

Szent István Egyetem

**Termények hibáinak detektálása, minőségi paraméterek
jellemzése optikai módszerek alkalmazásával**

Doktori (Ph.D.) értekezés

DOI: 10.54598/000090

Parrag Viktória

Budapest

2020

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

vezetője: Simonné Dr. Sarkadi Livia
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Élelmiszertudományi Kar
Élelmiszerkémiai és
Táplálkozástudományi Tanszék

témavezető: Dr. Felföldi József
egyetemi tanár, PhD
SZIE, Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék

Dr. Firtha Ferenc
egyetemi docens, PhD
SZIE, 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. Optikai módszerek megjelenése élelmiszeripari alkalmazásokban.....	11
2.2 Számítógépes látórendszerek és képfeldolgozás	11
2.2.1. Monokromatikus, trikromatikus, multispektrális és hiperspektrális képek.....	13
2.2.2. A képfeldolgozás lépései és technikái.....	14
2.2.3 A képfeldolgozás alkalmazása élelmiszereken	16
2.3 Spektroszkópia a közeli-infravörös tartományban	17
2.3.1 A spektroszkópia elméleti alapjai	17
2.3.2 A közeli-infravörös spektrofotométerek elvi felépítése, mérési módszerek és elrendezések	19
2.3.3 Élelmiszervizsgálat spektroszkópiai módszerekkel	21
2.4 Hiperspektrális képalkotás.....	22
2.4.1 Hiperspektrális képalkotó rendszer felépítése.....	25
2.4.2 A hiperspektrális képalkotás alkalmazása az élelmiszerminőség és biztonság területén.	26
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	36
3.1 Alkalmazott hiperspektrális képalkotó rendszerek.....	36
3.2 Alkalmazott előfeldolgozási módszerek	38
3.3 Alkalmazott statisztikai módszerek és eljárások.....	42
3.4 Kétspórás csiperkén végzett vizsgálatok	45
3.4.1 Pókhálós penész kimutatása és fungicid szerekkel kezelt minták osztályozása	45
3.4.2 Pókhálós penész és zöldpenész megjelenésének vizsgálata.....	46
3.5 Görögdinnye minőségi jellemzőinek becslése	49
3.6 Mikotoxinnal szennyezett kukorica vizsgálata.....	51
4. EREDMÉNYEK	54
4.1 Pókhálós penész fertőzés detektálása kétspórás csiperkén.....	54
4.2 Fungicid szerekkel kezelt kétspórás csiperke osztályozása.....	60

4.3	Pókhálós penész és zöldpenész megjelenésének vizsgálata kétspórás csiperkén.....	64
4.4	Minőségi paraméterek eloszlásának becslése görögdinnye mintákon	67
4.5	Fuzáriummal fertőzött kukorica minták vizsgálata	76
4.5.1	Toxintartalom becslése.....	78
4.5.2	Csoportok osztályozása szennyezettségi szint, fuzárium fajok és kukorica hibrid szerint	86
5.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	90
6.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	92
7.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	94
	SUMMARY	95
8.	MELLÉKLETEK.....	96
	M1: Irodalomjegyzék	96
	M2: Natamycin-nel kezelt csiperke és képe 1200 nm-en a CuBrowser kezelőfelületén.....	111
	M3: Görögdinnye vágási felületén, hiperspektrális látórendszerrel végzett mérések adatai alapján alkotott PLSR modellek súlyfaktor ábrái	112
	M4: Argus hiperspektrális képalkotó rendszer vezérlését végző szoftver beállításai fuzáriummal fertőzött kukorica minták vizsgálata során	115
	M5: A különböző fuzáriummal fertőzött őrölt kukoricaminták csoportjainak toxin tartalma	118
	M6: Az Európai Bizottság 2006/576/EK ajánlása „A deoxinivalenol, a zearalenon, az ochratoxin-A, a T-2, a HT-2 és a fumonizinek állati takarmányozásra szánt termékekben való előfordulásáról”	119
	M7: A pókhálós penésszel fertőzött és fungicid szerekkel kezelt kétspórás csiperke minták mennyisége.....	120
	M8: Fuzáriummal fertőzött kukorica minták száma (NI: nem fertőzött, G: <i>Fusarium graminearum</i> , V: <i>Fusarium verticillioides</i> , C: <i>Fusarium culmorum</i>).....	120
9.	Köszönetnyilvánítás	121

Jelölések, rövidítések jegyzéke

<u>Rövidítés</u>	<u>Angol megfelelő</u>	<u>Magyar megfelelő</u>
ANN	Artificial Neural Networks	Mesterséges neurális hálók (módszere)
ANOVA	Analysis of variance	Varianciaanalízis
AOTF	Acousto-optic tunable filter	Akusztó-optikailag hangolható szűrő
CART	Classification And Regression Trees	Klasszifikációs és regressziós fák
CCD	Charge coupled device	töltéscsatolt eszköz
CMOS	Complementary metal- oxide-semiconductor	Komplementer fém-oxid félvezető
CV	Cross-Validation	Keresztvalidáció
DON		deoxinivalenol
ELISA	Enzyme-linked immunosorbent assay	Enzimhez kapcsolt immunszorbens vizsgálatok
EMCVS	ensemble Monte Carlo variable selection	Együttes Monte Carlo változó szelekció
FDA	Flexible discriminant analysis	Flexibilis diszkriminancia analízis
FIR	Far-infrared	Távoli-infravörös (tartomány)
HO CV	Hold Out Cross-Validation	„Hold Out” keresztvalidáció
ICA	Independent component analysis	független komponens analízis
IR	Infra-red	Infravörös (tartomány)
LC-MS/MS		Folyadékkromatográf-tömegspektrométer
LCTF	Liquid crystal tunable filter	folyadékkristályos hangolható szűrő
LDA	Linear Discriminant Analysis	Lineáris diszkriminancia analízis
LED	Light emitting diode	Fényt kibocsátó dióda
LOD	Limit of detection	Kimutatási határ
LOO CV	Leave-one-out Cross-Validation	„Leave-one-out” keresztvalidáció
MASLT	Multivariate accelerated shelf life testing	Többváltozós gyorsított tárolási idő tesztelés
MCCV	Monte Carlo Cross-Validation	Monte Carlo keresztvalidáció
MIR	Mid-infrared	Közép-infravörös (tartomány)
MLR	Multi-linear regression	Többváltozós lineáris regresszió
MRI	Magnetic resonance imaging	Mágneses magrezonancia képalkotás
MSC	Multiplicative scatter correction	Multiplikatív szóródási korrekció
MSI	Multispectral imaging	Multispektrális képalkotás
NIR	Near-infrared	A közeli-infravörös fény tartománya
NIRS	Near-infrared spectroscopy	Közeli-infravörös spektroszkópia
PCA	Principal component analysis	Főkomponens analízis
PCR	Principal component regression	Főkomponens regresszió
PFN	Pale, firm, non-exudative	Halvány, kemény, nem exudatív
PLS	Partial least squares	Parciális legkisebb négyzetek módszere
PLS-DA	Partial least squares discriminant analysis	Diszkriminancia analízis parciális legkisebb négyzetek módszerével
PLSR	Partial least squares regression	Regresszió parciális legkisebb négyzetek módszerével
PSE	Pale pinkish-grey, very soft,	Halvány rózsaszínű-szürke, nagyon puha,

	exudative	exudatív
RFN	Reddish pink, firm, non-exudative	Vöröses rózsaszínű, kemény, nem exudatív
RMSEC	Root Mean Squared Error of Calibration	Kalibráció átlagos négyzetes hibája
RMSEV	Root Mean Squared Error of Validation	Validáció átlagos négyzetes hibája
ROC	Receiver operating characteristic	Vevő működési karakterisztika
ROI	Region of interest	Érdeklődési terület
RSE	Reddish, soft, exudative	Vöröses, puha, exudatív
SNV	Standard normal variate	Sorstandardizálás
SSC	Soluble Solid Content	Oldható-száranyagtartalom
SVM	Support Vector Machine	Tartóvektor-gép módszere
SW-NIR	Short wave near-infrared	Rövid hullámú közeli-infravörös (tartomány)
UV	Ultraviola	Az ibolyán túli sugárzás tartománya
VIS	Visible	A látható fény tartománya
WBSF	Warner-Bratzler shear force	Warner-Bratzler nyíróerő
WHC	Water holding capacity	Vízmeztartó képesség

1. BEVEZETÉS

A fejlett technológiák térhódítása az élelmiszerek minőségének ellenőrzése és biztosítása terén napjainkban egyre gyorsul. Ezt a folyamatot indokolja egyrészt az élelmiszerbiztonság növekvő jelentősége és előtérbe kerülése, másrészt a növekvő és egyre szigorúbb fogyasztói elvárások, valamint a fogyasztói bizalom elnyeréséért folytatott egyre kiélezettebb verseny. Az új technikák elterjedése a termelés hatékonyságának növelése által az élelmezésbiztonság javulását is elősegíti.

A hiperspektrális képalkotás technológiája bár már mintegy harminc évvel ezelőtt megjelent, elterjedése, illetve alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata napjaink aktuális kérdése. A hiperspektrális képalkotás egyesíti a spektroszkópia és a képalkotás előnyeit, a spektrumot a felvett kép minden pixelén rögzíti, így a mérést nagyméretű adathalmaz tárolása és feldolgozása követi. Az ehhez szükséges számítási kapacitás az elmúlt évek számítástechnikai fejlődésének köszönhetően ma már rendelkezésre áll, illetve a szenzorok területén végbement technikai fejlődés okán a mérőrendszerek egyre elérhetőbbé válnak. A technika alkalmazásának vizsgálata így az utóbbi években számos területen elkezdődött, köztük az élelmiszertudomány területén is.

A technika élelmiszeripari alkalmazásának számos előnye van, hiszen érintésmentes, valós idejű mérést tesz lehetővé, az adatok alapján következtethetünk a beltartalmi jellemzők értékére és azok eloszlására is, illetve bizonyos minőségi hibák kimutatását is lehetővé teszi. A képalkotó rendszer viszont meglehetősen összetett, más mérési módszerekhez képest a jel/zaj arány alacsony és az adatfeldolgozás is igen komplex feladat.

A módszerrel számos növényi és állati eredetű nyersanyagot, illetve élelmiszert vizsgált a szakirodalom, a különböző minőségi paraméterek becslésével, szennyeződések és hibák kimutatásával. A kutatások viszonylag új iránya a mikrobiológiai eredetű fertőzések megjelenése, ezen belül a gomba eredetű fertőzések megjelenésének vizsgálata hiperspektrális látórendszerrel még új, nagyrészt feltáratlan terület.

A különböző fungális fertőzések megjelenése az élelmiszereken és nyersanyagokon okozhat közvetlen élelmiszerbiztonsági veszélyt, mint a fuzáriumok által termelt szekunder metabolitok, a mikotoxinok, melyek nyelőcső rákot, torok irritációt, emésztőrendszeri és hasi fájdalmakat, émelygést, hányást, hasmenést, vérzést, szédülést, lázat és fejfájást okozhatnak (PRIETO-SIMÓN, NOGUER ÉS CAMPÀS, 2007). A gabonafélék és kukorica jellemző szennyezői, a mikotoxinok jelenléte ezekben a termékekben gyakorlatilag elkerülhetetlen, mennyiségükre az élelmiszerekben törvényileg szabályozott határértékek vonatkoznak.

A gombaeredetű fertőzések egy másik csoportja a termékek gyors minőségromlásának előidézésével okoz számottevő gazdasági károkat, kimutatásuk szintén súlyponti kérdés. Rendkívül gyakori a különböző terményeken a penészek elterjedése, melyek a környezeti körülményeket tekintve igen ellenállóak.

A kétspórás csiperke jellemző fertőzései a pókhálós penész, melynek egyik fő okozója a *Cladobotryum dendroides*, illetve a zöld penész, melyet a *Trichoderma* nemzetség megjelenése okoz. Ezek a mikroorganizmusok a szedést követően, a hűtött tárolás során is képesek igen gyorsan terjedni és így az áru jelentős részét megfertőzni.

Célom az optikai módszerek, illetve ezen belül a hiperspektrális képalkotás alkalmazhatóságának vizsgálata élelmiszer-nyersanyagok, termények minőségi, illetve élelmiszerbiztonsági jellemzőinek meghatározása, hibáinak kimutatása céljából. Ezen belül három területen végeztem kutatásaimat:

Kutatásaim során vizsgáltam kétspórás csiperke jellemző mikroszkopikus gombák által okozott betegségeit, ezen belül a pókhálós és a zöld penész jellemző kórokozójának (*Cladobotryum dendroides*, *Trichoderma aggressivum*) kimutathatóságát csiperke kalapján. A kísérletek során megvizsgáltam továbbá a különböző, penészfertőzések ellen alkalmazott szintetikus és biológiai eredetű antifungális szerek kimutathatóságát (natamycin, prokloráz-Mn, *Bacillus subtilis*), illetve az ezekkel kezelt minták elkülöníthetőségét. A csiperke mintákat mesterséges körülmények között fertőzve be a pókhálós és a zöld penész jellemző kórokozójával, mérésekkel követtem a fertőzés kifejlődésének folyamatát.

Görögdinnye esetén a minőségi paraméterek (pH, oldható szárazanyag-tartalom) eloszlását becsültem a gyümölcs vágási felületén a mért hiperspektrális adatok alapján, regressziós modellek segítségével.

A következő kísérlet során kétféle, különböző forrásból beszerzett kukoricahibridet vizsgáltam, melyek egyike érzékenyebb, a másik pedig rezisztensebb a fuzárium fertőzésre. A minták három csoportját mesterségesen fertőzték be különböző fuzárium fajokkal, *Fusarium culmorum*-mal, *Fusarium graminearum*-mal és *Fusarium verticilloides*-szel. A negyedik csoport nem esett át kezelésemre. A darált kukorica minták mikotoxin tartalma (DON, fumonizin B₁ és B₂ toxin koncentráció) ismert volt. A minták mérésével megvizsgáltam az érzékeny és rezisztens kukoricahibrid, az eltérő fertőzöttségi szintek, illetve a különböző fuzárium törzsek elkülöníthetőségét. A minták jelenlévő DON, fumonizin B₁ és B₂ toxin koncentrációját regressziós modellekkel becsültem a mért hiperspektrális adatok alapján.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Optikai módszerek megjelenése élelmiszeripari alkalmazásokban

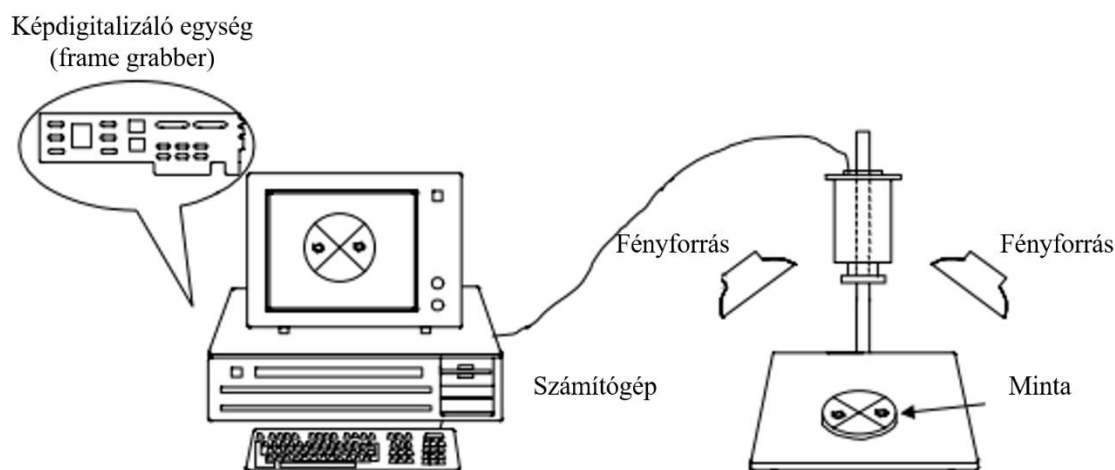
Az élelmiszeriparban az élelmiszer-biztonság és -minőség jelentősége mindig is elsődleges kérdés, az utóbbi időszakban viszont a fogyasztók egyre tudatosabb döntéshozatala és egyre magasabb szintű informáltsága folytán, ha lehet, még inkább előtérbe kerül. Az élelmiszerminőséggel kapcsolatos fogyasztói elvárások növekedésével az ellenőrzés módszerének is lépést kell tartania. Az alkalmazott technikák fontos jellemzője a megbízhatóság és gazdaságosság is. A laboratóriumokban végzett analitikai módszerekről általánosan elmondható, hogy pontosak, megbízhatóak és többnyire szelektíven alkalmazhatóak. Emellett előkészítést igényelnek, melynek során a mintát elroncsolják, költségesek és időigényes a kivitelezésük. Az élelmiszeripar számos területén azonban szubjektív módszereket alkalmaznak a hétköznapi minőségellenőrzésben, érzékszervi minősítéssel, szemrevételezéssel és szín-etalonokkal szűrik ki a minőségileg nem megfelelő alapanyagokat vagy termékeket. Ezekkel a módszerekkel nagyobb mennyiségek ellenőrzése is könnyen megvalósítható, viszont a reprodukálhatóság és az eredmények megbízhatósága megkérdőjelezhető, illetve minden esetben emberi munkára van szükség, mely bérköltséggel jár és nem automatizálható.

Az elmúlt két évtizedben az élelmiszeriparban, illetve az agrár-szektorban növekvő érdeklődés figyelhető meg az optikai módszerek iránt. Ezek a technikák roncsolásmentes, gyors, objektív mérést tesznek lehetővé, melyek könnyen automatizálhatók. Ma már elterjedtek például a színmérés alapján osztályozó berendezések.

A hiperspektrális képalkotás egyike a legújabban alkalmazott optikai módszereknek. Egyesíti a spektroszkópia és a képfeldolgozás nyújtotta lehetőségeket. A klasszikus módszerekkel szemben nem igényel mintaelőkészítést, roncsolásmentesen, sőt érintésmentesen mérhetők a minőségi paraméterek. A vizsgálat folyamatosan, on-line, akár a gyártósoron implementálva működtethető.

2.2 Számítógépes látórendszerek és képfeldolgozás

A számítógépes látórendszereket napjainkban már elterjedten alkalmazzák az élelmiszeripar számos területén (BROSNAN ÉS SUN, 2004). A számítógépes látórendszerek (1. ábra) általánosan öt alapvető részből épülnek fel: megvilágítás-fényforrás, kamera, képdigitalizáló egység (*frame grabber*), hardware és szoftver (DU ÉS SUN, 2004).



1. ábra Számítógépes látórendszer komponensei (WANG és SUN, 2002)

A technika számos előnnyel bír (BROSNAN ÉS SUN, 2004):

- precíz és leíró adatokkal szolgál,
- gyors és objektív,
- csökkenti az emberi munka- és erőforrás szükségességét,
- következetes, hatékony és gazdaságos,
- roncsolásmentes,
- robusztus,
- költséghatékonyan alkalmazható érzékelési technika,
- folyamatos adatrögzítést tesz lehetővé, melynek eredményei a későbbiekben is értékelhetők.

Mindemellett bizonyos hátrányokkal is számolnunk kell: strukturálatlan képek (hátterek, mátrixok) esetén a vizsgálandó objektumok azonosítása meglehetősen összetett és nehézkes, illetve a fényviszonyoktól függően mesterséges megvilágításra lehet szükség (ZUDE, 2008).

A rögzített kép minősége nagymértékben befolyásolja a későbbi képfeldolgozás hatékonyságát. A megvilágítás optimális kialakításával a rögzített képen potenciálisan jelentkező zavaró hatások (visszaverődés, árnyék, egyéb zajok) kiküszöbölhetők, ezzel a feldolgozáshoz szükséges idő számottevő mértékben csökkenthető (ZUDE, 2008). A különböző fényforrások számos alkalmazási lehetőséget nyújtanak (1. táblázat).

Napjainkban a terület meghatározó fejlődési iránya a számítógépes látórendszerek kombinálása mesterséges intelligenciával (KAKANI et al., 2020).

1. táblázat: Különböző fényforrások alkalmazási lehetőségei (ZUDE, 2008)

Fényforrás	Alkalmazás
VIS	A legtöbb az emberi szem számára látható hiba kimutatása
NIR	Nem látható romlás kimutatása Háttér eltávolítása Érettség becslése (kutatása folyamatban) A héj egyes károsodásainak kimutatása Szár (kocsány) azonosítása
UV	A héj szakadásának kimutatása Oleocellosis (citrusfélék mechanikai hatás okozta foltosodása) kimutatása Kezdeti állapotú romlás kimutatása
Struktúrált fény	3-D becslés Alaki szabálytalanságok kimutatása Szár (kocsány) azonosítása
Lézer	Érettség becslése (kutatása folyamatban) Héjvastagság

2.2.1. Monokromatikus, trikromatikus, multispektrális és hiperspektrális képek

Az elkészített kép tekinthető egy n-dimenziós mátrixnak, amely első két dimenziója a pixelek vertikális és horizontális pozíciójának, a további dimenziók pedig (a képképzés során alkalmazott szenzortól függően) a rögzített intenzitás értékeknek felelnek meg. Így például egy monokromatikus kép egy háromdimenziós adatmátrix, melynek harmadik koordinátája a pixelek intenzitás értéke.

Színes kép esetén már ötdimenziós mátrixot kapunk; egy pixel színét jellemezhetjük RGB (*red*: vörös, *green*: zöld, *blue*: kék) értékekkel. Ezek a leggyakrabban alkalmazott koordináták, a színrendszer elve hasonló az emberi látás működéséhez. A kutatásban egyéb színrendszereket is használnak, mint például a HSB (*hue*: színezet, *saturation*: telítettség, *brightness*: világosság-fényerő) és HSI (*hue*, *saturation*, *intensity*) rendszereket. Az említett rendszerek mellett elsősorban színek összehasonlítása esetén használatos a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE: Commission Internationale de l'Eclairage) szerinti szabványos színességi skálájú CIEXYZ és CIELAB színrendszerek.

A színes képeken túl további információt gyűjthetünk a mérendő objektumról, ha több, mint három csatornán, illetve akár a látható tartományon kívül eső hullámhossz értékeknél is mérünk.

Az Európai Tanács 2003. január 27-i 149/2003/EK rendeletében meghatározottak szerint: „Multispektrális képérzékelők” (*multispectral imaging sensors*) (6): Két vagy több diszkrét spektrális sávból képadatok egyidejű vagy sorozatos vételére alkalmas eszközök. A több mint húsz diszkrét spektrális sávval rendelkező szenzorokat hiperspektrális képszenzorokként is említik.

2.2.2. A képfeldolgozás lépései és technikái

A képfeldolgozás „nulladik” lépésének tekinthetjük magát a képalkotást. A képfeldolgozás folyamatának kialakítása során a különböző technikák közül a feladat szempontjából leghatékonyabb módszerek, lehető legoptimálisabb alkalmazására törekszünk.



2. ábra Általános képfeldolgozó rendszer konfiguráció öt komponenssel (DU ÉS SUN, 2004)

Előfeldolgozás (*Image preprocessing*)

A képfeldolgozás első lépése a nyers kép adott feladatnak megfelelő korrekciója: a geometriai torzulások kezelése, zajszűrés, fényességi szint (*grey level*) korrekció, homályos részek javítása (BROSNAN ÉS SUN, 2004).

A további lépéseket és technikákat ZUDE, (2008) után ismertetem.

Egyedi pixel operátorok: ezek a módszerek az egyes pixelek intenzitásértékét a szomszédos pixelektől függetlenül módosítják (*pixel remapping*). Ilyen például a kép binarizációja, melynek során kijelölünk egy adott küszöbértéket, az ennél magasabb intenzitással rendelkező képpontokhoz egy megadott értéket rendelünk, a fennmaradó pixelekhez pedig egy másikat. A színrendszer módosítása (pl. RGB koordináták átalakítása HSI koordinátákká) is tekinthető az egyedi pixel operátorok egy speciális esetének.

Térbeli operátorok: a képponton a szomszédos pixelek intenzitásától függően hajtja végre az intenzitás módosítását. Gyakran használják zajok csökkentésére, eliminálására, valamint az objektum és a háttér közötti kontraszt növelésére. Ezek a módszerek a konvolúció matematikai műveletén alapulnak, különböző maszkokat alkalmaznak, melyek meghatározzák a

transzformációnál figyelembe vett terület méretét. A konvolúció során minden pixel új intenzitásértéket vesz fel, amely általában a maszk által meghatározott területen lévő pixelek intenzitásának lineáris kombinációja.

A hisztogram skálázását módosító technikák: a képpontok intenzitását oly módon változtatják, hogy a kép hisztogramja (a képpontokon előforduló intenzitásértékek eloszlását mutató diagram) egy előre meghatározott hisztogramhoz legjobban közelítsen.

Erózió: az szélek erodálása segíthet a megvilágítás okozta hibák korrekációjában, viszont a vizsgálat minőségét ronthatja a vele járó információvesztés.

Szegmentálás

Ezek a technikák a vizsgált objektum és a háttér különválasztását segítik. Legegyszerűbb esete a küszöbölés (*thresholding*), amelynek során egy kijelölt érték szerint (küszöbérték) két osztályba soroljuk a képpontokat (objektum vagy háttér). Elsősorban monokromatikus képek esetén használatos, de általánosítva színes képeknél is alkalmazható. Ekkor a küszöb meghatározható külön egy vagy több csatornára, vagy a színes képet előbb monokromatikus képpé konvertálhatjuk. Trikromatikus képek esetén alkalmaznak összetettebb statisztikai módszereket is a szegmentációra, mint a diszkriminancia analízis, illetve felügyeletlen (*unsupervised*) módszereket, mint a klaszter analízis.

Jellemzők kiemelése (*feature extraction*)

Ennek a lépésnek a célja az objektum vizsgált jellemzőjének kiemelése a képen, többnyire a méretre, alakra és színre vonatkozó meghatározás. Az alak és a méret meghatározását bizonyos esetekben az elsődleges inercia tengelyek és a köztük lévő kapcsolat meghatározásával végzik, más esetekben Fourier leírókkal, illetve sok esetben a terület görbülete alapján. A felületi szerkezet vizsgálata szintén cél lehet, bár élelmiszerek esetén a felületi szerkezet általában nem tökéletesen szabályos, így leírása nehezebb feladat.

Osztályozás

A jellemzők kiemelését követően, a rendelkezésre álló információk alapján az objektumokat kategóriákba sorolhatjuk. Ennek legegyszerűbb esete, ha az adott jellemző(k)re vonatkozóan szintén küszöbértéket határozzunk meg. Ezen túl számos statisztikai módszer áll rendelkezésre, gyakran alkalmazott technika a lineáris diszkriminancia analízis (LDA), a mesterséges neurális hálók (ANN – *artificial neural networks*) és a tartóvektor-gép (SVM - *support vector machine*) módszere.

DAVIES (2000) átfogóan ismerteti a képfeldolgozás technikáit - a képfeldolgozás (*image processing*), alakelemzés, jellemzők detektálása és objektum lokációjának meghatározása, felületi szerkezet vizsgálata, három-dimenziós feldolgozás és a mintafelismerés módszerein keresztül.

2.2.3 A képfeldolgozás alkalmazása élelmiszereken

A számítógépes látórendszerek rendkívül sokrétűen felhasználhatóak az élelmiszerek minősítésében. ABBOTT (1999) a gyümölcsök és zöldségek minőségének meghatározásának technikái között az optikai tulajdonságokon belül taglalja a színmérést, a NIR spektrometriát, a multi- és hiperspektrális képalkotást. A képalkotást illetően a statisztikai módszerek fejlődését emeli ki, mint a terület haladását nagymértékben elősegítő tényezőt.

Az egyik különösen összetett, látórendszerrel vizsgált jellemző a felületi szerkezet. JACKMAN ÉS SUN (2013) cikkükben a felületi szerkezet vizsgálatát illetően az algoritmusok fejlesztését tartották a meghatározó fejlődési iránynak, kiemelve a wavelet transzformáció nyújtotta lehetőségeket. A gépi látás alkalmazása így hatékonyabbá tehető a hardware fejlesztésének költsége nélkül.

Az élelmiszerek vizsgálatának területéről készült összefoglaló cikkekben az alkalmazások széles palettájával találkozhatunk. DU ÉS SUN (2004) cikkükben mind a külső, mind a belső jegyek mérését lehetővé tevő technikákat áttekintik. Előbbire példa a CCD (*charge coupled device*) kamera, mellyel a minta mérete, alakja, színe, felületi textúrája és külső hibái vizsgálhatók. A minta belső szerkezetének felderítését, belső hibák detektálását ultrahanggal, mágneses magrezonancia képalkotás (*magnetic resonance imaging*, MRI), komputertomográfia (*computed tomography*, CT) és elektromos tomográfia (*electrical tomography*, ET) technológiával végzett mérések fejezetein belül taglalja.

