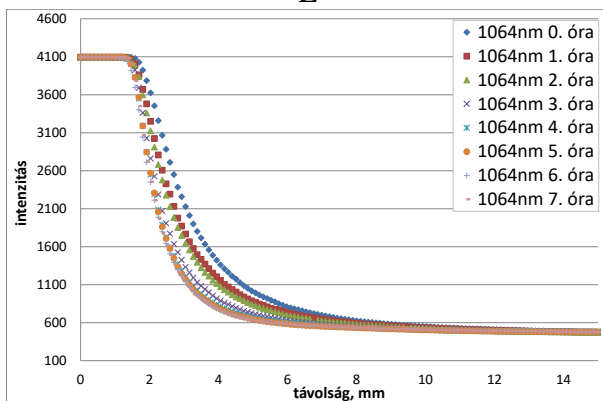
D



E

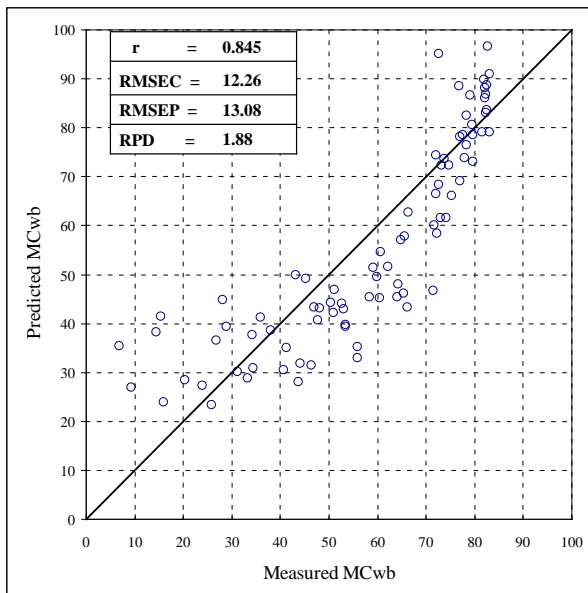


F

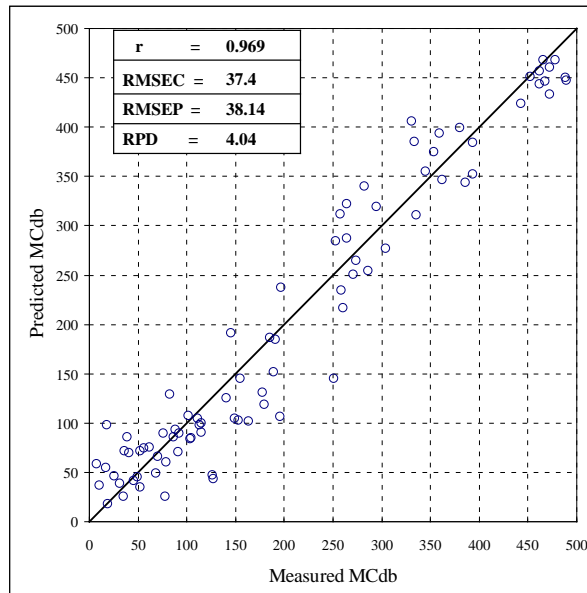


G

32. ábra Az alamaszeletek szárítása során átlagolt profilok változása a különböző hullámhosszú lézerek esetében



A



B

33. ábra Az almaszeletek nedvesség-tartalmának PLS becslése nedves (A) és száraz bázisra (B)

A modell paramétereit alapján a becslésben nagyobb szerepet játszanak az alacsonyabb hullámhosszúságú lézerekkel mért eredmények, amit a 6. táblázat mutat be.

6. táblázat: A PLS modell együtthatói (száraz bázis)

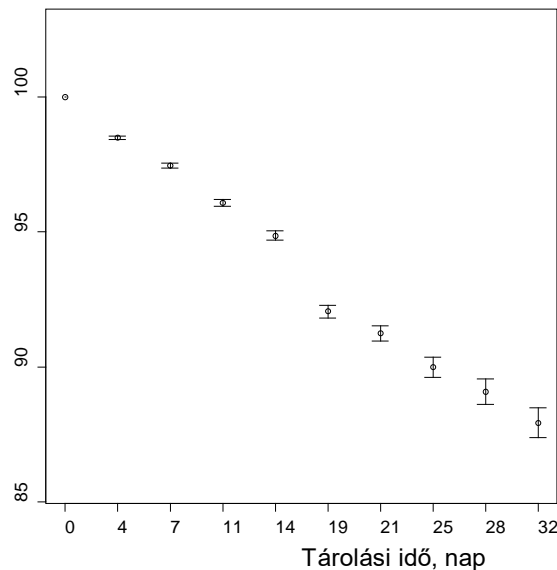
<i>FWHM 532</i>	<i>FWHM 635</i>	<i>FWHM 650</i>	<i>FWHM 780</i>	<i>FWHM 808</i>	<i>FWHM 880</i>	<i>FWHM 1064</i>	<i>konstans</i>
5,632	3,94	3,967	3,275	3,302	2,309	1,719	-530,7

Az Idared almaszeleteket 65 °C-on 7 órán keresztül szárítottam. A mintákat NIR spektrofotométerrel és lézer indukált diffúziós látórendszerrel vizsgáltam meg. A 740-1700 nm tartományban mért log 1/R spektrumot sikeresen alkalmaztam a PLS modell létrehozására. Megbecsültem a száraz alapra vonatkoztatott nedvességtartalmat $R=0,988$, $RPD=6,63$ és $DW=1,94$ értékekkel és a vizes bázisra vonatkoztatott nedvességtartalmat $R=0,98$, $RPD=5,09$ és $DW=1,51$. Hasonló korreláció és DW statisztika volt megfigyelhető a sztenderdizált spektrumok esetén. A PLS modellekben a tipikus vízabszorpciós csúcsok (970, 1200 és 1470 nm) egyértelműen megjelentek. Monoton változást figyeltem meg a lézerekkel indukált diffúziós profilokban. A profilok paramétereit, mint az IP, SLOPE és FWHM vizsgáltam meg és az FWHM értékkel tudtam a legjobban megbecsülni a száraz bázisra vonatkozó nedvességtartalmat ($R=0,969$, $RPD=4,014$, $DW=1,72$). Az eredmény megalapozta a továbblépés lehetőségét a sztenderdizált képfeldolgozási módszer kialakítása felé.

5.3 A burgonya tárolás eredményei

Véleményem szerint a burgonya, mint homogénnek tekinthető modellanyag jól használható fizikai változások nyomonkövetésére. A tárolás során lejátszódó fizikai változás

jelentős része a víztartalom csökkenésének tudható be. Ezt a változást a 34. ábra szemlélteti, ahol a burgonyaminták kiindulási állapothoz viszonyított relatív tömege a tárolási idő függvényében látható. Az ábrán a napi átlagok és a 95% konfidencia intervallumok lettek feltüntetve. Egyértelmű változás tapasztalható már az első mérési naptól.

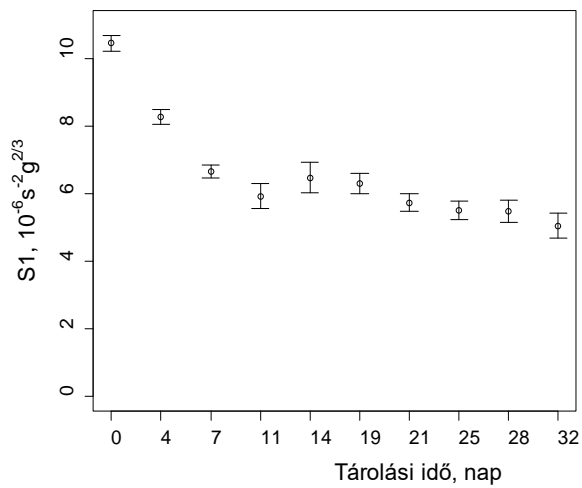


34. ábra A burgonya minták relatív tömege a tárolási idő függvényében

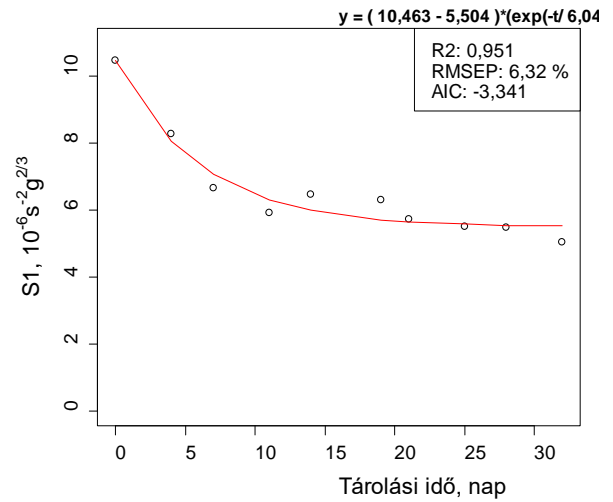
A 35.A és C ábra az akusztikus keménység tényezők (S1 és S2) változását mutatja a tárolás során. Az error bar ábrákon a napi átlagok és 95% megbízhatósági szinten a konfidencia intervallumok láthatók. A 35.B és D ábrák a mintacsoportot jellemző napi átlagokra illesztett exponenciális görbe, valamint azok egyenleteit láthatóak. Az S1 és S2 tényezők modellezésének jóságát a determinációs együtthatók ($R^2=0,95$ és $R^2=0,96$) és az alacsony becslési hibák (RMSEP=6,3% és RMSEP=6,1%) erősítik. Az illesztett exponenciális egyenletek az ábrák felett találhatóak, melyek megmutatják, hogy a kiinduló keménységekhez képest közel felére puhulnak a minták a tárolás végére.

A 35.E ábrán látható error bar diagrammon a dinamikus keménység tényező (D) változását szemlélteti a tárolási idő függvényében. Már a 4. tárolási napon jelentős változás következett be a minták keménységében, valamint a napi csoportok szórása kicsi lett. A 35.F ábrán a számított minőségi paraméterek alapján ($R^2=0,978$; RMSEP=4,6%; AIC=-35,99) elmondható, hogy a dinamikus keménység tényező változásának modellezése alacsony hibával megvalósítható.

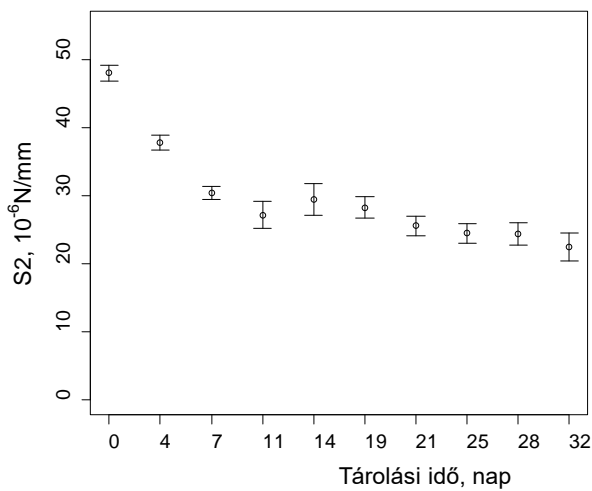
A két keménység tényező közül (dinamikus (D) és akusztikus) az ütészivsgálati tényező eredményezett szorosabb összefüggést egy exponenciális függvénnyel.



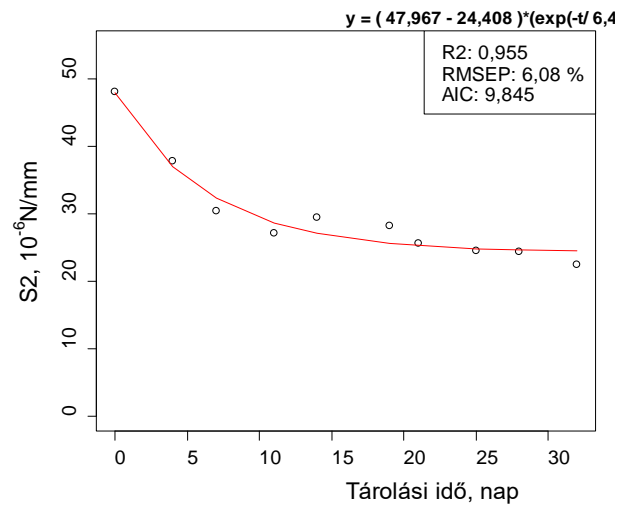
A



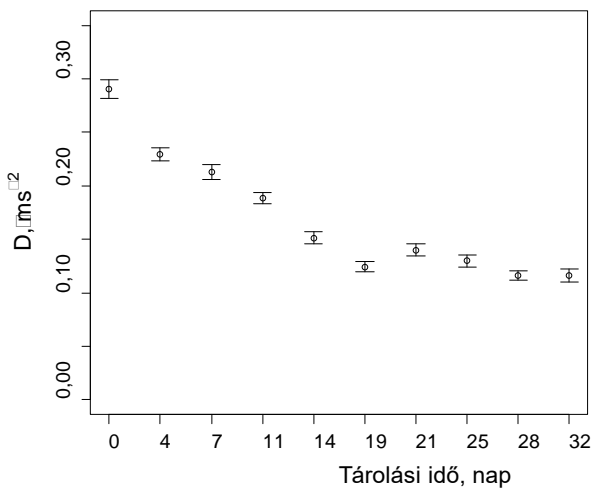
B



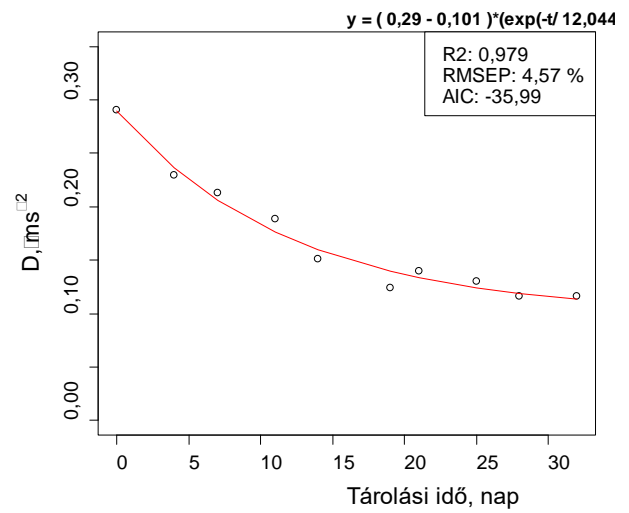
C



D



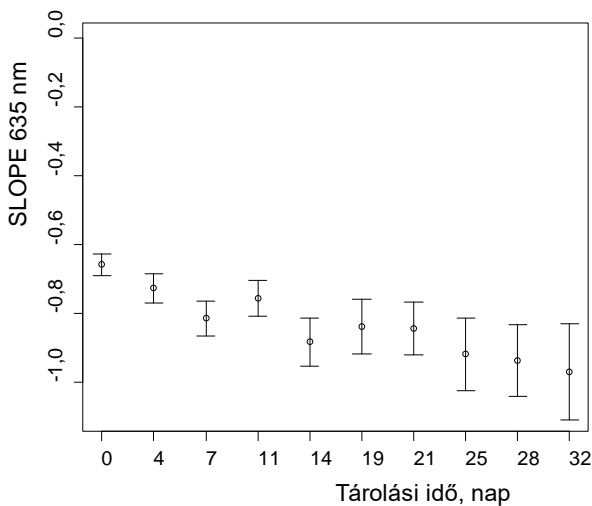
E



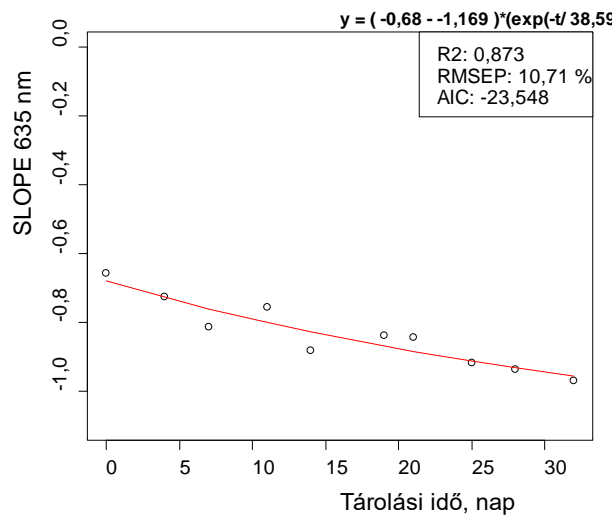
F

35. ábra A keménység változása a tárolási idő függvényében (A, C és E), valamint modellezésük a napi átlagértékek felhasználásával (B, D és F)

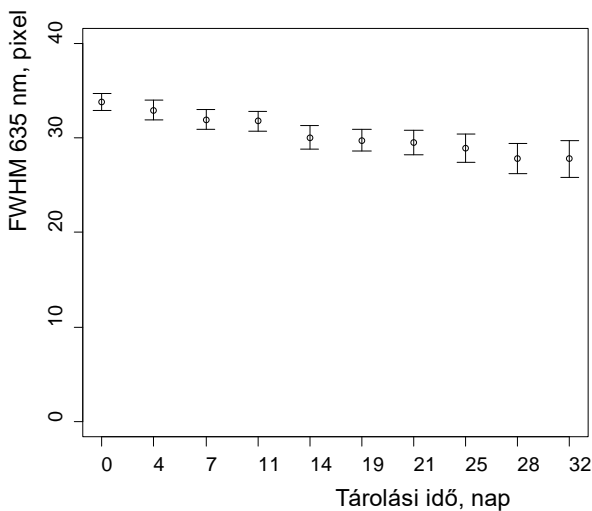
A diffúz reflexiós paraméterek esetében is hasonlóan jártam el, mint a már bemutatott keménység tényezőknél. Az alkalmazott hét különböző hullámhosszúságú lézerrel mért paraméterek előzetes szelekciója után a 635 nm lézer adatait választottam ki. A 635 nm hullámhosszúságú lézerrel mért két profil paraméter (SLOPE és FWHM) kerül bemutatásra a tárolási idő függvényében a 36.A és C ábrákon, ahol láthatók a napi átlagok, valamint a csoportokhoz tartozó konfidencia intervallumok 95%-os megbízhatósági szinten. Az FWHM paraméter esetében már a hetedik tárolási napon jelentősen különböznek a kísérlet kezdetén mért értékekhez képest, valamint a változás monotonitást mutat hasonlóan mint a keménység tényezők esetében. Az ábrákból kiderül, hogy a profilok meredeksége (SLOPE) tárolás során nő és az FWHM csökken, ami a szóródási és az elnyelési változást mutatja. Az átlagértékek modellezése során a (36. B és D ábrákon) a meredekség lazább kapcsolatot mutat ($R^2=0,87$) az exponenciális modellel, mint az FWHM érték esetében, ahol $R^2=0,976$. A polcontarthatóság (shelf life) becslése szempontjából D érték alapján alacsonyabb a tárolási idő becslésének hibája (RMSEP=4,5%), mint a diffúz reflexiós FWHM érték felhasználásával (RMSEP=5,1%). Az 5,1%-os hiba napokban kifejezve ~1,65 napos hibát jelent ($R^2=0,978$; RMSEP=4,6%).