Az elmúlt időszakban a számítástechnika fejlődése, illetve az eszközök számítási kapacitásának növekedése új lehetőségeket nyitott a képfeldolgozás területén is, korábban elképzelhetetlen adatmennyiségek kezelését téve lehetővé. A gépi tanulás alkalmazási lehetőségeit jelenleg elterjedten kutatják például termények osztályozása céljából (KOKLU ÉS OZKAN, 2020), avagy minőségi hibák kimutatására (CHEN et al., 2019). Egyre inkább előtérbe kerül a mélytanulás technológiája (DE JÓDAR LÁZARO ET AL., 2020; RONG et al., 2020), mely az elmúlt években egyre komplexebb feladatok megoldása során bizonyította hatékonyságát az élelmiszeripari alkalmazások terén is (KAKANI et al., 2020).

2.3 Spektroszkópia a közeli-infravörös tartományban

2.3.1 A spektroszkópia elméleti alapjai

A spektroszkópia az elektromágneses sugárzás és az anyag kölcsönhatásán alapuló jelenségeket vizsgáló technikák összessége (WILLIAMS ÉS NORRIS, 2001).

Az elektromágneses sugárzás rendelkezik mind hullám, mind részecske jellemzőkkel. A fény egységnyi részének, a fotonnak az energiája (E_i) (WILLIAMS ÉS NORRIS, 2001):

$$E_i = h \cdot \nu = h \cdot c \cdot \bar{\nu}^* = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

ahol:

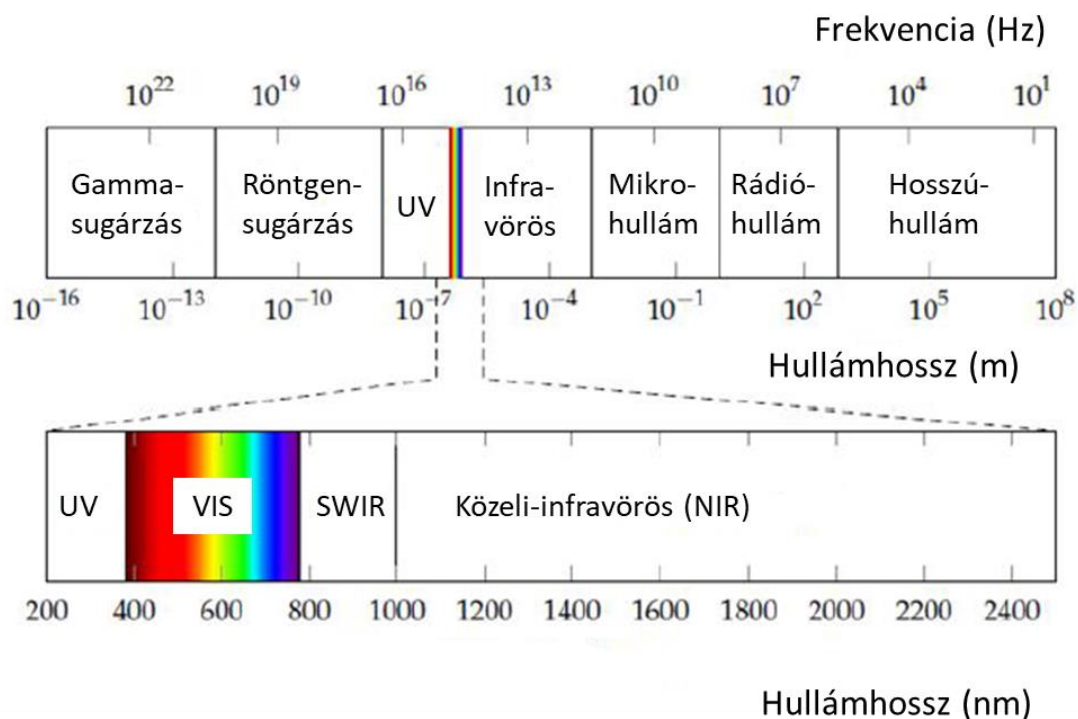
h : Planck-állandó

ν : a fényhullám frekvenciája

$\bar{\nu}^*$: a fény hullámszáma

c : a fénysebesség ($2,998 \times 10^8$ m/s vákuumban).

Az egyenletből adódik, hogy nagyobb frekvenciájú sugárzás nagyobb energiával rendelkezik.



3. ábra Az elektromágneses spektrum felosztása (Michelsburg, 2014)

Az elektromágneses spektrum 100 nm és 1000 μm közötti területét az optikai sugárzások tartományának is nevezik (ZUDE, 2008). Három szakaszra oszlik:

- 100 – 380 nm: ultraibolya tartomány (UV)
- 380 – 780 nm: látható tartomány (VIS)
- 780 nm – 1000 μm : infravörös tartomány (IR).

Az infravörös tartomány tovább osztható:

- közeli-infravörös (NIR) – 780 nm – 2,5 μm ,
- közép-infravörös (MIR) – 2,5 – 25 μm
- és 25 μm felett távoli-infravörös (FIR) tartományra.

Egy atom vagy molekula alapállapotból gerjesztett állapotba kerül, ha megfelelő energiájú elektromágneses sugárzást nyel el (abszorbeál) illetve energiája csökken, ha foton kibocsátás (emittálás) következik be.

A molekulák és az optikai sugárzás kölcsönhatása a következő módokon változtathatja meg a molekulák belső energiáját:

- Elektronátmenet: az emisszió vagy abszorpció során az elektronok energiaszintje változik, a spektrum az ultraibolya (UV) és a látható (VIS) tartományban figyelhető meg.
- Vibrációs átmenet: az interakció során a molekula rezgési energiája változik, a spektrum a közeli-infravörös (NIR) és a közép-infravörös (MIR) tartományban figyelhető meg.
- Rotációs átmenet: a molekula forgási energiája változik, közép- (MIR) és távoli-infravörös (FIR) tartományra jellemző.

A legnagyobb energiával az elektronátmenet rendelkezik, ezt követi a vibrációs, majd a rotációs átmenet.

A fény és az anyag kölcsönhatása során a beeső fény intenzitása megegyezik az áteresztett (transzmittált), elnyelt (abszorbeált) és visszavert (reflektált) fény intenzitásának összegével.

A közeli-infravörös tartományban található legtöbb abszorpciós sáv az infravörös tartományban jelentkező alapvető elnyelési sáv felharmonikusaiból és kombinációiból adódik, melyeket a rotációs és vibrációs átmenetek okoznak (NICOLAÏ et al., 2007). Nagy molekulák és összetett mátrixok spektruma számos ilyen sávot tartalmaz, a spektrum nem mutat éles csúcsokat, széles elnyelési sávok a jellemzőek.

Híg és nem szóró oldatok abszorpciója esetén (melynek során a fény áthalad a mintán és egy részét a minta elnyeli), adott anyag mért spektrumát a Beer-Lambert törvény segítségével vizsgálhatjuk:

$$I = I_0 \times e^{-acd}$$

a: moláris abszorpciós koefficiens,

c: moláris koncentráció,

d: optikai úthossz a mintában.

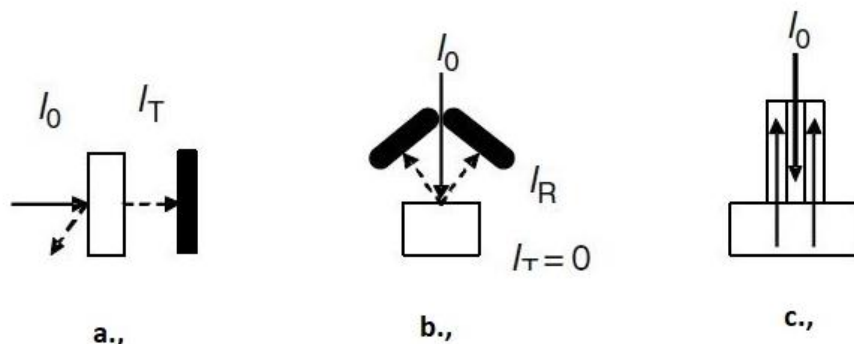
A fényelnyelés tehát az abszorbeáló anyag koncentrációjával arányos, így a Beer-Lambert törvény oldatok koncentrációjának meghatározása során igen gyakran alkalmazott összefüggés.

2.3.2 A közeli-infravörös spektrofotométerek elvi felépítése, mérési módszerek és elrendezések

A NIR (közeli-infravörös) spektrofotométerek elemei: fényforrás (általában wolframszálas halogén izzólámpa), mintatartó, monokromátor, detektor és különböző optikai elemek, például lencsék, kollimátorok, sugárosztók, integrálgömbök és optikai szálak (NICOLAÏ et al., 2007).

Optikai geometria szerint a következő mérési módszerek (4. és 5. ábra) jellemzők (ZUDE, 2008):

- Transzflektancia
- Reflektancia
- Részleges transzmittancia vagy remittancia
- Interaktancia

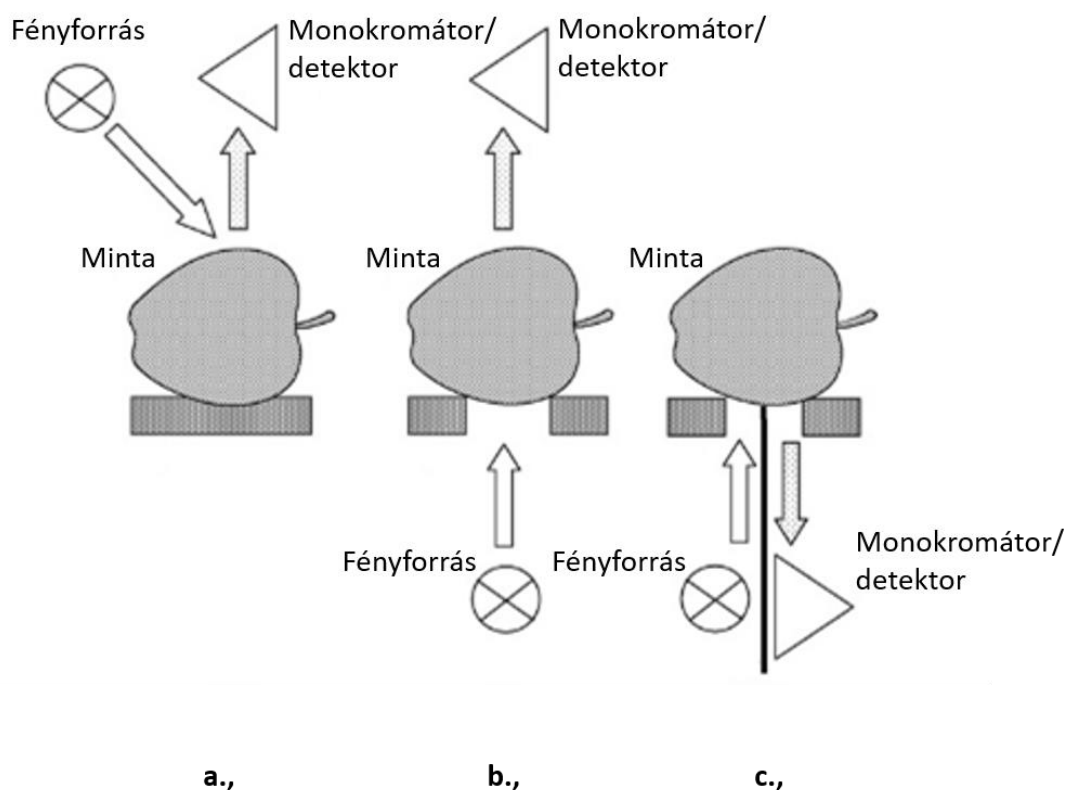


4. ábra: A minta beállításának geometriája (I_0 : beeső fény, I_T : transzmittált ill. áteresztett fény, I_R : reflektált ill. visszavert fény) (ZUDE, 2008)

Transzmittancia mérése esetén a fényforrás-minta-detektor egyvonalban helyezkednek el, a detektorba érkező fény mennyisége a mintára jellemző szórástól és abszorpciótól függ. (Híg, nem szóró minták esetén a Beer-Lambert törvény alkalmazható.)

- Transzflektancia esetén a fény a mintán áthaladva egy visszaverő felülethez ér, ahonnan a mintán keresztül a detektorba érkezik.
- Reflektancia optikai geometria szerint a detektor a megvilágított minta felületével szemben helyezkedik el, így mind a minta felületéről visszatükröződő, mind a mintával (diffúz reflexió útján) kölcsönhatásba lépett fényt fogadja.
- Részleges transzmittancia vagy remittancia: a detektor a minta felületéről visszatükröződő fénytől takarva van, viszont a fényforrás-minta-detektor által bezárt szög kisebb, mint 180 fok.
- Az interaktancia definiálható rövid úthosszú részleges transzmittanciaként, mely esetén a megvilágított és detektált területek egymás mellett helyezkednek el.

A különböző mérési elrendezéseket az 5. ábra szemlélteti reflektancia, transzmittancia és interaktancia mérése esetén.



5. ábra Összeállítások reflektancia (a.), transzmittancia (b.) és interaktancia (c.) spektrum rögzítésére. (Interaktancia mód esetén a monokromátor a felületről visszaverődő fénytől fizikailag védve helyezkedik el.) (NICOLAÏ et al., 2007)

2.3.3 Élelmiszervizsgálat spektroszkópiai módszerekkel

A közeli-infravörös spektroszkópiát az élelmiszeranalitika területén is elterjedten használják. Az analitikai alkalmazáson túl számos kutatás született az élelmiszerek minőségi jellemzőinek meghatározásáról (HILDRUM ET AL., 1992; OZAKI, MCCLURE és CHRISTY, 2006; ZUDE, 2008; RUIZ-ALTISENT et al., 2010, ALANDER et al., 2013).

Mára már a téma irodalma szinte minden potenciális mintát és vizsgálható jellemzőt feldolgozott, a teljesség igénye nélkül: állati és növényi eredetű nyersanyagok beltartalmától kezdve - víz-, (GJERDE és MARTENS, 1987; BLAKEY, BOWER és BERTLING, 2009) fehérje- (PAZDERNIK, KILLAM és ORF, 1997; PRIETO et al., 2006) és zsírtartalom (GJERDE és MARTENS, 1987; SIERRA et al., 2008); SSC (CARLINI, MASSANTINI és MENCARELLI, 2000; PEDRO és FERREIRA, 2005), pH (ANDRÉS et al., 2008; YING és LIU, 2008) - a reológiai paramétereken (keménység- *stiffness*, *firmness*) (MCGLONE, ABE és KAWANO, 1997; J. LAMMERTYN et al., 1998), érettségen (alma Streif-index) (MCGLONE, JORDAN és MARTINSEN, 2002) és minőségi hibákon át (belső hibák, ütődések, sérülések) (BLASCO et al., 2007) a félkész- és késztermékek ellenőrzéséig (NI, MEI és KOKOT, 2011).

Az utóbbi években a (külső és belső) minőségi jellemzőkön (MAGWAZA et al., 2012) túl egyre speciálisabb tulajdonságok vizsgálatára alkalmazzák a közeli-infravörös spektroszkópiát, úgy mint az eredetiség, illetve hamisítatlanság meghatározása folyékony élelmiszerek (alkoholos és alkoholmentes italok, tej, joghurt és különböző olajok) (WANG et al., 2017), illetve halak (LIU, ZENG és SUN, 2013) esetén, vagy akár a transzgenikus termékek azonosítása (ALISHAHI et al., 2010).

Napjainkban egyre több hordozható, kézi műszer jelenik meg a piacon (DOS SANTOS et al., 2013), mint például a Consumer Physics cég által fejlesztett SCiO nevű kisméretű NIR spektrométer.

A technológia jelenlegi egyik meghatározó fejlődési iránya az on-line, valós idejű alkalmazás (FU és YING, 2016). Első ízben a japán Mitsui Minig Co., Ltd. cég dolgozott ki online alkalmazást, mely NIR szenzor segítségével SSC alapján végezte barackok osztályozását (NICOLAÏ et al., 2007). Az élelmiszeriparban egyre népszerűbb a technológia, megjelennek félüzemi és üzemi alkalmazások (POREP, KAMMERER és CARLE, 2015), valamint a módszer meghatározó eleme a folyamatelemzési technológiáknak (PAT: *process analytical technology*) (GRASSI és ALAMPRESE, 2018), így a kritikus folyamatparaméterek és a minőségi tulajdonságok nyomon követésének.

A hiperspektrális kamerák elterjedése új lehetőségeket nyit meg az online minőségellenőrzésben (NICOLAÏ et al., 2007; RUIZ-ALTISENT et al., 2010).

2.4 Hiperspektrális képalkotás

A technika elsőként a távérzékelés területén jelent meg, az 1980-ban indult, Alexander Goetz vezette fejlesztés eredménye az új technológiájú érzékelővel rendelkező AIS (Airborne Imaging Spectrometer), majd AVIRIS (Airborne Visible- Infrared Imaging Spectroradiometer) lett, megkezdődött a spektrométerek repülőgépeken való alkalmazása (DALE et al., 2013; SZALAY, 2014).

A technológiát spektrálisan jellemzően a látható (VIS) és a közeli-infravörös (NIR) tartományban alkalmazzák. A látható tartományban mérhetők többek között a különböző növényi színanyagok – klorofill, karotinoidok, antociánok – melyek mennyisége és aránya a növényzet állapotáról ad tájékoztatást. A távérzékelésben elterjedten alkalmaznak különféle vegetációs indexeket (XUE és SU, 2017), melyek a látható illetve a közeli-infravörös tartományban, kettő vagy több spektrális sávon mért értékek matematikai kombinációja. A legrégebbi és legelterjedtebben alkalmazott index az NDVI (*normalized difference vegetation index*) a mért területen jelenlévő vegetáció mennyiségi meghatározását segíti. Számos indexet használnak napjainkban, így például a különböző növényi pigmentek jelenlétére érzékeny PRI-t (*photochemical reflectance index*), a CARI-t (*chlorophyll absorption ratio index*) vagy az ARI-t (*anthocyanin reflectance index*) (XUE és SU, 2017).

Ezeknek a távérzékelés által kidolgozott módszereknek a precíziós mezőgazdaságban is nagy hasznát veszik. A svájci Gamaya cég specifikus megoldásokat kínál a növények termesztésében, egyes kártevők, gyomok detektálásával, a vegetáció fejlődésének monitorozásával vagy a hozam mennyiségének becslésével.

A hiperspektrális képalkotás egyesíti a képalkotás és a spektroszkópia nyújtotta lehetőségeket, egy időben több, mint húsz spektrális csatornán a kép minden képpontján történik a rögzítés, ezáltal a komponensek kémiai jellegéről és eloszlásáról is információ nyerhető (2. táblázat).

2. Táblázat: RGB képalkotás, NIR spektroszkópia (NIRS), multispektrális képalkotás (MSI) és hiperspektrális képalkotás (HSI) összehasonlítása (GOWEN et al., 2007)

	RGB képalkotás	NIRS	MSI	HSI
Térbeli információ	igen	nem	igen	igen
Spektrális információ	nem	igen	korlátozott	igen
Több alkotóra vonatkozó információ	korlátozott	igen	korlátozott	igen
Érzékenység kisebb komponensekre	nem	nem	korlátozott	igen

A mérés eredménye a háromdimenziós hiperspektrális adatkocka, két dimenziója térbeli (x,y), harmadik pedig spektrális (λ) információt hordoz. Az adott képponton a spektrális sávokon kapott adatsort szokás „voxel”-nek, azaz vektor pixelnek is nevezni.

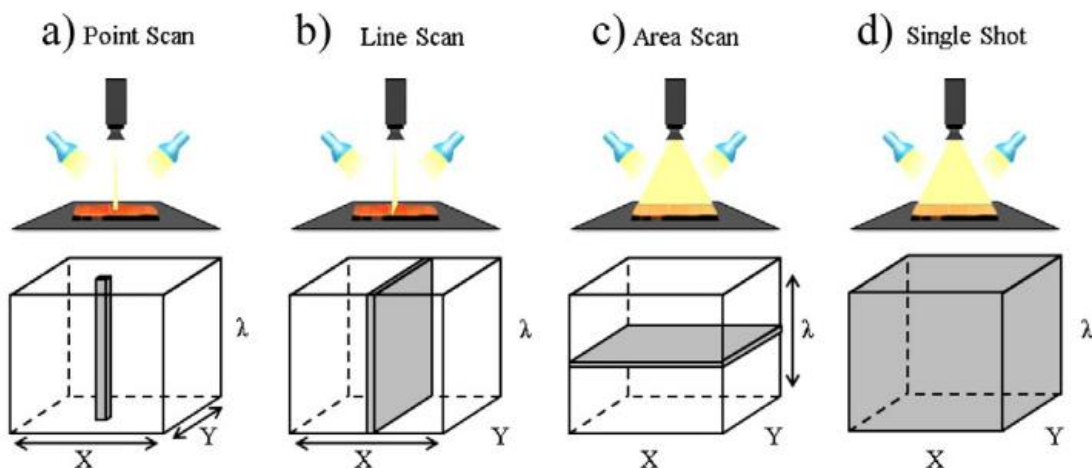
A képalkotás módja szerint négyféle módszer létezik: egy pontban mérő (*point scanning*), egy vonalban mérő (*line scanning*), egyszerre egy területen mérő (*area scanning*) és az ún. *single shot* módszer.

Az első lehetőség az egy pontban mérő spektrométer használata (*point scanning* vagy *whiskbroom* módszer), mely pontról pontra veszi fel a minta spektrumát. Ez az eljárás adja az alkalmazott spektrométertől függően a legjobb spektrális felbontást, az alkalmazás viszont időigényes és meglehetősen körülményes. Az adatok tárolása BIP (*band-interleaved-by-pixel*) formátumban történik (WU és SUN, 2013; MICHELSBURG, 2014).

A második eljárás az egy vonalban mérő (*line scanning* vagy *push-broom* módszer), a kép egy teljes vonalában, egyszerre két (y, λ) dimenzióban történik a kép rögzítése, a kamera vagy a minta a mérés közben x irányba halad. A kamera mozgására példa a távérzékelés esetén figyelhető meg, mikor a mérőrendszer repülőgépre, műholdra vagy drónra elhelyezve végzi a képalkotást. A másik esetre példa az pari körülmények között a futószalagon haladó minta mérése. A kép tárolása BIL (*band-interleaved-by-line*) formátumban történik (HUANG, LIU és NGADI, 2014).

A következő módszernél (*area scanning*, *plane scanning*, *band sequential method* vagy *wavelength scanning*) a kép látótere fix, kétdimenziós monokromatikus kép rögzítése zajlik, hullámhosszról hullámhosszra, majd BSQ (*band sequential*) formátumban kerül tárolásra. Előnye, hogy az expozíció ideje hullámhosszanként eltérő lehet, illetve nem szükséges a minta vagy a képalkotó eszköz mozgatása (WU és SUN, 2013).

Az utolsó, legújabb *single shot* vagy *snapshot* technika egy időben képes mindhárom dimenzióban rögzíteni, speciális, komplex optikai rendszerek és nagyméretű detektorok segítségével (kivéve a CASSI - *Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging* - technológiát) (HAGEN, 2012).



6. ábra Különböző hiperspektrális képalkotási módok: a.,: egy pontban mérő -point scan, b.,: egy vonalban mérő - line scan, c.,: egyszerre egy területen mérő - area scan és d.,: single shot módszer (WU és SUN, 2013)

Bizonyos, a hagyományos, színes vagy monokromatikus képeket rögzítő számítógépes látórendszereknél jelentkező problémák a hiperspektrális képalkotó rendszerek esetén is felmerülnek, melyek például a rossz megvilágítással, a zaj jelenlétével, a mért terület (ROI: *region of interest*) kiválasztásával függenek össze, ezeket a hibákat az előfeldolgozási lépésekkel tudjuk javítani. Ezen túl az információfeldolgozás is összetettebb, mivel számos hullámhosszt vizsgálunk. A multikollinearitás miatt fellépő statisztikai problémák jelentősen megnehezítik, a lényeges hullámhosszak kiválasztását vagy a pixelek osztályozását a hiperspektrális kép szegmentálásához (D. LORENTE et al., 2011).

A legszélesebb körben elterjedt statisztikai módszerek:

- főkomponens analízis (PCA),
- parciális legkisebb négyzetek módszere (PLS),
- lineáris diszkriminancia analízis (LDA),
- mesterséges neurális hálók (ANN).

Általános probléma spektrumok elemzése esetén, hogy az épített modell a tanuló mintákra vonatkozóan jó eredményt mutat, viszont új adatok esetén nem tud megfelelő becslést adni. Ilyen esetben az épített modell „túlillesztett” (*overfitting*), ez a hiba a modellépítésben nagy számú változó (illetve a megfigyelések vagy minták számához képest nagy számú faktor) esetén jelentkezhet.

2.4.1 Hiperspektrális képalkotó rendszer felépítése

Fényforrások: A halogén lámpákat VIS és NIR tartományban elterjedten alkalmazzák, ezek univerzális, szélessávú fényforrások, hátrányuk viszont, hogy jelentős hőleadással rendelkeznek.

Ezen kívül alkalmaznak LED-eket (*light emitting diode*), lézert és hangolható fényforrásokat, melyek esetén a fény felbontó egységet a mintát megvilágító nyaláb útjában helyezik el. Az intenzitás ebből adódóan alacsony, tehát a technika kíméli a mintát a hőhatástól. Ebből adódóan a hangolható fényforrásokat a történelmi dokumentumok vizsgálata esetén alkalmazzák (WU és SUN, 2013a).

A fény diszperziója: szélessávú fényforrások használatánál a fényt felbontó eszközök elengedhetetlen elemei a képalkotó rendszernek. Megvalósításának legegyszerűbb módja a szűrő kerék (filter wheel), melyben adott hullámhosszú sugárzást (UV, VIS vagy NIR tartományban) átengedő szűrők (bandpass filter) helyezkednek el (WU és SUN, 2013a).

A line scanning módban működő képalkotó spektrográfok optikai rácsok, illetve prizmák segítségével bontják a fényt. Az elektromosan hangolható szűrők két típusa az akusztó-optikailag (AOTF: acousto-optic tunable filter) és a folyadékkristályos (LCTF: liquid crystal tunable filter) hangolható szűrő. Nem tartalmaznak mozgó alkatrészt, viszont spektrális felbontásuk korlátozott (5-20 nm). A Fourier-transzformációs képalkotó spektrométerek egy interferométer segítségével működnek, a kapott interferogramból inverz Fourier transzformáció útján kapható meg a spektrum (WU és SUN, 2013a).

Mátrix detektorok: a beeső fotonokat elektronokká alakítva mérik a beérkező fény intenzitását. A szilárd fázisú mátrix detektorok (solid state area detector) két nagy csoportja a töltéscsatolt - CCD (charge-coupled device) és a CMOS (complementary metal- oxide-semiconductor) detektorok. Alapegységeik a fényérzékeny anyagból készülő fotodiódák (WU és SUN, 2013a; HUANG, LIU és NGADI, 2014).

A hiperspektrális képalkotás területén gyakran használt fotoszenzitív anyagok a szilikon (Si) UV, VIS és SW-NIR tartományban, az indium-gallium-arszenid (InGaAs) NIR tartományban és a

higany-kadmium-tellurid (mercury cadmium tellurium: MCT vagy HgCdTe) MIR és NIR tartományban. További alkalmazható anyagok az ólom-szelenid (PbSe) (1,5-5,2 μm között), az ólom-szulfid (PbS) (1-3,2 μm között), indium-antimonid (InSb) (1-6,7 μm között), platina-szilicid (PtSi) (1-5 μm között), germánium (Ge) (0,8-1,7 μm között és a deuterált triglicil-szulfát DTGS) (0,8 és 25 μm között) (WU és SUN, 2013a).

A mérést megelőzi a rendszer **spektrális és térbeli kalibrációja**. A szenzor működéséből fakadóan a szenzor felületén megjelenő szabad töltéshordozók zavaró hatást fejtenek ki. Ez a zaj kiküszöbölhető **a reflektancia kalibráció** végrehajtásával. Ennek során egy a fényforrás kikapcsolt állapota mellett, letakart szenzorról készült felvétellel (sötét referencia) és egy, a használt mérési beállítások mellett, egy ~99,9% visszaveréssel rendelkező reflektancia sztenderdről készült felvétellel (világos referencia) korrigáljuk a mért értékeket (WU és SUN, 2013a).

$$R = (I_s - I_d) / (I_w - I_d) \times 100$$

R: korrigált hiperspektrális kép relatív reflektancia értéke (%),

I_s : nyers (korrigálatlan hiperspektrális kép),

I_d : sötét referencia kép,

I_w : világos referencia kép.