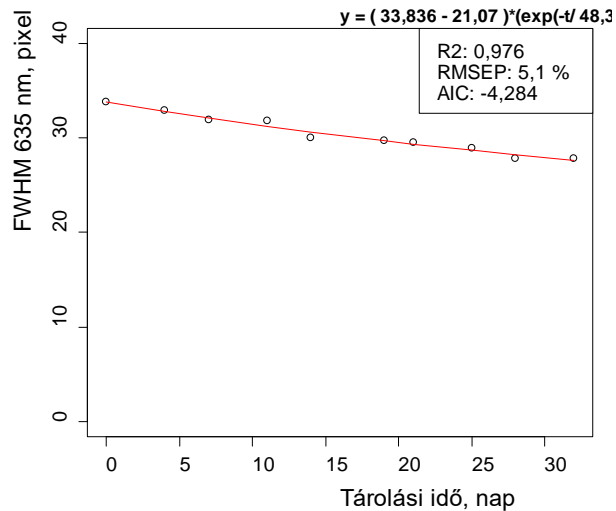
A



B



C

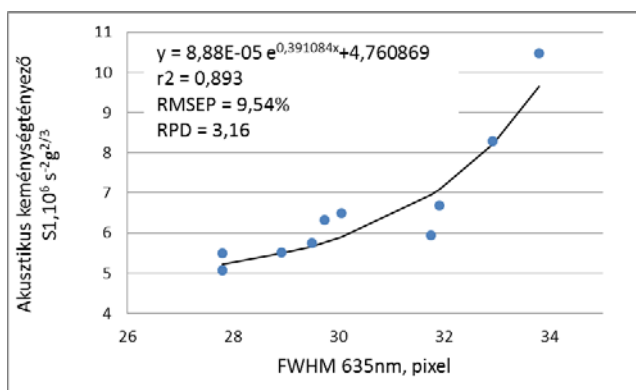


D

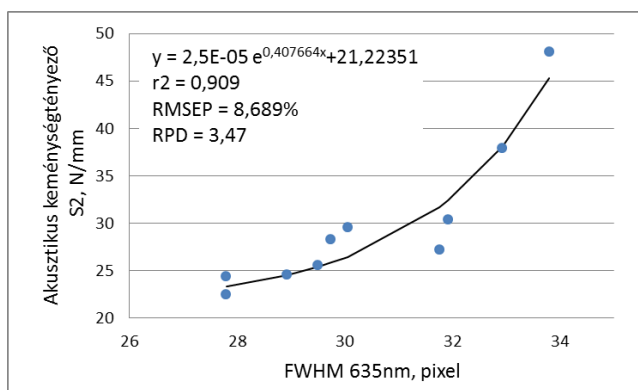
36.ábra 635 nm hullámhosszú lézerrel mért diffúz reflexiós profil paraméterek változása a tárolási idő függvényében (A, C), valamint a naponként mérési átlagok modellezése (B, D)

A 36. (A, B, C és D) ábrákon tapasztaltak alapján a diffúz reflexiós módszer mérhető változást mutat. A változás egy exponenciális összefüggéssel írható le, hasonlóan a keménység adatok változásához (35.ábrák). A diffúz reflexiós paraméterek és a keménység tényezők összehasonlításával láthatóvá válik, hogy a kétféle módszerrel mért eredmények hasonló változásra utalnak. A 37. ábrán a 635 nm hullámhosszú lézerrel mért átlagos FWHM értékek összevetése látható az akusztikus (A, B ábrák) és dinamikus keménység (C ábra) értékekkel. Mindhárom esetében exponenciális összefüggés tapasztalható, a dinamikus keménység és az optikai paraméter között a legszorosabb az összefüggés ($r^2 = 0,96$; RMSEP = 6,136%; RPD =

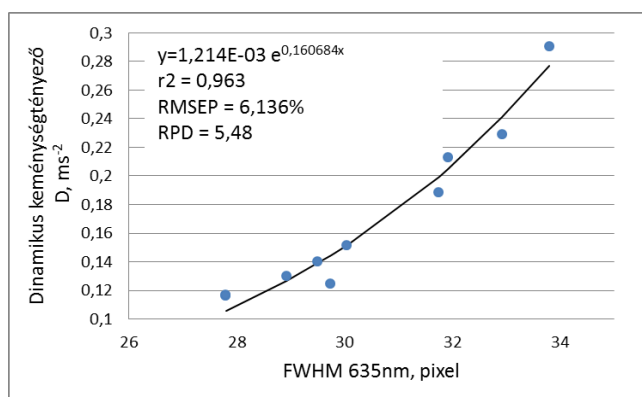
5,48). SLOPE estében nem mutatott egyik keménységtényező sem ilyen erős összefüggést, ami arra utal hogy a keménység változása a profilok gradiensére nincs jelentős hatással.



A



B



C

37.ábra A diffúz reflexiós paraméter (635 nm hullámhosszon mért profilokkal)

Az impakt keménységgel kapott szorosabb összefüggést az magyarázza, hogy az akusztikus keménység globális keménységre (Muha 2008), viszont az impakt keménység felületi keménységre utal (ez a jellemző azonos helyen mért, mint a diffúz reflexiós módszer esetében). A keménység és a diffúz reflexiós tényező között - a 635 nm hullámhosszúságú lézerrel mért eredményekhez hasonlóan - szoros összefüggést tapasztaltam, amely egybevág Lu és Peng (2006) által mért eredményekkel. Cikkükben leírták, hogy Magness-Taylor féle penetrometriás és hiperspektrális módszerrel kétféle őszibarack ('Red Haven' és 'Coral Star') keménységét vizsgálták. A méréseik során 153 spektrális szórás profilt készítettek 500-1000 nm tartományban.

A fény szóródása alapján az adott hullámhossz értékeken kétparaméteres Lorentz-féle eloszlásfüggvényt illesztettek (19.egyenlet) (az illesztés jóságát mutatja, hogy a determinációs együtthatók átlagos értéke $r^2 > 0,999$), a keménységet keresztvalidációs multi-lineáris regressziós modellel becsülték. A keménységgel legjobban a 677 nm-en mért értékek korreláltak, ez a klorofillre jellemző elnyelésre utal.

[19]

$$I_{w_i} = \frac{a_{w_i}}{1 + (x/b_{w_i})^2}$$

A legjobb keménység becsléshez 10 hullámhosszon (603, 616, 629, 642, 648, 664, 671, 677, 690, 707 nm), a 'Red Haven' esetében és 11 hullámhosszon (625, 645, 661, 671, 674, 677, 947, 957, 976, 980, 996 nm) a 'Coral Star' mintánál használtak. A becslések során kapott determinációs együtthatók 'Red Haven'-nél $r^2=0,77$, míg a 'Coral Star' esetén $r^2=0,58$ -nak adódtak. A függvény paramétereit használták fel a becslésekhez független változóként, melyek leírták a profilok csúcs értékeit és a szóródás teljes szélességét. Az eredmények alapján, a barackok esetében kutatók úgy gondolták, hogy a hiperspektrális rendszerrel felvett szóródási profilok potenciálisan alkalmasak roncsolásmentes keménység becslésére.

Az 38.a ábrán látható, hogy a kérdéses szakaszon (630-680 nm) nagy variabilitása van a Lorentz függvény 'a' paraméterének, ami a mellette levő (a hullámhossz függvényében ábrázolt) korrelációs koefficiens grafikonból is kiderül. A Lorentz függvény 'b' paraméterének változásában kevésbé kivehető a tipikus szakaszon a nagy variabilitás (38.ábra bal b), ugyanakkor a mellette lévő korrelációs görbén már szembetűnő.

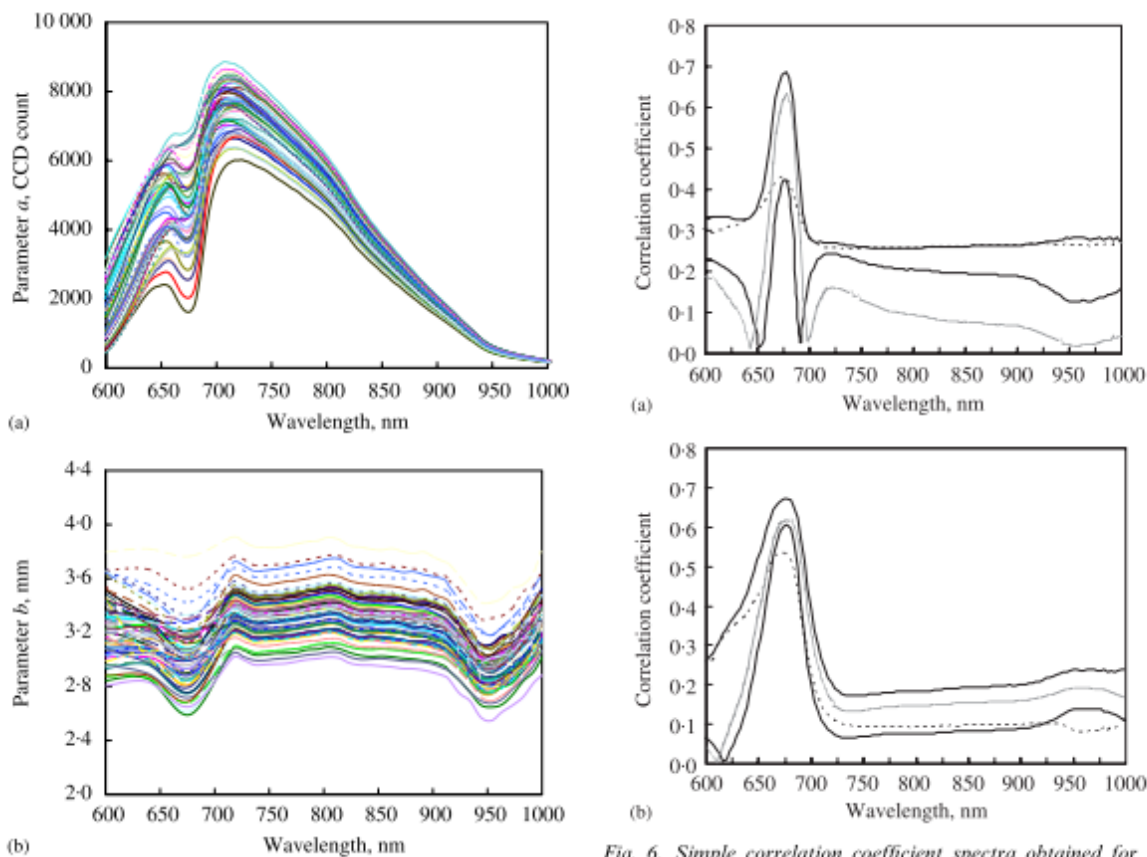


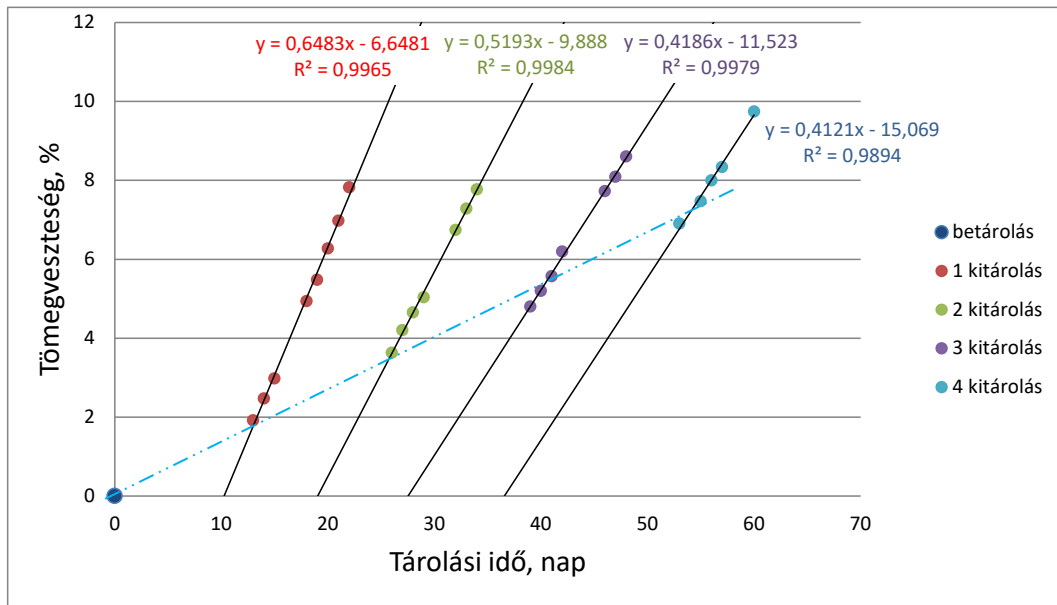
Fig. 5. Spectra of Lorentzian parameters a and b for selected peach samples; a represents the peak scattering intensity in CCD count, with no unit; b is the full width of the scattering profile at one half of the peak intensity, in mm

Fig. 6. Simple correlation coefficient spectra obtained for the four parameter combinations over the wavelengths between 600 and 1000 nm for 'Red Haven' (a) and 'Coral Star' (b) peaches; —, a , the peak value of scattering profiles; - - -, b , the full width at one half of the peak value; —, $a \times b$, the multiplication of a and b ; —, a & b , two independent parameters for each wavelength

38. ábra Lorentz paraméterek változása (forrás: Lu és Peng, 2006)

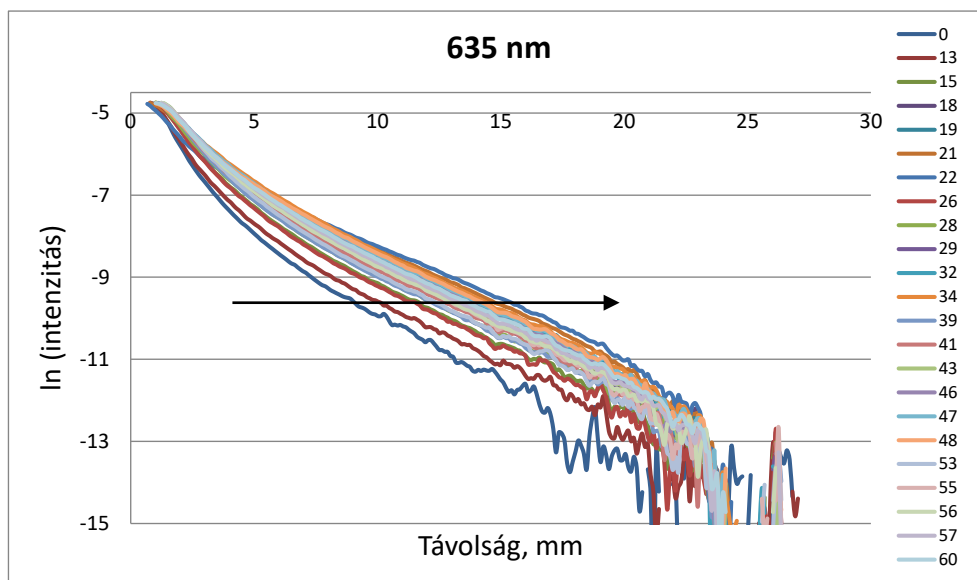
5.4 A körte tárolási kísérlet eredményei

A kísérlet során különböző tárolási körülményekkel szimuláltam az ideális és nem ideális tárolást. A kétféle hőmérsékleten (hűtő és szoba) tárolt minták fizikai paraméterei eltérő sebességgel változtak a tárolási idő függvényében. A körteminták nagy variabilitása miatt a napi átlagértékeket használtam fel a kiértékelésekhez. A 39. ábrán látható a négy kitárolást követő tömegvesztés változása. A tömegvesztés a víztalom változását mutatja, ami hatással van a szerkezetre. A kitárolások után lineáris az összefüggés a tömegvesztés és a tárolási idő között az egyes csoportokban, mivel az illesztett lineáris függvények $R^2 = 0,989-0,998$ tartományon helyezkedtek el, valamint a körteminták eltérő mértékben veszítették tömegüket. Az eltérő sebességre utal az ábrán lévő illesztett egyenesek meredekség értékeinek változása (meredekség = 0,648 - 0,412). Az első kitárolást követően figyelhető meg a legintenzívebb tömegvesztés változás (meredekség=0,648). Az ábrán az is jól látható, hogy a hűtőtárolóban (szaggatott vonallal jelölt) a minták lassú tömegvesztésen esnek át.



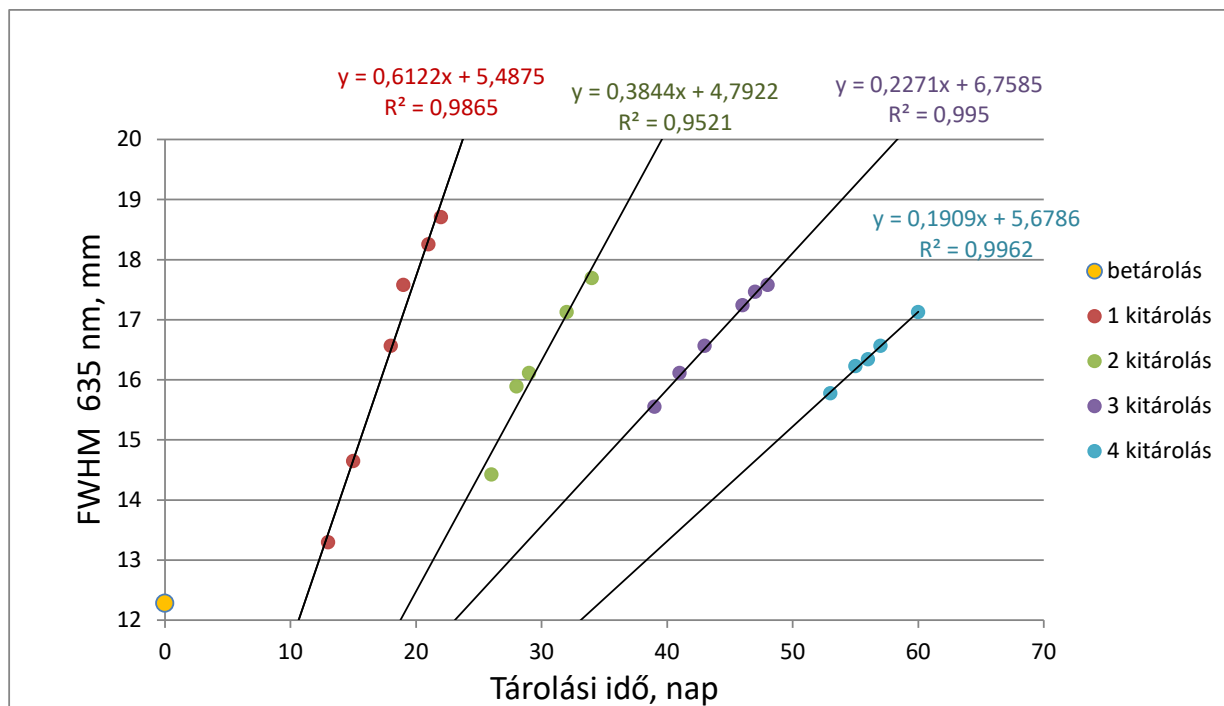
39. ábra Tömegveszteség változása a tényleges tárolási idő függvényében

A körtemintákról a 635 nm hullámhosszú lézerrel indukált szöveti képekből készített naponta átlagolt diffúziós profiljait készítettem el. Minden így kapott görbéből kiszámítottam a transzformációs profilokat (40. ábra) az 5.1.2 pontban lévő 18. egyenlettel felhasználásával. Az ábrán az látszik, hogy a profilok alakjában van változás. Jól mutatja, hogy a mérési napok előrehaladtával a módszer detektál a tárolás során lejátszódó egyfajta változást (nyíllal jelöltem a tárolási idővel bekövetkező változást).



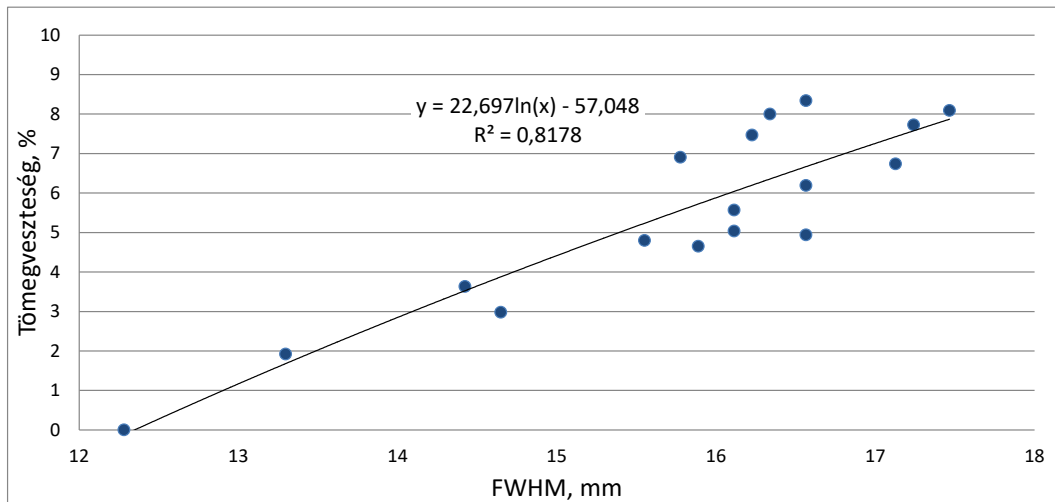
40. ábra Mérési naponként átlagolt 635 nm hullámhosszon mért logaritmikus intenzitás profilok

A szemléletesebb bemutatás és a mélyrehatóbb elemzés érdekében az előző ábrán bemutatott profilokhoz tartozó FWHM értékeket ábrázoltam a tárolási idő függvényében (41. ábra). Ennél az ábránál hasonló tendencia figyelhető meg, mint a tömegveszteség változásánál a tárolási idő függvényében (39. ábra), ezért elkészítettem hasonlóan a tömegveszteség változásához, a lineáris illesztéseket ($R^2 = 0,90-0,98$; meredekség = 0,16-0,05-ig változtak) az intenzitás értékekre (41. ábra). Az eredmények alapján elmondható, hogy a diffúz reflexiós profilok FWHM értékei hasonló tendenciát mutatnak, mint a tömegveszteség változása.