2.4.2 A hiperspektrális képalkotás alkalmazása az élelmiszerminőség és biztonság területén

Ma már az élelmiszertudomány területén is komoly irodalma van a technológiának. WU és SUN (2013b) összefoglaló cikkükben az alkalmazások rendkívül széles körét írták le.

Hús és állati termékek esetén a vizsgált paraméterek többek között a porhanyósság (*tenderness*) (ELMASRY, SUN és ALLEN, 2012; TAO et al., 2012), Warner-Bratzler nyíróerő (Warner-Bratzler shear force: WBSF) (WU et al., 2012), vízmegtartó képesség (*water holding capacity*: WHC) (KAMRUZZAMAN et al., 2012) vagy csepegési veszteség (BARBIN et al., 2012), zsírtartalom (márványozottság) (WOLD et al., 2011) és bizonyos zsírsavak mennyisége volt

(KOBAYASHI et al., 2010). Élelmiszerbiztonsági szempontból súlyponti kérdés a szennyeződések és mikroorganizmusok kimutatása. Több sikeres kutatás született az összecsíraszám (Feng és Sun, 2013a) és egyes gyakran előforduló baktériumok (*Pseudomonas*, *Enterobacteriaceae*) meghatározásáról (FENG és SUN, 2013b; FENG et al., 2013), bár ez a terület ma még számos új lehetőséget rejt. A szennyezettség kimutatásának terén viszont már több automatikus, akár ipari környezetben működő valós idejű (*real-time*) megoldás létezik (YOON et al., 2011).

A húsmintáknál említett paraméterek (nedvességtartalom, textúra, pH, WHC) a hal minták esetén is relevánsak, ezek mellett egyéb tényezők vizsgálata is előtérbe kerül, mint a frissességnek (SIVERTSEN, KIMIYA és HEIA, 2011; IVORRA et al., 2013) vagy a jég mennyiségének meghatározása (STEVİK et al., 2010). A WU és SUN (2013b) összefoglaló cikkében említett mérések szinte mind a 400-1000 nm közötti spektrális tartományban történtek.

Zöldség és gyümölcs minták esetén a szín (ARIANA és LU, 2010; GARRIDO-NOVELL et al., 2012; SÁNCHEZ et al., 2014), a nedvességtartalom (RAJKUMAR et al., 2012), a keménység (LU és PENG, 2006; ELMASRY et al., 2007) és az SSC (AMODIO et al., 2017) a kulcs faktorok a minőséget illetően, ezek mellett az érettségi fok becsléséről is készültek kutatások (ELMASRY et al., 2007; SÁNCHEZ et al., 2014). Ezeknél a mintáknál számos forrása lehet a termék minőségcsökkenésének, ezek közül (a teljesség igénye nélkül) az irodalom sikerrel vizsgálta például a felületi, illetve rovar okozta sérülés detektálását (SARANWONG et al., 2011), nem látható sérülést kiwi gyümölcsön (LÜ et al., 2011), nyomódást például almán, hagyma bakteriális (WANG et al., 2012) és citrusfélék penész eredetű fertőzöttségét (LORENTE et al., 2011; LORENTE et al., 2012; GÓMEZ-SANCHIS et al., 2013).

Gabonafélék esetén meghatározó kérdések az utóbbi időben a rovarok okozta károsodás és a toxintermelő mikroorganizmusok (*Fusarium*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus parasiticus*, *Aspergillus niger*) és termékeik kimutatása (WU és SUN, 2013b).

Egy viszonylag korai cikkben (QIAO et al., 2007) eredményesen alkalmazták a hiperspektrális képalkotást 400–1000 nm között sertéshús minőségi kategóriákba sorolására (RFN: *reddish pink, firm, non-exudative*; PSE: *pale pinkish-grey, very soft, exudative*; PFN: *pale, firm, non-exudative*, RSE: *reddish, soft, exudative*) és márványozottságuk becslésére, melyet a hússzelet zsírtartalma és annak eloszlása határoz meg.

LU és PENG (2006) őszibarack keménységét vizsgálták Magness-Taylor -féle penetrometriás és 500 és 1000 nm között végzett hiperspektrális eljárással. Az adott hullámhossz értékeken

kétparaméteres Lorentz-féle eloszlásfüggvényt illesztettek a fény szóródása alapján, multilineáris regressziós modellel becsülték a keménységet, majd keresztvalidációt végeztek. A 677 nm-en mért értékek korreláltak a legjobban a keménységgel, ami a klorofillre jellemző elnyelésre utal.

POLDER et al. (2003) hiperspektrális módszerrel és független komponens analízissel (ICA) válogattak különböző érettségi állapotú paradicsomokat. Két fontos független változót találtak a spektrális adatok alapján, melyek a likopin és a klorofill tartalomra utaltak. Ezzel a módszerrel fejleszthető adott komponens(ek)re (és eloszlásukra) érzékeny válogató, ahol a kalibráció in-line történik, független komponens analízissel.

Áfonya minőségének jellemzésében elsősorban a méret, keménység és az oldható szárazanyag-tartalom a meghatározó tényező. 500-100 nm közötti reflektanciára vonatkozó hiperspektrális adatokkal és PLS módszerrel LEIVA-VALENZUELA és munkatársai (2013) sikeresen becsülték mind a keménységet ($R=0,87$), mind az SSC értékét ($R=0,79$). (LEIVA-VALENZUELA, LU és AGUILERA, 2013)

A kutatások más ága bizonyos összetevők kvantitatív meghatározását célozza. Fagyasztva szárított brokkoli mintákon 950–1650 nm között végzett hiperspektrális mérésekkel (maszkolás, SNV kezelés és PLS módszer útján) érték el ígéretes eredményt a glikozinolát-tartalomra és annak eloszlására vonatkozóan (HERNÁNDEZ-HIERRO et al., 2014).

AMODIO és munkatársai különböző érettségi állapotú édeskömény minták beltartalmát és egyéb ehhez kapcsolódó minőségi jellemzőit vizsgálták 400–1000 nm és 900–1700 nm közötti tartományban. A 400–1000 nm között mért adatokat felhasználva kielégítő pontosságot értek el az oldható szárazanyag tartalom, bizonyos cukrok és szerves savak mennyiségének, a fenoltartalomnak és az antioxidáns aktivitás becslésére vonatkozóan, valamint PLS-DA módszerrel sikeresen osztályozták a különböző érettségi állapotú mintákat (AMODIO et al., 2017).

CHAUDHRY et al. (2018) szabdalt kányazsásza (*Diplotaxis tenuifolia*) eltarthatósági idejét (shelf-life) becsülték sikerrel 400–1000 nm közötti hiperspektrális képalkotással és a MASLT (*multivariate accelerated shelf life testing*) módszerrel.

Az ipari alkalmazás lehetőségei szempontjából komoly potenciál rejlik a módszerben a különböző feldolgozási folyamatok on-line monitorozásának területén (LIU, PU és SUN, 2017).

2.4.2.1 Minőségi paraméterek becslése dinnye mintákon

SUN, HUANG, XU, és YING, (2010) dinnye és sárgadinnye belső minőségének roncsolásmentes lehetőségeiről szóló cikkükben kiemelik a NIR spektroszkópiát és a módszer on-line megvalósíthatóságát.

SÁNCHEZ, és munkatársai (2014) NIR spektroszkópiával, roncsolásmentesen becsülték sárgadinnye minták belső felületén, CIELAB színrendszerben mért színjellemzőit (a^* , b^* , C^* , h^*), melyek a termék minősége és érettségi állapota szempontjából meghatározó paraméterek.

JIE és munkatársai (2014) olyan roncsolásmentes on-line válogatórendszert fejlesztettek ki, amely VIS és NIR tartományban diffúz transzmittancia spektrum alapján becsüli a vonalon haladó görögdinnye minták oldható szárazanyag tartalmát (SSC).

SUGIYAMA, TSUTA és SUN, (2010) különböző érettségi állapotú sárgadinnyéket mértek 400-1000 nm közötti hiperspektrális képalkotással, a 676 nm-nél kapott abszorbancia adatok alapján a cukor eloszlását eredményesen szemléltették.

2.4.2.2 Kétspórás csiperke vizsgálata hiperspektrális látórendszerrel

A gombák fontos szerepet töltenek be a humán táplálkozásban és e tekintetben jelentőségük egyre nő: a világon megtermelt ehető gomba mennyisége 1978 és 2013 között több, mint harmincszorosára nőtt (DIEGO és PARDO-GIMÉNEZ, 2017). Kedvező a hatásuk az egészségre, köszönhetően összetételüknek (magas fehérjetartalom, esszenciális aminosavak, alacsony keményítő- és koleszterintartalom, alacsony zsírtartalom, vitamin- és ásványi anyag forrás) (KALÁČ, 2009; WANI, BODHA és WANI, 2010). Ezen felül védelmet nyújtanak az oxidatív stresszel szemben, hiszen magas antioxidáns- illetve polifenol-tartalommal rendelkeznek, amely kétspórás csiperke esetén jelentős eltéréseket mutathat a termesztés körülményeitől függően (GEÖSEL et al., 2011)

Európában az egyik legelterjedtebben termesztett fajta a kétspórás csiperke (*Agaricus bisporus*), a világ gombatermesztésének mintegy egyharmadát a csiperke adja (GEÖSEL et al., 2011).

A gombák minőségét számos tényező együttesen határozza meg, mint a megjelenés, frissesség, szín, méret, érettségi állapot, fejlettségi állapot, keménység, turgor (szövetrugalmasság), mikrobák megjelenése, tisztaság, hibamentesség, súlycsökkenés és foltosodás. Szedést követően igen rövid, mindössze 3-4 napos eltarthatósági idővel rendelkeznek, érzékenyek a mechanikai hatásokra, könnyen kialakul enzimatikus barnulás a szövetekben, valamint magas víztartalmuk lehetővé teszi a mikroorganizmusok szaporodását (AGUIRRE et al., 2008).

A gombatermesztésben fellépő egyik legmeghatározóbb probléma a baktériumok és gombák által okozott fertőzések megjelenése, amely jelentős veszteségeket okoz az alacsonyabb kihozatal, csökkent minőség és rövidebb eltarthatósági idő által (SOKOVIĆ és GRIENSVEN, 2006).

A csiperketermesztésben a legjellemzőbb patogén baktérium a *Pseudomonas tolaasii*, mely a gombafejek foltosodását, elszíneződését okozza (FLETCHER és GAZE, 2008) (7. ábra).



7. ábra: Baktérium okozta foltosodás csiperke kalapján (Fletcher és Gaze, 2008)

A mikroszkopikus gombák szintén gyakori okozói a csiperke minőségromlásának. A pókhálós penész igen elterjedt betegség, melyet elsősorban a *Cladobotryum dendroides* (avagy *Dactylium dendroides*) és a *C. mycophilum* okoz (FLETCHER és GAZE, 2008; GYÖRFI, 2010; MYCOBANK Fungal databases, 2014). A fertőzés elnevezése annak legjellemzőbb tünetére utal: pókháló-szerű micéliumok jelennek meg a termőtest vagy a takaró föld felszínén. A termőtest világosbarna elszíneződése és zsugorodás figyelhető meg. A kalapon kétféle folt látható, az első típus sötétbarna határozatlan kontúrral, a második típus világosbarna kerek kontúrral (GYÖRFI, 2010).

Korábbi kutatások kimutatták, hogy a pókhálós penészt okozó *Cladobotryum mycophilum* és *C. dendroides* rezisztens lehet bizonyos gombaölő-szerekkel szemben, mint a tibenzol, karbendazim és a prokloráz-Mn komplex (GROGAN és GAZE, 2000).

A *Trichoderma* nemzetség által okozott zöld penész szintén igen elterjedt, agresszív gombapatogén (8. ábra). Gyakran jelenik meg a termesztés környezetében fa polcokon vagy tálcákon (FLETCHER és GAZE, 2008). A fertőzés tünetei jelentkezhetnek a komposztban és a takaró földön: eleinte fehér fonalak jelennek meg, majd pár nap elteltével színük zöldre változik.

A termőtesteken apró foltok alakulnak ki. A *Trichoderma* és a *Cladobotrium* által okozott fertőzés tünetei igen hasonlóak (GYÖRFI, 2010).



8. ábra *Trichoderma aggressivum* fertőzés okozta foltosodás csiperkén (FLETCHER és GAZE, 2008)

TAGHIZADEH et al. (2009) eredményesen becsülték kétspórás csiperke nedvességtartalmát 400-1000 nm között HSI módszerrel és PLSR modellel, a spektrumokat legeredményesebben SNV eljárással transzformálták, a módszer a nedvességtartalom eloszlásának szemléltetésére is alkalmasnak bizonyult.

TAGHIZADEH et al. (2010) különböző csomagolású (PVC és különbözően perforált PET fóliák) csiperkegombák minőségét vizsgálták 14 napon keresztül HSI módszerrel 400-1000 nm között, illetve mérve a súlycsökkenést, színt, érettségi indexet és gázösszetételt (CO_2 , O_2). A különböző csomagolások hatását a minőségre ANOVA módszerrel értékelték, a hiperspektrális adatokat PLSR becsléssel elemezték.

GOWEN et al. (2008) szeletelt csiperke tárolás alatt bekövetkező minőségváltozását követték nyomon 400-1000 nm között mérve hiperspektrális képalkotással, a vizsgálat során a nedvességtartalmat, reológiai jellemzőket és a CIE Lab színekoordinátákat (L^* , b^*) becsülték PCR és MLR modellel, melyek közül a PCR jobb eredményt adott.

A színjellemzők esetén az L érték pontosabb becslése érhető el 400-1000 nm között alkalmazott HSI és SNV módszerrel, mint a hagyományos RGB képekkel, továbbá a gombák felülete is eredményesebben jellemezhető volt. (Taghizadeh, Gowen és O'Donnell, 2011a)

GASTON et al. (2010) csiperkegombában a polifenol-oxidáz enzim aktivitását mérték, mely az enzimatis barnulás fő okozója, illetve a hiperspektrális méréseket 400-1000 nm között végezték. A modellépítést szintén PCR módszerrel (három főkomponens alapján), valamint

MLR és PLSR módszerrel, a spektrumok előfeldolgozását MSC és SNV módszerrel végezték. A legeredményesebb eljárást az MSC módszer és a PCR regresszió kombinációjával kapták.

TAGHIZADEH et al. (2011b) a HSI módszer alkalmazhatóságát vizsgálták 445 és 945 nm között csiperkegombán az egészséges szövetek, enzimátikus barnulást mutató (mechanikai igénybevételnek kitett) és takarófüldelel szennyezett mintákon. Az eredményeik szerint a technika PLS-DA modellel eredményesen osztályozta a mintákat és nagyobb pontossággal, mint az RGB képek adatai alapján.

GOWEN et al. (2009) HSI módszerrel a 400 és 1000 nm közötti spektrumokat SNV módszerrel dolgozva fel, PCA és LDA módszerrel igen magas, 95% fölötti pontosságot értek el ép és fagyássérült csiperkék osztályozásában.

ESQUERRE et al. (2012) hiperspektrális adatok alapján olyan multispektrális rendszert dolgoztak ki, amely a mechanikailag sérült csiperke mintákat már korai fázisban detektálja. Az adatokat 880-1720 nm között, 7 nm-es spektrális felbontással rögzítették, EMCVS (ensemble Monte Carlo variable selection) módszerrel meghatározták a legstabilabb normalizált regressziós koefficiens mutató hullámhossz-régiókat, majd PLS-DA modellt építettek az adatokból. Öt kulcs tartományt azonosítottak 971, 1090, 1188, 1384 és 1454 nm körül.

GASTON et al. (2010) PLS-DA módszer segítségével 95%-ot meghaladó pontossággal osztályoztak ép, mechanikailag sérült és *Pseudomonas tolaasii* baktériummal fertőzött csiperke mintákat két lépésben. A baktérium kimutatása korábbi, Vízhányó és Felföldi (2000) által, látórendszerrel végzett vizsgálat esetén is sikeres volt. A *Pseudomonas tolaasii* ugyan nem humánpatogén mikroorganizmus, viszont jelentős gazdasági károkat okoz világszerte. Bár a *Pseudomonas tolaasii* fertőzés esetén a módszer ígéretesnek bizonyult, vírus okozta („mushroom virus X”) fertőzés kimutatásának alkalmazása sikertelen volt.

2.4.2.3 Mikrobiális eredetű fertőzések detektálása növényeken

SANKARAN és munkatársai (2010) összefoglaló cikkükben megemlítik mind a VIS-NIR spektroszkópiát, mind a hiperspektrális képalkotást napjaink legújabb, növényeken megjelenő fertőzések kimutatására alkalmas technikái között. A hiperspektrális technológia alkalmazását érintő legnagyobb kihívás szerintük az adott betegségre specifikus hullámhosszak és a megfelelő osztályozó algoritmus kiválasztása.

GOWEN és munkatársai (2015) a HSI mikrobiológiai vonatkozású alkalmazásáról szóló kutatásokat három kategóriába sorolták: (1) alapkutatások, melyek során a mikrobiológiai szempontból fontos biokémiai folyamatokról gyűjtenek információt, (2) alkalmazott kutatások,

általában „mesterséges” táptalajon tenyésztett mikroorganizmusok vizsgálata és azonosítása mikroszkopikus szinten, (3) alkalmazott kutatások, mikroorganizmusok kimutatása makroszkopikus méretben, „valódi” szubsztráton, például élelmiszeren. A mikroorganizmusok metabolizmusa a mátrix összetételének változását idézi elő, amely potenciálisan kimutatható HSI technikával.

RUMPF és munkatársai (2010) cukorrépákat fertőztek meg különböző mikroorganizmusokkal (*Cercospora beticola*, *Uromyces betae*, *Erysiphe betae*). Vegetációs index értékek és SVM módszer segítségével eredményesen osztályozták a vizsgált leveleket fertőzött és egészséges kategóriákba, valamint a fertőzött leveleket kórokozó szerint. A betegség kimutatása már a tünetek megjelenése előtt ígéretes eredményeket mutatott.

Világszerte elterjedt probléma a hagyma pszeudomonászos betegsége, melynek kórokozója a *Burkholderia cepacia* baktérium. WANG és munkatársai (2012) 950–1650 nm között mért reflektancia alapján FDA módszerrel 80%-os, míg SVM módszerrel 87,14%-os pontossággal osztályozták a mintákat egészséges és fertőzött kategóriákba.

Szintén jelentős gazdasági veszteséget okoz a citrusfélék penészgomba eredetű fertőzése, a legnagyobb károkat szedés után (post-harvest) a *Penicillium* nemzetség fajai okozzák. LORENTE és munkatársai (2011) hiperspektrális technikával kapott adatokból spektrális indexeket képezve a vevő működési karakterisztika (ROC) görbe és mesterséges neurális hálók (ANN) segítségével, különböző bemeneti jellemzőkkel tesztelve a módszert, a pixeleket sikeresen osztályozták, a leghatékonyabb módszerrel a romlás kimutatását illetően 95,5%-os osztályozási pontosságot értek el. (LORENTE et al., 2011). Egy későbbi cikkben több módszert teszteltek a megfelelő jellemzők kiválasztására, majd a kapott változók alapján CART (*Classification And Regression Trees*) és ANN módszerrel végeztek szegmentálást. Az eredmények alapján a szerzők szerint multispektrális látórendszer hozható létre, mely magas pontossággal különíti el a fertőzött gyümölcsöket (GÓMEZ-SANCHIS et al., 2013).

2.4.2.4 Mikotoxin-termelő mikroszkopikus gombák vizsgálata

Az egyik legnagyobb élelmiszerbiztonsági kockázatot azok a gombák okozzák, melyek olyan szekunder metabolitokat (mikotoxinokat) termelnek, mint az aflatoxinok, sterigmatocisztin, ochratoxin, fumonizinek, zearalenon, illetve A és B típusú trichotecének, mint a deoxinivalenol (DON). A fuzárium nemzetség tagjai sokféle mikotoxint termelnek, köztük zearalenont, trichotecéneket és fumonizineket. A fumonizinek tipikus szennyezői a kukoricának, a fumonizin B1 rákkeltő hatása igazolt. A trichotecének proteinszintézis-gátlók, dermatotoxikusak,

immunszuppresszívek és az egyik legjelentősebb képviselőjük, a DON toxin emetikus hatású (innen ered az elterjedt vomitoxin elnevezés) (JAKUCS és VAJNA, 2003).

Miután a mikotoxinok meghatározására általánosan használt analitikai módszerek, mint az enzimhez kapcsolt immunszorbens vizsgálatok (ELISA) és az LC-MS/MS költségesek, időigényesek és nem alkalmazhatóak terepen, az utóbbi években új módszerek jelennek meg a mikotoxinok illetve a gomba eredetű fertőzések kimutatására (PRIETO-SIMÓN, NOGUER és CAMPÁS, 2007; MCMULLIN, MIZAIKOFF és KRŠKA, 2014)

Noha a jelenlegi IR alapú módszerek nem képesek az élelmiszerekben előforduló mikotoxinok direkt meghatározására, a gabonák gomba eredetű fertőzése vizsgálható a belső jellemzők által, például a fuzárium fajok a szénhidrát és fehérjetartalom változását idézik elő (HE és SUN, 2015)

Az elmúlt években egyre több kutatás születik a HSI alkalmazási lehetőségeiről különböző fungális fertőzések, illetve mikotoxinok jelenlétének kimutatásáról gabonaféléken. Köztük fuzárium okozta kár kimutatásáról búzán (BAURIEGEL et al., 2011; BARBEDO, TIBOLA és FERNANDES, 2015) és durumbúza szemeken (SERRANTI, CESARE és BONIFAZI, 2013), ochratoxin A szennyezés kimutatásáról tárolt búzán (SENTHILKUMAR et al., 2017) és árpán (SENTHILKUMAR et al., 2016).

BARBEDO et al. (2017) olyan algoritmust fejlesztettek ki, amely néhány kiválasztott sávon mért adat alapján 72% illetve 81% pontossággal képes osztályozni a fuzáriummal fertőzött búzaszemeket kettő, illetve három osztályba. Bár a módszer nem alkalmas a DON-tartalom direkt becslésére, indirekt módon viszont a fuzárium okozta károsodás alapján kielégítő pontosság érhető el a feldolgozó vonalon való monitoring megvalósításához.

DEL FIORE et al. (2010) 12 kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridet (*Zea mays L.*) tanulmányozott, melyeket mesterségesen fertőztek különböző *Aspergillus* törzsekkel, három *Fuzárium* törzsszel és *Penicillium*mal. A hiperspektrális képek adatain PCA-t végeztek, a súlyfaktor értékek alapján kiválasztották a meghatározó hullámhosszokat (410 nm, 470 nm, 535 nm, 945 nm), az ezeknél mért adatokon ANOVA-t és Fisher-féle LSD tesztet végeztek. A Fisher-féle LSD teszt azt mutatta, hogy a különböző gomba-eredetű fertőzések eltérő spektrális tulajdonságokat mutatnak. 410 nm és 470 nm szignifikáns eltérést mutatott 48 órával az *A. flavus*-szal és *A. niger*-rel való befertőzés után.

Egy későbbi vizsgálatban *F. verticillioides*-szel fertőzött egész kukoricaszemekről készítettek hiperspektrális felvételeket 960–1662 nm és 1000–2498 nm között. A PCA-val való adatredukció elvégzése után átlagra centrálást (*mean centering*) és PCA-t végeztek a tisztított

adatokon. Az első főkomponens score plot-ja alapján két klaszter (alacsony és közepes értékek) rajzolódott ki a szem fertőzött és nem fertőzött területeinek megfelelően. PLS-DA alkalmazásával sikerült elkülöníteni a csoportokat és helyesen becsülni a fertőzött és nem-fertőzött területek osztályhoz tartozását (WILLIAMS et al., 2010).

Egy ezt követő kutatás során egész kukoricaszemeket (*Zea mays L.*) fertőztek meg *Fusarium verticillioides*-szel, majd HSI módszerrel készítettek felvételeket 1000-2498 nm között. 8 spektrum átlagán SNV transzformációt és átlagra centrálást alkalmaztak, majd minden kezelt csoportra vonatkozóan PLS modellt építettek. A PCA 4. és 5. főkomponens score plot-ján a fertőzés időbeli trendje volt megfigyelhető (az első három főkomponens a topográfiát írta le). A szemek orientációjának meghatározó hatása volt a modellre. A 4. főkomponens faktorsúly ábráján pozitív csúcsok voltak megfigyelhetőek 1045 nm-nél (keményítőre utaló érték), 1668 nm-nél (aromás szerkezetre utaló érték), 1900 nm-nél (keményítőre utaló érték) és 2136 nm-nél (fehérjére utaló érték). PLS modellel a fertőzés foka becsülhető volt (WILLIAMS et al., 2012).

Egy kifejezetten fuzáriumok növekedésére koncentráló kutatás során burgonya dextróz agaron tenyésztettek ki *Fusarium subglutinans*, *Fusarium proliferatum* és *Fusarium verticillioides* fajokat és HSI módszerrel vizsgálták a mintákat. A micélium növekedése által tapasztalt időbeli változás PCA és PLS-DA módszerrel észlelhető volt. PLS-DA alkalmazásával a fuzárium törzsek megkülönböztethetőek voltak egymástól. (WILLIAMS et al., 2012b).

A vizsgálathoz erősen kapcsolódó másik munkában szintén *Fusarium subglutinans*, *Fusarium proliferatum* és *Fusarium verticillioides* növekedési karakterisztikáját követték HSI módszerrel, PCA és az úgynevezett “sepréses technikával” (*brushing technique*), különböző növekedési zónák voltak azonosíthatóak a score plot-on. A feldolgozott spektrumokon három olyan releváns régiót találtak, melyek a minták szénhidrát-tartalmának változására utalnak (1166 és 1380 nm), illetve egyet, amely a fehérjetartalomra (1918 nm) (WILLIAMS et al., 2012a).

WANG et al. (2014) 1000 és 2500 nm közötti HSI mérés alkalmasságát tanulmányozták az aflatoxin B1 (AFB1) szennyeződés kimutatására egészséges kukoricaszemek felületén. Az SNV transzformált spektrumokon PCA-t végeztek, és a látens változókon lépésenkénti faktoriális diszkriminancia analízist végeztek (stepwise factorial discriminant analysis). Az összesen 4 diszkrimináló faktor közül az első három béta koefficiense alapján meghatározták a kulcs hullámhossz-értékeket: 2344 nm, 2274 nm, 2057 nm, és 1729nm.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 Alkalmazott hiperspektrális képalkotó rendszerek

A csiperkén és görögdinnyén végzett méréseket a Szent István Egyetem Élelmiszertudományi Karán, a Fizika Automatika Tanszéken végeztem. Az itt található Headwall XEVA-1648 XC134 hiperspektrális képalkotó rendszer push-broom módszerrel, 900 és 1700 nm közötti tartományban 5 nm-es felbontással mér (9. ábra). A rendszer Specim spektrográffal rendelkezik, melyben Xenoth 14 bites szenzor működik, a szenzor-mátrix indium-gallium-arzenid (InGaAs), spektrális felbontása 256 px, térbeli felbontása 320 px, az alkalmazott beállításokkal a spektrális felbontás 5 nm, a térbeli felbontás pedig 0,475 mm volt.

A mérési rendszer érzékenysége hely szerint és spektrálisan nem egyenletes. A méréseket megelőzően a kalibráció során egy világos (fehér) etalon (NCS 0300) és az elsötétített kép mérésével kezelhetőek a megvilágítás és a szenzorok okozta egyenetlenségek – e két szélső érték segítségével számítható a mérési adatból a relatív reflektancia értéke.



9. ábra Headwall Photonics hiperspektrális képfeldolgozó rendszer (forrás: Headwall Photonics)

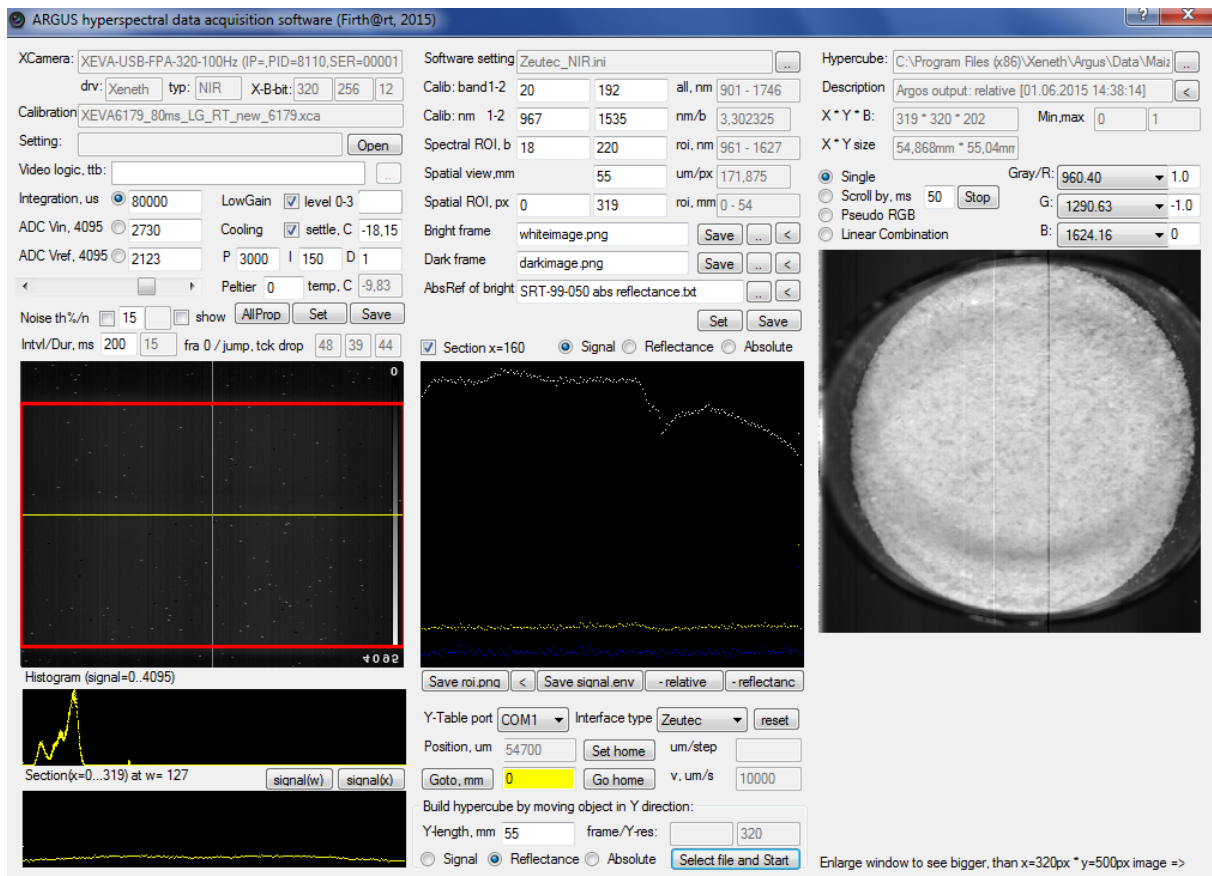
A hiperspektrális felvételek rögzítését a mikotoxinnal szennyezett kukorica minták esetén a bécsi Universität für Bodenkultur (VIRIS lab for Analytical Ecogeochemistry) push broom rendszerű, Zeutec GmbH. gyártmányú műszerével végeztem, (Xeva-USB-FPA-1.7-320-TE1 kamera,

InGaAs szenzorral - 12 bit, 320 x 256 térbeli felbontás, ImSpector N17E spektrográf 5nm spektrális felbontás), mely 900 és 1700 nm között mér (10. ábra). Az alkalmazott beállításokkal a felbontás 0,172mm/px volt. A méréseket megelőzően kétpontos reflektancia kalibrációt végeztem Spherooptics gyártmányú diffúz reflektancia sztenderd segítségével.



10. ábra: Zeutec GmbH.gyártmányú hiperspektrális képalkotó rendszer a bécsi Universität für Bodenkultur (VIRIS lab for Analytical Ecogeochemistry) épületében

A Fizika-Automatika Tanszéken fejlesztett Argus szoftver (FIRTHA, 2011) végezte mindkét mérőrendszer esetén a hiperspektrális képfeldolgozó rendszer, a szenzorok és a léptetőmotor vezérlését. A szoftver támogatja az optimális A/D paraméterek beállítását, a kétpontos spektrális kalibrációt, a látótér kalibrálását, a mintatartó asztal mozgását és a képek megfelelő frekvenciával történő felvételét (11. ábra).



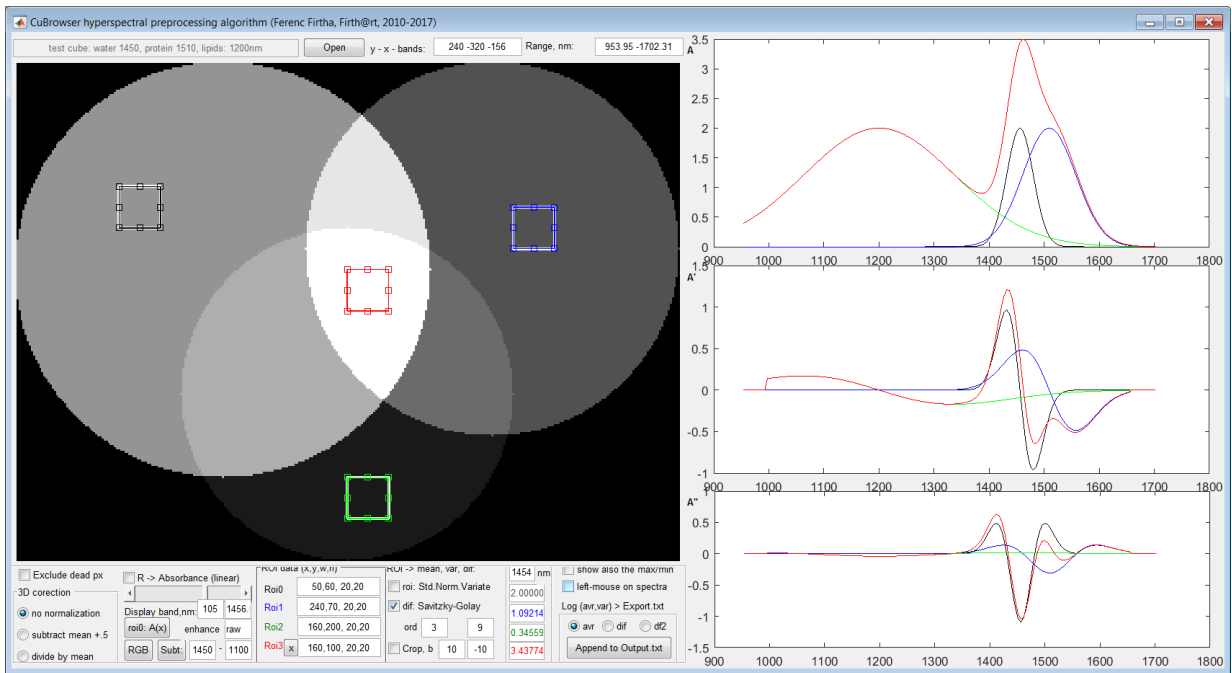
11. ábra: Hiperspektrális képalkotó rendszer vezérlését végző Argus szoftver kezelőfelülete (FIRTHA, 2011)

3.2 Alkalmazott előfeldolgozási módszerek

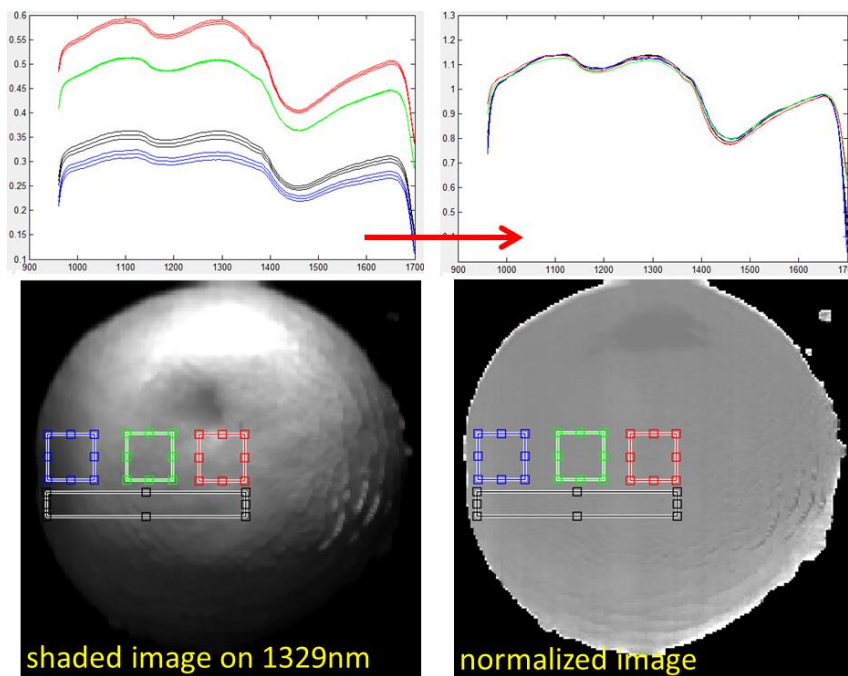
A mérés során különböző a műszerre jellemző (detektor érzékenységének különbségei stb.) illetve külső tényezők (hőmérséklet hatása, mért minta felületi egyenetlensége miatti eltérések stb.) okozta zavaró hatás jelentkezhethet, amely hatással van a mért értékekre. Ezen tényezők hatása különböző előfeldolgozási módszerekkel csökkenthető. A magas („zaj”) vagy alacsony („háttér”) frekvenciájú interferenciák hatásának kiküszöbölésére szolgáló módszerek kihasználják az adathalmaz változói közötti kapcsolatot (WISE, GALLAGHER és WINDIG, 2006).

A CuBrowser szoftver lehetővé teszi számos kép- és spektrum-előfeldolgozás tesztelését a vizsgált hiperspektrális képen (12. ábra). Az indium-gallium-arszenid szenzor, jellemzőiből adódóan egyes képpontokon pozitív, illetve negatív maximumokat érzékel, ezt a szoftver korigálja (*dead pixel correction*), valamint zajszűrést alkalmaz (medián filter). A jelölők segítségével manuálisan választhatjuk ki a megfelelő érdeklődési területeket, az ezeken a képpontokon kapott spektrumok átlagát jeleníti meg a jobb oldali mezőben, alatta pedig ennek első, legalul pedig második deriváltját. A szoftver segítségével különböző spektrális előkezeléseket is végezhetünk, normálást (kivonással, illetve osztással), Savitzky-Golay simítást,

illetve sorstandardizálást (SNV módszer). Ezen túl a spektrumok eleje és vége (melyek jellemzően zajjal terheltek) eltávolíthatóak a *crop* funkcióval.



12. ábra: CuBrowser szoftver kezelőfelülete (FIRTHA és ÉDER, 2012)



13. ábra: Hiperspektrális kép 1329 nm-nél vett metszete csiperke kalapjáról (bal, lent), a kiválasztott érdeklődési területek átlagspektumai (bal, fent), hiperspektrális, osztással normált kép 1329 nm-nél vett metszete (jobb, lent), a kiválasztott érdeklődési területek átlagspektumai (jobb, fent),

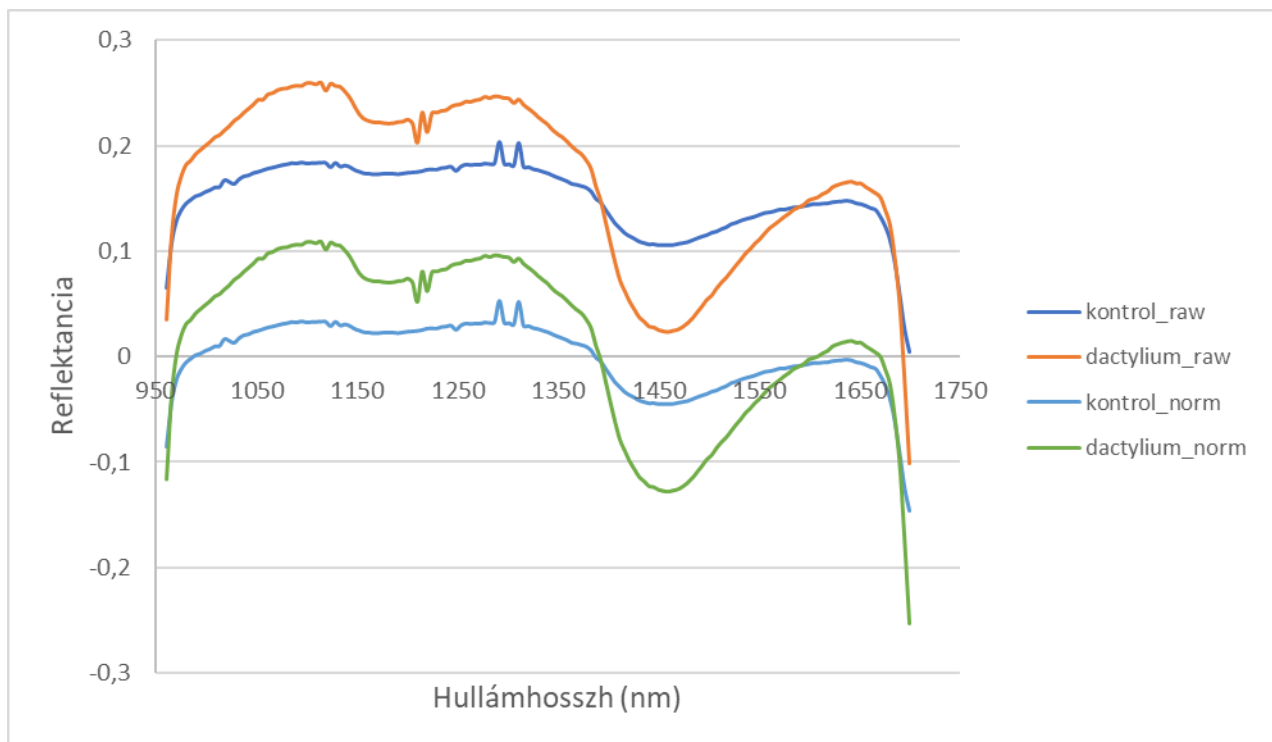
A 13. ábrán csiperke kalapjáról készült nyers és osztással normált 1329 nm-nél vett hiperspektrális képek láthatók, valamint a kiválasztott érdeklődési területek átlagspektrumai. A görbült felület okozta spektrális különbségek hatását az előkezelés mérsékli.

Alkalmazott spektrális előfeldolgozási módszerek

Egyszerű normálás: a teljes spektrumra vonatkozó átlag intenzitásérték kivonása az egyes intenzitásértékekből:

$$I_{i \text{ norm}} = I_i - \Gamma$$

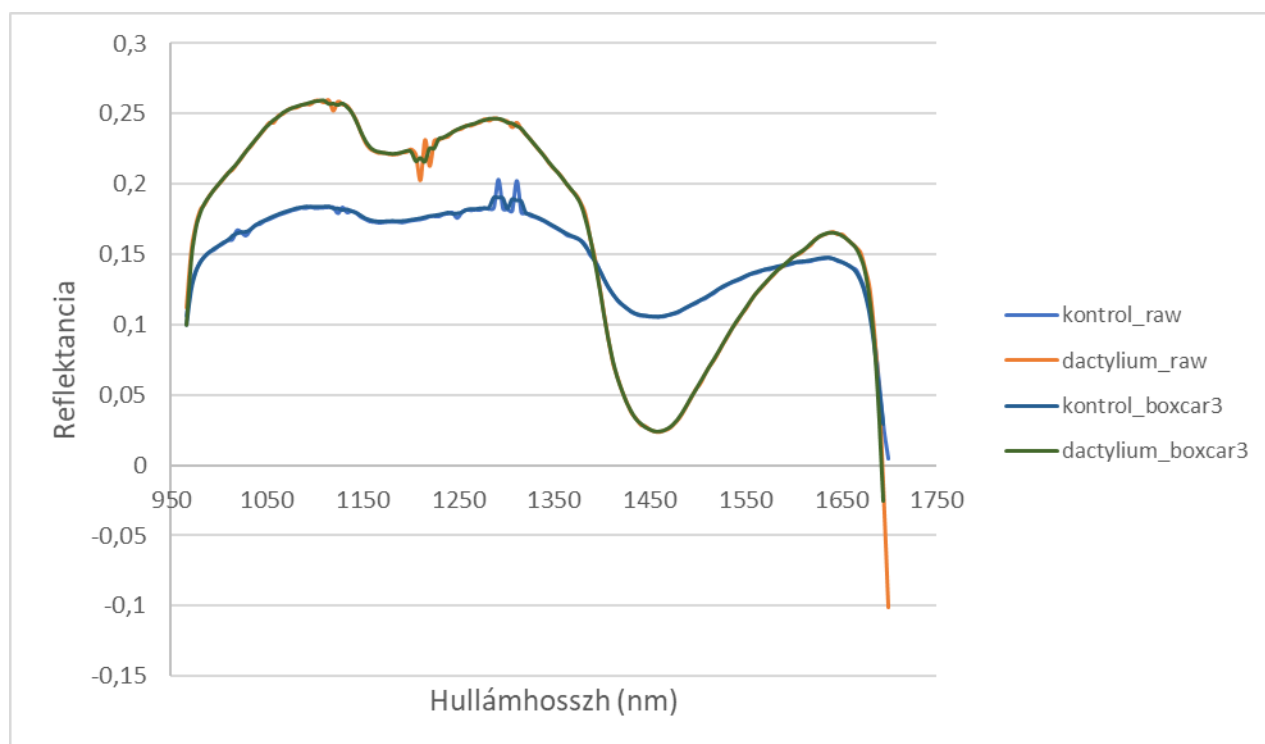
Ezzel a módszerrel az alapvonal-ingadozás kiküszöbölhető (14. ábra).



14. ábra: Nyers és normált átlagspektrumok ép (kontrol) és pókhálós penésszel fertőzött (dactylium) kétspórás csiperkén végzett hiperspektrális mérés során kapott képek alapján

Egyszerű mozgó átlag (running mean vagy boxcar simítás): az egymást követő, megadott számú értéket (illetve a megadott intervallumba eső értékeket) átlagolva kapjuk meg a kiindulási értékre vonatkozó módosított értéket, ezt az eljárást folytatjuk a teljes spektrumon. A mozgóátlag segítségével a spektrumon simítást végezhetünk, mellyel csökkenthetjük a kiugró értékek, azaz a

véletlen hiba hatását. Egyes esetekben az előfeldolgozás során három pontos egyszerű mozgó átlagot alkalmaztunk (15. ábra).



15. ábra: Nyers és egyszerű 3 pontos mozgóátlaggal simított átlagspektrumok ép (kontrol) és pókhálós penésszel fertőzött (dactylium) kétspórás csiperkén végzett hiperspektrális mérés során kapott képek alapján

Savitzky-Golay simítás (SAVITZKY és GOLAY, 1964): a spektrum adott hullámhossz-intervallumban való módosítása, az eljárás során kapott eredmény annak felel meg, mintha a megadott számú adatpontra (*window size*) a legkisebb négyzetek módszerével adott rendű polinomot illesztettek volna, ezt a függvényablakot eltolva a módosítást végig vezetjük a spektrumon. A függvényablak megválasztása során fontos a spektrumcsúcsok méretének (szélességének) figyelembevétele (WILLIAMS és NORRIS, 2001; BÁZÁR, 2011).

Sorstandardizálás (Standard Normal Variate: SNV módszer) (BARNES, DHANOA és LISTER, 1989): a szóródás-korrekciós eljárások egyike, az egyes spektrumokat egymástól függetlenül korrigálja. A standardizálást a sorvektorokon (egyedi spektrumokon) végzi a módszer, az elemek számtani közepe 0, a szórás pedig egységnyi lesz.

3.3 Alkalmazott statisztikai módszerek és eljárások

Box-plot (dobozos ábra): a minták eloszlását szemléltető grafikus eszköz, a doboz az interkvartilis terjedelmet mutatja, ezen belül látható a mediánt reprezentáló vonal, a dobozon kívül pedig a minimum és a maximum látszik. (KEMÉNY és DEÁK, 2000)

Tartóvektor-gép (Support Vector Machine: SVM)

Statisztikai módszer, amely regressziót végez és osztályozási feladatokat hajt végre. Osztályozás esetén a többdimenziós térben hipersíkok létrehozásával különíti el a különböző osztályokhoz tartozó eseteket. Az optimális hipersík megalkotásához az SVM iteratív tanuló algoritmust alkalmaz, amely a hibafüggvény minimumát keresi. Az SVM módszer olyan gépi tanulási algoritmus, mely az adatmátrixot kernelfüggvény segítségével magasabb dimenzióba transzformálja úgy, hogy ezáltal a nemlineáris adatok lineárisra illeszkedjenek. (STATSOFT, 2013)

Főkomponens analízis (Principal Component Analysis: PCA) (WOLD, ESBENSEN és GELADI, 1987) A főkomponens analízis széles körben elterjedt dimenzióredukációs módszer, gyakran alkalmazzák az adatok kezdeti felderítésére. (*exploratory analysis*), nagyszámú egymással korreláló változót egymástól független főkomponenssé transzformál. A főkomponens analízis elemzi a többváltozós adathalmaz korrelációs szerkezetét és azonosítja azt a tengelyt, amelynek mentén a minták variabilitása maximális – az első főkomponenst. A következő főkomponensek a korábbiakra ortogonálisak és a megmaradt variabilitást maximalizálják. (MEILGAARD, CARR és CIVILLE, 1999). A kapott főkomponensek az eredeti változók lineáris kombinációi, melyek azok legnagyobb varianciáját tartalmazzák. Általában már kevés főkomponens elég ahhoz, hogy az eredeti változók varianciájának nagyobb hányadát tartalmazza (>90%), így rendkívül hasznos több egymással korreláló változó alapján az osztályok elkülönülésének megjelenítésére. Gyakran használják hiperspektrális mérések kiértékelésekor „feltáró” (*exploratory*) vizsgálatként. A módszer egyike a felügyeletlen tanítású (*unsupervised*) módszereknek, tehát a modellépítés során az osztályok ismeretlenek.

Regresszió a legkisebb négyzetek módszerével (Partial Least Squares Regression: PLSR)

A részleges legkisebb négyzetek módszere során az új (látens) változók úgy jönnek létre, hogy a függő változóval való kovarianciát maximalizálják, így a dimenzióredukációt nem csak a spektrumokra, hanem a válaszváltozókra is elvégzi. Ebből adódóan a látens változók jobban korrelálnak a függő változóval, mint például főkomponensregresszió (Principal Component Regression: PCR) esetén, ezért a meghatározási hiba csökkenése várható a módszer

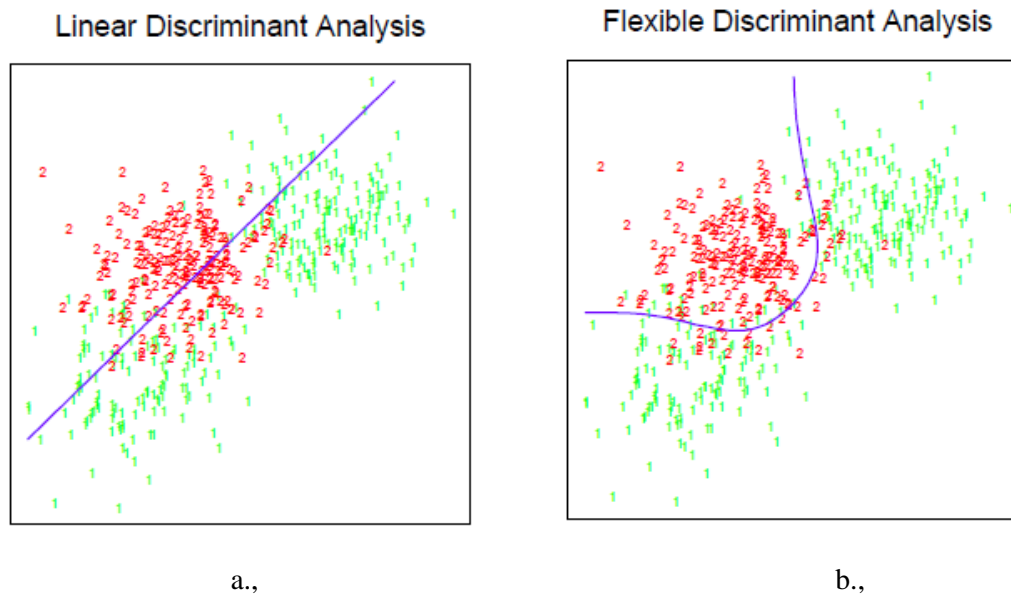
alkalmazásával). Ha a kiindulási adatok varianciájának relatív relevanciája a kiindulási adatok, illetve a kémiai információ modellezését illetően megegyező, a PCR és a PLSR faktorok közel megegyezők lesznek. Viszont, ha a kiindulási adatok variabilitását nagyobb mértékben befolyásolja valamely irreleváns hatás (például a fény szóródása), a releváns hatás a PCR későbbi faktoraiban jelenik meg és zajnak látszik, a PLSR viszont az első faktorokban jeleníti meg ezeket. (WILLIAMS és NORRIS, 2001)

Diszkriminancia Analízis (Discriminant Analysis)

Az diszkriminancia analízis a felügyelt tanítású (*supervised*) módszerek egyike, tehát a modellépítés során a minták osztályhoz tartozását ismerjük. A diszkriminancia analízis a független változók terében oly módon alakít ki új tengelyeket, hogy a függő változók osztályai által képzett centrumok közötti távolságot maximalizálja. Az eredeti változók azon kombinációja, amelyik leghatékonyabban szeparálja a csoportokat egymástól, maximalizálja a kategória átlagok közötti variancia (*variance between category means*) és a kategóriákon belüli variancia (*variance within categories*) hányadosát.

A flexibilis diszkriminancia analízis a lineáris diszkriminancia analízis olyan kiterjesztése, amely lineáris regresszió helyett flexibilis, nem-paraméteres illesztést alkalmaz (16. ábra) (HASTIE, TIBSHIRANI és FRIEDMAN, 2009)

A PLS-DA módszer a parciális legkisebb négyzetek módszerével becsüli a minták osztályhoz tartozását (WISE, GALLAGHER és WINDIG, 2006). A módszer használata különösen célszerű minták elkülönítésére olyan esetben, ha dimenzióredukció is szükséges és a főkomponens analízisnél előnyösebben alkalmazható (BARKER és RAYENS, 2003). A legkisebb négyzetek módszere hagyományosan regressziós módszer, amellyel egy folyamatos változót tartalmazó Y válaszmátrixot kapunk. A PLS-DA során a válaszmátrix kategóriához tartozást jelöl, így a módszer belsőleg „újra kódolja” a válaszmátrixot („*dummy*” blokk mátrixként) oly módon, hogy minden kategóriára vonatkozóan egy (folyamatos) indikátor változót hoz létre, így e változók értéke alapján történik a kategóriába sorolás (ROHART et al., 2017).



16. ábra: Lineáris (a.,) és flexibilis (b.,) diszkriminancia analízis összehasonlítása (Hastie, Tibshirani és Andreas, 1995)

Keresztvalidáció (Cross-Validation – CV)

Ez a módszer az épített modell validációját úgy végzi el, hogy a minták egyik részét használja a modell megalkotásához (konstrukciós halmaz vagy *training set*) és a fennmaradó hányadra alkalmazza azt (*validation set*). Az ilyen validációs halmazon alapuló validációs módszer alkalmazása prediktív modellek esetén előnyös.

A megfigyelések ilyen kettéosztása, a konstrukciós halmazon végzett modellépítés után a teszt halmazon végzett validáció tulajdonképpen a „Hold Out” (HO CV) keresztvalidáció módszere. A „Leave-one-out” keresztvalidáció (LOO CV) a teszhalmazában egy minta szerepel, a többi minta felhasználásával alkotjuk meg a modellt, majd a validációt az egy „kihagyott” mintán végezzük. Ezt az eljárást több alkalommal megismételjük és a becslések átlagát vesszük. „K-szoros” keresztvalidáció (K-fold Cross-Validation – KCV) esetén a megfigyeléseket n darab közel egyenlő (egymással nem átfedő) részhalmazzra osztjuk, majd k-szor elvégezzük a modellépítést és a validációt, egymás után a k darab halmazzt véve teszt halmazzként, a többi megfigyelés alkotja a konstrukciós halmazzt.

A Monte Carlo keresztvalidáció (MCCV) az előző KCV módszer egy olyan változata, amelyben a megfigyelések konstrukciós és teszhalmazzra való felosztását minden esetben egymástól függetlenül, véletlenszerűen (Monte Carlo módszerrel) végezzük (KOVÁCS, 2015). A módszerről XU és LIANG, (2001) részletes leírást nyújt.

3.4 Kétspórás csiperkén végzett vizsgálatok

A kétspórás csiperkén végzett mérések és a tárolás helyszíne a Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar, Fizika-Automatika Tanszék (Budapest) volt.