41. ábra 635 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok FWHM értékeinek változása a normál tárolási idő függvényében

A kiugró érték elemzés után függvénykapcsolatot kerestem a tömegveszteség és az FWHM értékek között, amit a 42. ábrán mutatok be. A két fizikai paraméter között szoros ($R^2 = 0,818$) lineáris kapcsolat figyelhető meg. Ebből az összefüggésből arra következtethetünk, hogy a profilok szélességének változására nagy hatással van a víztartalom csökkenése, mivel a tömegveszteség a víztartalom csökkenéséből ered. Főként a sejtek között lévő víztartalom csökkenése valamint az állományt meghatározó anyagok (keményítő, pektin) mennyiségének változása eredményezi a puhulást, ezért várható, hogy a profilokból kinyert adatokkal becsülhető a keménység.



42. ábra Tömegvesztés (%) függvényében az 635 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok FWHM értékeinek változása

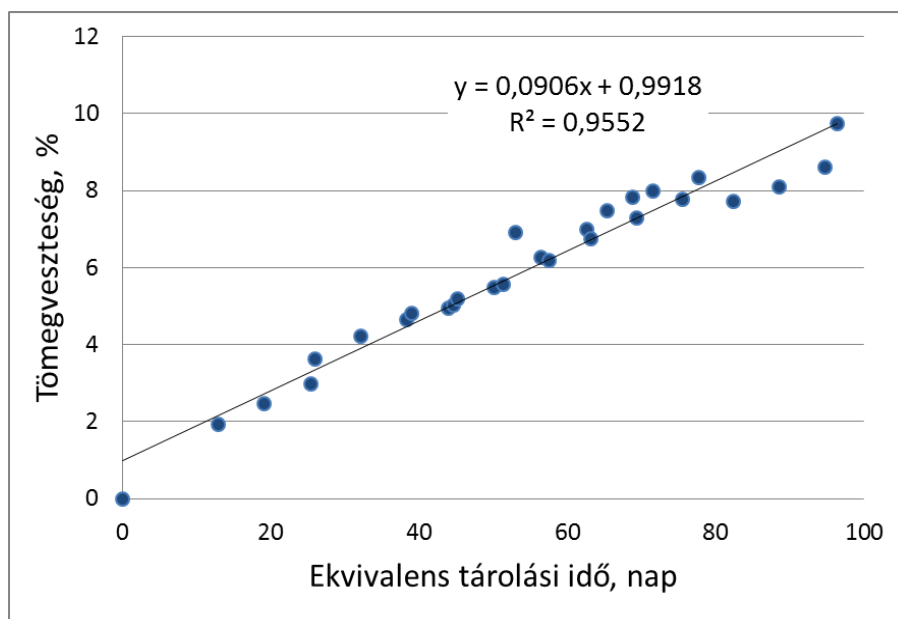
A fizikai változások modellezése érdekében szükség volt az eltérő hőmérsékleten tárolt minták fizikai jellemzőinek egyenértékesítésére. A tömegvesztés (39.ábra), mint az adott tárolási körülményt jól jellemző paramétert vettük alapul az egyenértékű tárolási idő érték (Storage Time Equivalent Value, STEV) számításához. Az így kapott összefüggést a 20. egyenlet írja le. A transzformációról részletesebben az elkészült publikációnkban írunk (Zsom et al. 2014). Az ekvivalens tárolási idő bevezetésével a különböző hőmérsékleten tárolt minták mért jellemzői az eredetileg eltérő időbeli változásuk ellenére egységesen elemezhetővé váltak. A fizikai jellemzők változása (pl. puhulása) exponenciális egyenlettel közelíthető a tárolási idő függvényében.

[20]

$$t_{\text{ekvivalens}} = t_{\text{tényleges_szoba}} \times C_x + t_{\text{tényleges_hűtő}}$$

ahol: adott mintára $C_x=5,2$

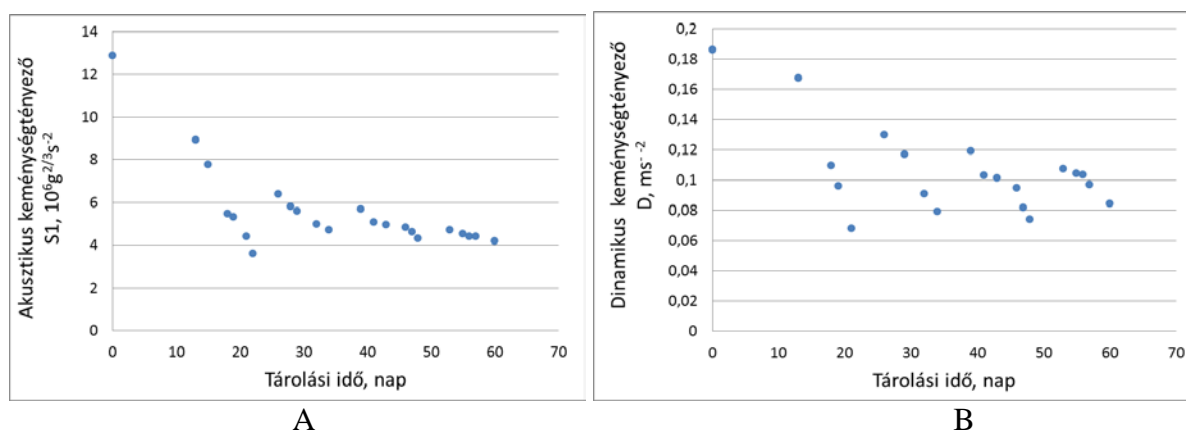
Az ekvivalens tárolási idő bevezetésével a négy tárolási csoport szakaszossága megszűnt, a 43. ábrán láthatóan egy egyenesre sorolódnak a pontok. Ez a transzformáció lehetővé teszi a teljes tárolás eredményeinek egységes kezelését.



43. ábra A tömegveszteség (%) alakulása az ekvivalens tárolási idő függvényében

5.4.1 A tárolási idő és a keménység tényezők kapcsolata

A tárolás alatt lejátszódó keménységváltozást két fizikai paraméter időbeli lefutásával a 44. ábra szemlélteti (akusztikus (A) és dinamikus (B) keménységtényező). Az akusztikus keménység értékeiben exponenciális lecsengésű változás figyelhető meg, mindkettő esetében a tömegveszteségnél bemutatott (41. ábra) szakaszosság kivehető.



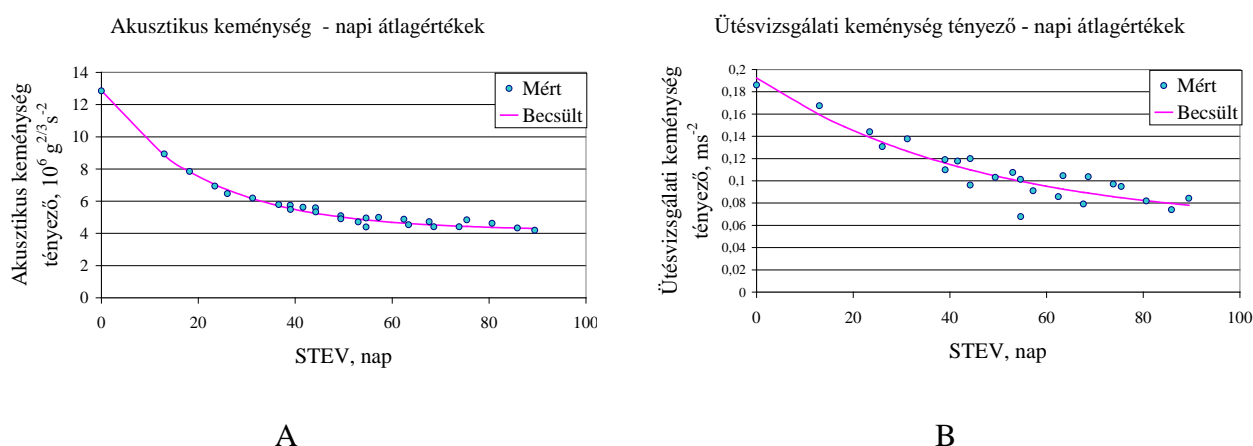
44. ábra A körteminták akusztikus (A) és dinamikus (B) keménységtényezőjének változása a tárolási idő függvényében

Az 45. ábrán látható az akusztikus (A) illetve az ütésvizsgálati (B) keménységtényező változása az ekvivalens tárolási idő (STEV) függvényében. Mindkét keménységtényező változása leírható egy-egy exponenciális egyenlettel. Az akusztikus (21.egyenlet) és az ütésvizsgálati (22.egyenlet) keménységtényező változására illesztett egyenletek a következők:

$$[21] \quad S1 = (12,86 - 4,19) \cdot e^{-\frac{STEV}{21,0}} + 4,19$$

$$[22] \quad D = (0,192 - 0,059) \cdot e^{-\frac{STEV}{45,8}} + 0,059$$

Az ekvivalens tárolási idő (STEV) bevezetésével a szakaszosság megszűnt, viszont az akusztikus keménység értéke továbbra is exponenciálisan változott, ami a 45. ábrán megfigyelhető. Az illesztett görbe jól jellemzi az akusztikus ($R^2=0,989$) és az ütésvizsgálati ($R^2=0,851$) keménység tényezők változását, amit a determinációs együtthatók értéke igazol.

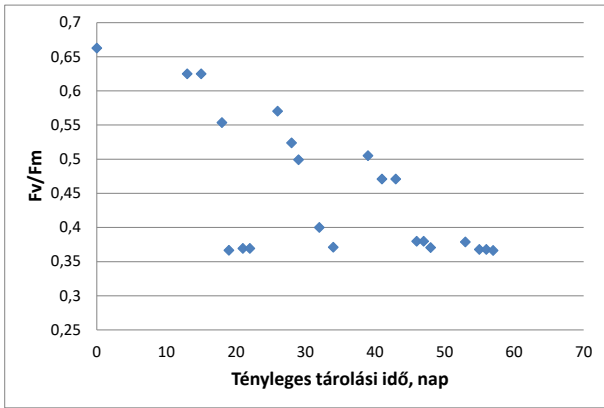


45. ábra A körteminták akusztikus (a) és ütésvizsgálati (b) keménység tényezőjének változása a STEV függvényében (Dénes et al. 2013)

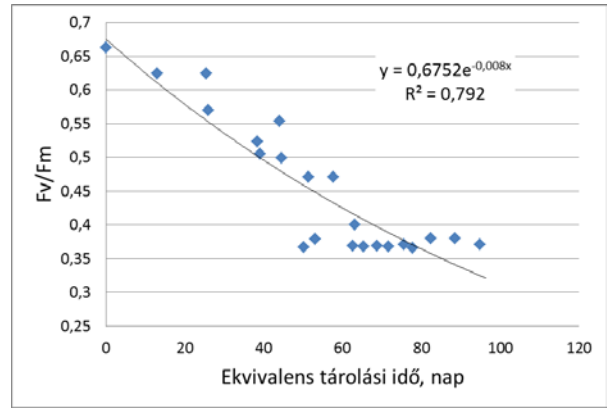
Összességében elmondható, hogy az ekvivalens tárolási idő bevezetésével a két fizikai paramétert egységesen tudtam kezelni, mely összevont adatsor időbeli változása exponenciális összefüggéssel írható le.

5.4.2 A tárolási idő és a klorofill fluoreszencia kapcsolata

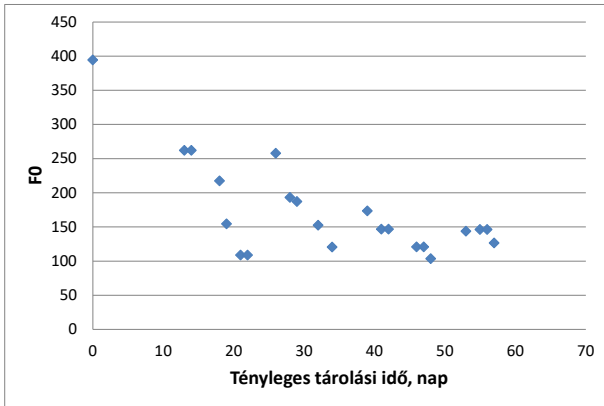
Klorofill fluoreszenciás (F_0 , F_m , F_v/F_m) átlagos értékeket normál (46.A, C, és E ábrák) és ekvivalens tárolási idő (46.B, D és F ábrák) függvényében ábrázoltam. A normál tárolási idő ábrázolásánál hasonló tendencia figyelhető meg, mint a tömegveszteség, keménység és diffúz reflexiós paramétereknél. A ekvivalens tárolási idő bevezetésével a klorofill fluoreszencia is hasonló rendeződést mutat, mint ahogy a keménység és a diffúz reflexiós paraméterek esetében is megfigyelhető volt. A legjobb illeszkedést egy exponenciális lecsengésű görbén érik el (46.B, D és F ábrák). A legjobb illeszkedés F_m értékek esetében volt tapasztalható, ahol $R^2=0,874$.



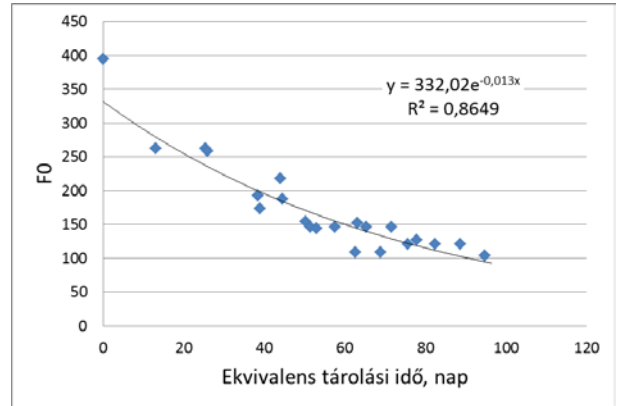
A



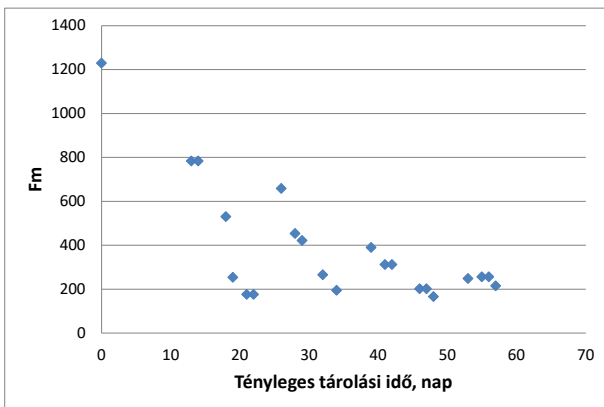
B



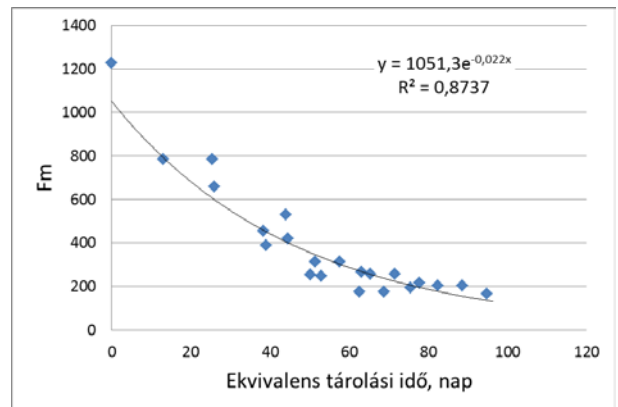
C



D



E

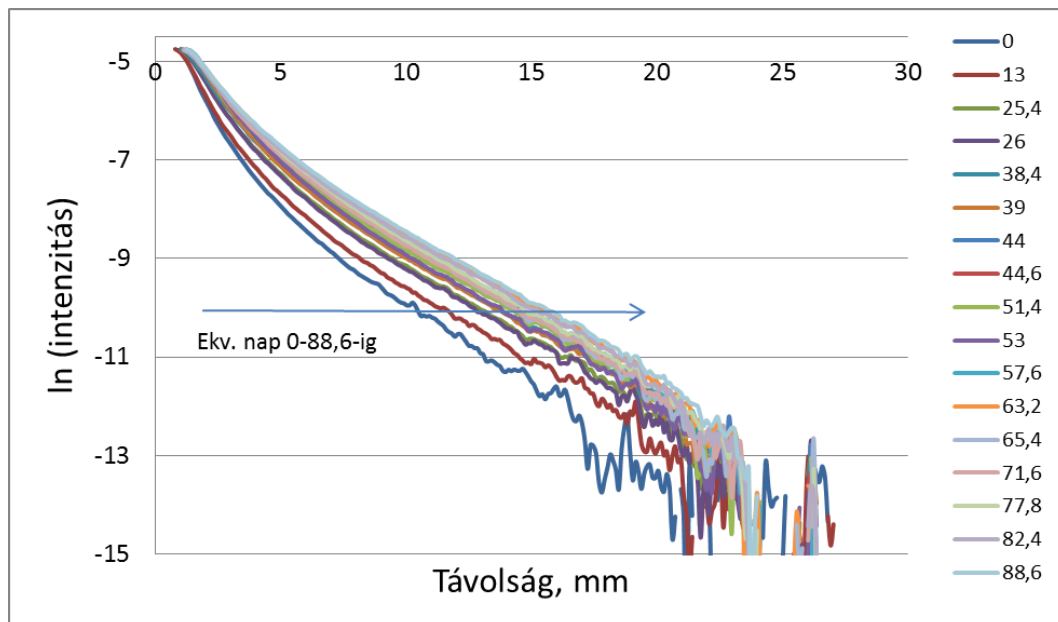


F

46. ábra Klorofill-fluoreszcencia változása a tényleges és az ekvivalens tárolási idő függvényében

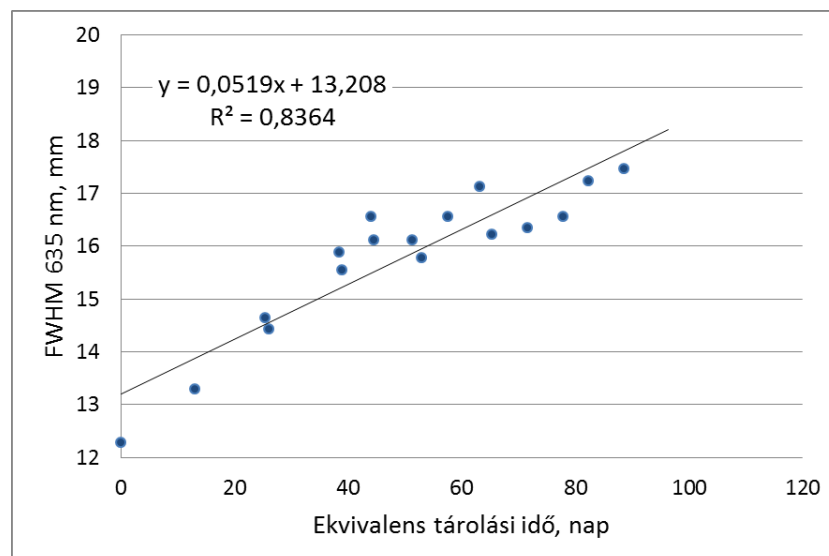
5.4.3 Az ekvivalens tárolási idő és a diffúz reflexiós paraméterek kapcsolata

A 47. ábrán láthatóak az ekvivalens tárolási időhöz hozzárendelt átlagos logaritmusos intenzitás profilok. Az intenzitás profilok szélessége nőtt az ekvivalens idő függvényében.