3.4.1 Pókhálós penész kimutatása és fungicid szerekkel kezelt minták osztályozása

A kétspórás csiperke minták termesztése ellenőrzött körülmények között, azonos paraméterek (komposzt hőmérséklet, nedvességtartalom, CO₂, öntözés) mellett történt.

A mintákat négy csoportra osztottuk, három csoportot a termesztési gyakorlatban használt szerekkel kezeltünk, ezek aktív alkotói: 1. natamycin, 2. Prokloráz-Mn, 3. *Bacillus subtilis*, egy csoportot pedig kezeletlenül hagytunk.

A négy csoportot két-két részre osztottuk, egy-egy részt pedig közvetlenül fertőztünk be 10⁶ CFU m⁻² koncentrációjú pókhálós penész (*Cladobotrynum dendroides*) szuszpenzióval. A 8 csoport mintaszáma változó volt, 61 fertőzött és 39 nem-fertőzött minta volt összesen, ebből kezeletlen: 29 db, natamycin: 26 db, *Bacillus subtilis*: 23 db, Prokloráz-Mn: 22 db (M7 melléklet). A termőtesteket 11 napon át hűtőszekrényben tároltuk.

A tárolás folyamán a mintákról digitális fényképek (Canon EOS 450D) (17. ábra) és hiperspektrális felvételek készültek.



17. ábra: Pókhálós penész (*Cladobotrynum dendroides*) fertőzés tüneteit mutató kétspórás csiperke minták

A hiperspektrális képek szegmentálását a CuBrowser MATLAB szoftver (FIRTHA és ÉDER, 2012) segítségével manuálisan végeztem, ép és a fertőzés tüneteit mutató szövetrészek kiválasztásával és a terület átlagspektrumának mentésével. A zaj csökkentése érdekében a spektrumokon normálást és Savitzky-Golay simítást alkalmaztunk (harmadrendű polinom illesztése, 9 pontra).

A modellépítés és validálás RStudio 0.97.336 verziójú szoftverrel, illetve R Project 2.15.1 verziójú szoftverrel (e1071 package alkalmazásával) történt.

A fertőzött és nem—fertőzött csoportok osztályozását Support Vector Machine (SVM) módszerrel végeztük.

A fungicid kezelések osztályozását a fertőzött csoport esetén flexibilis diszkriminancia analízissel (FDA), a nem-fertőzött csoportban tartóvektor-gép (SVM) módszerrel végeztük. (A nem-fertőzött csoport esetén jellemzően előfordultak nagyon közeli intenzitásértékek egymás mellett – jelentős volt a kollinearitás, mely esetben a DA módszer nem volt alkalmazható.)

A validálás Monte Carlo kereszt validációval (Monte Carlo cross validation: MCCV) történt, a validációhoz a minták 20%-át, a modellépítéshez a minták 80%-át használtuk, az iteráció 10^3 alkalommal ismétlődött.

3.4.2 Pókhálós penész és zöldpenész megjelenésének vizsgálata

Az ép, egészséges kétspórás csiperke termőtest minták beszerzése a helyi piacon történt. A mintákat 3 csoportba osztottuk:

1. kontrol (desztillált vízzel kezelt) (8 db)
2. mesterségesen fertőzött *Cladobotryum dendroides*-szel (8 db)
3. mesterségesen fertőzött *Trichoderma aggressivum*-mal (8 db)

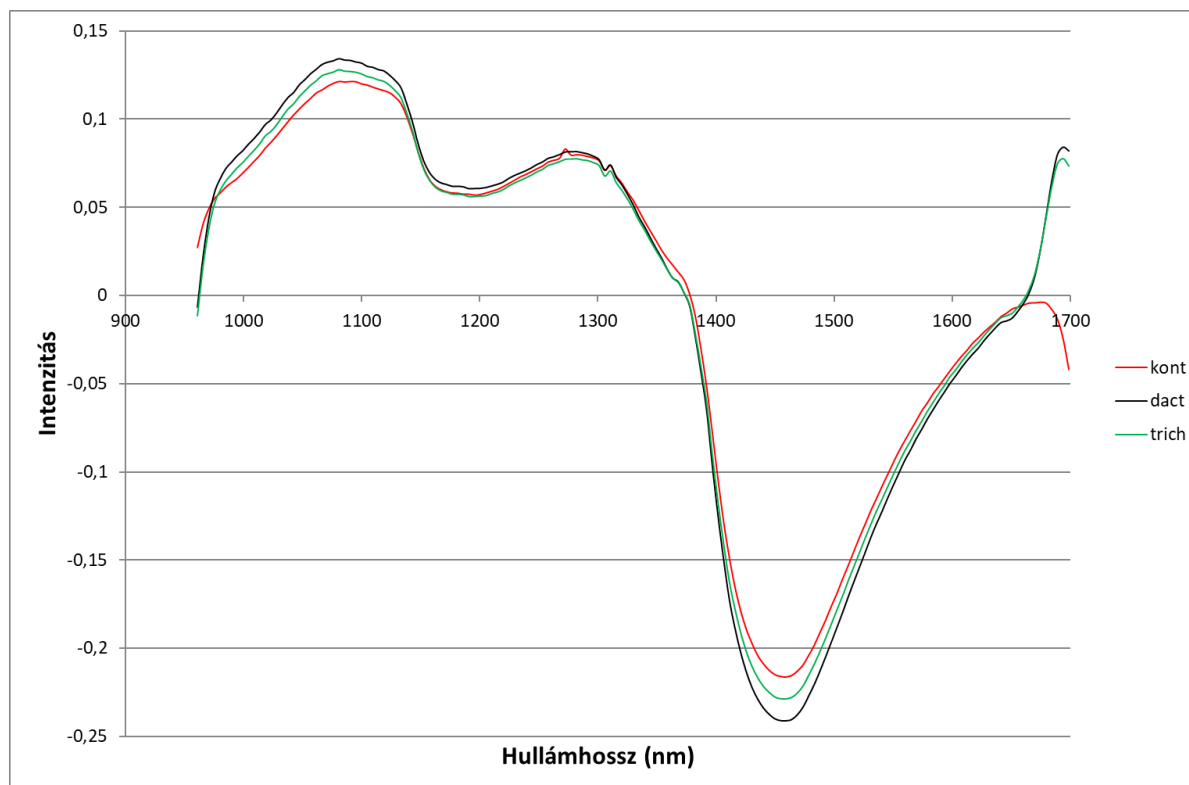
A minták befertőzése ill. kezelése manuálisan történt, 50-50 µl desztillált vizet, illetve a fertőző ágenst tartalmazó oldatot juttattunk a kalapra és egyenletesen eloszlattuk a felületen, az érintett területet megjelöltük. A mintákat öt napon keresztül szabályozott körülmények között tároltuk, kb. 6°C hőmérséklet és 90% relatív nedvességtartalom mellett. A tárolás során a fertőzések jellemző tünetei nem voltak megfigyelhetőek (a későbbiekben jelentek meg: 18. ábra). A kísérlet

során a mintákról digitális fényképeket (Canon EOS 450D) és hiperspektrális felvételeket készítettem.



18. ábra: Zöld penész fertőzés tüneteinek megjelenése kétspórás csiperkén

A hiperspektrális képek szegmentálását a CuBrowser MATLAB szoftver (FIRTHA és ÉDER, 2012) segítségével manuálisan végeztem, a megjelölt szövetrészek kiválasztásával és a terület átlagspektrumának mentésével. Az elmentett átlagspektrumokat normáltuk (19. ábra) és Savitzky-Golay simítást alkalmaztunk (harmadrendű polinom illesztése, 9 pontra).

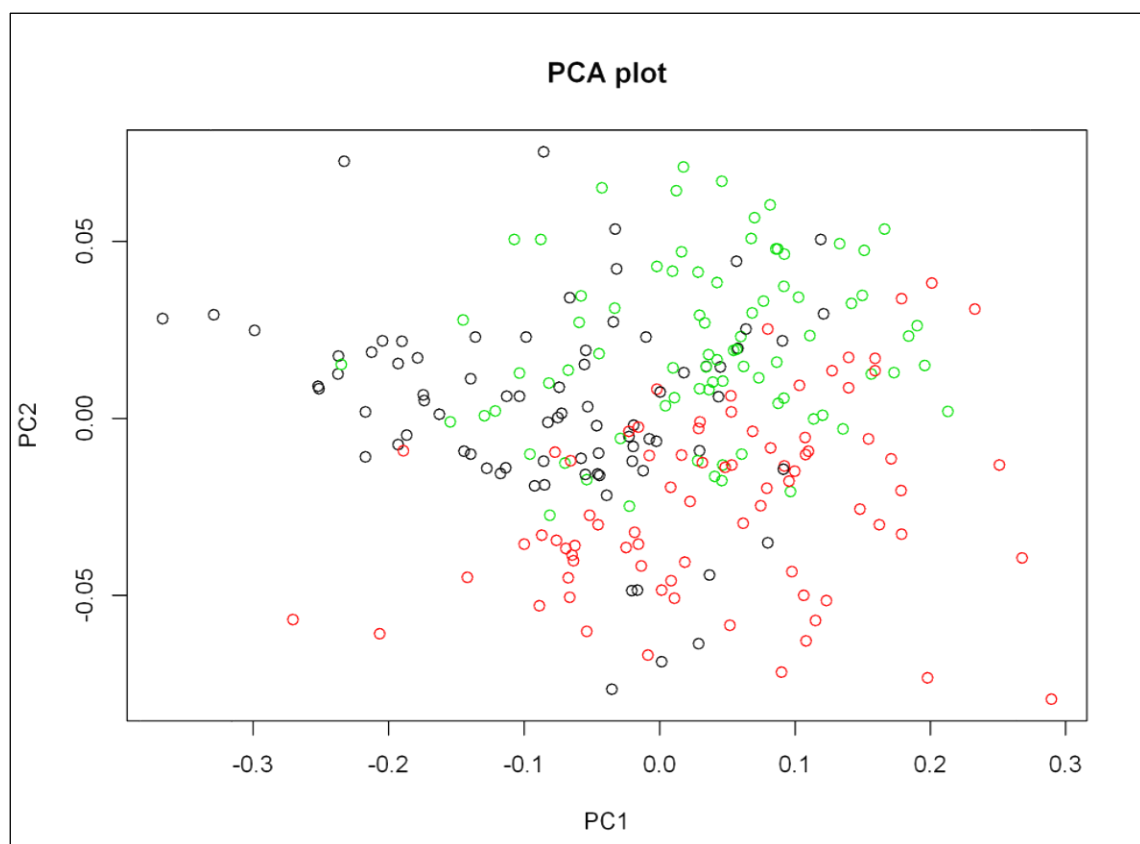


19.ábra: A csoportok normalizált intenzitás értékeinek átlag spektrumai a kísérlet első napján (kontrol: piros, Cladobotryum: fekete, Trichoderma: zöld)

A statisztikai elemzést RStudio 0.97.336 illetve 0.98.501 verziójú szoftverrel, illetve R Project 2.15.1 verziójú szoftverrel végeztem.

A kapott adatokat főkomponens analízissel vizsgáltam, illetve LDA módszerrel osztályoztam

A főkomponens analízis (PCA) (20. ábra) eredménye alapján kapott faktorsúly (*loading*) értékeknek megfelelően kiválasztottam az osztályozás szempontjából 5 legfontosabb hullámhossz értéket: 1014 nm, 1459 nm, 994 nm, 1397 nm és 980 nm.



20. ábra: A PCA során kapott első két főkomponens score plot-ja (kontrol: piros, cladobotryum: fekete, trichoderma: zöld)

A minták osztályozása ezt követően a kiválasztott hullámhossz-értékeken mért adatok alapján történt, SVM és FDA módszerrel.

A kapott modelleken keresztvalidációt végeztem, a kalibráció az adatok 66%-ának, a validálás az adatok 33%-ának felhasználásával zajlott.

3.5 Görögdinnye minőségi jellemzőinek becslése

Két azonos beszerzési forrásból származó görögdinnye mintából a középső részen a legnagyobb átmérőnél két-két, mintegy 3 cm szélességű szeletet metszettünk ki. A szeleteket radiálisan 3 részre osztottuk a gyümölcs szerkezetének megfelelően.

A szeletrészekről digitális fénykép (Canon EOS 450D) és hiperspektrális felvétel készült.

A középső résztől 3 különböző távolságban kijelölt pontokon történt mintavétel, a kiválasztott pontokon (22. ábra) meghatároztuk a pH és az oldható szárazanyag-tartalom értékét.

A pH mérést Mettler Toledo Seven Multi pH mérővel, az oldható szárazanyag-tartalom meghatározását Atago Pocket Refractometer PAL-1 (21. ábra) műszerrel végeztük.



a.,



b.,

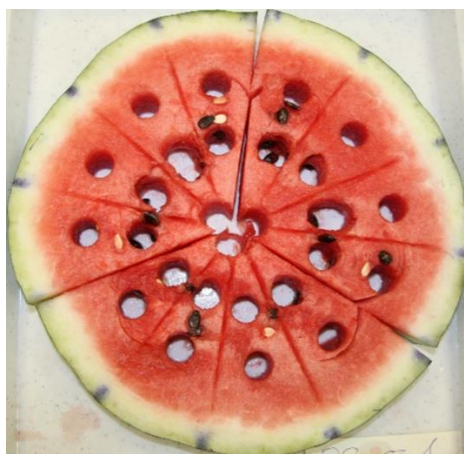
21. ábra: a.: Mettler Toledo Seven Multi pH mérő (Forrás: www.mt.com), b.: Atago Pocket Refractometer PAL-1 (Forrás: www.atago.net)

A hiperspektrális képeken a mintavétel helyének megfelelő pontokon a CuBrowser MATLAB szoftver (FIRTHA és ÉDER, 2012) segítségével manuálisan jelöltem ki az érdeklődési területeket (ROI) (22. ábra) és mentettem ezek átlagspektrumát (23. ábra).

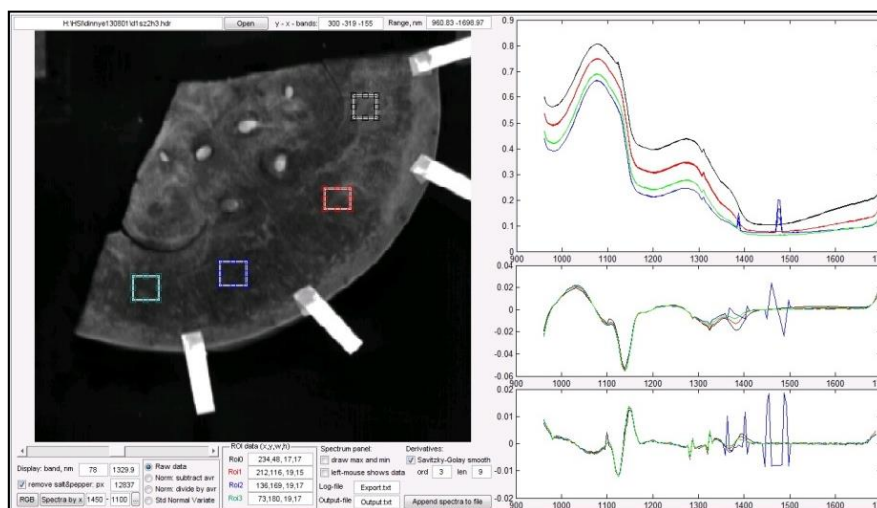
A spektrumok előfeldolgozása során 3 pontos mozgó átlagot (a kiugró csúcsokként jelentkező zajok hatásának eltávolítása érdekében) és SNV transzformációt alkalmaztam.

A statisztikai elemzést MATLAB szoftverrel ('MATLAB', 2016) végeztem.

A minőségi paraméterek (SSC, pH) valamint a középponttól mért sugár értékének becslését PLS regresszióval (PLSR) végeztem. A kalibráció során a minták 90%-át alkalmaztuk tanuló mintaként, a keresztvalidáció (MCCV) során pedig 10%-ot teszt mintaként 100 ismétlésben véletlenszerűen kiválasztva.



22. ábra: Mintavétel dinnyeszeleten minőségi paraméterek meghatározásához



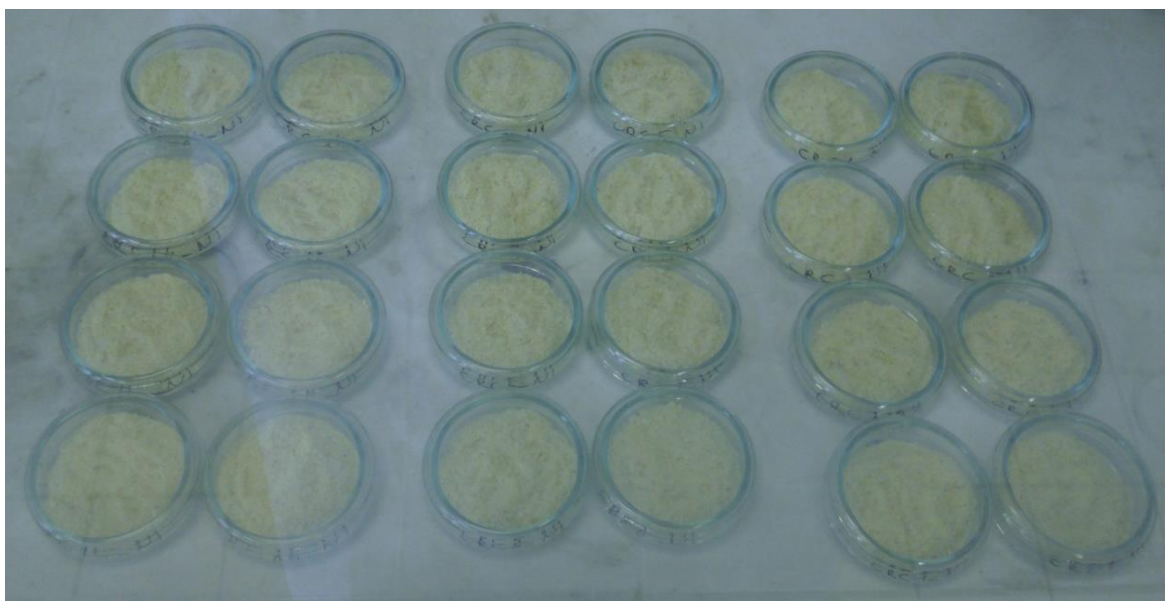
23. ábra: Dinnye minták hiperspektrális képének szegmentálása CuBrowser szoftverrel

3.6 Mikotoxinnal szennyezett kukorica vizsgálata

A kísérlet során két különböző kukorica (*Zea mays*) hibridet vizsgáltunk: az egyik Linzből, a Staatbau Linztól származó hibrid rezisztensebb a fuzárium fertőzésre (jelölése: SBL), a másik hibrid, mely Szegedről a Gabonakutatóból került beszerzésre (jelölése: CRC), pedig érzékenyebb. Mintaként darált kukoricát használtunk. A méréseket az Universitát für Bodenkultur (VIRIS lab for Analytical Ecogeochemistry) intézményének Zeutec gyártmányú hiperspektrális képalkotó rendszerével végeztem (3.1 fejezet, M4 melléklet).

A minták nem estek át fertőtlenítésen, mivel kukorica esetén a gombák által termelt toxinok jelenléte egy bizonyos mennyiségben gyakorlatilag elkerülhetetlen. Így a kontrol csoporton nem végeztünk semmilyen kezelést, tehát a természetesen előforduló toxinok voltak bennük jelen. A következő két csoportot *Fusarium graminearum*, illetve *Fusarium verticillioides* spórák selymen keresztüli injektálásával mesterségesen fertőztük be. Az utolsó csoportot *Fusarium culmorum*-mal fertőztük be, melynek során egy fogpiszkálót merítettünk a spóra-szuspenzióba, majd közvetlenül a kukoricacsöveket kezeltük vele. A négy különbözően kezelt csoporton belül toxintartalom szempontjából eltérő szinteket mutató mintákat választottunk ki (3. táblázat).

A minták toxin-tartalmának – deoxinivalenol, fumonizin B₁ és B₂, – meghatározása egy LC-MS/MS alapú módszerrel (Malachová *et al.*, 2014) történt.



24. ábra: A mérésre előkészített fuzáriummal fertőzött kukorica minták

A mintákat 5 cm átmérőjű Petri- csészékbe helyeztem és enyhén lepréseltem a méréseket megelőzően, hogy kisebbek legyenek a felületi egyenetlenségek, így csökkenjen a fény szóródásának hatása. Minden csoportból 8 ismétlést mértem (24. ábra, M8 melléklet).

A hiperspektrális képek szegmentálását és a zajok mérséklését MATLAB ('MATLAB', 2016) szoftverrel végeztük, a képeken azonos nagyságú, homogén megvilágítású 100 x 100 pixel nagyságú területeket választottunk ki. Ezeket a területeket 5 darab 20 x 100 pixel nagyságú területre osztottuk, majd az ezeken a területeken vett öt-öt átlagspektrum átlagát vettük mintánként.

A spektrumokon Savitzky-Golay simítást (másodrendű polinom illesztése 25 pontra) és SNV transzformációt alkalmaztunk.

Az adatok elemzését R Studio 0.99.896 verziójú szoftverrel, illetve R Project 3.2.5 verziójú szoftverrel végeztem. A minták toxintartalmát PLS regresszió segítségével becsültem (pls package), illetve a csoportokat PLS-DA módszerrel (mixOmics package) osztályoztam.

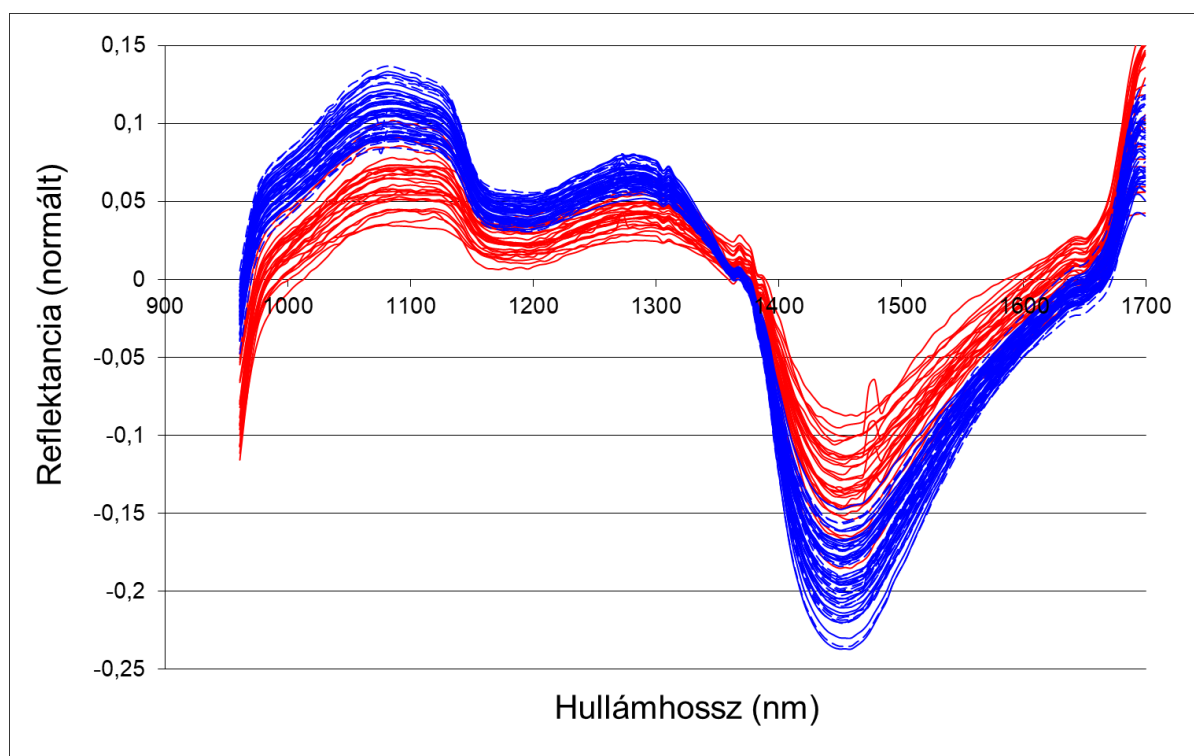
3. táblázat: Fuzáriummal fertőzött kukorica minták toxin tartalma (NI: nem fertőzött, G: *Fusarium graminearum*, V: *Fusarium verticillioides*, C: *Fusarium culmorum*)

Hibrid	Osztály	DON (µg/kg)	FB ₁ (µg/kg)	FB ₂ (µg/kg)	Total (µg/kg)
SBL	NI	912,0	87,2	29,9	1029,1
	NI	96,0	< LOD	< LOD	96,0
	G	32160,0	1,0	0,1	32161,1
	G	19040,0	585,6	163,2	19788,8
	G	5632,0	< LOD	< LOD	5632,0
	V	464,0	20800,0	6000,0	27264,0
	V	112,8	4560,0	1504,0	6176,8
	V	298,4	944,0	286,4	1528,8
	C	52480,0	3264,0	1136,0	56880,0
	C	24640,0	549,6	263,2	25452,8
	C	236,0	450,4	208,0	894,4
CRC	NI	1528,0	187,2	91,2	1806,4
	NI	215,2	< LOD	< LOD	215,2
	G	50160,0	832,0	262,4	51254,4
	G	30320,0	41,3	20,0	30381,3
	G	14640,0	66,6	27,1	14733,7
	V	723,2	52320,0	18400,0	71443,2
	V	1680,0	22240,0	7616,0	31536,0
	V	733,6	7688,0	2280,0	10701,6
	C	73840,0	2728,0	1032,0	77600,0
	C	20800,0	2992,0	976,0	24768,0
	C	1184,0	1448,0	668,8	3300,8

4. EREDMÉNYEK

4.1 Pókhálós penész fertőzés detektálása kétspórás csiperkén

A 25. ábrán a kontrol mintákon, az egészséges szövetrészeken és a fertőzött területeken vett normált spektrumok láthatók, melyek között egyértelműen spektrális különbségek mutatkoznak. Észlelhetők a víz ismert abszorpciós csúcsai 1200 nm és 1450 nm körül. 1450 nm-nél a fertőzött részek nagyobb reflektanciát – kisebb mértékű abszorpciót – mutatnak, vélhetően a foltok nedvességtartalma alacsonyabb, mint a kontrol területeken. A másik jellemző vízcsúcs (1200 nm) esetén ugyan ellentétes tendencia látható, a különbség itt azonban csekély, a normálás hatásának tudható be. Az 1450 nm-nél és 1080 nm-nél kapott reflexiós faktorokat tekintve az itt kapott arányok jellemzők lehetnek a fertőzésre.

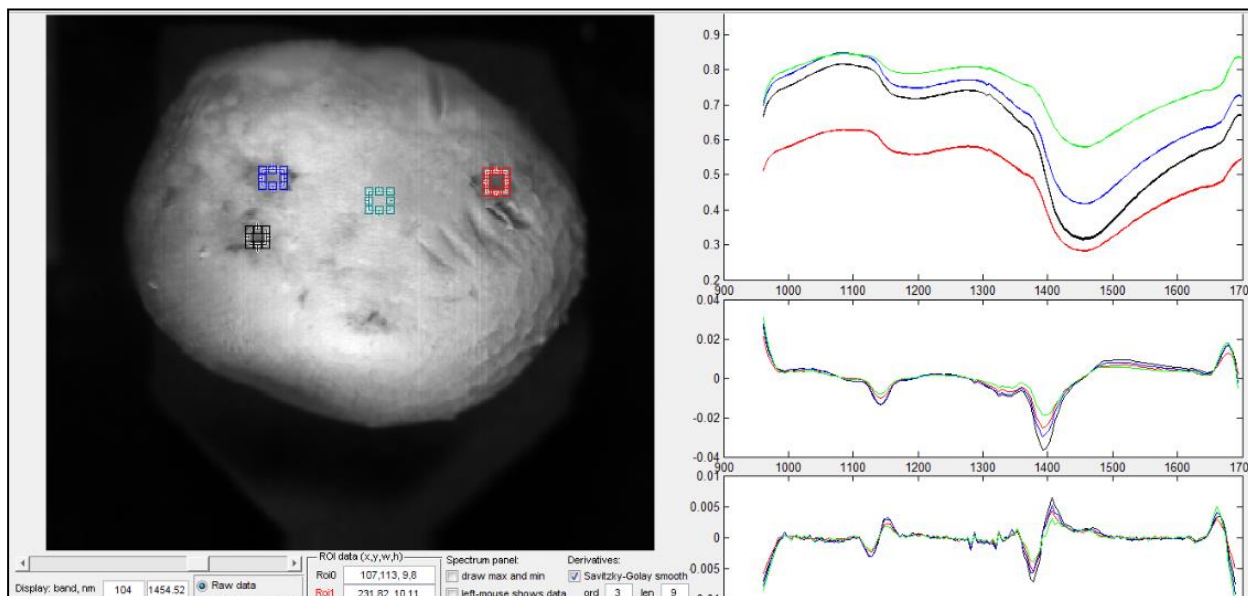


25. ábra: A kísérlet első napján mért spektrumok normált alakja, vörös: *Cladobotryum* okozta folt, kék: kontrol

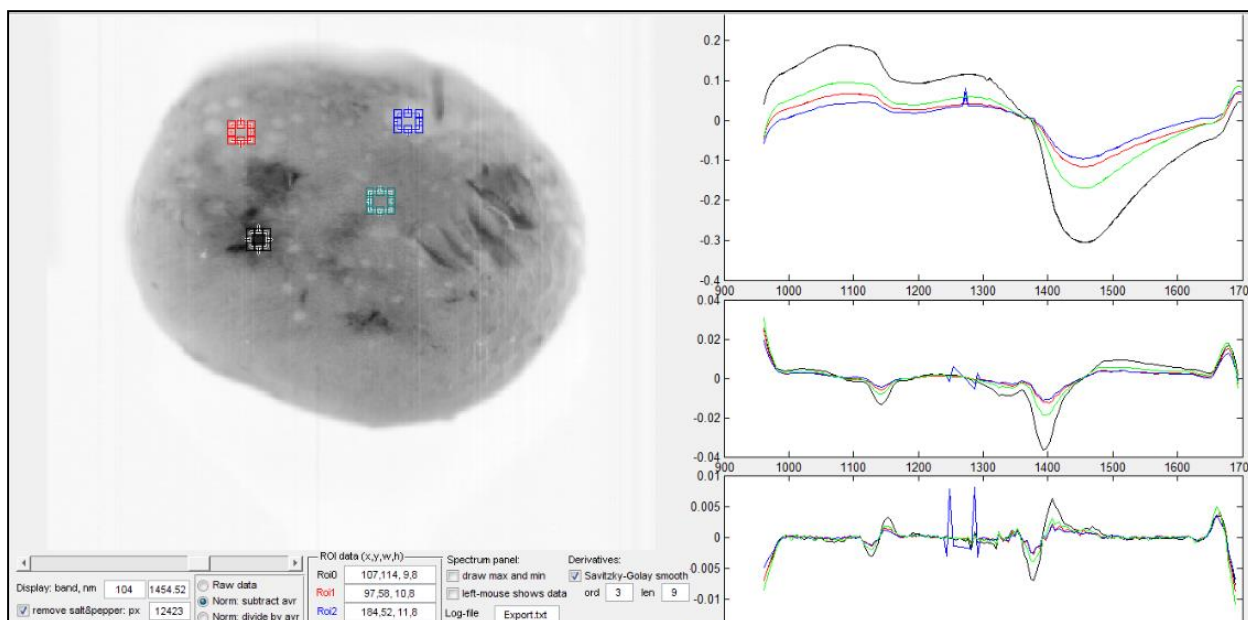
A 4. táblázatban egy natamycin-nel kezelt mintán végbement változás látható 1454 nm-nél. A normált intenzitás értékeket 1454 nm-nél ábrázoló képeken a fertőzés tüneteit mutató foltok világos, míg a mechanikai sérülést elszenvedett területek sötét területekként látszanak (27. ábra). A módszer segítségével így a szövetek állapota vizualizálható és a szövetkárosodás oka

megállapítható. A módszerrel a normált spektrumok 1454 és 1200 nm-nél mért értékeinek felhasználásával már korai fázisban észlelhető a fertőzés megjelenése.

Ahogy a 26. és 27. ábra mutatja, a mechanikailag károsodott szövetrész spektruma láthatóan eltér a fertőzött szövetrész spektrumától.


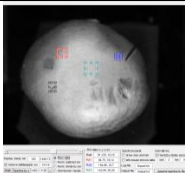
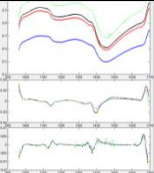
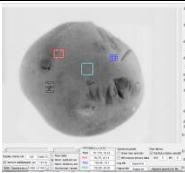
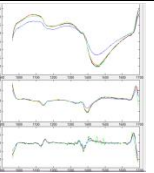

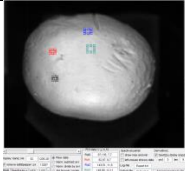
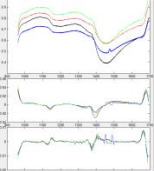
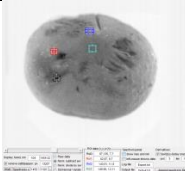
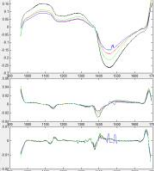

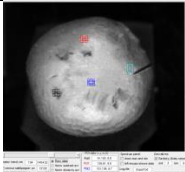
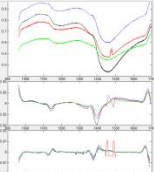
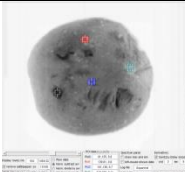
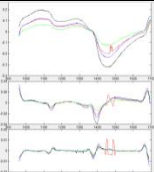

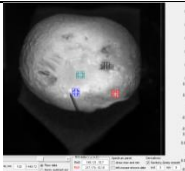
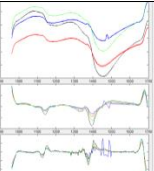
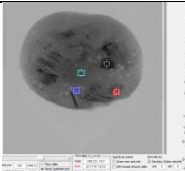
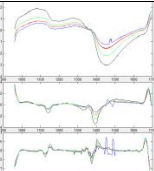

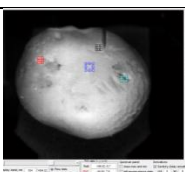
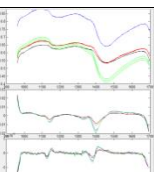
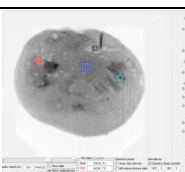
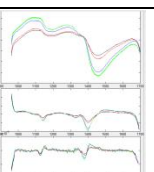

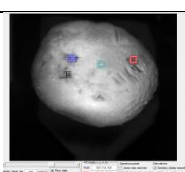
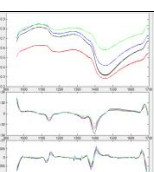
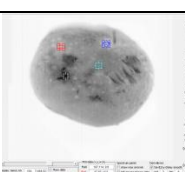
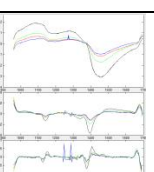


26. ábra: Natamycin-nel kezelt minta képe a CuBrowser kezelőfelületén 1454 nm-nél mért értékekkel; jobb oldalon felső diagram: érdeklődési területek (ROI-k) átlag reflektancia spektruma, középen: érdeklődési területek (ROI-k) átlag reflektancia spektrumának első deriváltja, alul: érdeklődési területek (ROI-k) átlag reflektancia spektrumának második deriváltja; mechanikailag károsodott szövetrész: fekete, kék jelölés, fertőzött szövetrész: piros, zöld jelölés



27. ábra: Natamycin-nel kezelt minta képe a CuBrowser kezelőfelületén 1454 nm-nél mért normált értékei; jobb oldalon felső diagram: érdeklődési területek (ROI-k) átlag reflektancia spektruma, középen: érdeklődési területek (ROI-k) átlag reflektancia spektrumának első deriváltja, alul: érdeklődési területek (ROI-k) átlag reflektancia spektrumának második deriváltja; mechanikailag károsodott szövetrész: fekete jelölés, fertőzött szövetrész: piros, kék, zöld jelölés

4. táblázat: Natamycin-nel kezelt minta a kísérlet különböző napjain (fekete, vörös jelölés: *Cladobotrium* okozta folt; kék, zöld jelölés: mechanikailag sérült szövet) és képe 1454 nm-en

Dátum	RGB kép	1454nm	1454nm normált
05.03.		 	 
05.06.		 	 
05.07.		 	 
05.08.		 	 
05.09.		 	 
05.13.		 	 

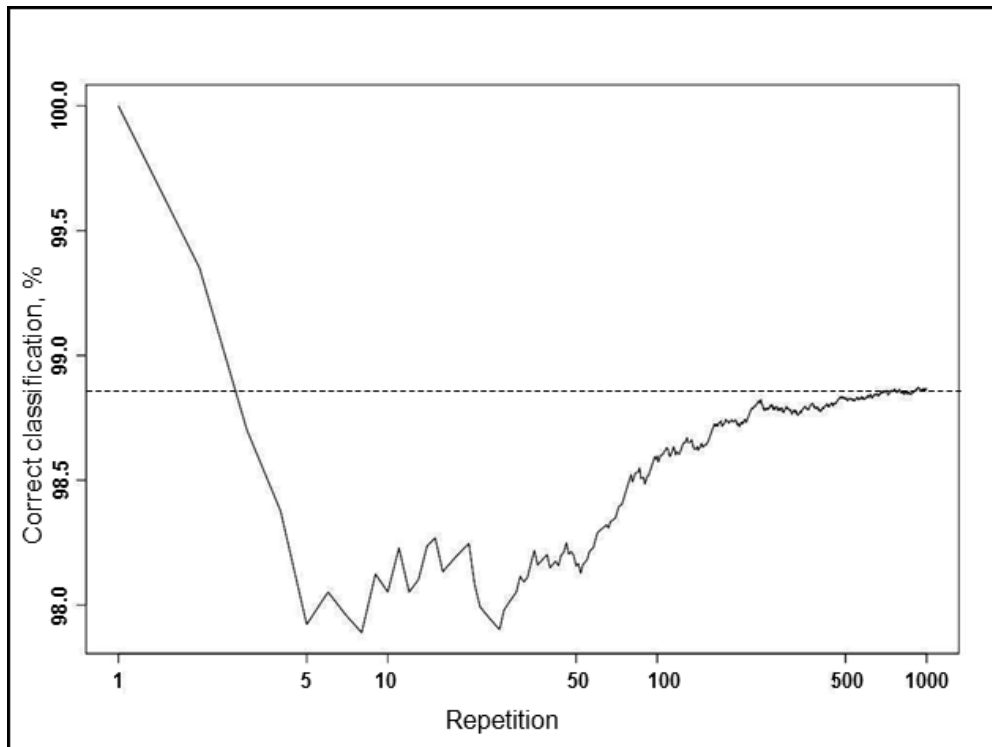
Az SVM módszerrel történt osztályozás eredményeit az 4. táblázat mutatja. Az osztályozás sikeres volt, a helyesen osztályozott minták aránya a különböző csoportokban a következő volt: kezeletlen: 100%, natamycin: 80,78%, prokloráz-Mn: 89,71%, *Bacillus subtilis*: 93,16% (5. táblázat).

5. táblázat: SVM osztályozás eredménye

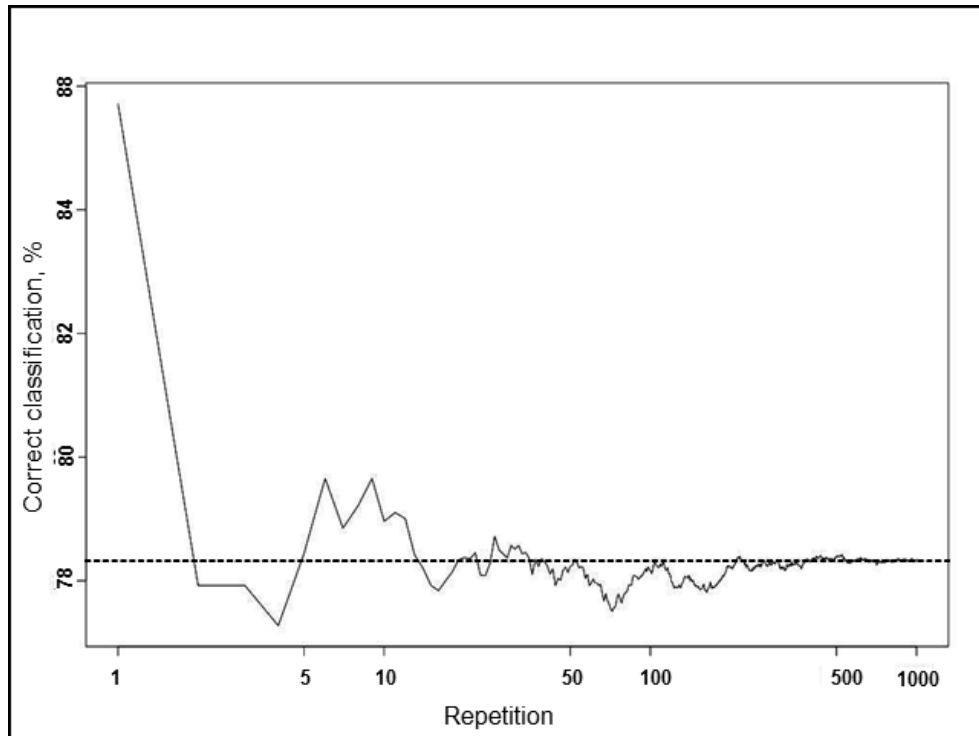
Kezeletlen		
	valós	
becsült	<i>Cladobotryum</i>	kontrol
<i>Cladobotryum</i>	100,00%	0,00%
kontrol	0,00%	100,00%
Összes helyesen becsült	100%	
Prokloráz-Mn		
	valós	
becsült	<i>Cladobotryum</i>	kontrol
<i>Cladobotryum</i>	95,42%	16,96%
kontrol	4,58%	83,04%
Összes helyesen becsült	89,71%	
Natamycin		
	valós	
becsült	<i>Cladobotryum</i>	kontrol
<i>Cladobotryum</i>	60,13%	5,60%
kontrol	39,87%	94,40%
Összes helyesen becsült	80,78%	
Bacillus subtilis		
	valós	
becsült	<i>Cladobotryum</i>	kontrol
<i>Cladobotryum</i>	88,89%	4,24%
kontrol	11,11%	95,76%
Összes helyesen becsült	93,16%	

A validációt követően ez az arány enyhén csökkent: kezeletlen: 98,5% (28. ábra), natamycin: 78% (29. ábra), Prokloráz-Mn: 88% (30. ábra), *Bacillus subtilis*: 91% (31. ábra).

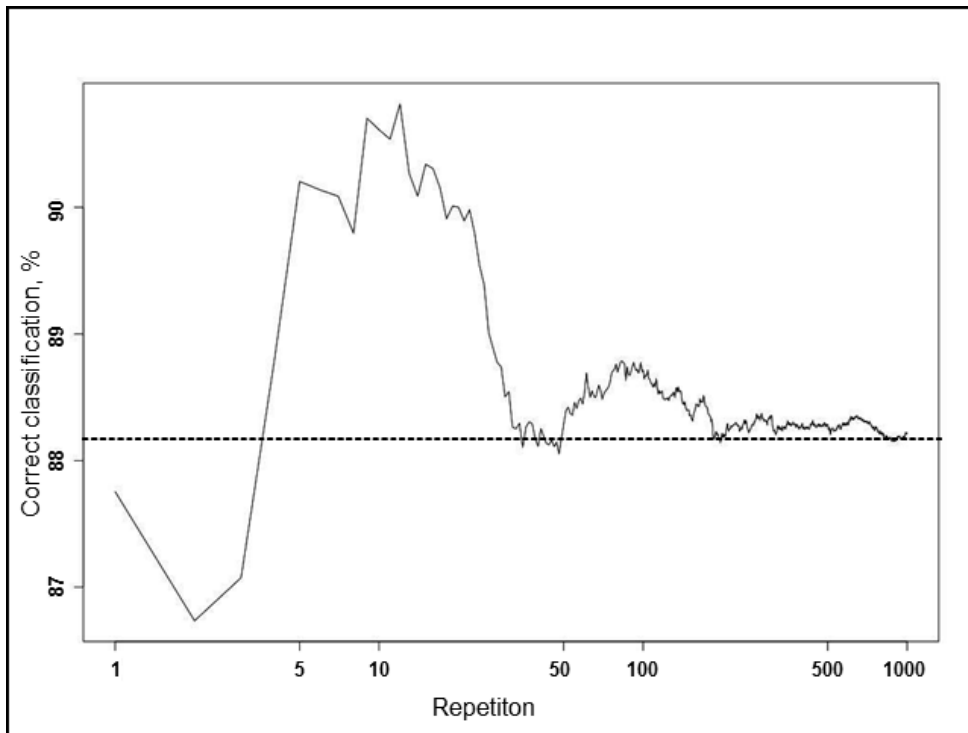
Az eredmények ígéretesek Gaston et al., (2011) eredményeivel összehasonlítva is, bár abban a kutatásban *Ps. tolasii* által fertőzött és mechanikailag sérült csiperke spektrumát vizsgálták 445 és 945 nm között, a helyesen osztályozott minták aránya 98,8% volt a tanuló minták és 66,1% a teszt minták esetén.



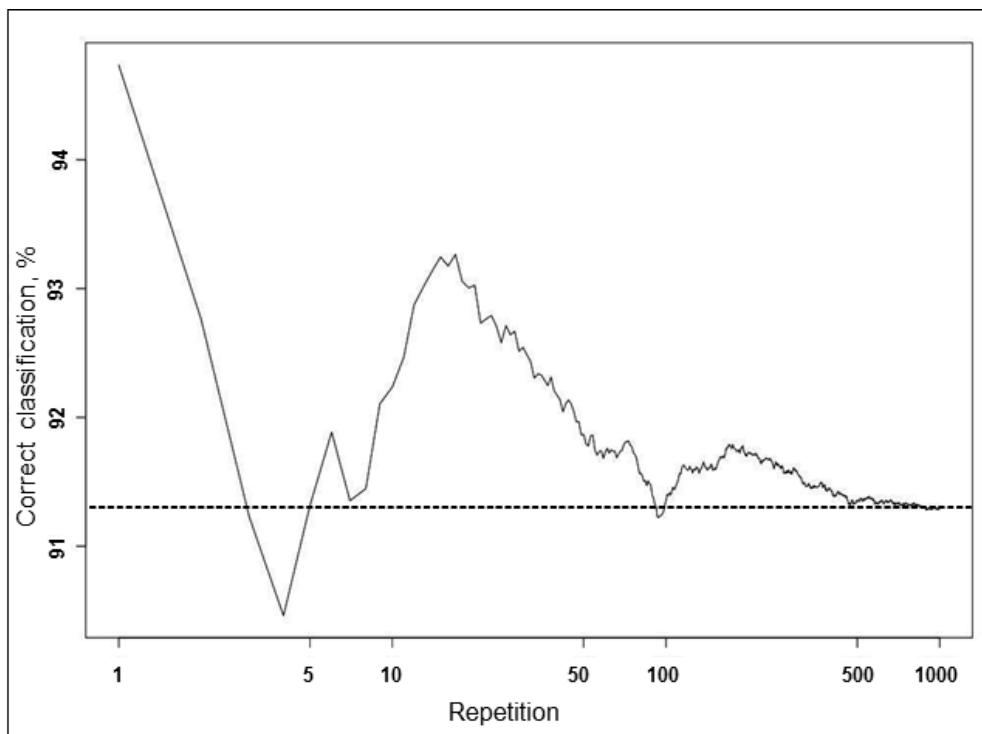
28. ábra: Monte Carlo keresztvalidáció (MCCV) eredménye kezeletlen minták esetén



29. ábra: Monte Carlo keresztvalidáció (MCCV) eredménye natamycin-nel kezelt minták esetén



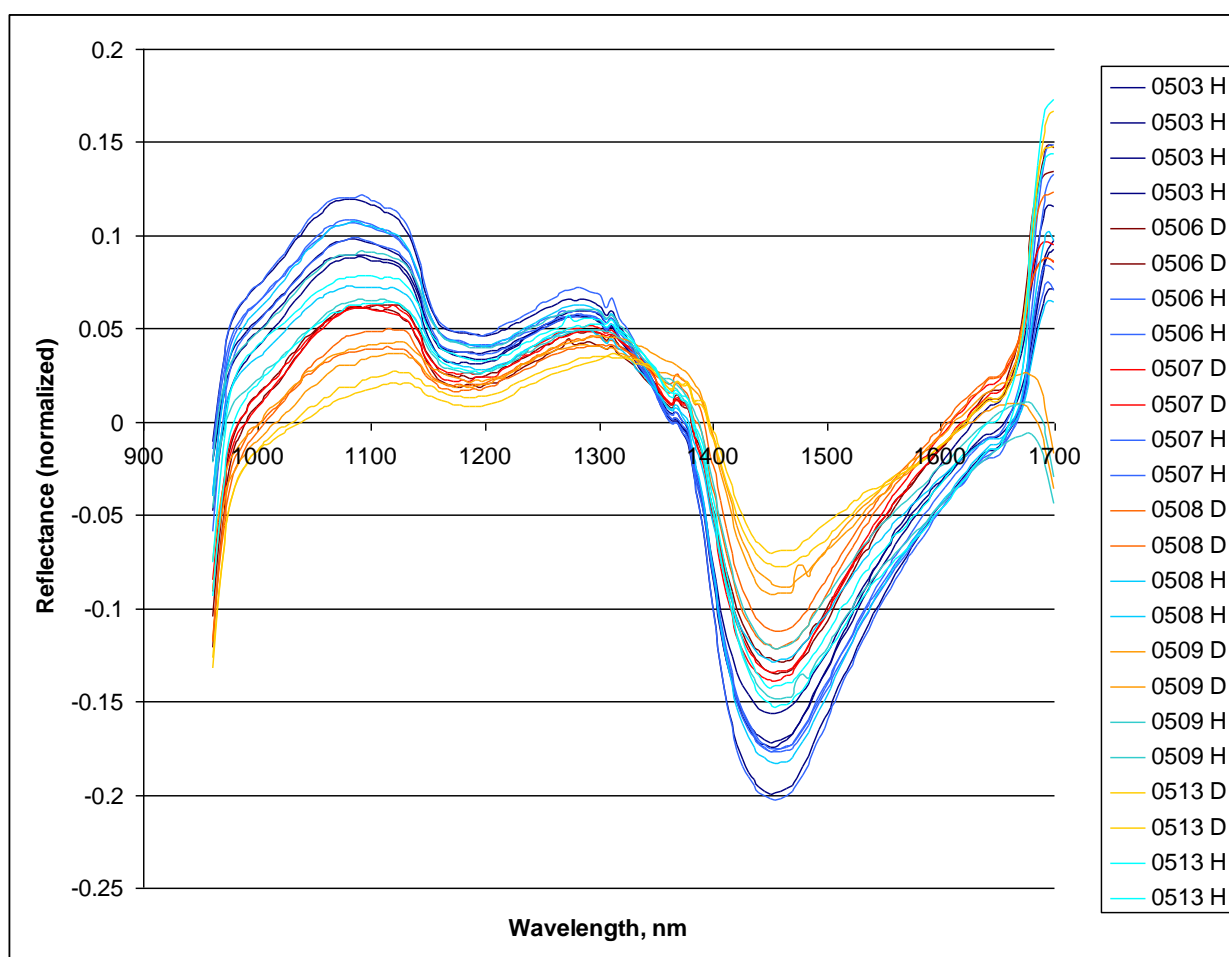
30. ábra: Monte Carlo keresztvalidáció (MCCV) eredménye prochloráz-Mn-komplex-szel kezelt minták esetén



31. ábra: Monte Carlo keresztvalidáció (MCCV) eredménye *Bacillus subtilis* -szel kezelt minták esetén

4.2 Fungicid szerekkel kezelt kétspórás csiperke osztályozása

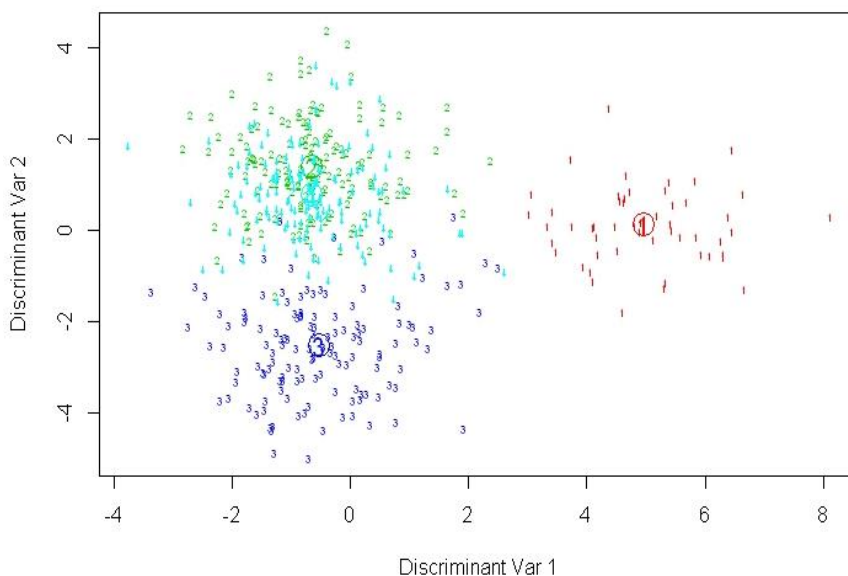
A 32. ábra egy adott minta spektrumának a kísérlet 10 napja alatt bekövetkezett változását mutatja. A mintán egyrészt a *Cladobotryum* (régábbi néven *Dactylium*) fertőzés tünetét mutató szövetrészeket (a diagramon kék színnel jelölve), másrészt a tünetmentes területek egyes részeit (pirosas-sárgás színnel jelölve) választottuk ki a szegmentálás során. 1450 nm-nél (az egyik ismert vízcsúcsnál) a reflektancia növekedése látható mindkét szövetrész esetén, tehát a kísérlet 10 napja alatt a minta száradása figyelhető meg. 1200 nm-nél fordított a tendencia, ez a spektrumok normálásából fakad. A két különböző szövetrész normált spektrumai között a mérés minden napját tekintve érzékelhető a különbség.



32. ábra: Normált spektrumok alakulása egy adott mintán 10 nap alatt, H: tünetet nem mutató szövetrész, D: fertőzés tünetét mutató folt

A *Cladobotryum*-mal fertőzött minták osztályozása diszkriminancia analízissel sikeres volt, az osztályozás hibája 12,71%. A natamicyn-nel és a *Bacillus subtilis*-szel kezelt csoportok átfedést

mutatnak (33. ábra), a *Bacillus subtilis*-szel kezelt minták spektrumainak 19,44%-át az osztályozás a natamicyn-nel kezelt csoportba sorolta, illetve a a natamicyn-nel kezelt minták spektrumainak 13, 16%-át a *Bacillus subtilis*-szel kezelt csoportba (6. táblázat).



33. ábra: *Cladobotryum*-mal fertőzött minták esetén végzett LDA eredménye, 1 (vörös): kezeletlen, 2 (zöld): natamicyn, 3 (sötétkék): Prokloráz-Mn, 4 (világoskék): *B. subtilis*

A prokloráz-Mn-nal kezelt csoport 93,13%-át és a kezeletlen csoport 100%-át helyesen osztályozta a módszer, a 33. ábrán a diszkriminancia analízis szerint alapvetően három pontfelhő rajzolódik ki. Ez az eredmény összhangban van az előzetesen vártakkal: a szintetikus gombaölő szer (prokloráz-Mn), a kezeletlen és a biológiai eredetű gombaölő szerek (natamicyn, *Bacillus subtilis*) külön csoportokat mutatnak. A natamicyn-nel és *Bacillus subtilis*-szel kezelt csoportokat nem sikerült elkülöníteni.

A 7. táblázat az SVM módszerrel végzett osztályozás eredményeit mutatja. A *Cladobotryum*-mal fertőzött minták esetén a spektrumok 74, 58%-a, a kontrol minták esetén 66,67% osztályozása volt helyes.

6.táblázat: *Cladobotryum*-mal fertőzött, különböző fungicid kezelésen átesett minták spektrumain végzett LDA osztályozás tévesztési mátrixa

	valós osztály				
		Kezeletlen	Natamycin	Prokloráz-Mn	<i>Bacillus subtilis</i>
prediktált osztály	Kezeletlen	100%	0	1,31%	1,44%
	Natamycin	0	86,18%	4,58%	19,44%
	Prokloráz-Mn	0	0,66%	93,13%	2,88%
	<i>Bacillus subtilis</i>	0	13,16%	2,62%	78,47%

A fertőzött minták esetén az osztályozás hatékonysága 80-90% körül alakult a kezeletlen és a prokloráz-Mn-nal kezelt csoportban, a többi csoportban alacsonyabb volt. A kontrol minták esetén a helyesen osztályozott spektrumok aránya 89,76% a kezeletlen csoportnál, 71,61% a *Bacillus -subtilis*-szel kezelt csoportnál, 53,88% a natamycin-nel kezelt osztályban és 14,29% a prokloráz-Mn-nal kezelt osztályban, (valószínűleg abból adódott az alacsony arány, hogy ebben a csoportban volt a legalacsonyabb a minták száma (M7 melléklet)).