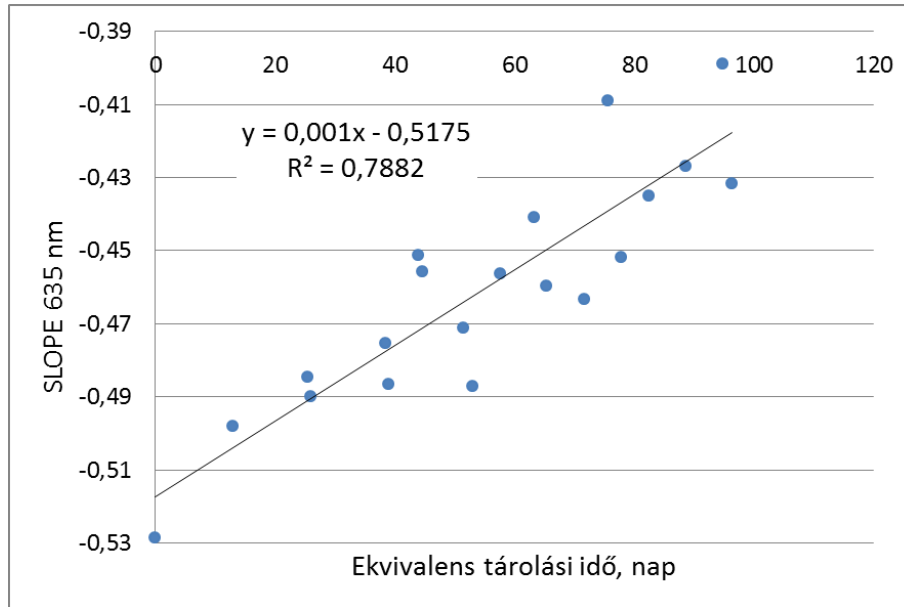
47.ábra A mérési naponként átlagolt 635nm hullámhosszon mért logaritmusos intenzitás profilok változása ekvivalens tárolási idő jelölésével

A szemléletesebb bemutatás érdekében ábrázoltam a 48. ábrán az FWHM értékeket a STEV függvényében. Az ekvivalens idő sorba tudta rendezni a profilokat, egy egyenesre rendezte a pontokat ($R^2 = 0,836$) a 41. ábrán bemutatott normál tárolási idővel ellentétben.



48. ábra 635 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok FWHM értékeinek változása az ekvivalens idő függvényében (STEV)

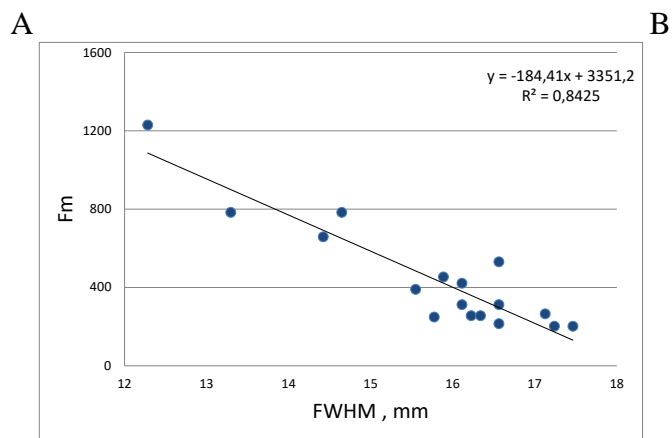
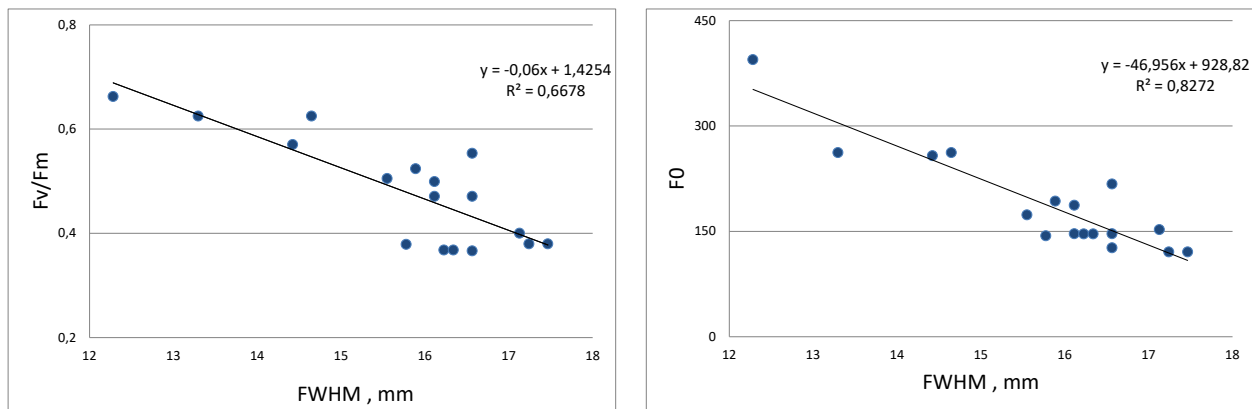
A logaritmusos profilok SLOPE értékeinek változása az 49. ábrán látható, ahol a változás lazább kapcsolatban ($R^2 = 0,79$) van az ekvivalens idővel, mint az FWHM értékek esetében. Ebből arra következtethetünk, hogy a tárolási idő előrehaladtával a profilok szélesedésén kívül kis mértékben azok gradienseire is hatással van a tárolás.



49.ábra A 2,7-9 mm távolság tartományon mért meredekségek a STEV függvényében

5.4.4 A klorofill fluoreszencia és az FWHM (635 nm) értékek kapcsolata

A klorofill fluoreszenciás és diffúz reflexiós mérések során azonos mérési pontokon elemeztem a körte mintákat. A klorofill fluoreszencia három tényezője (F_v/F_m , F_0 és F_m) és a diffúz reflexiós paraméter között lineáris összefüggés tapasztalható (50. ábra). A két módszer közötti összefüggés az F_m érték esetében volt a legszorosabb ($R^2 = 0,842$).



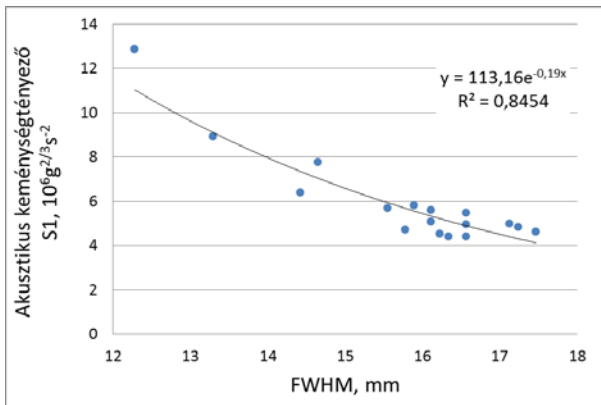
C

50. ábra A klorofill-fluoreszcencia paraméterek függvényében az 635 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok FWHM értékeinek változása

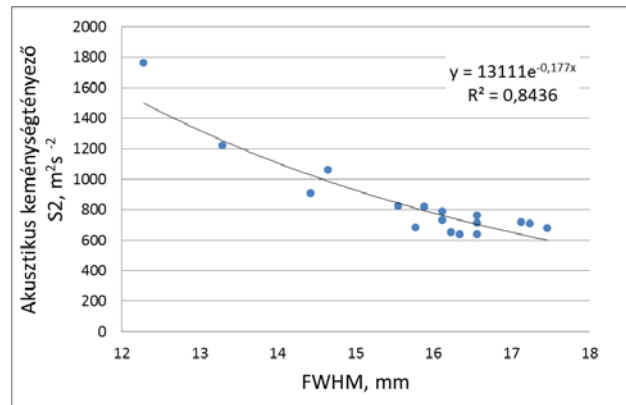
A két paraméter közötti erős kapcsolat feltételezhető, mivel mindkét mérés a klorofill elnyelési hullámhossztartományán dolgozik, így hasonló komponens változását detektálják.

5.4.5 A keménység és a diffúz reflexiós paraméterek kapcsolata

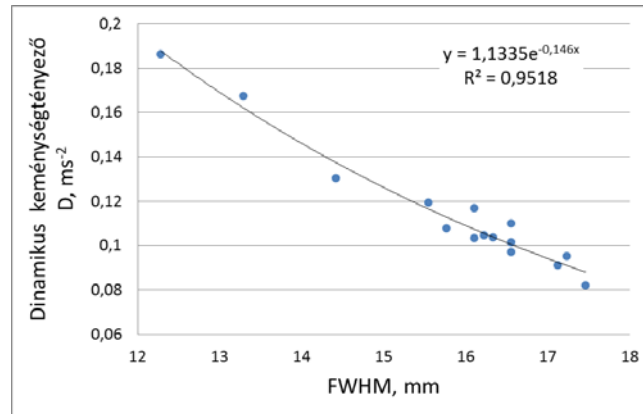
A keménység és diffúz reflexiós paraméterek hasonló lefutásúak. A diffúz reflexiós paraméterek és a keménység tényezők összehasonlításával láthatóvá válik, hogy a két különböző módszerrel mért eredmények hasonló változásra utalnak. Az 51. ábrán a 635 nm hullámhosszú lézerrel mért profilok FWHM értékeinek változását hasonlítom össze az akusztikus (51.A, B ábrák) és dinamikus keménység (51.C ábra) értékekkel. Az akusztikus esetében exponenciális összefüggés ($R^2 \geq 0,89$), a dinamikus keménységgel szorosabb lineáris összefüggés ($R^2 = 0,957$) tapasztalható. A SLOPE estében nem mutatott egyik keménységtényező sem ilyen szoros összefüggést, ami arra utal, hogy a keménység változása a profilok gradiensére kevésbé van hatással.



A



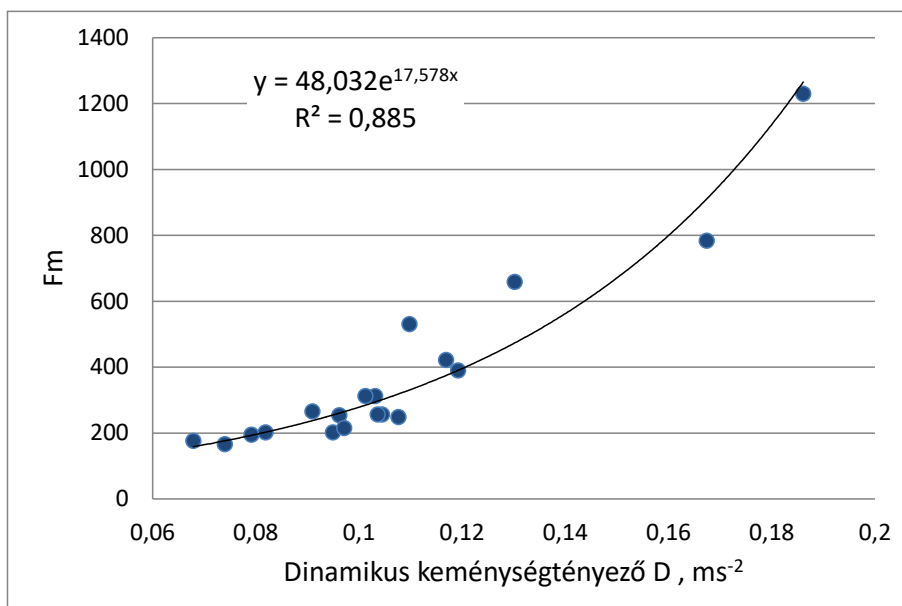
B



C

51. ábra Akusztikus keménység (A, B) és felületi keménység tényező (C) és a 635 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok FWHM értékeinek kapcsolat

Az 5.3 bekezdésben leírt eredmények is igazolják, hogy a 635 nm hullámhosszú lézerrel mért sztenderdizált profilfeldolgozás után a profilra jellemző FWHM érték és a lokális keménységi mutató (D) szoros összefüggésben van ($R^2=0,96$) a napi átlagok esetében. Érintésmentes optikai módszerrel egy szerkezetre utaló keménység jellemzőt tudtam mérni.

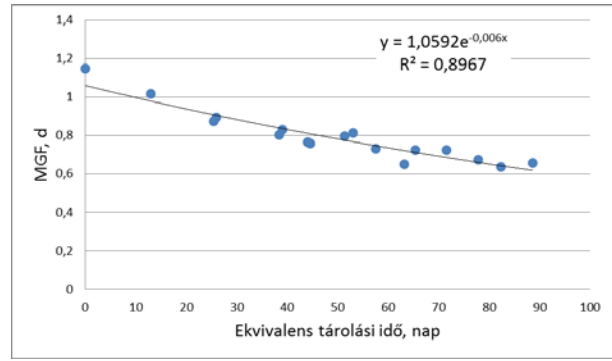
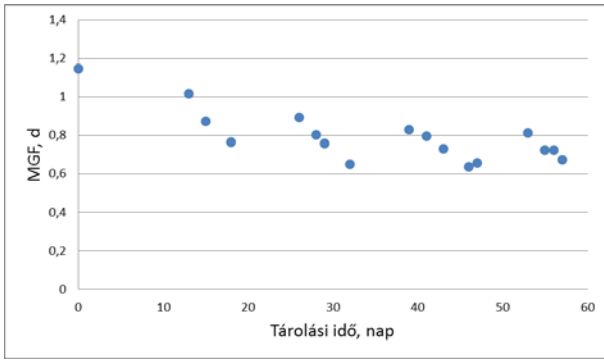


52.ábra Klorofill fluorszencia paraméter (Fm) változása a dinamikus keménység (D) függvényében

Az utóérési szakaszban Bosc-Kobak mintáknál a 630-677 nm tartományon elnyelést eredményező anyagok alakulnak át. Ezek hatására jellemzően megváltozik a gyümölcs szerkezete, ezzel szóródási tulajdonságai, ami a diffúziós profil alakjára hat. Ennél a jelenségénél, anizotrópián (g) kívül nem csak elnyelés (μ_a), de a szóródás (μ_s') is kismértékben szerepet játszik, amit alátámaszt az, hogy a diffúz reflexió mérési ponttal megegyező helyen mért klorofill-fluoreszcenciás értékek kisebb korrelációt mutatnak a keménységgel (52. ábra).

5.4.6 A módosított Gompertz (MGF) függvény illesztése

A diffúz reflexió profilok alternatív kiértékelési módszereként elvégeztem a módosított Gompertz függvény (MGF) illesztését is. A körte tárolási kísérlet 635 nm hullámhosszúságú lézerrel mért profiljaira illesztett MGF függvény d paramétere és a kétféle idő között hasonló tendencia figyelhető meg, mint az FWHM érték változásánál (53.ábra). A normál tárolási idő szakaszossága és az ekvivalens tárolási idő bevezetésével egy exponenciális lecsengésű görbére sorolódtak ($R^2 = 0,897$) a pontok.

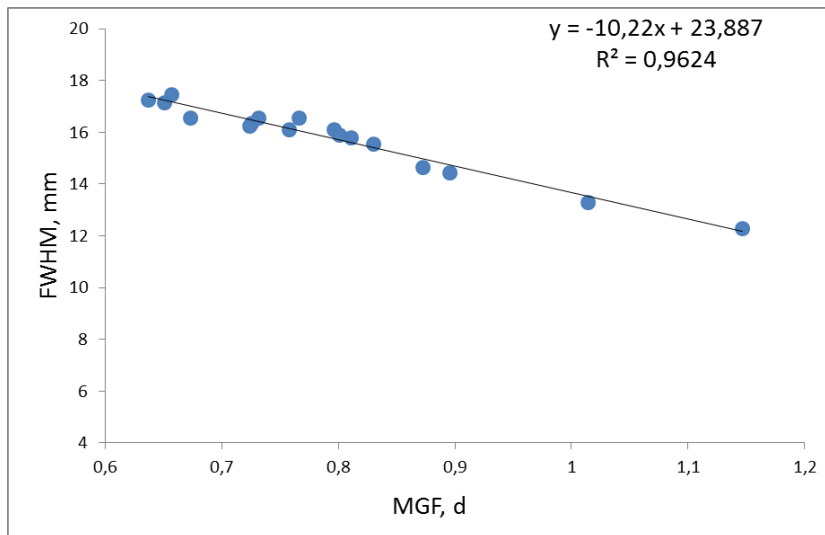


A

B

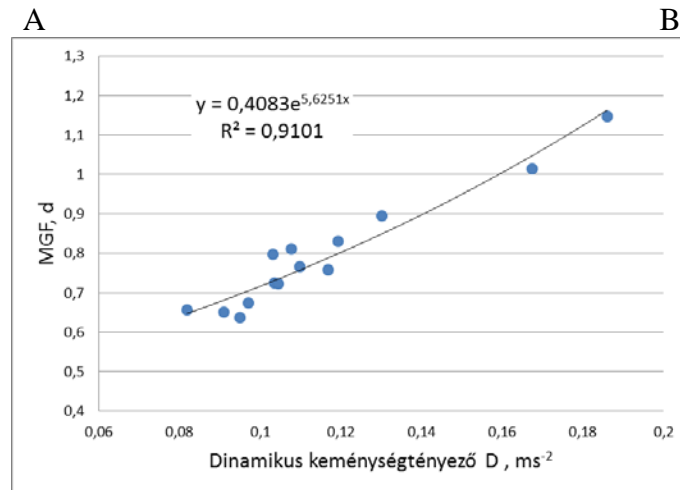
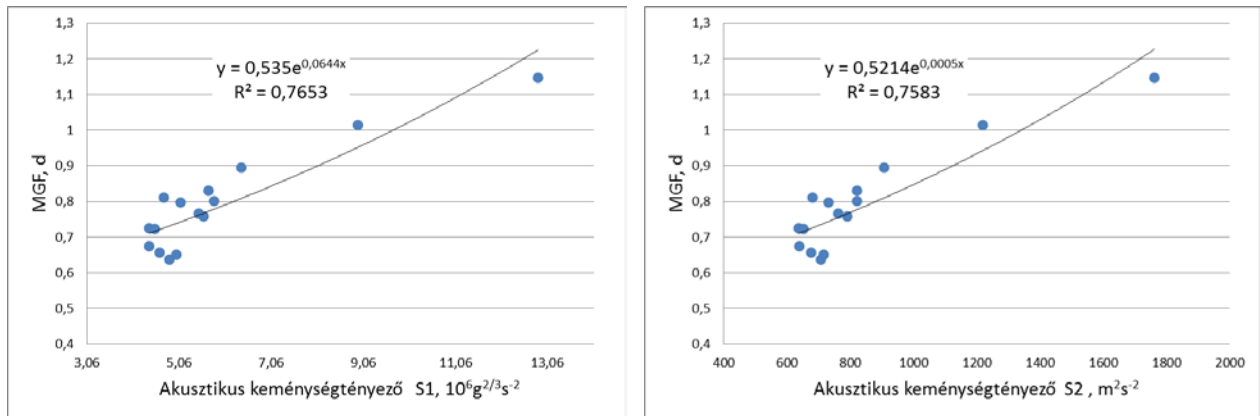
53. ábra MGF d paraméter változása a tényleges (A) és ekvivalens idő (B) függvényében

Az 54. ábrán látható, hogy az illesztett d paraméter és az FWHM értékek között erős összefüggés tapasztalható $R^2 = 0,96$.



54. ábra 650 nm hullámhosszon mért diffúziós profilok FWHM értékeinek változása és az MGF delta paraméter kapcsolata

Érdekes még az MGF d paraméter és a keménység tényezők kapcsolata, melyeknél lazább összefüggés tapasztalható (55. ábra), mint ami az FWHM értéknél volt (51. ábra).