Mivel a nem fertőzött minták csoportján az alkalmazott SVM módszerrel prokloráz-Mn tekintetében a validációban fals negatív minták aránya igen magas (45,54%), a módszer alkalmazása antifungális szerek kimutatására nem javasolható. A fertőzött minták osztályozásának eredményessége szemben a nem fertőzött minták magas tévesztési arányával utalhat arra, hogy a módszer az alkalmazott gombaellenes szerek közvetlen kimutatására ugyan nem alkalmas, viszont eredetük alapján (természetes vagy szintetikus) osztályozhatóak a minták.

7. táblázat: Különböző fungicid kezelésen átesett, *Cladobotryum*-mal fertőzött és kontrol minták spektrumain végzett SVM osztályozás tévesztési mátrixa

<i>Cladobotryum</i> -mal fertőzött minták					
	valós osztály				
prediktált osztály		Kezeletlen	Natamycin	Prokloráz-Mn	<i>Bacillus subtilis</i>
	Kezeletlen	88,46%	3,92%	2,29%	2,78%
	Natamycin	3,85%	75,16%	7,63%	25,00%
	Prokloráz-Mn	0,00%	1,96%	83,21%	11,11%
	<i>Bacillus subtilis</i>	7,69%	18,95%	6,87%	61,11%
Kontrol (nem fertőzött)					
	valós osztály				
prediktált osztály		Kezeletlen	Natamycin	Prokloráz-Mn	<i>Bacillus subtilis</i>
	Kezeletlen	89,76%	25,00%	45,54%	9,32%
	Natamycin	3,31%	53,88%	30,36%	17,80%
	Prokloráz-Mn	0,00%	5,60%	14,29%	1,27%
	<i>Bacillus subtilis</i>	6,93%	15,52%	9,82%	71,61%

4.3 Pókhálóspenész és zöldpenész megjelenésének vizsgálata kétspórás csiperkén

Az adatokon főkomponens analízist végeztünk és ebből kiindulva szelektáltuk a változókat. Az adatokon végzett PCA súlyfaktor értékei alapján öt hullámhossz-értéket választottunk ki: 1014 nm, 1459 nm, 994 nm, 1397 nm és 980 nm.

A kiválasztott hullámhosszaknál mért intenzitásértékeket felhasználva lineáris diszkriminancia analízissel (LDA) és SVM módszerrel készült modellek segítségével végeztük a minták osztályozását.

SVM modellel a helyesen osztályozott minták aránya 75% körüli volt (8. táblázat), a validáció során ez az arány kis mértékben nőtt (9. táblázat). A validáció során véletlenszerűen történt az osztályozandó minták kiválasztása, valószínűleg a kiválasztott minták esetén jelentősebb volt a metabolikus aktivitás, mint a minták összességét illetően, ebből adódóan lehetett az osztályozás ez esetben hatékonyabb.

8. táblázat: SVM osztályozás tévesztési mátrixa (helyesen osztályozott minták aránya 74,2%)

	valós osztály		
prediktált osztály	<i>Cladobotryum</i>	kontrol	<i>Trichoderma</i>
<i>Cladobotryum</i>	74%	10%	19%
kontrol	16%	79%	11%
<i>Trichoderma</i>	9%	11%	70%

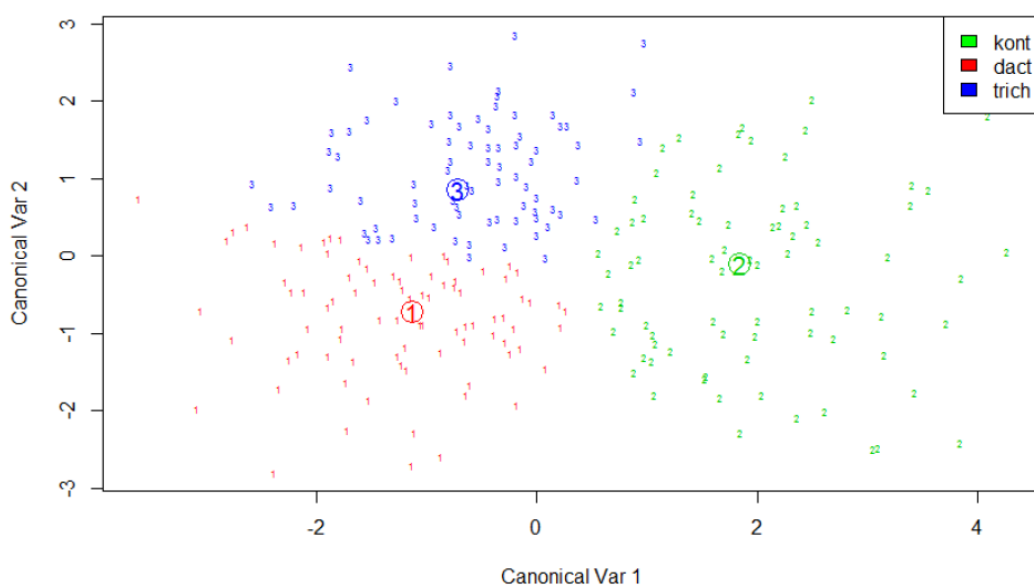
9. táblázat: SVM validáció tévesztési mátrixa (helyesen osztályozott minták aránya 76,0%)

	valós osztály		
prediktált osztály	<i>Cladobotryum</i>	kontrol	<i>Trichoderma</i>
<i>Cladobotryum</i>	76%	9%	14%
kontrol	15%	74%	7%
<i>Trichoderma</i>	9%	18%	79%

Az LDA módszerrel alkotott modell határozottan jobb eredményre vezetett. A helyesen osztályozott minták aránya elérte a 87,5%-ot (10. táblázat), a validáció során pedig 86,4%-ra csökkent (11. táblázat).

10. táblázat: LDA osztályozás tévesztési mátrixa (helyesen osztályozott minták aránya 87,5%)

prediktált osztály	valós osztály		
	<i>Cladobotryum</i>	kontrol	<i>Trichoderma</i>
<i>Cladobotryum</i>	79%	1%	13%
kontrol	1%	96%	0%
<i>Trichoderma</i>	20%	3%	88%



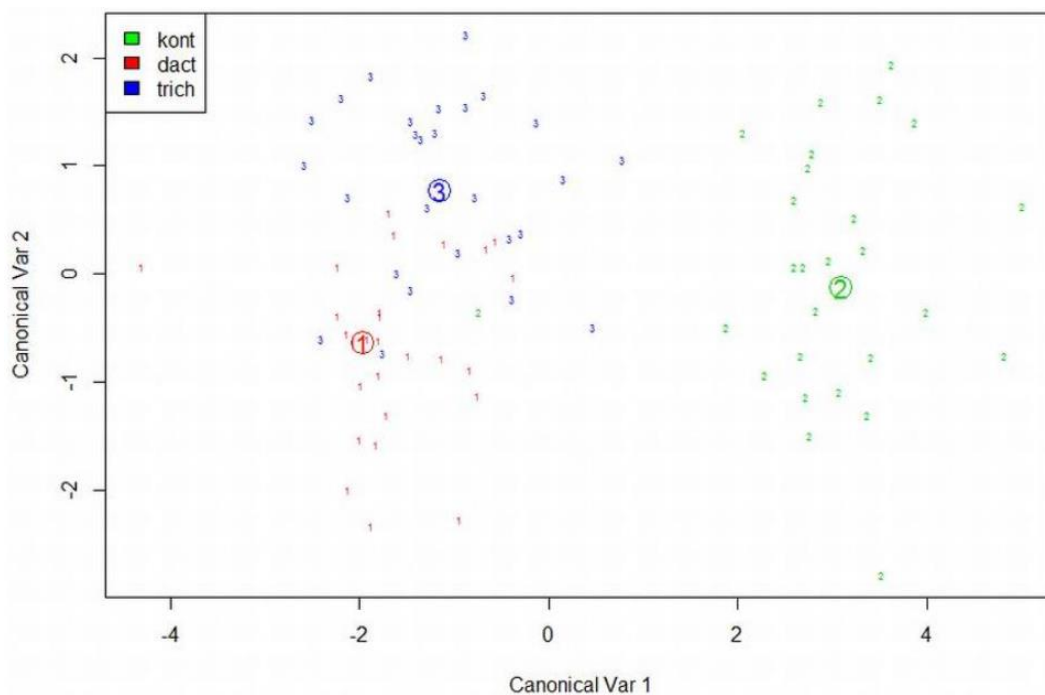
34. ábra: LDA osztályozás eredménye (zöld: kontrol, vörös: *Cladobotryum*-mal fertőzött, kék: *Trichoderma*-val fertőzött)

A legjobb eredményt a kontrol csoport osztályozásában sikerült elérni, ezt követte a *Trichoderma*-val, majd a *Cladobotryum*-mal fertőzött csoport.

A két különböző penész által fertőzött minták szétválasztása kevésbé volt eredményes, viszont a fertőzött és kontrol minták osztályozása igen hatékony volt (34. ábra, 35. ábra), a fertőzött minták spektrumai közül mindössze egy lett hibásan kontrolként osztályozva, a kontrol minták spektrumainak pedig több, mint 95%-a helyes osztályba került a validáció során.

11. táblázat: LDA validáció tévesztési mátrixa (helyesen osztályozott minták aránya 86,4%)

prediktált osztály	valós osztály		
	<i>Cladobotryum</i>	kontrol	<i>Trichoderma</i>
<i>Cladobotryum</i>	78%	0%	15%
kontrol	0%	96%	0%
<i>Trichoderma</i>	22%	4%	85%



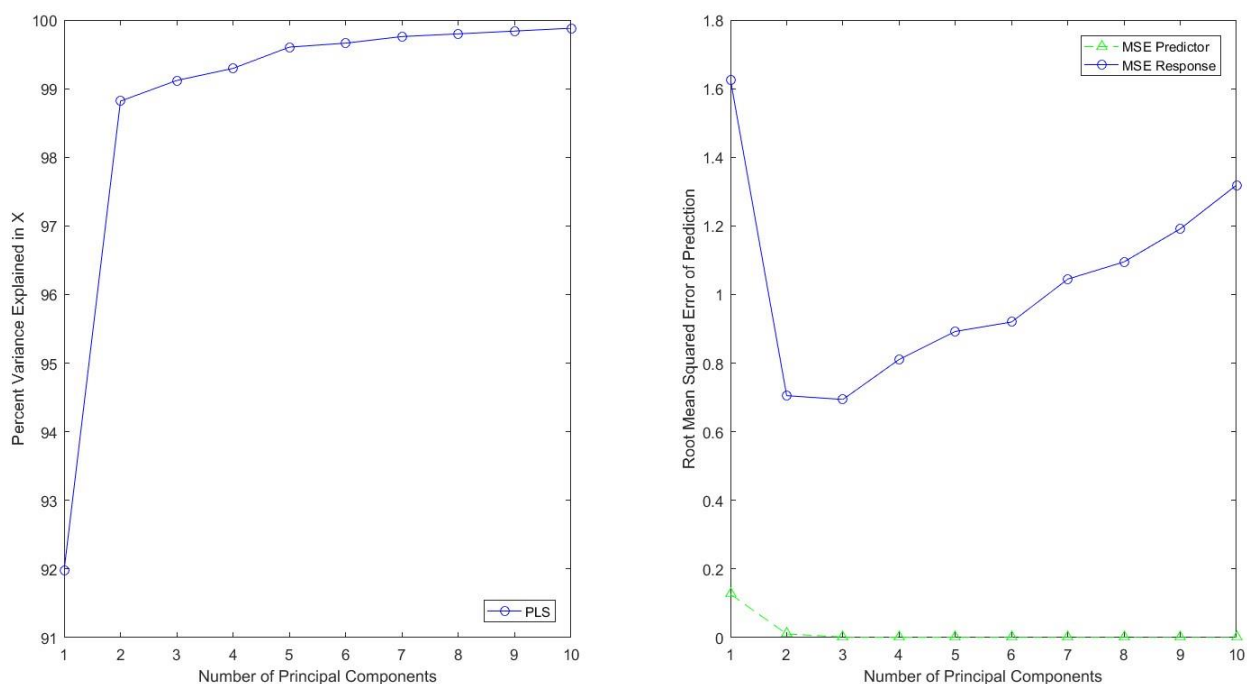
35. ábra: LDA keresztvalidáció eredménye (zöld: kontrol, vörös: *Cladobotryum*-mal fertőzött, kék: *Trichoderma*-val fertőzött)

A kiválasztott hullámhosszak adatain végzett diszkriminancia analízis alkalmas volt a fertőzött és kontrol minták elkülönítésére már a fertőzések korai fázisában, mikor a fertőzés tünetei még nem észlelhetők. Az eredmények alapján multispektrális válogatórendszer alakítható ki a fertőzést hordozó csiperkegombák kiválasztására.

4.4 Minőségi paraméterek eloszlásának becslése görögdinnye mintákon

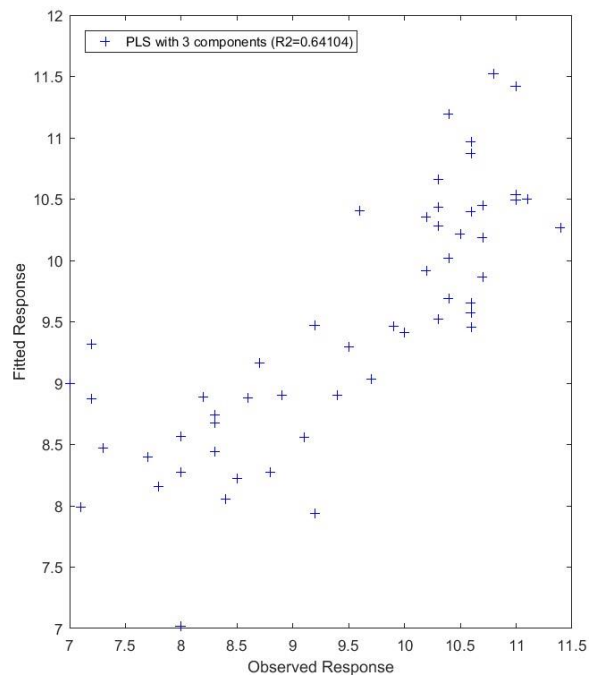
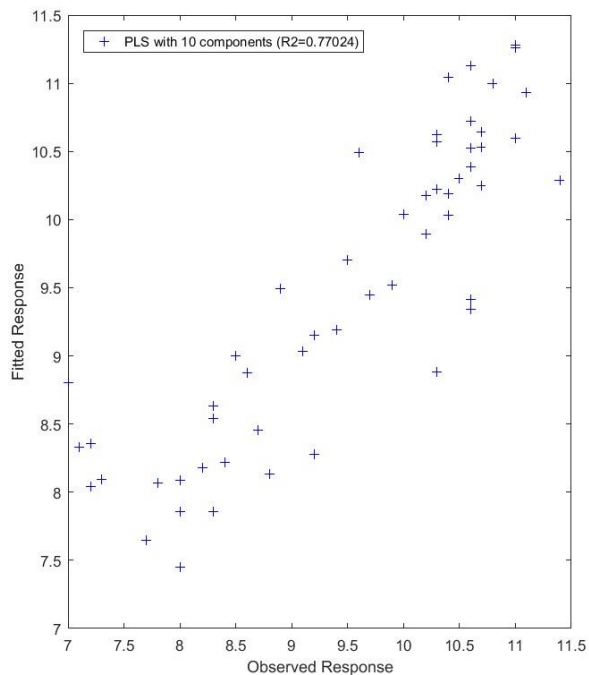
Oldható szárazanyag-tartalom (Brix) becslése

Az adatokat külön vizsgálva, az egyik minta esetén 2 látens változóval már az adatok variációjának majdnem 99%-a leírható volt, illetve a becslés négyzetes hibája 0,7 körüli volt 2 és 3 látens változónál (36. ábra).



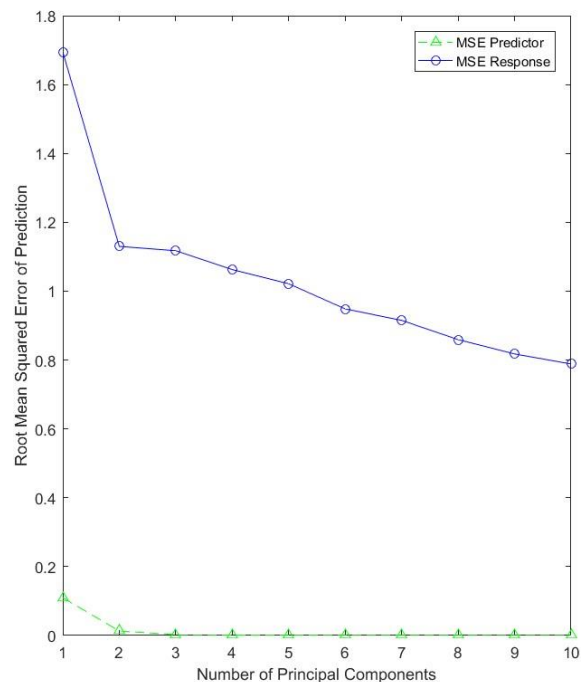
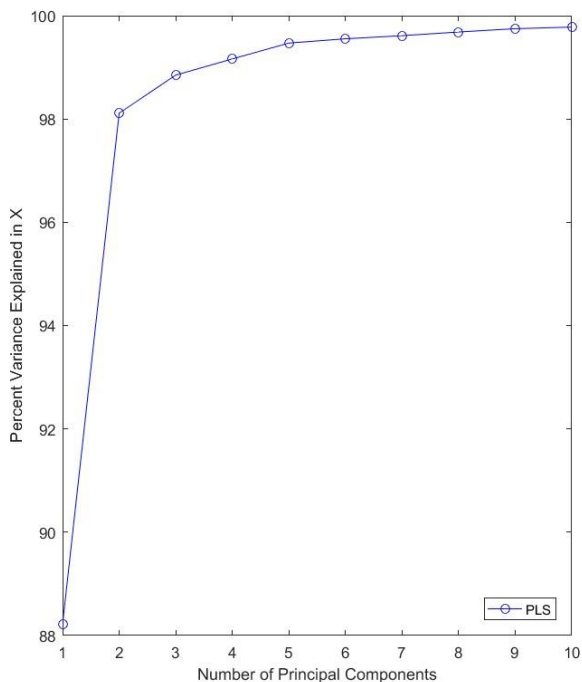
36. ábra: Oldható szárazanyag-tartalom (Brix) PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye az egyik mintán, bal: magyarázott variancia (%) a látens változók számának függvényében, jobb: RMSEC (Predictor) és RMSEV (Response) értéke a látens változók számának függvényében

A becslési ábrák szerint (37. ábra) az adatok már 3 látens változó esetén eredményes illesztést mutatnak ($R^2 = 0,64$), bár 10 látens változónál az illesztés számottevően szorosabb ($R^2 = 0,77$).

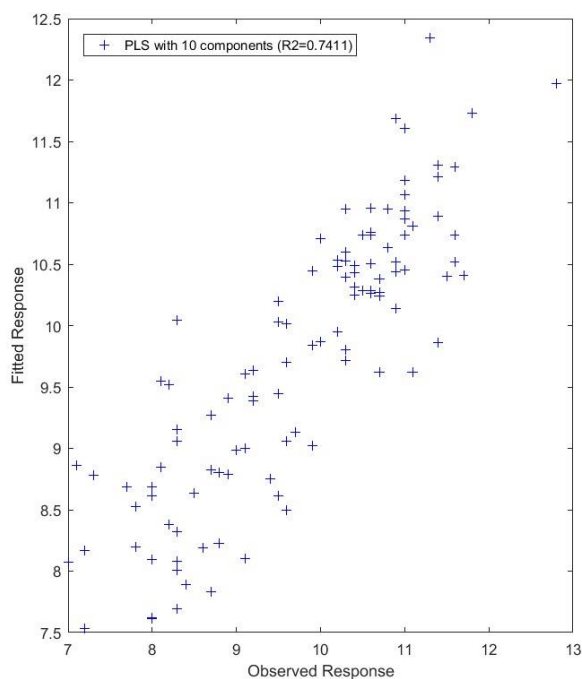


37. ábra: Oldható szárazanyag-tartalom (Brix) PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy mintán, bal: becslési ábra 10 látens változó esetén, jobb: becslési ábra 3 látens változó esetén

A minták összesített adatainak elemzésekor a becslés legalacsonyabb négyzetes hibája 10 látens változónál adódott $RMSEV = 0,8$ értéknél (38. ábra), itt a determinációs együttható értéke $R^2 = 0,74$ volt (39. ábra).



38. ábra: Oldható szárazanyag-tartalom (Brix) PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, bal: magyarázott variancia (%) a látens változók számának függvényében, jobb: RMSEC (Predictor) és RMSEV (Response) értéke a látens változók számának függvényében

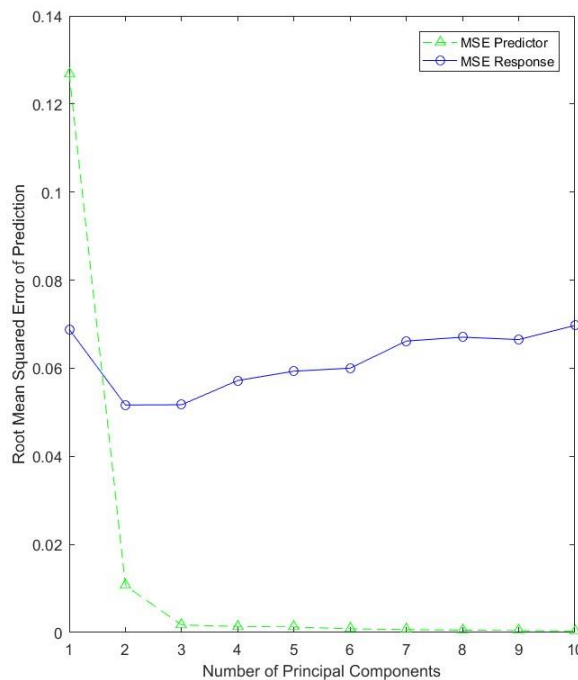
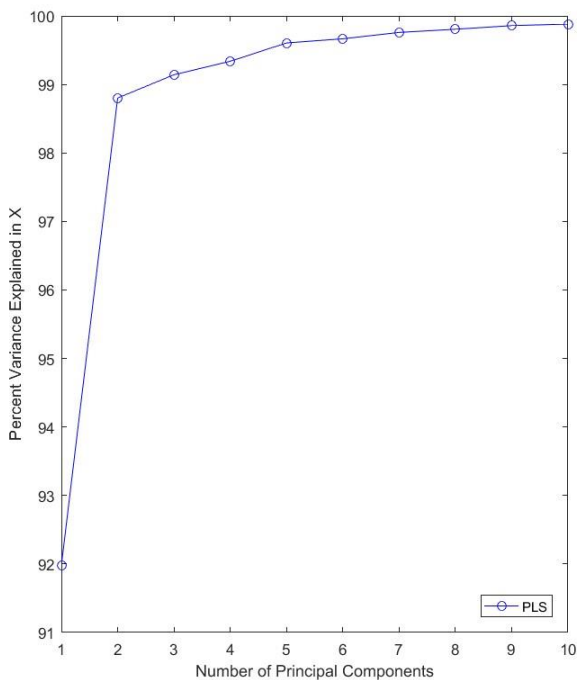


39. ábra: Oldható szárazanyag-tartalom (Brix) PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, becslési ábra 10 látens változó esetén

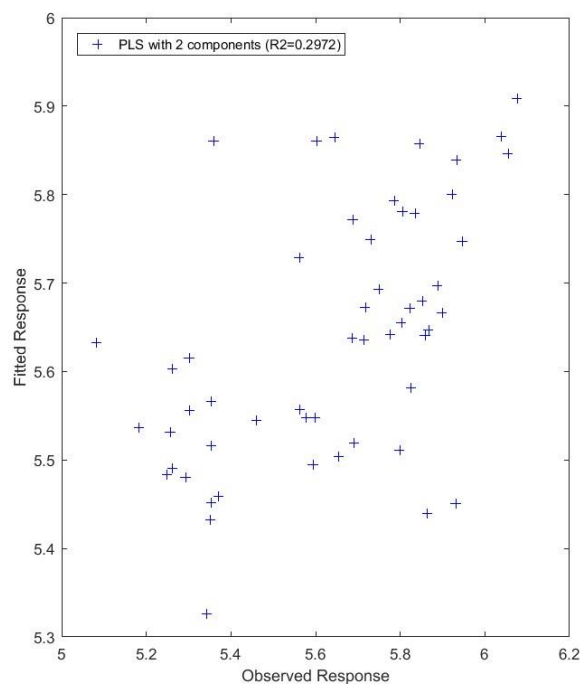
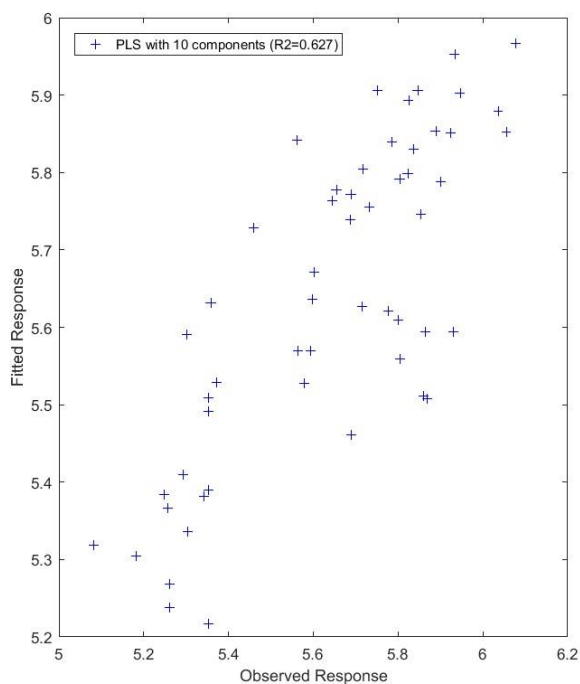
A PLSR modellek esetén az első látens változó súlyfaktor ábrája (M3 melléklet) negatív maximumokat mutat a víz abszorpciós régióiban, 1200 nm és különösen 1450 nm körül, ami a várttal megegyező eredmény az oldható szárazanyag-tartalom becslésénél.

pH-érték becslése

Egy minta adataival végzett regresszió a determinációs együttható tekintetében nagyon csekély korrelációt mutatott, értéke 2 látens változónál $R^2 = 0,29$, 10 látens változónál pedig $R^2 = 0,62$ (41. ábra). A négyzetes hiba (RMSEV) minimuma 0,05 körül adódott (40. ábra).