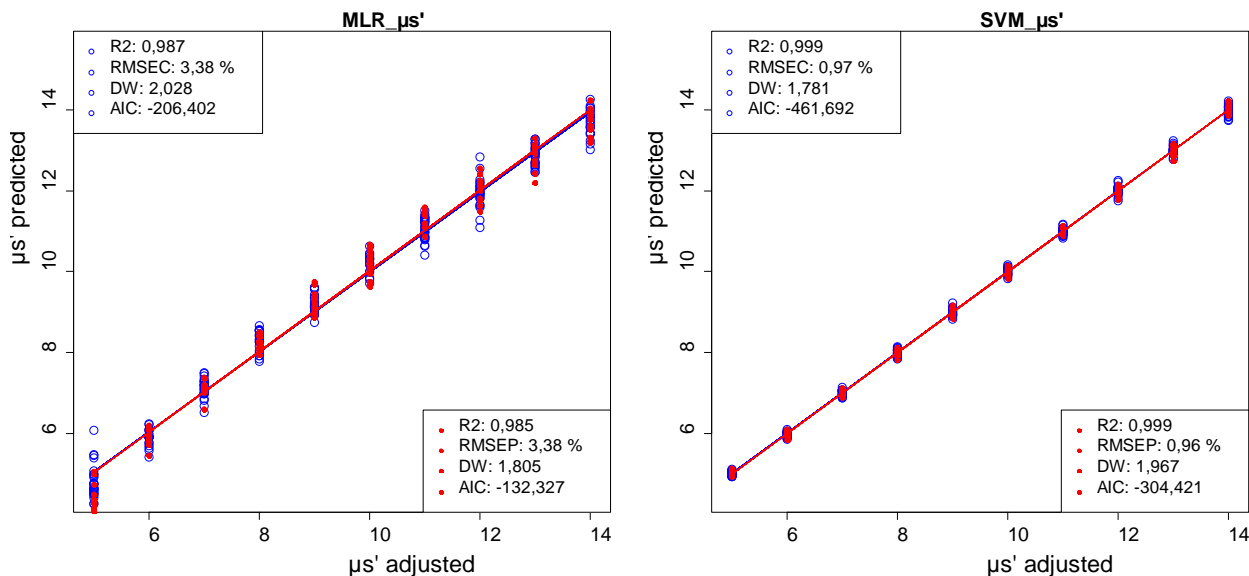
55. ábra Akusztikus keménység (A, B) és felületi keménység tényező (C) és az illesztett MGF d paraméterének kapcsolat

5.5 Monte Carlo szimuláció

Monte Carlo szimulációt végeztem a módosított Gompertz függvény (MGF) együtthatói és a biológiai szövet optikai tulajdonságai (μ_a , μ_s , g) közötti kapcsolat felderítésére. Az illesztéssel kapott predikciós modelleket (lineáris (MLR) és non-lineáris (SVM, kernel: radial)) alkalmaztam a különböző paraméterek becslésére. A négy paraméterből hármat (α , ε és δ) használtam fel minden becsléshez. A β együttható nem hordozott a becslések szempontjából lényegi információt. A predikciós modellek építésénél a becslések megbízhatósága érdekében háromszoros kresztvalidációt (CV) alkalmaztam, ahol az adatok randomizálása után 2/3-ad részével elkészültek a kalibrációs modellek. A maradék része a validációban vett részt és minden elem egyszer szerepelt modellépítésben.

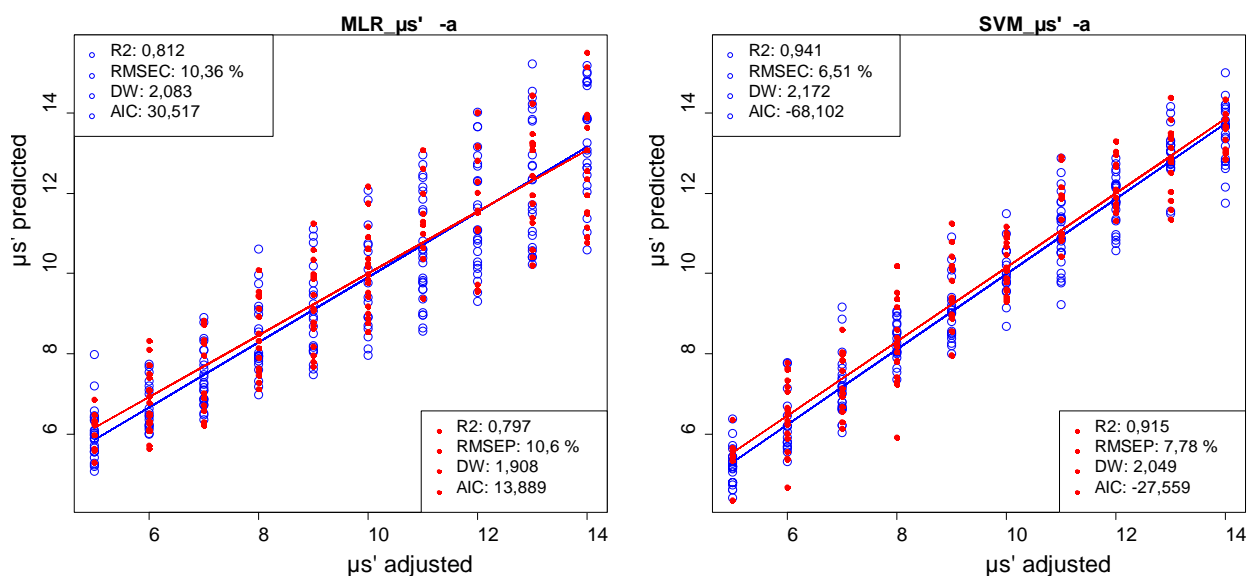
Az 56. ábrákon a μ_s' paraméter (független változó) becslésénél a függő változóknak a profilokra illesztett MGF függvény paraméterek és a μ_a abszorpciós tényező voltak. Kétféle becslést alkalmaztam lineáris (MLR) és nem lineáris (SVM) a predikciós modellépítéshez. Az SVM becslés hozta a legjobb eredményt, amit a determinációs együtthatók $R^2=0,99$, az alacsony

kalibrációs (RMSEC=0,97) és becslési hibája (RMSEP=0,96%) igazol. A felállított modellek szisztematikus hibával nem terheltek a Durbin-Watson teszt alapján (DW= 1,805 és 1,967).



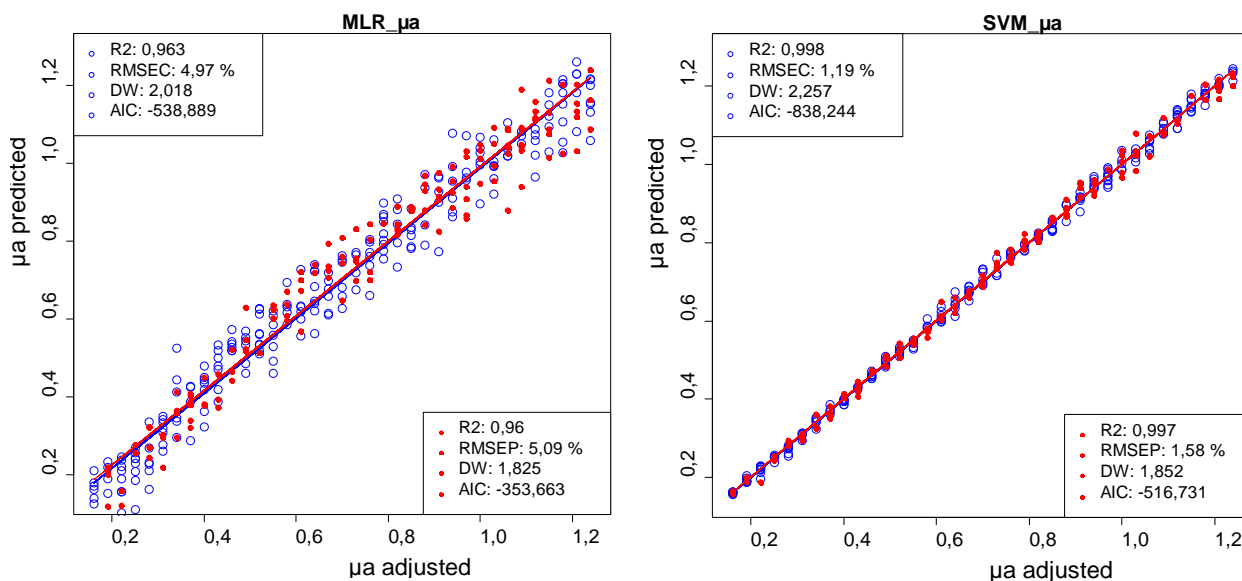
56. ábra Scattering tényező becslése MGF paraméterekkel (α , ε és δ) μ_s' ismeretében

Az 57. ábrán szereplő becslések azt az esetet modellezik, amikor a mérés során sem a μ_s' sem a μ_a tényezőket nem ismerjük. Kizárólag az illesztések után kapott MGF paraméterek felhasználásával közel nyolcszoros hibával RMSEP=7,78% lehetett megbecsülni a μ_s' értékét SVM módszerrel. Ez az eredmény azt mutatja, hogy az szóródásért és elnyelésért felelős paraméterek (μ_s' és μ_a) jelentős hatást gyakorolnak a profilok alakjára és a kölcsönhatásuk nem elhanyagolható. Ez esetben a nem ismert μ_a paraméterben rejlő információ hiánya lerontja a független paraméterek becslésének pontosságát.



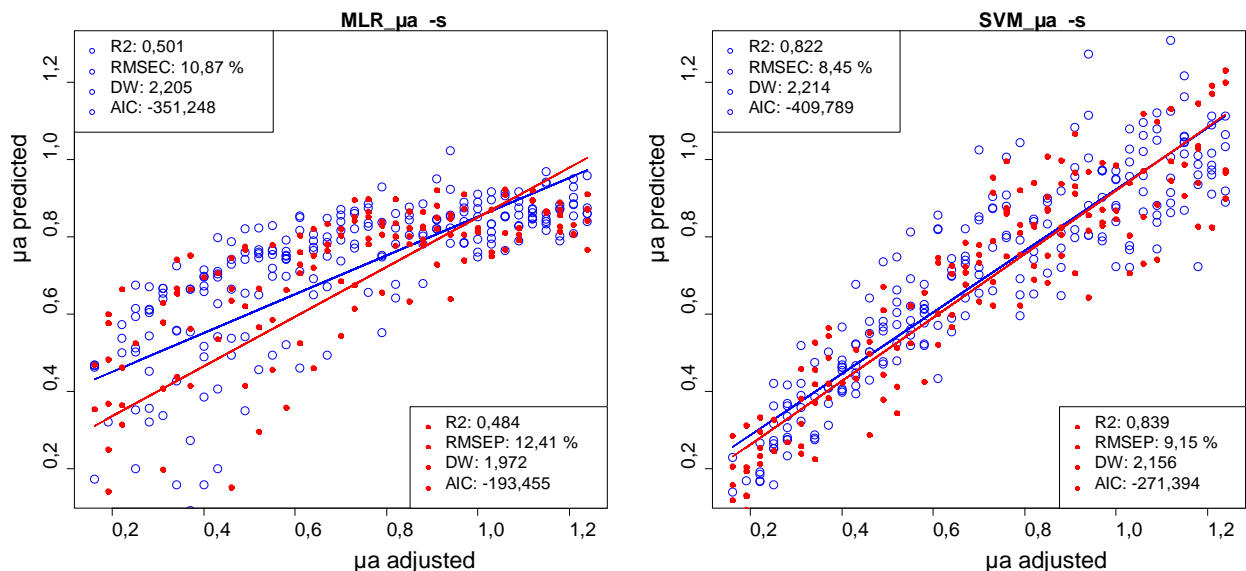
57. ábra Szóródási tényező becslése MGF paraméterekkel (α , ε és δ)

Az 58. ábrán a μ_a paraméter becslései láthatók. A kétféle modell közül az SVM módszer hozta a jobb eredményt, amit a determinációs együttható $R^2=0,997$, az alacsony kalibrációs (RMSEC=1,19%) és becslési hiba (RMSEP=1,58%) is igazol. A felállított modellek szisztematikus hibával nem terheltek a Durbin-Watson teszt alapján (DW= 2,02 és 2,26).



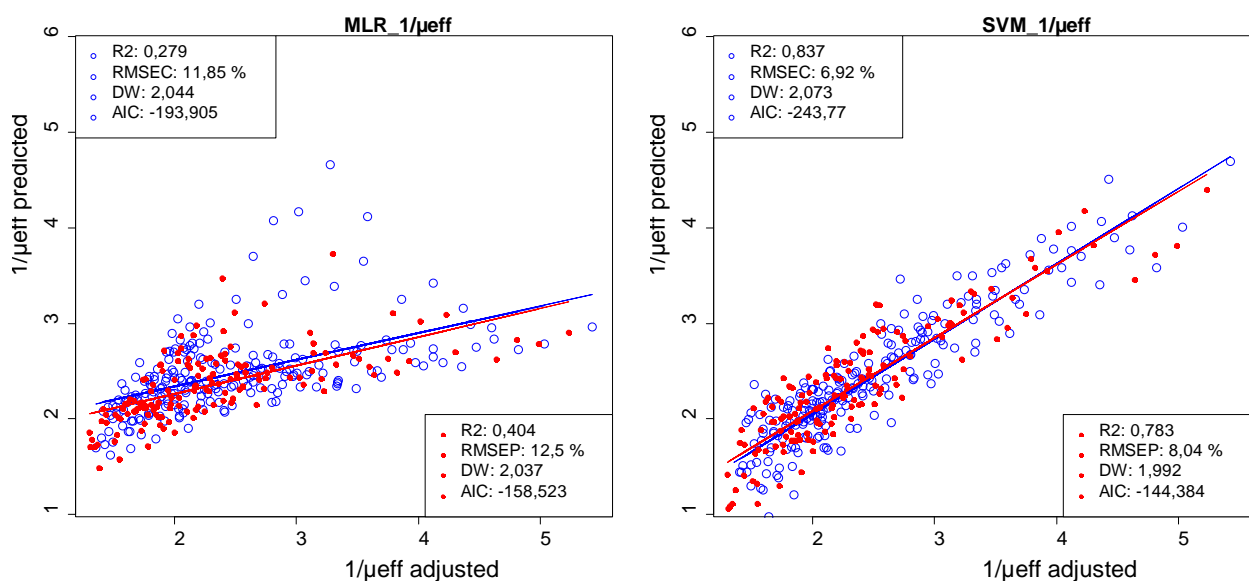
58. ábra Abszorpciós tényező becslése MGF paraméterekkel (α , ϵ és δ) μ_s ismeretében

A 59. ábrán szereplő becsléseknél modelleztem azt a helyzetet, amikor sem a μ_s sem a μ_a tényezőt nem ismerjük. Kizárólag a MGF paraméterek felhasználásával közel hétszer nagyobb hibával (RMSEP=9,15%) lehetett megbecsülni a μ_s értékét az SVM módszerrel. Továbbra sem jelentkezett szisztematikus hiba a modellekben a Durbin-Watson teszt alapján. A 58. és 59. ábrán bemutatott eredmények azt mutatják, hogy a μ_s paraméterben rejlő információ hiánya jelentősen lerontja a független paraméter becslésének pontosságát.



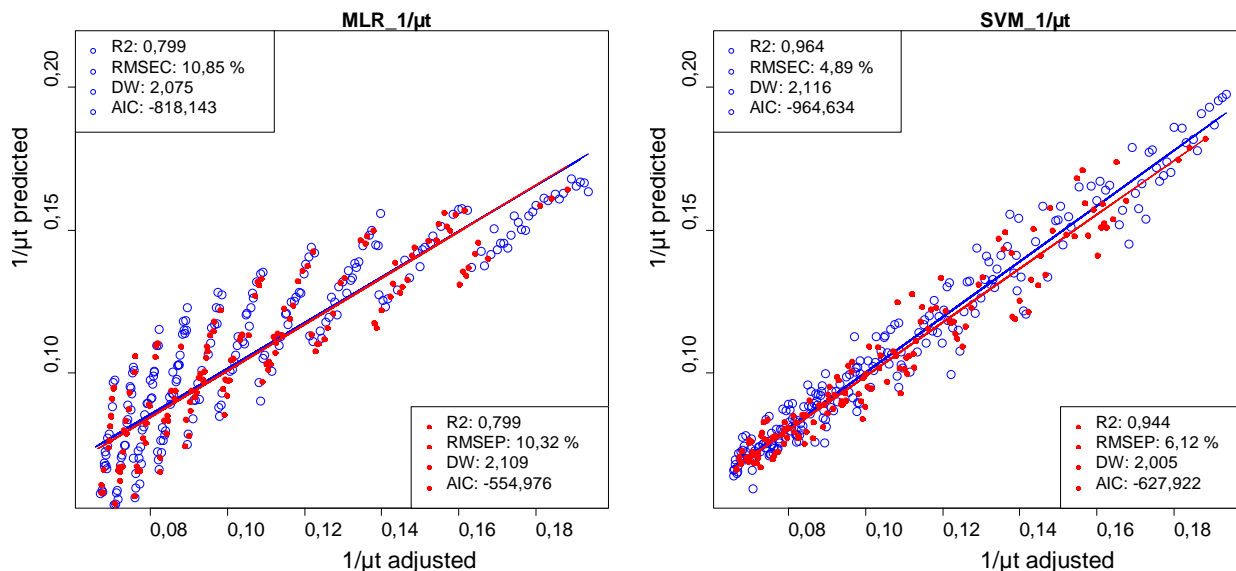
59. ábra Abszorpciós tényező becslése MGF paraméterekkel (α , ε és δ)

A behatolási mélység ($1/\mu_{\text{eff}}$) becslése során (60. ábra) megfigyelhető egyfajta nem lineáris összefüggés a függő és független változók között. Ennek a paraméternek a becslése során is az SVM módszer hozta a legjobb eredményt RMSEP=8,27% és $R^2=0,79$ determinációs együttható mellett. Szisztematikus hibával egyik modell sem terhelte.



60. ábra Behatolási mélység becslése MGF paraméterekkel (α , ε és δ)

Az 61.ábrán szereplő becsléseknél az MLR módszernél $1/\mu$ (diffúziós együttható) értékeiben megfigyelhető egyfajta elfordulás a mért és becsült paraméterek között, ami az SVM módszerrel nem volt tapasztalható. Az SVM becsléssel közel egy egyenesre tudta hozni a $1/\mu$ értékeit alacsonynak mondható hibával (RMSEP=5,71%), autókorreláció mentesen (DW=2,2) és szoros illeszkedés mutató determinációs együttható ($R^2=0,95$) mellett.

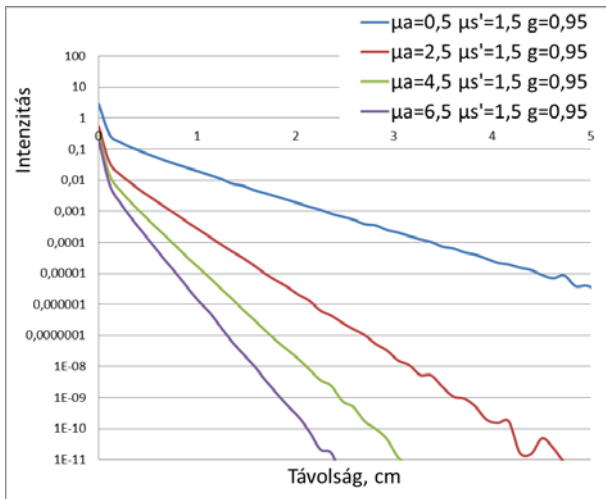


61. ábra Diffúziós együttható becslése MGF paraméterekkel (α , ε és δ)

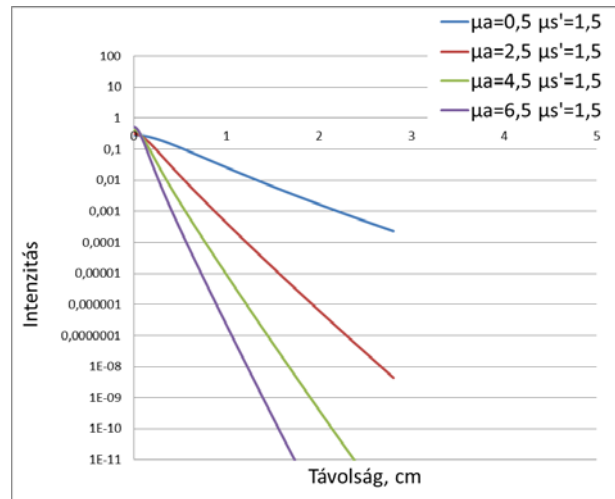
Összességében elmondható, hogy mind a négy féle paraméter (μ_a , μ_s' , μ_{eff}^{-1} és μ_t^{-1}) becslésénél az SVM módszer bizonyult a legjobbnak. A legjobb független becslés a diffúziós tényező ($1/\mu_t$) esetében volt a legjobb, ahol $R^2=0,948$ és a becslés hibája alacsony $\text{RMSEP}=5,71\%$ lett. Egyik esetben sem volt a becslés autokorrelációval terhelve ($1,7 < \text{DW} < 2,3$).

5.6 Az elméleti és a szimulációs profilok összehasonlítása

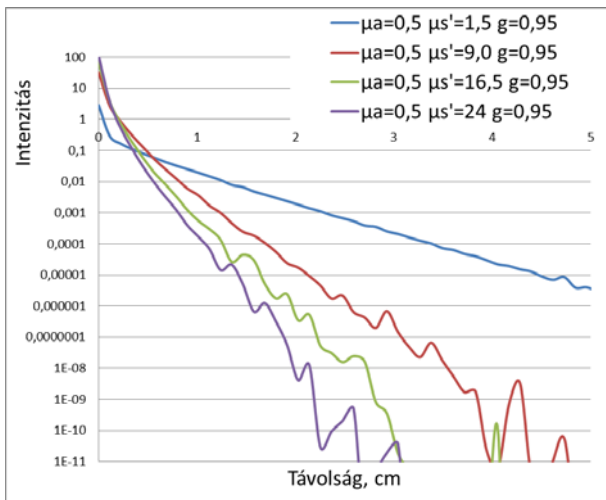
A kétféle módszerrel (Monte Carlo és Farrell) számított diffúziós profilok láthatóak a 62. ábrán. A és B ábrán a μ_s' értékét rögzítettem, míg a C és D ábráknál a μ_a értékét. Az összehasonlíthatóság érdekében logaritmikus skálázást alkalmaztam az y tengelyeken. Az MC módszerrel hosszabban lehet szimulálni a fotonok útját, mint a Farrell modell segítségével. A két modell között az is eltérés, hogy az MC szimulációnál g paraméter, míg a Farrell modellnél törésmutató (A) paraméter van jelen. A szimulációknál figyelembe vettem ezen két paraméter beállításánál a szakirodalmi adatokat, ahol a termények esetén $g = 0,95$ és $A = 2,2$ értéket alkalmaznak. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a két módszer eredményei hasonlóak, amit a Spearman féle rangkorreláció is igazolt ($r > 0,98$).



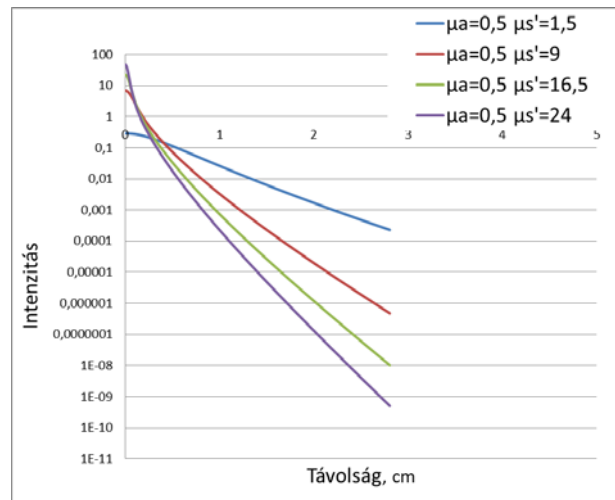
A



B



C

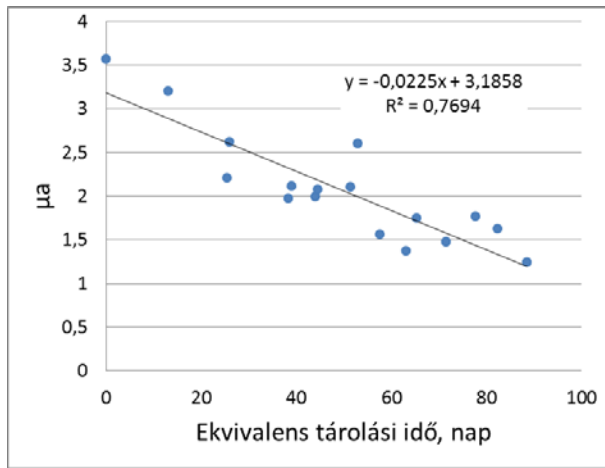


D

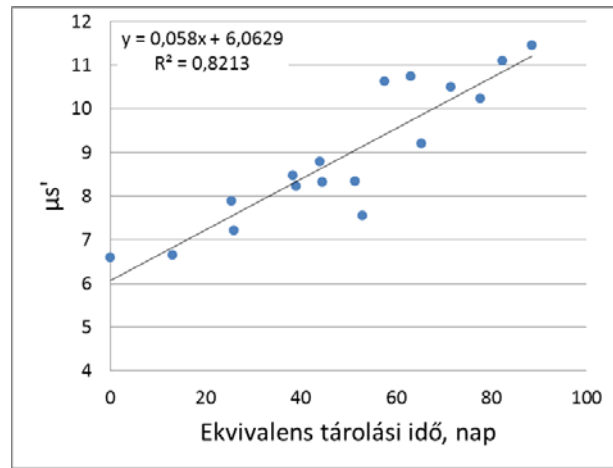
62. ábra Monte Carlo szimulációval (A és C) és a Farrell modellel (B és D) számított profilok összehasonlítása

5.7 SVM modellekkel becsült optikai paraméterek

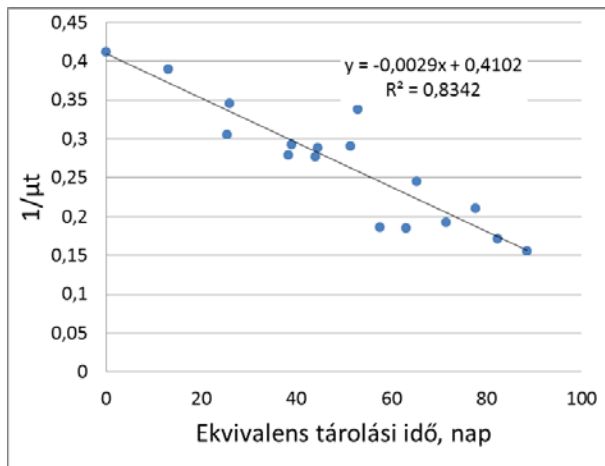
A körtemérés eredményeit használtam fel ahhoz, hogy az optikai paramétereket (μ_a , μ_s' , $1/\mu_{\text{eff}}$ és $1/\mu_t$) az 5.5 fejezetben ismertetett legjobb modellek (SVM) segítségével becsüljem meg. A 63. ábrán láthatóak a körte tárolás becsült optikai paramétereit és az ekvivalens tárolási idejének összefüggései. Ezek az optikai paraméterek lineáris összefüggést mutatnak az ekvivalens tárolási idő függvényében. A diffúziós együtthatóval ($1/\mu_t$) tapasztalható a legszorosabb összefüggés ($R^2 = 0,834$; $\text{RMSEP} = 11,86\%$; $\text{RPD} = 2,53$).



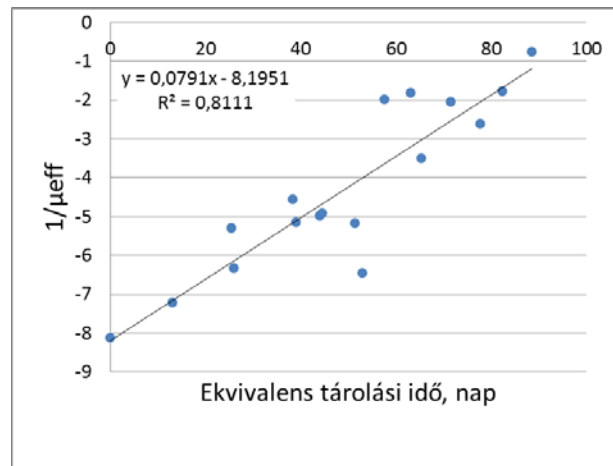
A



B



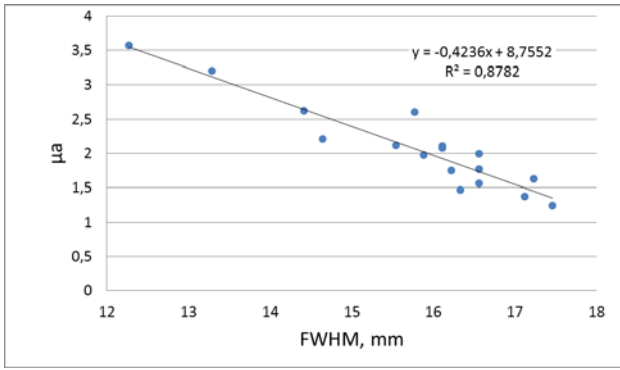
C



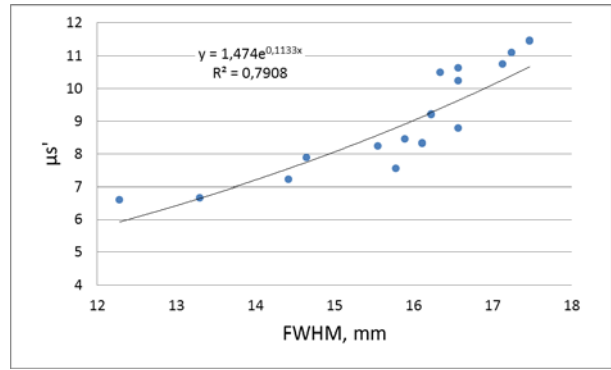
D

63. ábra A körte SVM modellel becsült optikai paramétereit és az ekvivalens tárolási idő kapcsolatát

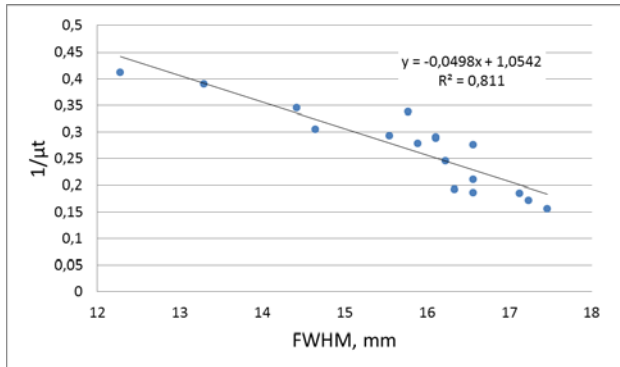
A 64. ábrán láthatók a körte tárolás becsült optikai paramétereit és a 635 nm hullámhosszon mért FWHM értékek összefüggései. Ezek az optikai paraméterek a μ_s' kivételével lineáris összefüggést mutatnak. Az abszorpciós együtthatóval (μ_a) tapasztalható a legszorosabb lineáris összefüggés ($R^2 = 0,878$).



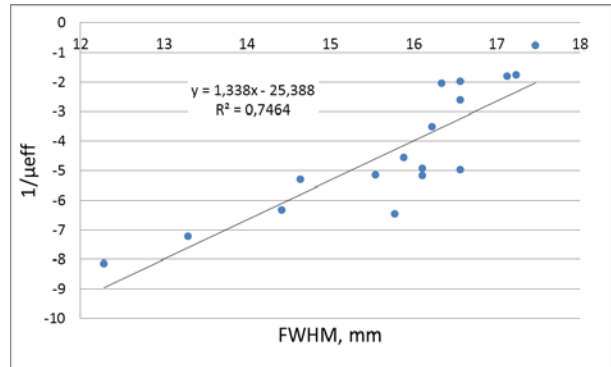
A



B



C



D

64. ábra A körte SVM modellel becsült optikai paramétereit és a 635 nm hullámhosszúhoz tartozó FWHM értékek kapcsolata

6 Új tudományos eredmények

Az elvégzett kutatás és az elért eredmények alapján az alábbi új tudományos eredményeket fogalmaztam meg.

1. Számítógépes látórendszeren alapuló, diffúz reflexiós mérési és kiértékelési módszert és kutatási célra alkalmas eszközt dolgoztam ki egyes zöldségek és gyümölcsök fizikai és beltartalmi jellemzőinek becslésére, amely lehetővé teszi ezen termények fizikai állapotának érintésmentes megállapítását. Általánosan alkalmazható módszert dolgoztam ki a rendszer alkalmazhatósági korlátainak megállapítására, és a készülékfüggő beállítások sztenderdizálására. Az adott rendszer legkisebb javasolt integrációs ideje a sztenderdizált adatok jel/zaj viszonya alapján 10 ms.
2. A vizsgált minták diffúz reflexiós paraméterei, valamint tárolási és szárítási ideje között egyértelmű összefüggést bizonyítottam:
Exponenciális összefüggést állapítottam meg a diffúz reflexiós profilok paraméterei és a tárolási idő között burgonya esetén (635 nm; FWHM; $r^2=0,976$; RMSEP=5,1%).
A körte tárolása során lineáris összefüggést állapítottam meg a diffúz reflexiós profil paramétere és a kísérleti mintában lejátszódó folyamatokat reprezentáló jelenség (az ekvivalens tárolási idő) között (635 nm; FWHM; $r^2=0,836$; RMSEP=4,88%).
3. Az almaszeletek szárítása során a referencia módszer hatékonyságát megközelítő predikciós modellt készítettem, a diffúz reflexiós módszer FWHM paraméterének felhasználásával a száraz bázisú nedvességtartalom meghatározására ($r^2=0,939$; RMSEP=7,63%; RPD=4,04).
4. Megállapítottam, hogy a diffúz reflexiós módszer érintés mentes módon alkalmas a vizsgált kertészeti termények állapotának becslésére. A körte és a burgonya minták mérési eredményeivel igazoltam, hogy a tárolás során bekövetkező dinamikus keménység tényező változása és a 635 nm hullámhosszúságú lézerrel mért FWHM értékek között szoros exponenciális összefüggés tapasztalható (burgonya $R^2=0,963$; körte $R^2=0,952$).
5. A körte tárolási kísérlet során bebizonyítottam, hogy szoros lineáris összefüggés van a diffúz reflexiós paraméterek és a fluoreszcencia jellemzők között (FWHM ~ Fm; 635 nm; $r^2=0,843$; ~ Fv/Fm; 635 nm; $r^2=0,668$; ~ F0; 635 nm; $r^2=0,827$).
6. Monte Carlo szimuláció segítségével bebizonyítottam, hogy a számított diffúz reflexiós profilok adataiból módosított Gompertz függvény együtthatóival felépített SVM modell segítségével becsülhető a behatolási mélység ($1/\mu_{\text{eff}}$) és a diffúziós együttható ($1/\mu_t$) értéke ($1/\mu_{\text{eff}}$: $r^2=0,783$; RMSEP=8,04%; DW=1,992; $1/\mu_t$: $r^2=0,944$; RMSEP=6,12%; DW=2).

7 Javaslato

Kutatási eredményeim alapján a diffúz reflexiós módszer alkalmas kertészeti termények lokális keménységének roncsolásmentes mérésére. Az általam megépített mérőrendszer méreténél fogva rutinszerű eljárásra még nem alkalmas. Ahhoz, hogy az iparban is használható kézi műszer kerüljön kialakításra, a mérni kívánt jellemzőtől (pl.: klorofill, antocianin, nedvességtartalom, dinamikus keménység) függően tipikus hullámhosszakot kell kiválasztani. A hordozható kézi műszer fényforrásainak könnyen és gyorsan cserélhető kialakítása szükséges. A vizsgált szöveti elem tulajdonságainak gyors meghatározása érdekében célszerű lenne a mintán kontakt mérést alkalmazni. Ez által csökkenthető a célműszer mérete. A megvalósíthatóság másik megoldása lehet, ha optikai szálakat alkalmazunk, melyek egy érzékelőhöz közvetítik egy központi fényforrásból származó, a szövetből visszaverődő fényt. A kézi műszer nagyban megkönnyítheti a termelők vagy kereskedelmi egységek munkáját azzal, hogy releváns információt ad a termény állapotáról.

8 Összefoglalás

8.1 Összefoglaló

Napjainkban az egészséges táplálkozás kiemelkedően fontos része az életünknek. A szezonális termények esetén általában friss, hazai árut fogyaszthatunk, melyek optimális szedési állapotban érik el a kívánt beltartalmi jellemzőiket. A kereskedelemben a zöldségek és gyümölcsök fogyasztói megítélését a termény minősége nagymértékben befolyásolja, ezt sok esetben a fogyasztók szemrevételezéssel és mechanikai vizsgálatokkal, tapintás útján ellenőrzik. A pulntarthatóság döntően meghatározza az áru értékesíthetőségi idejét. A minőség időbeli változása kulcskérdés az ellátási lánc során, beleértve a logisztikát is, mivel ennek ismerete elengedhetetlen a betakarítás utáni technológia folyamatokban, az állapotjellemzők becslésében.

A technológiák fejlődésével újabb módszerek kerültek előtérbe az élelmiszeripari alapanyagok vizsgálatára. A korszerű berendezések alkalmasak arra, hogy gyors és megbízható minőségi előrejelzéseket adjanak a terményekről. A hagyományos módszerekkel ellentétben az új módszerek környezetünk tudatosabb védelme érdekében nagy mennyiségű vegyszerfelhasználást nem igényelnek.

A doktori munkámban számítógépes látórendszeren alapuló, diffúz reflexiós mérési és kiértékelési módszer kidolgozását tűztem ki célul. Az irodalmi feldolgozás után a munka a mérőrendszer megtervezésével és megépítésével folytatódott. Számos élelmiszere és terményen végeztem méréseket, többek között almát szárítottam, valamint burgonyával és körtével végeztem tárolási kísérletet. Az alkalmazhatóság és optimális beállítás egy nem elhanyagolható szempont a műszer tesztelése során. A jelenleg használt mérőműszer fő részét képezi egy 12 bit felbontású CCD kamera. Az irodalmi feldolgozás arra világított rá, hogy a kutatók különböző kamerákat (pl.: hiperspektrális, monokromatikus és RGB kamerákat, melyeknek felbontása is eltérő lehet) alkalmaznak. Fontosnak tartottam az egységesítést, hogy az eltérő kamerákkal készített diffúz reflexiós képek összevethetőek legyenek. Meghatározó beállítás a záridő, mely a diffúziós folt nagyságát és a túltelített pixelek számát befolyásolja. A felbontás és a záridő függetlenítése céljából elkészült egy, a sztenderdizált profilok számításához használható képletet. A diffúziós profilok jellemzéséhez használható jelzőszámok meghatározása során a profil meredekségét (SLOPE), inflexiós (IP) pontját, félérték szélességét (FWHM), valamint az illesztett módosított Gompertz függvény (MGF) paramétereit vizsgáltam. A tapasztalatok és a mérési eredmények alapján az FWHM érték változása bizonyult a legjobbnak a profilok jellemzésére. Az FWHM szoros korrelációt mutat a profilokra illesztett négy paraméteres MGF függvény delta paraméterével. A két független tárolási kísérlet (körte, burgonya) során mért

dinamikus keménység értékek változása szoros összefüggésben volt a 635 nm hullámhosszúságú lézerrel mért FWHM változásával, ami megerősíti Lu és Peng (2006) barackok méréséből származó eredményeit.

A szedést követően a termények utóérési szakaszba lépnek. A tárolási kísérletek ezt a változást voltak hivatott lekövetni. Az érés során a klorofill tartalom csökkenése volt tapasztalható, melyet a klorofill elnyelési hullámhosszán mért értékek változása is mutatott. Reményeim szerint munkámmal hozzájárulok egy a világon nem elterjedt érintésmentes vizsgálati módszer magyarországi honosításához, mely alapjául szolgálhat egy in vivo technika kialakulásának. A technika kézi műszeres adaptációja segítség lehet az optimális szedési állapot előrejelzésére a gazdák számára.

8.2 SUMMARY

Healthy diet is very important in our everyday life. In case of seasonal crops, generally fresh, domestic goods are consumed that reach their desired nutritional characteristics in the optimal harvesting state.

In the trade consumers' perception of fruits and vegetables is highly influenced by the quality of the product, that is always controlled by visual inspection and mechanical (by touching) examination. Shelf life of a fruit or vegetable influences the time of their trading. In supply chain the changes of quality in time is a key point, including logistics, because the knowledge is essential for the post harvest technology and the prediction of features connected to the state.

Due to the recent rapid development of technology, new methods have been introduced for testing food ingredients. Advanced equipments are able to provide fast and reliable quality prediction of crop quality. Compared to conventional methods, new procedures do not require large amount of chemicals.

The aim of my PhD work was to develop a diffuse reflectance measurement and evaluation method based on computer vision system. Based on the scientific literature I designed and constructed the measurement system. Measurements were performed on several different types of food and crops, including apple drying, potato and pear storage experiments. For measurement system, testing the applicability and optimal settings are of great importance.

The main part of the currently used measurement instrument is a 12 bit/pixel resolution CCD camera. It was found in the literature that researchers are using different cameras (hyperspectral, monochromatic and RGB) even with diverse resolution.

In my point of view the standardization is a key point to be able to compare diffuse reflection images captured by different cameras. Exposure time is very important attribute because it influences the size of diffusively illuminated area and the number of oversaturated pixels.

A formula was established for the decoupling of resolution and exposure time, to calculate the standardized profiles. In order to characterize diffusion profiles, slope, inflection point, full width at half maximum (FWHM) value and the parameters of modified Gompertz function (MGF) were analyzed. According to the experiences and measurement results, FWHM value

was the best to characterize profiles. Strong correlation was found between FWHM and delta parameter of MGF fitted on profiles.

Changes of the measured stiffness values during the two independent storage experiment (pear, potato) were in strong correlation with FWHM value measured by 635 nm laser, that confirms the result of Lu and Peng (2006) for apricots.

Harvesting is followed by post-harvest phase of crops. These changes were modelled by storage experiments. During maturation, chlorophyll content was reduced which was confirmed by value changes measured close to chlorophyll absorption wavelength.

I hope my work will contribute to the adaptation of a less known non-contact analysis method in Hungary, as a basis of an in-vivo technique. The handheld adaptation of the technique can help farmers to predict the optimal harvesting state.

9 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik munkájukkal és segítségükkel hozzájárultak az értekezés elkészültéhez. Különösen tudományos vezetőimnek:

Dr. Felföldi Józsefnek és **Dr. Baranyai Lászlónak**, akik szakmai irányításukkal, ötleteikkel, segítőkész munkájukkal és támogatásukkal nélkülözhetetlen segítséget nyújtottak kutatómunkámhoz

Szeretnék köszönetet mondani azoknak, akiknek szóban ezt nem tehetem,

Édesanyámnak † és **Dr. Fekete Andrásnak** †, akik nélkül a doktori munka el sem kezdődhetett volna.

Köszönetet mondok

Dr. Zsomné Dr. Muha Viktóriának,

Dr. Kovács Zoltánnak,

Dr. Zsom Tamásnak és Dr. Csim Györgynek a dolgozat elkészüléséhez nyújtott segítségért

A mérésekben segítő hallgatónak:

Parrag Viktóriának, Ecseki Hellának,

Krizsán Tamásnak, Pál Tamásnak és Lovas Lászlónak

A mérőrendszer kialakításában nyújtott segítségért:

Kiss Attilának (emelőszerkezet és vasszerelvények)

és Mavridisz Vaszilisznak (lézereket vezérlő program)

A doktori tanulmány létrejöttének anyagi támogatásáért:

TÁMOP 4.2.1.B-09/1/KMR és TÁMOP-4.2.2/B-10 projektnek

Bátyámnak Dénes Tamásnak

Opponenseimnek, segítő észrevételeikért és jótanácsaikért:

Dr. Balla Csabának, Dr. Láng Zoltánnak, és Dr. Jung Andrásnak

Köszönet illeti a Szent István Egyetem Fizika és Automatika Tanszékének régi és jelenlegi munkatársait a segítőkészségükért és támogatásukért.

Köszönetet szeretnék mondani családomnak, keresztszüleimnek, hogy végig támogattak és biztattak munkám során. Végül, de nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani feleségemnek a biztatásáért, támogatásáért és kitartásáért.

10 Mellékletek

10.1 Irodalomjegyzék

- Alamar M.C., E. Bobelyn, J. Lammertyn, B.M. Nicolai and E. Moltó, (2007): Calibration transfer between NIR diode array and FT-NIR spectrophotometers for measuring the soluble solids contents of apple. *Postharvest Biology and Technology*, 45(1), p.38–45. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.008>
- Balázs G., Z. Bugyi, S. Gergely, A. Hegyi, A. Hevér, A. Salgó and S. Tömösközi, (2011): *Élelmiszeranalitika gyors és automatizált módszerei*, Nemzeti Tankönyvkiadó.
- Baranyai L., (2011): *Estimation of Optical Properties in Postharvest and Processing Technology*, <http://doi.org/10.5772/15081>
- Baranyai L. and M. Zude, (2009): Analysis of laser light propagation in kiwifruit using backscattering imaging and Monte Carlo simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69(1), p.33–39. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.011>
- Barbosa-Canovas G., J. Fernandez-Molina, S. Alzamora, M. Tapia, A. Lopez-Malo and J. Chanes, (2003): Handling and Preservation of Fruits and Vegetables by Combined Methods for Rural Areas. *Food and Agriculture Organisation Agricultural Services Bulletin*, 149, p.19–37. <http://doi.org/ISBN 92-5-104861-4>
- Barnes R.J., M.S. Dhanoa and S.J. Lister, (1989): Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy*, 43(5), p.772–777.
- Bellon V., J.L. Vigneau and M. Leclercq, (1993): Feasibility and Performances of a New, Multiplexed, Fast and Low-Cost Fiber-Optic NIR Spectrometer for the On-Line Measurement of Sugar in Fruits. *Appl. Spectrosc.*, 47(7), p.1079–1083. Retrieved from <http://as.osa.org/abstract.cfm?URI=as-47-7-1079>
- Bellon–Maurel V., (1992): *Application de la spectroscopie proche infrarouge au contrôle en ligne de la qualité des fruits et légumes*. l’Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Benge J.R., H.N. De Silva, N.H. Banks and P.B. Jeffery, (2000): Empirical modelling of postharvest changes in the firmness of kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology*, 19(3), p.211–220. [http://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00091-0](http://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00091-0)
- Birth G.S., G.G. Dull, W.T. Renfroe and S.J. Kays, (1985): Nondestructive spectrophotometric determination of dry matter in onions. *Journal of the American Society for Horticultural*

Science, 110, p.297–303.

- Bobelyn E., A.-S. Serban, M. Nicu, J. Lammertyn, B.M. Nicolai and W. Saeys, (2010): Postharvest quality of apple predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance. *Postharvest Biology and Technology*, 55(3), p.133–143. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.09.006>
- Bonanno A.S., J.M. Ollinger and P.R. Griffiths, (1992): The origin of band positions and widths in near-infrared spectroscopy. In T. N. and A. T. K. I. Hildrum, T. Isaksson, ed. *Near – Infrared Spectroscopy, Bridging the Gap Between Data Analysis and NIR Applications*. New York: Ellis-Horwood, pp. 19–28.
- Carlomagno G., L. Capozzo, G. Attolico and A. Distante, (2004): Non-destructive grading of peaches by near-infrared spectrometry. *Infrared Physics & Technology*, 46(1), p.23–29. <http://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.004>
- Cavaco A.M., P. Pinto, M.D. Antunes, J.M. da Silva and R. Guerra, (2009): “Rocha” pear firmness predicted by a Vis/NIR segmented model. *Postharvest Biology and Technology*, 51(3), p.311–319. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.08.013>
- Chauchard F., R. Cogdill, S. Roussel, J.M. Roger and V. Bellon-Maurel, (2004): Application of LS-SVM to non-linear phenomena in NIR spectroscopy: development of a robust and portable sensor for acidity prediction in grapes. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 71(2), p.141–150. <http://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.01.003>
- Cho Y.-J. and Y.J. Han, (1999): Nondesctuctive characterization of apple firmness by quantitation of laser scatter. *Journal of Texture Studies*, 30(6), p.625–638. <http://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1999.tb00234.x>
- Collell C., P. Gou, P. Picouet, J. Arnau and J. Comaposada, (2010): Feasibility of near-infrared spectroscopy to predict aw and moisture and NaCl contents of fermented pork sausages. *Meat Science*, 85(2), p.325–330. <http://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.01.022>
- Cozzolino D. and I. Murray, (2004): Identification of animal meat muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy. *LWT - Food Science and Technology*, 37(4), p.447–452. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.013>
- Davies A.M. and A. Grant, (1987): Review: near–infrared analysis of food. *International Journal of Food Science & Technology*, 22, p.191–207.
- Dénes D.L., Z.M. Viktória, Z. Tamás, K. Zoltán, B. László and F. József, (2013): Körte (Bosc kobak) minőségváltozásának jellemzése roncsolásmentes fizikai módszerekkel. In B. B. Éva & F. István, eds. *Fiatal kutatók az egészséges ételmisszerért*. Debrecen: Debreceni

Egyetem Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma, pp. 3–9.

- Dénes L.D., V. Zsom-Muha, L. Baranyai and J. Felföldi, (2012): Modelling of apple slice moisture content by optical methods. *Acta Alimentaria*, 41, p.39–51. <http://doi.org/10.1556/AAlim.41.2012.Suppl.4>
- Van Eijk C.W.E., R.W. Hollander and S.M. Van Der Sluis, (1988): An MWPC for beta radiochromatography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 273(2-3), p.764–766. [http://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)90092-7](http://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90092-7)
- Farrell T.J. and S.M. Patterson, (1992): A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo. *Medical Physics*, 19(4), p.879. <http://doi.org/10.1118/1.596777>
- Felföldi J., (1996): Gyümölcsök és zöldségfélék keménység-jellenzése akusztikus tulajdonságaik alapján. In *Élelmiszerfizikai közlemények*. Budapest, pp. 35–45.
- Felföldi J. and A. Fekete, (2000): Firmness assessment by impact method. In *ASAE Annual International Meeting*. Milwaukee, pp. 1–7.
- Felföldi J. and T. Ignáth, (1999): Dynamic method for quick and non-destructive measurement of the surface firmness of fruits and vegetables. In *Hungarian Agricultural Engineering*. pp. 29–30.
- Ferrer-Gallego R., J.M. Hernández-Hierro, J.C. Rivas-Gonzalo and M.T. Escribano-Bailón, (2011): Determination of phenolic compounds of grape skins during ripening by NIR spectroscopy. *LWT - Food Science and Technology*, 44(4), p.847–853. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.001>
- Flores K., M.T. Sánchez, D. Pérez-Marín, J.E. Guerrero and A. Garrido-Varo, (2009): Feasibility in NIRS instruments for predicting internal quality in intact tomato. *Journal of Food Engineering*, 91(2), p.311–318. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.09.013>
- Fu X., Y. Zhou, Y. Ying, H. Lu and H. Xu, (2006): NIR assessment of soluble solids and firmness for pears of different cultivars. In p. 63810N–63810N–10. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1117/12.685880>
- Geladi P., D. MacDougall and H. Martens, (1985): Linearization and Scatter-Correction for Near-Infrared Reflectance Spectra of Meat. *Appl. Spectrosc.*, 39(3), p.491–500. Retrieved from <http://as.osa.org/abstract.cfm?URI=as-39-3-491>
- Gómez A.H., Y. He and A.G. Pereira, (2006): Non-destructive measurement of acidity, soluble solids and firmness of Satsuma mandarin using Vis/NIR-spectroscopy techniques. *Journal*

- of *Food Engineering*, 77(2), p.313–319. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.036>
- Gómez-López V.M., F. Devlieghere, V. Bonduelle and J. Debevere, (2005): Intense light pulses decontamination of minimally processed vegetables and their shelf-life. *International Journal of Food Microbiology*, 103(1), p.79–89. <http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.028>
- Gonzalez R.C. and R.E. Woods, (1992): *Digital Image Processing* 2nd ed., Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Gunasekaran S. and J. Irudayaraj, (2001): Optical methods: visible NIR and FTIR spectroscopy. In *Nondestructive Food Evaluation: Techniques to Analyse Properties and Quality*. New York, USA: Marcel Dekker Inc.
- Guthrie J., B. Wedding and K. Walsh, (1998): Robustness of NIR calibrations for soluble solids in intact melon and pineapple. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 6(1), p.259–265. <http://doi.org/10.1255/jnirs.145>
- Guthrie J.A., D.J. Reid and K.B. Walsh, (2005): Assessment of internal quality attributes of mandarin fruit. 2. NIR calibration model robustness. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56 (4), p.417–426. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1071/AR04299>
- Han D., R. Tu, C. Lu, C. Liu and Z. Wen, (2006): Nondestructive detection of brown core in the Chinese pear “Yali” by transmission visible–NIR spectroscopy. *Food Control*, 17, p.604–608. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.03.006>
- Hollas J.M., (1987): *Modern Spectroscopy*, Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Huang M. and R. Lu, (2010): Apple mealiness detection using hyperspectral scattering technique. *Postharvest Biology and Technology*, 58(3), p.168–175. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.08.002>
- Huang M., Q. Zhu, B. Wang and R. Lu, (2012): Analysis of hyperspectral scattering images using locally linear embedding algorithm for apple mealiness classification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 89, p.175–181. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.003>
- Ji B.P., (2000): Non–destructive detecting farm produce by means of NIR spectrum. *Machinery for Cereals Oil and Food Proccession*, 6, p.31–33.
- Jiang H. and W. Zhu, (2013): Determination of Pear Internal Quality Attributes by Fourier Transform Near Infrared (FT-NIR) Spectroscopy and Multivariate Analysis. *Food Analytical Methods*, 6(2), p.569–577. <http://doi.org/10.1007/s12161-012-9480-9>
- Keijzer M., S.L. Jacques, S.A. Prahl and J.A. Weich, (1989): Light distribution in artery tissue.pdf. , p.148–154. <http://doi.org/n.a>

- Kienle A., L. Lilge, M.S. Patterson, R. Hibst, R. Steiner and B.C. Wilson, (1996): Spatially resolved absolute diffuse reflectance measurements for noninvasive determination of the optical scattering and absorption coefficients of biological tissue. *Appl. Opt.*, 35(13), p.2304–2314. <http://doi.org/10.1364/AO.35.002304>
- Kim G.Y., K.J. Lee, K.H. Choi, J.R. Son, D.S. Choi and S.W. Kang, (2004): Defect and Ripeness Inspection of Citrus Using NIR Transmission Spectrum. In *Advances in Nondestructive Evaluation*. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, pp. 1008–1013. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.1008>
- van Kooten O. and J.F.H. Snel, (1990): The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. *Photosynthesis Research*, 25(3), p.147–150. <http://doi.org/10.1007/BF00033156>
- Kortüm G., (1969): Reflectance Spectroscopy : Principles, Methods, Applications. , p.1–367. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-88071-1>
- Kosson R., (2003): Chlorophyll fluorescence and chilling injury of green pepper as affected by storage conditions. In *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 379–385. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.628.47>
- Kovács E. and B. Paripás, (2011): *Fzika II.*, Miskolci Egyetem Földtudományi Kar. Retrieved from http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0033_SCORM_GEFIT6102/sco_09_01.scorm
- Lammertyn J., B. Nicolai, K. Ooms, V. De Smedt and J. De Baerdemaeker, (1998): Nondestructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR spectroscopy. In *Transactions of the ASAE*. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, pp. 1089–1094. <http://doi.org/10.13031/2013.17238>
- Leiva-Valenzuela G.A., R. Lu and J.M. Aguilera, (2013): Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging. *Journal of Food Engineering*, 115(1), p.91–98. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.001>
- Liu Y. and Y. Ying, (2005): Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of “Fuji” apples. *Postharvest Biology and Technology*, 37(1), p.65–71. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.02.013>
- Lleó L., P. Barreiro, M. Ruiz-Altisent and A. Herrero, (2009): Multispectral images of peach related to firmness and maturity at harvest. *Journal of Food Engineering*, 93(2), p.229–235.

<http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.028>

Lorente D., N. Aleixos, J. Gómez-Sanchis, S. Cubero, O.L. García-Navarrete and J. Blasco, (2012): Recent Advances and Applications of Hyperspectral Imaging for Fruit and Vegetable Quality Assessment. *Food and Bioprocess Technology*, 5(4), p.1121–1142. <http://doi.org/10.1007/s11947-011-0725-1>

Lovász T., P. Merész and A. Salgó, (1994): Application of near infrared transmission spectroscopy for the determination of some quality parameters of apples. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2(4), p.213–221. <http://doi.org/10.1255/jnirs.47>

Lu R., (2004): Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 31(2), p.147–157. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.08.006>

Lu R., (2001): Predicting Firmness and Sugar Content of Sweet Cherries Using Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 44(5), p.1265–1271.

Lu R., D.E. Guyer and R.M. Beaudry, (2000): Determination of firmness and sugar content of apples using near-infrared diffuse reflectance. *Journal of Texture Studies*, 31(6), p.615–630. <http://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2000.tb01024.x>

Lu R. and Y. Peng, (2004): Hyperspectral Scattering for Assessing Peach Fruit Firmness. In *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Ottawa. <http://doi.org/10.13031/2013.16691>

Lu R. and Y. Peng, (2006): Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), p.161–171. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.11.004>

Machado N.P., J.C. Fachinello, S.P. Galarça, D.L. Betemps, M.S. Pasa and J.D. Schmitz, (2012): Pear quality characteristics by Vis / NIR spectroscopy. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 84(3), p.853–863. <http://doi.org/10.1590/S0001-37652012000300027>

Maxwell K. and G.N. Johnson, (2000): Chlorophyll fluorescence--a practical guide. *Journal of experimental botany*, 51(345), p.659–668. <http://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>

McGlone V., D. Fraser, R. Jordan and R. Künnemeyer, (2003): Internal quality assessment of mandarin fruit by vis/NIR spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 11(5), p.323–332. <http://doi.org/10.1255/jnirs.383>

McGlone V., A. Kawano and S. Kawano, (1997): Kiwifruit firmness by near infrared light scattering. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 5(1), p.83.

<http://doi.org/10.1255/jnirs.102>

- McGlone V.A., R.B. Jordan and P.J. Martinsen, (2002): Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for “Royal Gala” apple. *Postharvest Biology and Technology*, 25(2), p.135–144. [http://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00180-6](http://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00180-6)
- Mendoza F., R. Lu, D. Ariana, H. Cen and B. Bailey, (2010): Integration of hyperspectral scattering characteristics and image analysis techniques for improved prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. In *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010 Volume 2*. Pittsburgh, PA, pp. 1693–1714.
- Mendoza F., R. Lu and H. Cen, (2012): Comparison and fusion of four nondestructive sensors for predicting apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 73, p.89–98. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.05.012>
- Mitchell, FG and G. Mayer, (1987): Relation of dry weight to “Hayward” kiwifruit maturity. *Progress Report to the California Kiwifruit Commission*.
- Mitchell F., (1990): Postharvest physiology and technology of kiwifruit. *Acta Horticulturae*, 282(29), p.1–307.
- Mitchell F., G. Mayer and W. Biasi, (1989): Using total solids to measure kiwifruit maturity. *Progress Report to the California Kiwifruit Commission*.
- Muha V., (2008): *Dinamikus módszerek kertészeti termények jellemzésére*. Retrieved from http://phd.lib.uni-corvinus.hu/286/2/muha_viktoria_thu.pdf
- Nicolai B.M., E. Lötze, A. Peirs, N. Scheerlinck and K.I. Theron, (2006): Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 40(1), p.1–6. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.12.006>
- Nicolaï B.M., B.E. Verlinden, M. Desmet, S. Saevels, K. Theron, R. Cubeddu, A. Pifferi and A. Torricelli, (2008): Time-resolved and continuous wave NIR reflectance spectroscopy to predict firmness and soluble solids content of Conference pears. *Postharvest Biology and Technology*, 47, p.68–74. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.001>
- Del Nobile M.A., A. Conte, M. Cannarsi and M. Sinigaglia, (2008): Use of biodegradable films for prolonging the shelf life of minimally processed lettuce. *Journal of Food Engineering*, 85(3), p.317–325. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.040>
- Noh H.K. and R. Lu, (2007): Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*, 43(2), p.193–201. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.09.006>

- Osborne S., R. Künnemeyer and R. Jordan, (1999): A low-cost system for the grading of kiwifruit. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 7(1), p.9–15. <http://doi.org/10.1255/jnirs.229>
- Osticioli I., N.F.C. Mendes, A. Nevin, F.P.S.C. Gil, M. Becucci and E. Castellucci, (2009): Analysis of natural and artificial ultramarine blue pigments using laser induced breakdown and pulsed Raman spectroscopy, statistical analysis and light microscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 73(3), p.525–531. <http://doi.org/10.1016/j.saa.2008.11.028>
- Ozaki Y., W.F. McClure and A. a. Christy, (2007): *Near-infrared spectroscopy in food science and technology*, <http://doi.org/10.1002/0470047704>
- Peng Y. and R. Lu, (2006a): An lctf-based multispectral imaging system for estimation of apple fruit firmness: part I. acquisition and characterization of scattering images. In *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Michigan, pp. 259–267. <http://doi.org/10.13031/2013.20225>
- Peng Y. and R. Lu, (2006b): An lctf-based multispectral imaging system for estimation of apple fruit firmness: part II. selection of optimal wavelengths and development of prediction models. In *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. michiga, pp. 269–275. <http://doi.org/10.13031/2013.20224>
- Peng Y. and R. Lu, (2008): Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 48(1), p.52–62. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.019>
- Peng Y. and R. Lu, (2005): Modeling multispectral scattering profiles for prediction of apple fruit firmness. *Transactions of the Asae*, 48(1), p.235.
- Peng Y. and R. Lu, (2007): Prediction of apple fruit firmness and soluble solids content using characteristics of multispectral scattering images. *Journal of Food Engineering*, 82(2), p.142–152. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.12.027>
- Pokol G., E.R. Gyurcsányi, A. Simon, L. Bezúr, G. Horvai, M.V. Horváth and K. Dudás, (2011): *Analitikai kémia* Gyö. Pokol, ed., Budapest. Retrieved from http://oszkdk.oszk.hu/storage/00/00/60/35/dd/1/analk__mia_animaciok_nelkul.pdf
- Polder G., G.W.A.M. van der Heijden and I.T. Young, (2003): Tomato sorting using independent component analysis on spectral images. *Real-Time Imaging*, 9(4), p.253–259. <http://doi.org/10.1016/j.rti.2003.09.008>
- Ponce A.G., S.I. Roura, C.E. del Valle and R. Fritz, (2002): Characterization of Native Microbial

- Population of Swiss Chard (*Beta vulgaris*, type cicla). *LWT - Food Science and Technology*, 35(4), p.331–337. <http://doi.org/10.1006/fstl.2001.0879>
- Porep J.U., D.R. Kammerer and R. Carle, (2015): On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. *Trends in Food Science & Technology*, 46(2), p.211–230. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.10.002>
- Prahl S.A., M. Keijzer, S.L. Jacques and A.J. Welch, (1989): Monte-Carlo model of light propagation in tissue. *SPIE Institute series*, IS(5), p.102–111. <http://doi.org/10.1.1.132.5731>
- Qiao J., M.O. Ngadi, N. Wang, C. Gariépy and S.O. Prasher, (2007): Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system. *Journal of Food Engineering*, 83(1), p.10–16. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.038>
- Qin J. and R. Lu, (2008): Measurement of the optical properties of fruits and vegetables using spatially resolved hyperspectral diffuse reflectance imaging technique. *Postharvest Biology and Technology*, 49(3), p.355–365. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.010>
- Qin J. and R. Lu, (2009): Monte Carlo simulation for quantification of light transport features in apples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1), p.44–51. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2009.04.002>
- Qing Z., B. Ji and M. Zude, (2008): Non-destructive analyses of apple quality parameters by means of laser-induced light backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 48(2), p.215–222. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.10.004>
- Qing Z., B. Ji and M. Zude, (2007): Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *Journal of Food Engineering*, 82(1), p.58–67. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.01.016>
- Romano G., D. Argyropoulos, K. Gottschalk, E. Cerruto and J. Müller, (2010): Influence of colour changes and moisture content during banana drying on laser backscattering. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(2), p.46–51. <http://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.02.046-051>
- Romano G., L. Baranyai, K. Gottschalk and M. Zude, (2008): An approach for monitoring the moisture content changes of drying banana slices with laser light backscattering imaging. *Food and Bioprocess Technology*, 1(4), p.410–414. <http://doi.org/10.1007/s11947-008-0113-7>
- Romano G., M. Nagle, D. Argyropoulos and J. Müller, (2011): Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content and hardness of apple tissue during drying. *Journal of Food Engineering*, 104(4), p.657–662.

<http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.026>

- Roy S., R. Anantheswaran, J. Shenk, M.O. Westerhaus and R. Beelman, (1993): Determination of moisture content of mushrooms by VIS–NIR–spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 63, p.355–360.
- Sakamoto Y. (Yosiyuki), 1946- Ishiguro M. (Makio) and 1948- Kitagawa G. (Genshiro), (1986): *Akaike information criterion statistics*, Tokyo : KTK Scientific Publishers ; Dordrecht ; Boston : D. Reidel ; Hingham, MA : Sold and distributed in the U.S.A. and Canada by Kluwer Academic Publishers.
- Saranwong S., J. Sornsrivichai and S. Kawano, (2003): Performance of a portable near infrared instrument for Brix value determination of intact mango fruit. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 11(3), p.175–181. <http://doi.org/10.1255/jnirs.364>
- Saranwong S., J. Sornsrivichai and S. Kawano, (2004): Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 31(2), p.137–145. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.08.007>
- Schaare P. and D. Fraser, (2000): Comparison of reflectance, interactance and transmission modes of visible-near infrared spectroscopy for measuring internal properties of kiwifruit (*Actinidia chinensis*). *Postharvest Biology and Technology*, 20(2), p.175–184. [http://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00130-7](http://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00130-7)
- Schmilovitch Z., A. Mizrach, A. Hoffman, H. Egozi and Y. Fuchs, (2000): Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology*, 19(3), p.245–252. [http://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00102-2](http://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00102-2)
- Selma M. V, A. Allende, F. Lopez-Galvez, M.A. Conesa and M.I. Gil, (2008): Disinfection potential of ozone, ultraviolet-C and their combination in wash water for the fresh-cut vegetable industry. *Food microbiology*, 25(6), p.809–814. <http://doi.org/10.1016/j.fm.2008.04.005>
- Smith P., D.B. Reid, C. Environment, L. Palo, P. Alto and P.L. Smith, (1979): Smith et al. - 1979 - A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. , 20(1), p.62–66. <http://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Subedi P.P. and K.B. Walsh, (2011): Assessment of sugar and starch in intact banana and mango fruit by SWNIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 62(3), p.238–245. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.014>
- Sun D., (2008): *Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control*, Academic Press.

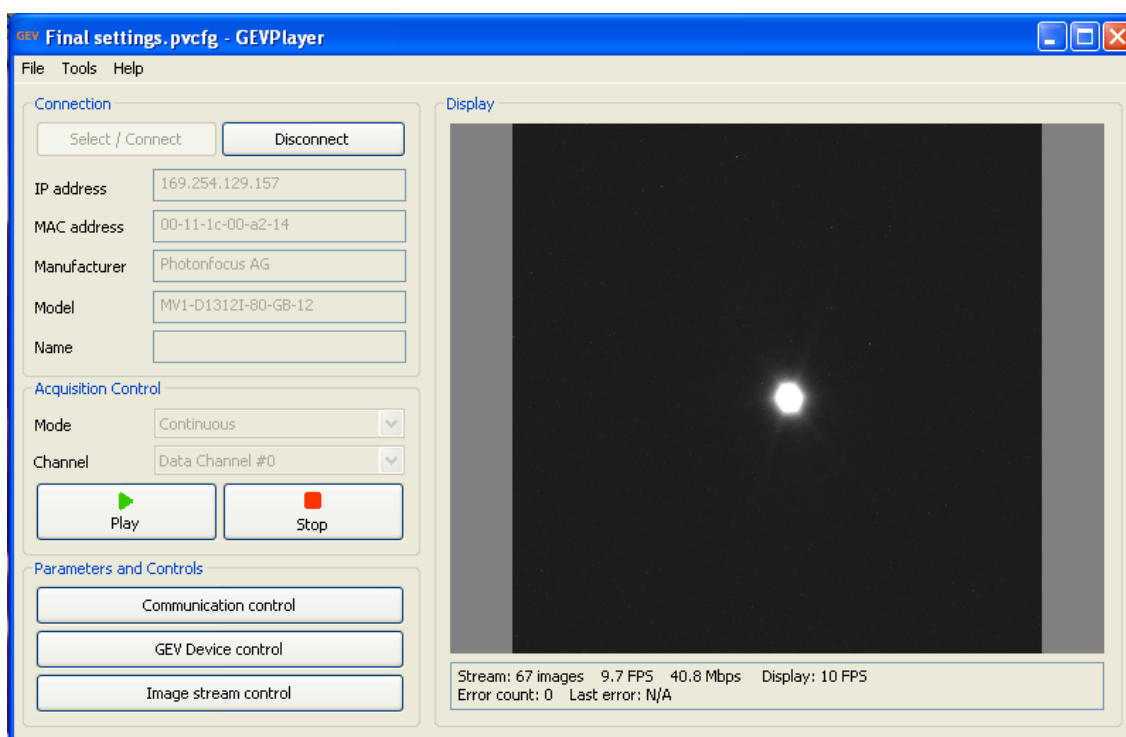
- Tan C.C., S.Y., Iftikhar, A., Allan and J.G., Freeman, (1995): Local effects of colorectal cancer are well palliated by endoscopic laser therapy. *European Journal of Surgical Oncology*, 21(6), p.648–652. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0029621968&partnerID=40&md5=50bc521659169208bda155116625df54>
- Tarkosova J. and J. Copikova, (2000): Fourier transform near infrared spectroscopy applied to analysis of chocolate. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 8, p.21–26.
- Teerachaichayut S., K.Y. Kil, A. Terdwongworakul, W. Thanapase and Y. Nakanishi, (2007): Non-destructive prediction of translucent flesh disorder in intact mangosteen by short wavelength near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 43(2), p.202–206. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.09.007>
- Tu K., P. Jancsó, B. Nicolai and J. De Baerdemaeker, (2000): Use of laser-scattering imaging to study tomato-fruit quality in relation to acoustic and compression measurements. *International Journal of Food Science & Technology*, 35(5), p.503–510. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00407.x>
- Walsh K., M. Golic and C. Greensill, (2004): Sorting of fruit using near infrared spectroscopy: application to a range of fruit and vegetables for soluble solids and dry matter content. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 12(3), p.141–148. <http://doi.org/10.1255/jnirs.419>
- Wang S., S.L. Jacques and L. Zheng, (1995): Monte Carlo modeling of light transport in tissues. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2607(713), p.73 – 100. [http://doi.org/10.1016/0169-2607\(95\)01640-F](http://doi.org/10.1016/0169-2607(95)01640-F)
- Watada A.E. and L. Qi, (1999): Quality of fresh-cut produce. *Postharvest Biology and Technology*, 15, p.201–205. [http://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00085-4](http://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00085-4)
- Wätzig W. and W. Westmeister, (1979): Determination of the average FWHM in background-free spectra. *Nuclear Instruments and Methods*, 159(3), p.547–551. <http://doi.org/N.a>
- Wihelm L.R., D.A. Suter and G.H. Brusewitz, (2005): Drying and Dehydration. *Process Engineering*, p.259–284.
- Williams P. and K. Norris, (1987): *Near-infrared technology in the agricultural and food industries*,
- Wilson B.C. and G. Adam, (1983): A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue. *Medical physics*, 10, p.824–830. <http://doi.org/10.1118/1.595361>
- Wilson B.C. and S.L. Jacques, (1990): Optical reflectance and transmittance of tissues:

- principles and applications. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 26(12), p.2186–2199.
<http://doi.org/10.1109/3.64355>
- Wu J., Y. Peng, Y. Li, W. Wang, J. Chen and S. Dhakal, (2012): Prediction of beef quality attributes using VIS/NIR hyperspectral scattering imaging technique. *Journal of Food Engineering*, 109(2), p.267–273. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.004>
- Zude M., (2003): Non-destructive prediction of banana fruit quality using VIS/NIR spectroscopy. *Fruits*, 58(3), p.135–142. <http://doi.org/10.1051/fruits:2003001>
- Zude M., B. Herold, J.M. Roger, V. Bellon-Maurel and S. Landahl, (2006): Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. *Journal of Food Engineering*, 77(2), p.254–260.
<http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.027>
- Zsom T., (2007): *Az étkezési paprika minőségváltozása a szedés utáni időszak alatt*. Budapesti Corvinus Egyetem.
- Zsom T., V. Zsom-Muha, D. Dénes, G. Hitka, L. Nguyen and J. Felföldi, (2014): Non-destructive postharvest quality monitoring of different pear and sweet pepper cultivars. *ACTA ALIMENTARIA*, 43(Suppl 1), p.206–214.

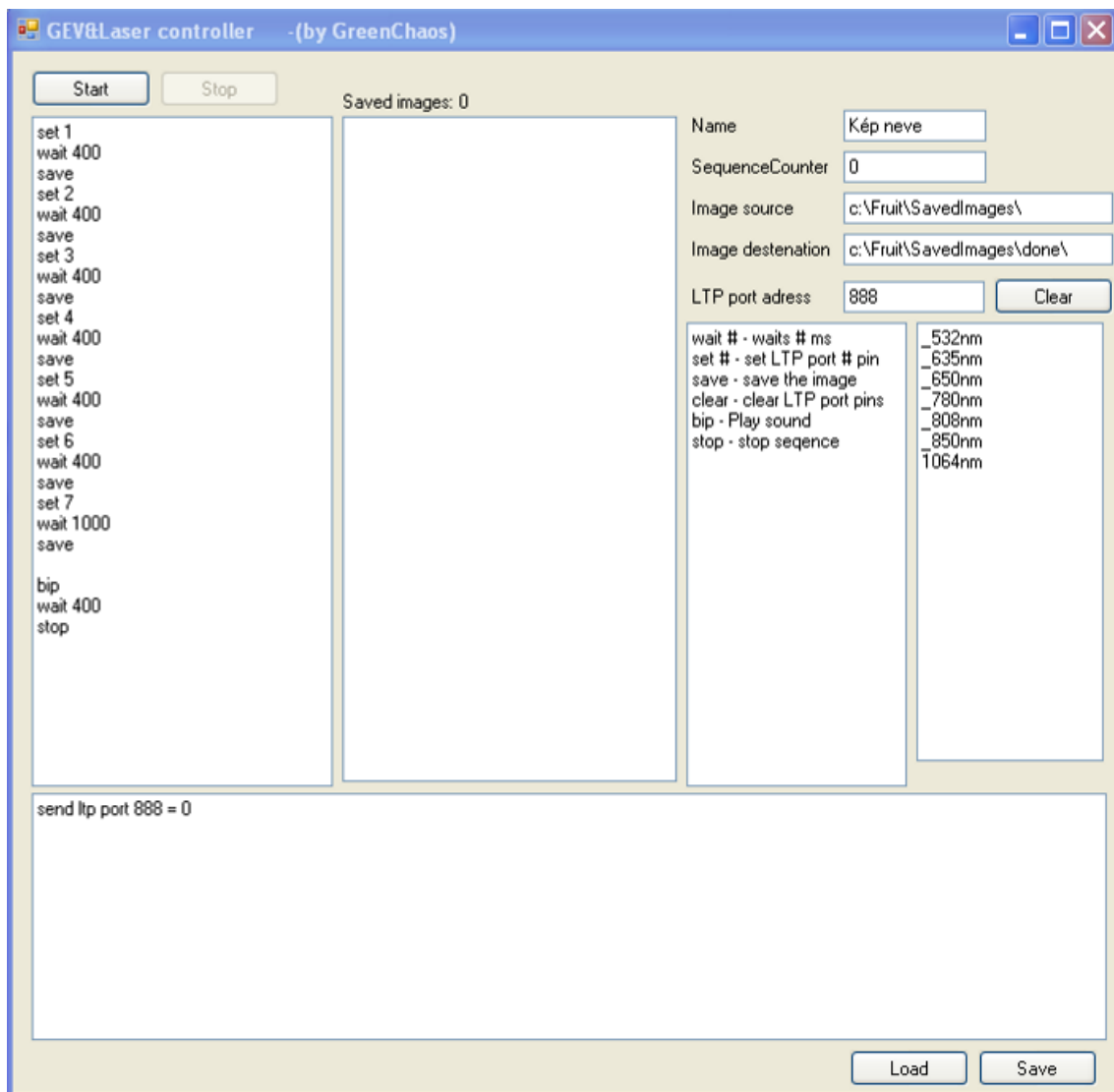
10.2 Photon Focus MV1–D1312 típusú CCD IP kamera



10.3 Kamera vezérlő program



10.4 Kamera és relékártya vezérlő program



10.5 8 csatornás relékártya



10.6 Forráskód

```
# Scattering()
# Bináris képfájl beolvasása, ábrázolása, középpont
# megkeresése és a profil kiszámítása
# RETURN: profil

Scattering <- function(FileName,Width=512,Height=512)
{
  ## Beolvasás
  F <- file(FileName, open="rb")
  rbd <- readBin(F,integer(),Width*Height,size=2)
  close(F)
  rbmx <- matrix(rbd,ncol=Width)
  ## Ábrázolás
  #súlypont számítása
  #középpont meghatározása
  thres <- (min(rbx)+max(rbx))/2
  #sor és oszlop mx-ok elkészítése
  w=1:Width; h=1:Height
  mx<-matrix(rep(1,(max(w)*max(h))),ncol=max(w),nrow=max(h))
  mxx<-mx*h; mxy<-t(t(mx)*w)
  #melyik koordinátán van nagyobb intenzitás
  trescoo<-which(as.vector(rbx)>thres)
  #intenzitás vektor elkészítése
  vrbmx<-as.vector(rbx)[trescoo]
  #x és y irányú súlyozott vektorok elkészítése és összegzése
  rmxx<-as.vector(mxx)[trescoo]; rmxy<-as.vector(mxy)[trescoo]
  CX<-sum(rmxx*vrbmx); CY<-sum(rmxy*vrbmx)
  #össz intenzitás kiszámítása
  N<-sum(vrbmx)
  CX <- CX/N; CY <- CY/N
  CX <- round(CX); CY <- round(CY)
  cat("Center =",CX,":",CY,"\n")
  ## Profil számítás
  PSize <- max(Width,Height)
  VI <- rep(0,Psize)
  VN <- rep(0,Psize)
  for (i in 1:Width) {
    for (j in 1:Height) {
      R <- sqrt((i-CX)^2 + (j-CY)^2)
      R <- round(R)
      VN[R] <- VN[R]+1
      VI[R] <- VI[R]+rbmx[i,j]
    }
  }
  for (i in 1:PSize) {
    if (VN[i]>0) { VI[i] <- VI[i]/VN[i] }
  }
  return( VI )
}
```

10.7 A diffúziós profilok CV% eltérése az elforgatási szög függvényében, valamint az FWHM értékek az elforgatási szög függvényében