40. ábra: pH-érték PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy mintán, bal: magyarázott variancia (%) a látens változók számának függvényében, jobb: RMSEC (Predictor) és RMSEV (Response) értéke a látens változók számának függvényében

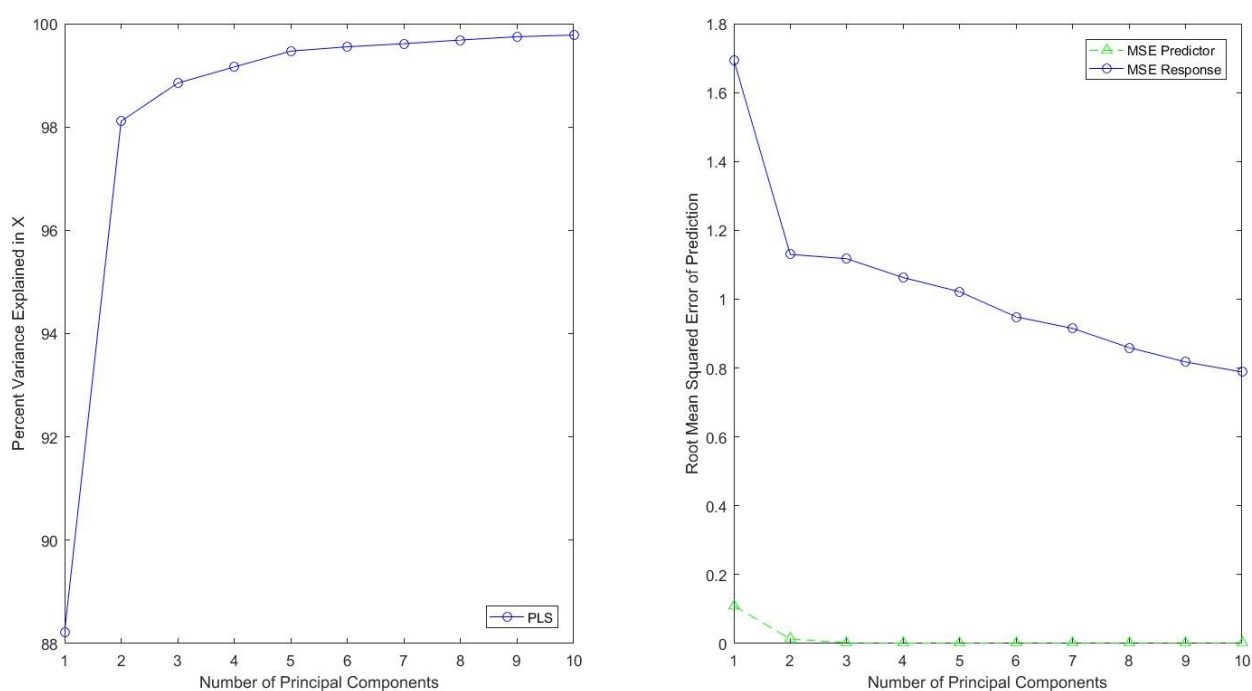


41. ábra: pH-érték PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy mintán, bal: becslési ábra 10 látens változó esetén, jobb: becslési ábra 2 látens változó esetén

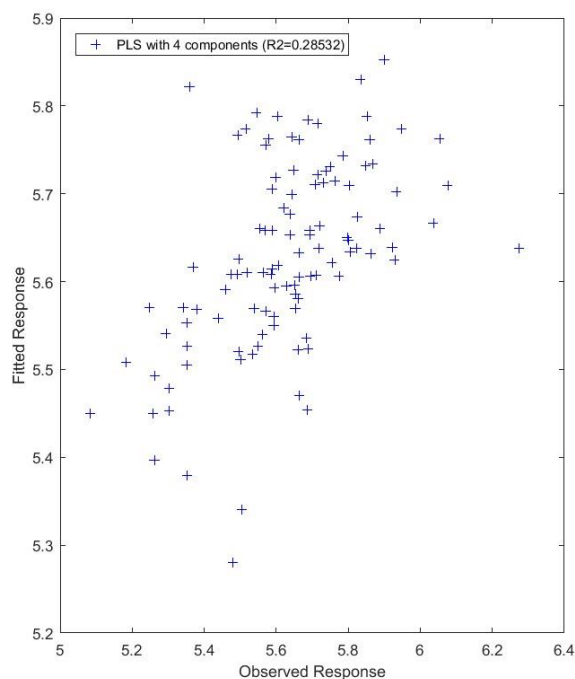
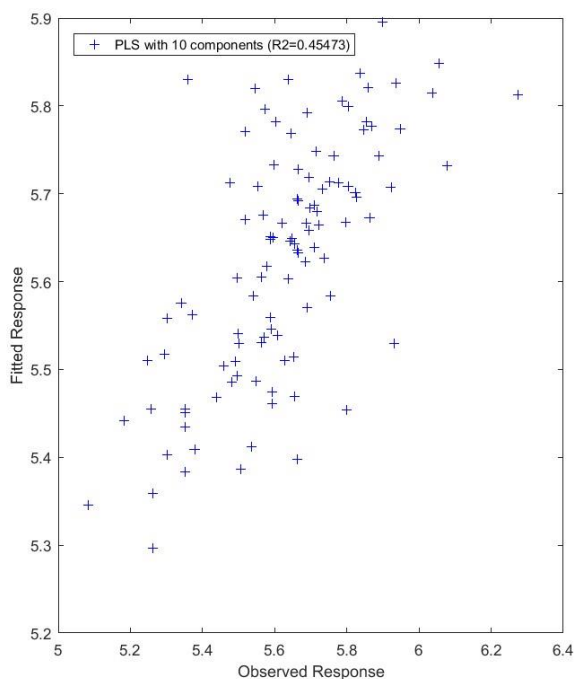
Az eredmények a minták összesített adataira vonatkozóan, a determinációs együtthatót illetően hasonlóak a minták esetén külön tapasztaltakhoz, bár valamivel alacsonyabbak: 4 látens

változónál $R^2 = 0,28$, 10 látens változó esetén pedig csupán $R^2 = 0,45$ (43. ábra). A négyzetes hiba értéke viszont jóval magasabb, 10 látens változó esetén 0,8 körüli (42. ábra).

A pH-érték becslése a kapott eredmények alapján nem bizonyult sikeresnek. Ebben az esetben is a víztartalomra utaló régiókban mutattak a súlyfaktor ábrák kapcsolatot a becslés esetén (M3 melléklet). A minták (gyümölcsök) spektruma, illetve azok eltérései kismértékűek lehetnek, ha a savtartalmat illetően a minták között nincs számottevő eltérés (a minták savtartalma viszonylag alacsony), illetve a különbségek sem feltétlenül okoznak kimutatható eltérést spektrálisan. A pH-érték így egyike a spektrálisan nehezen becsülhető minőségi jellemzőknek.



42. ábra: pH-érték PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, bal: magyarázott variancia (%) a látens változók számának függvényében, jobb: RMSEC (Predictor) és RMSEV (Response) értéke a látens változók számának függvényében

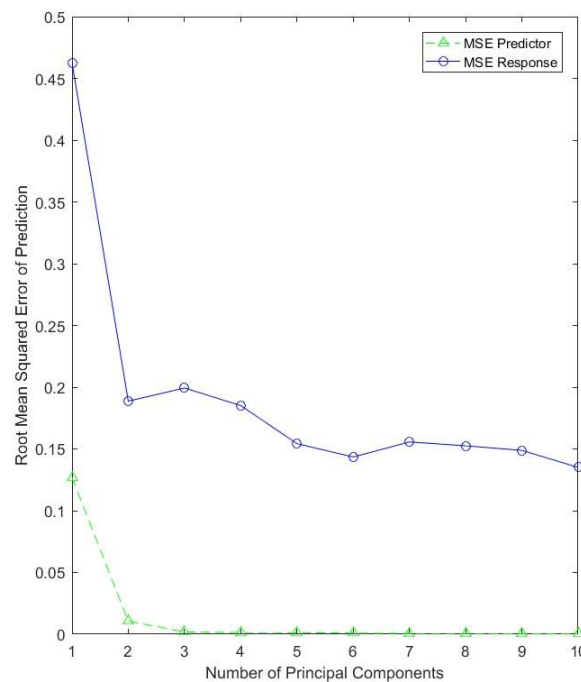
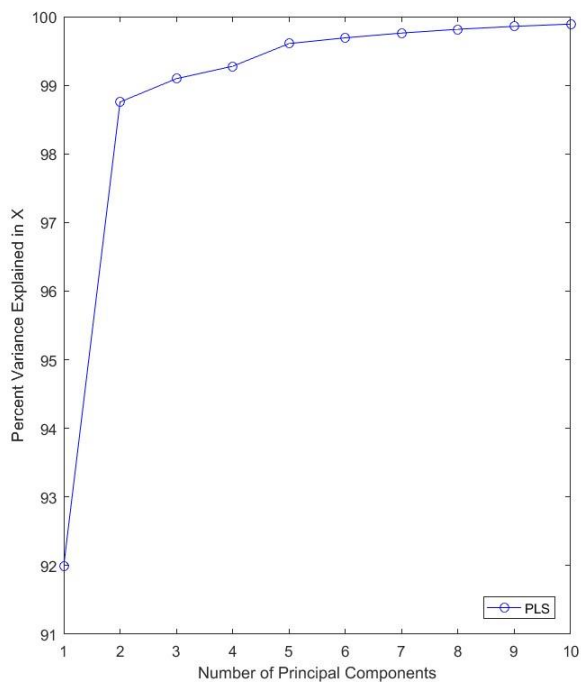


43. ábra: pH-érték PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, bal: becslési ábra 10 látens változó esetén, jobb: becslési ábra 2 látens változó esetén

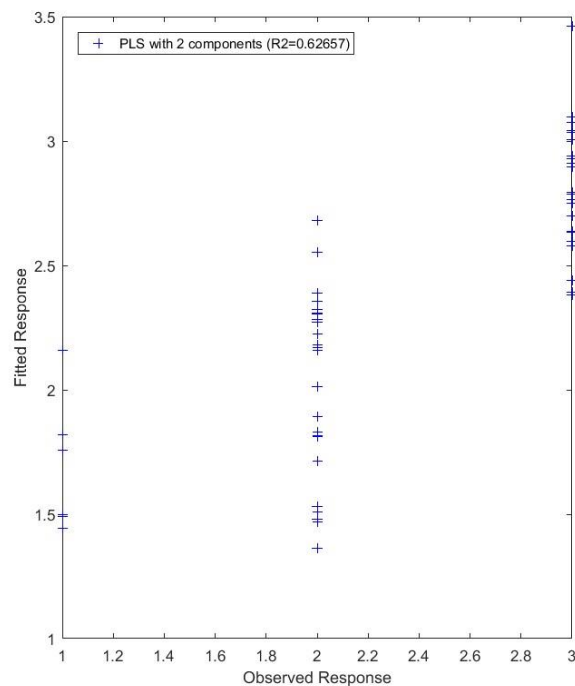
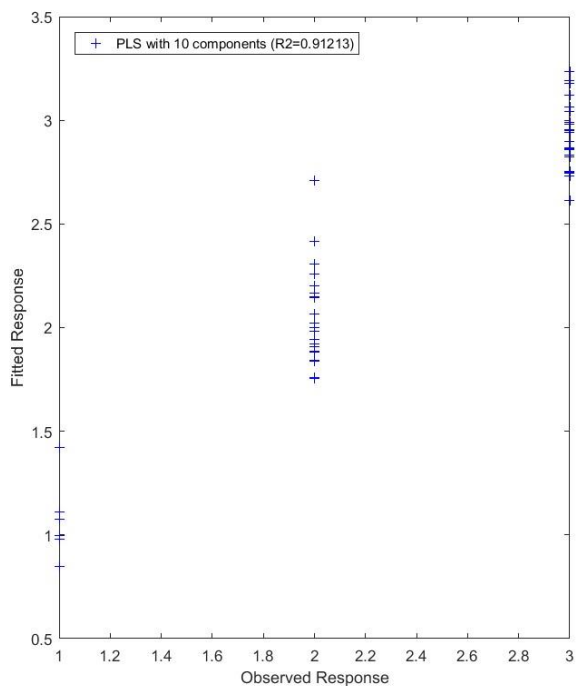
A középponttól mért távolság becslése

A középponttól mért távolság becslése során az egymástól megközelítőleg azonos távolságra lévő, kijelölt érdeklődési területek (ROI) 1-3 diszkrét értékeket kaptak (1: középpont, 2: középponthoz közelebbi szövetrész, 3: héj részhez közelebbi szövetrész).

Egy minta adatainak vizsgálata esetén már 2 látens változóval leírható volt a variancia több, mint 98%-a. A négyzetes hiba már 2 látens változónál 0,2 alá csökkent (44. ábra). A determinációs együttható két látens változónál is elfogadható illesztést mutatott ($R^2 = 0,62$), 10 látens változónál pedig igen szoros illesztést ($R^2 = 0,91$) (45. ábra).



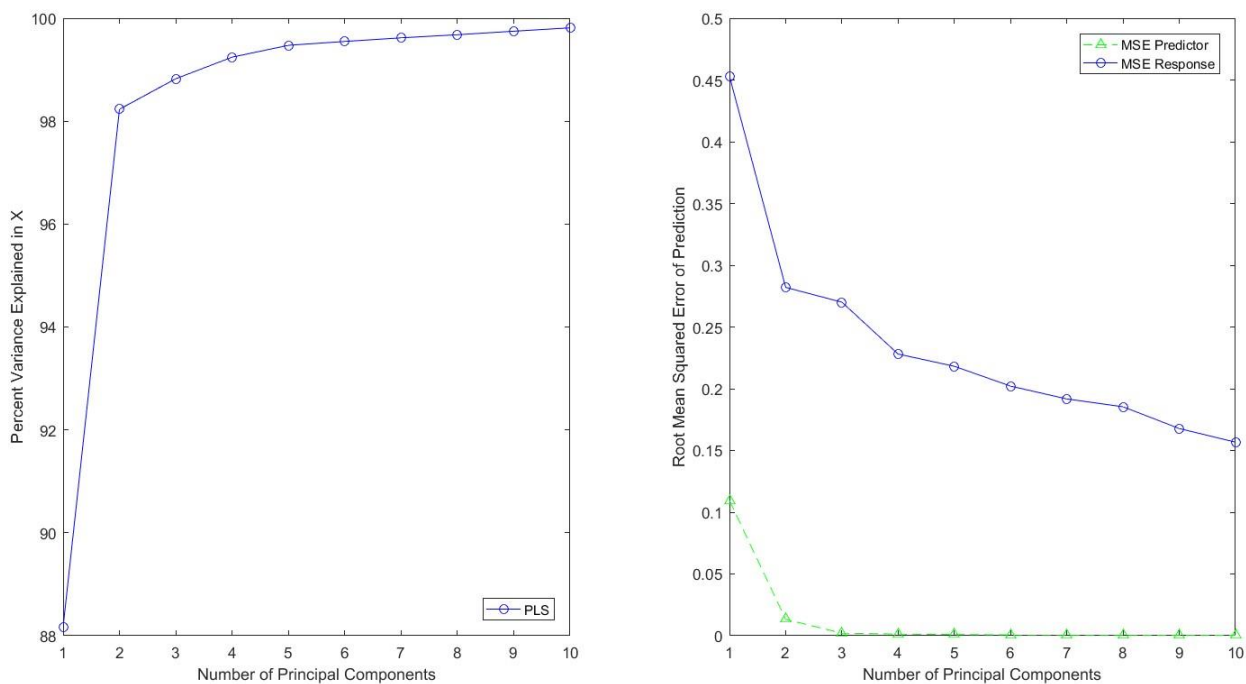
44. ábra: A középponttól mért távolság PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy mintán, bal: magyarázott variancia (%) a látens változók számának függvényében, jobb: RMSEC (Predictor) és RMSEV (Response) értéke a látens változók számának függvényében



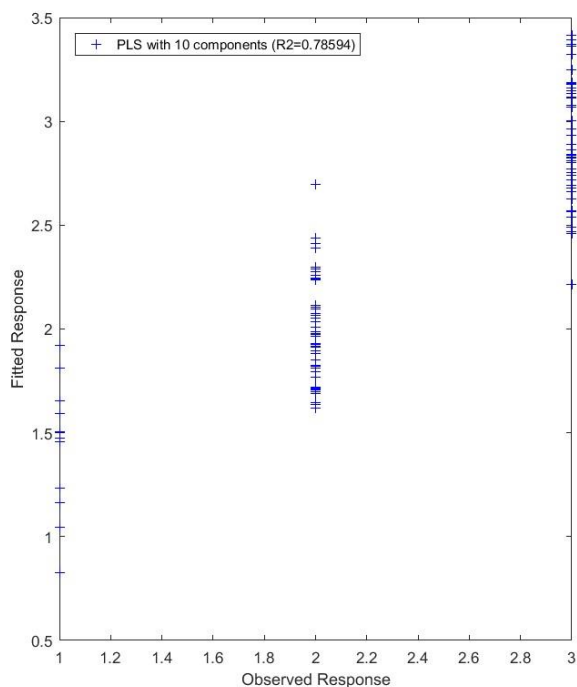
45. ábra: A középponttól mért távolság PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy mintán, bal: becslési ábra 10 látens változó esetén, jobb: becslési ábra 2 látens változó esetén

A minták összesített adatainak elemzése során már 2 látens változóval leírható volt a variancia több, mint 98%-a, illetve a becslés négyzetes hibája már ekkor 0,3 alá csökkent (46.ábra). 10

látens változó esetén ez a hiba majdnem a felére csökkent, az illesztés pedig igen jó eredményt adott: $R^2 = 0,79$ (47. ábra).



46. ábra: A középponttól mért távolság PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, bal: magyarázott variancia (%) a látens változók számának függvényében, jobb: RMSEC (Predictor) és RMSEV (Response) értéke a látens változók számának függvényében



47. ábra: A középponttól mért távolság PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, becslési ábra 10 látens változó esetén

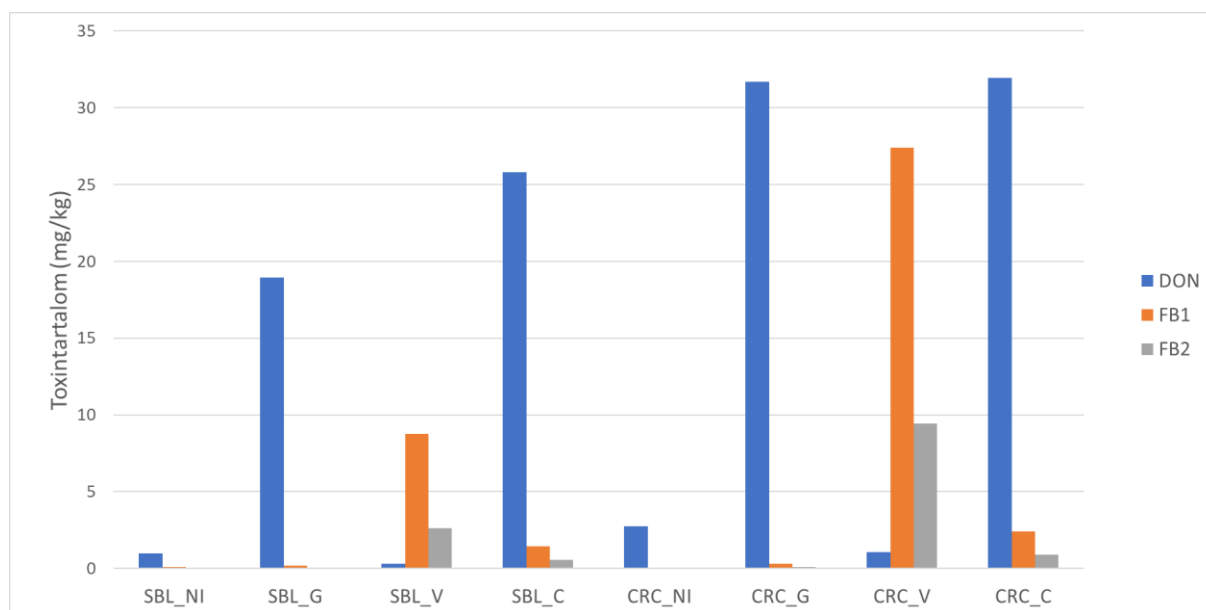
A középponttól mért távolság becslésénél kapott súlyfaktor ábrák szintén 1450 nm körül mutatnak maximumot. A vizsgált minta víztartalma igen magas és ennek hatása spektrálisan is megjelenik. Az eredmények ez alapján elsősorban a minta víztartalmának eloszlásában való különbségeket tükrözik.

A pH érték becslése nem volt sikeres, amelynek oka többek között az alacsony savtartalom és a jellemzőt illető alacsony variabilitás lehet. Az oldható szárazanyagtartalom eloszlásának vizsgálata eredményesnek bizonyult, a minták külön vizsgálata is elfogadható becslést tett lehetővé, ahogy a középponttól mért távolság esetén is.

4.5 Fuzáriummal fertőzött kukorica minták vizsgálata

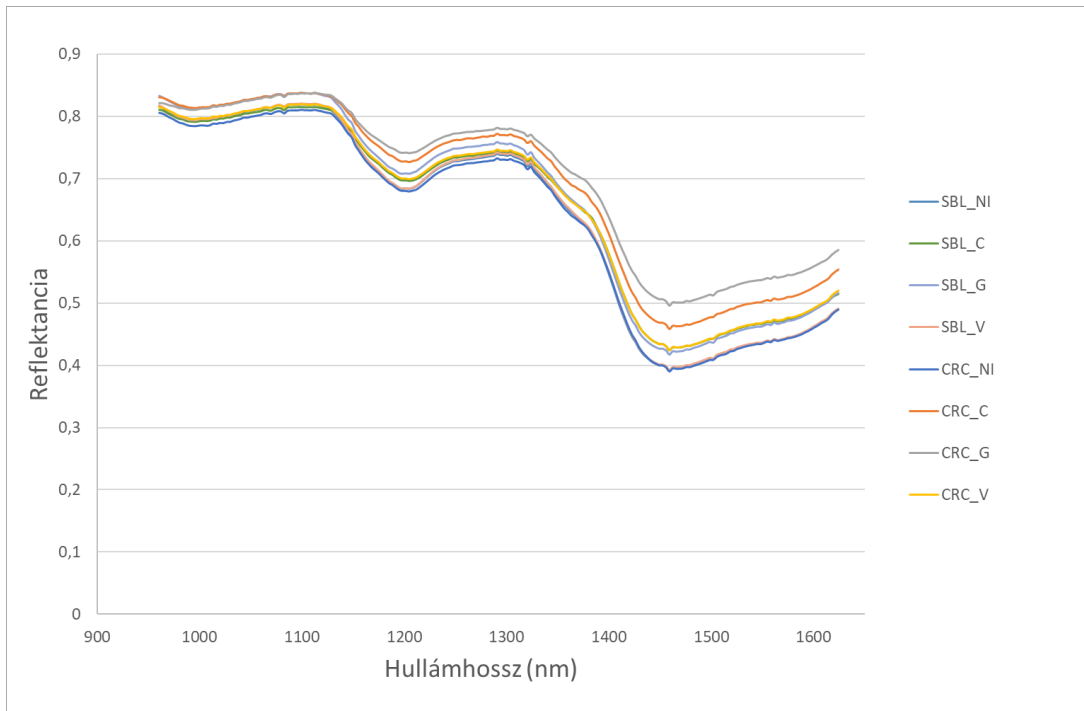
Az 48. ábrán látható, hogy a két hibrid esetén a gombák metabolikus aktivitása a vártnak megfelelő módon tér el: az érzékenyebb „CRC” jelű hibrid csoportok átlagos toxintartalma magasabb a rezisztensebb „SBL” jelű hibrid csoportjaira jellemző értékeknél.

Az 48. ábra továbbá azt is mutatja, hogy a különböző fuzárium törzsek eltérő arányban termelnek szekunder metabolitokat, a *Fusarium culmorum* és a *Fusarium graminearum* trichotecéneket, köztük DON toxint termelnek, míg a *Fusarium verticilloides*-re a fumonizinek termelése jellemző (JAKUCS és VAJNA, 2003) (M5 melléklet).

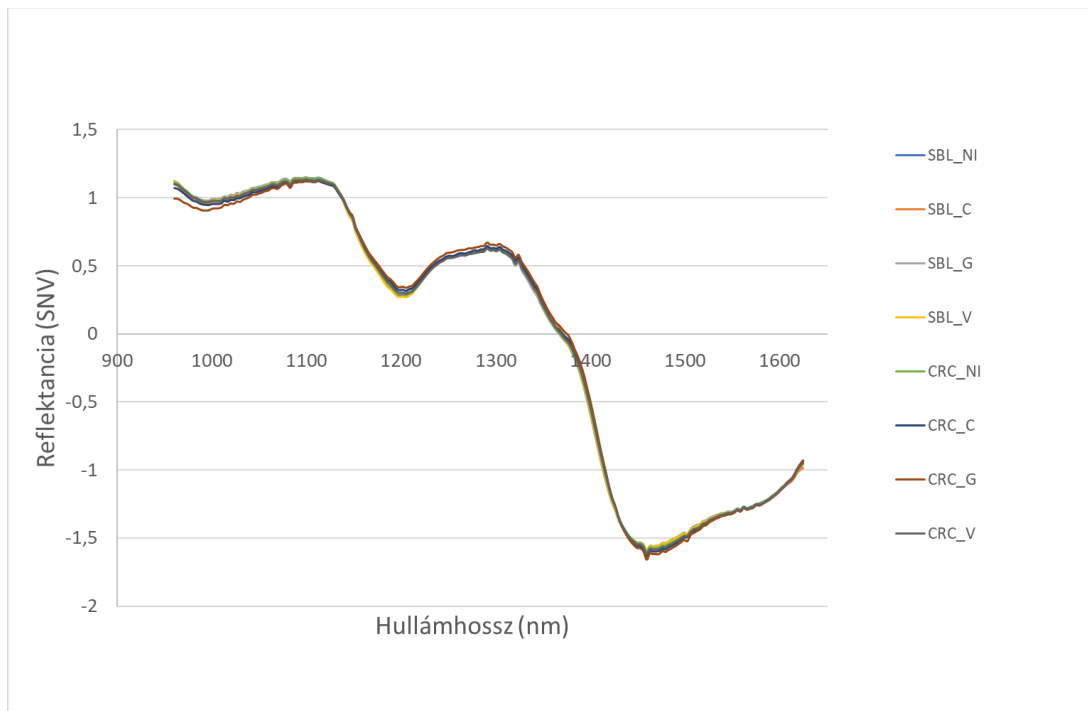


48. ábra: A különböző fuzáriummal fertőzött őrölt kukoricaminták csoportjainak átlagos toxin tartalma (sötétkék: deoxinivalenol (DON), narancs: fumonizin B₁ (FB1), szürke: fumonizin B₂ (FB2))

Pusztán a csoportok átlagspektrumait tekintve nem állapítható meg a különböző hibridek vagy a különböző fuzárium fertőzések közötti alapvető különbség (49. ábra). A megjelenő alapvonal-ingadozást az SNV transzformáció hatása kiküszöböli (50. ábra).



49. ábra: A különböző fuzáriummal fertőzött őrölt kukoricaminták csoportjainak simított átlagspektruma



50. ábra: A különböző fuzáriummal fertőzött őrölt kukoricaminták csoportjainak simított és SNV transzformált átlagspektrumai

4.5.1 Toxintartalom becslése

Összesített toxintartalom becslése

Az analitikai eredmények alapján PLS regresszió alkalmazásával becsültük az összesített toxin tartalmat (DON és fumonizinek). A regresszió során a 12. táblázat szerinti összeállításnak megfelelően történt a minták felosztása. A regressziót úgy végeztem, hogy a megadottaknak megfelelő mennyiségű mintát csoportonként, véletlenszerűen 10-10 alkalommal kiválasztottam, majd a látens változók számát 5-tel növeltem.

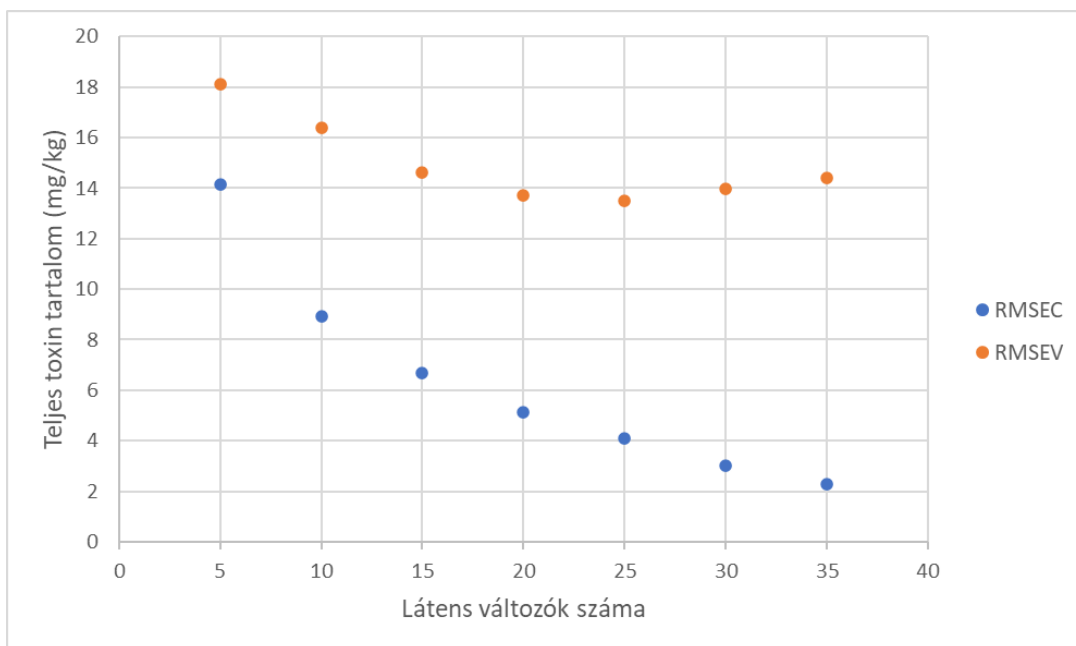
12. táblázat: A fuzáriummal fertőzött kukorica minták felosztása a statisztikai elemzéshez, összesített toxintartalom becslése esetén

Csoport	Tanuló minta (db)	Teszt minta (db)
Természetesen fertőzött (NI)	24	8
<i>Fusarium culmorum</i> (C)	36	12
<i>Fusarium graminearum</i> (G)	36	12
<i>Fusarium verticilloides</i> (V)	36	12

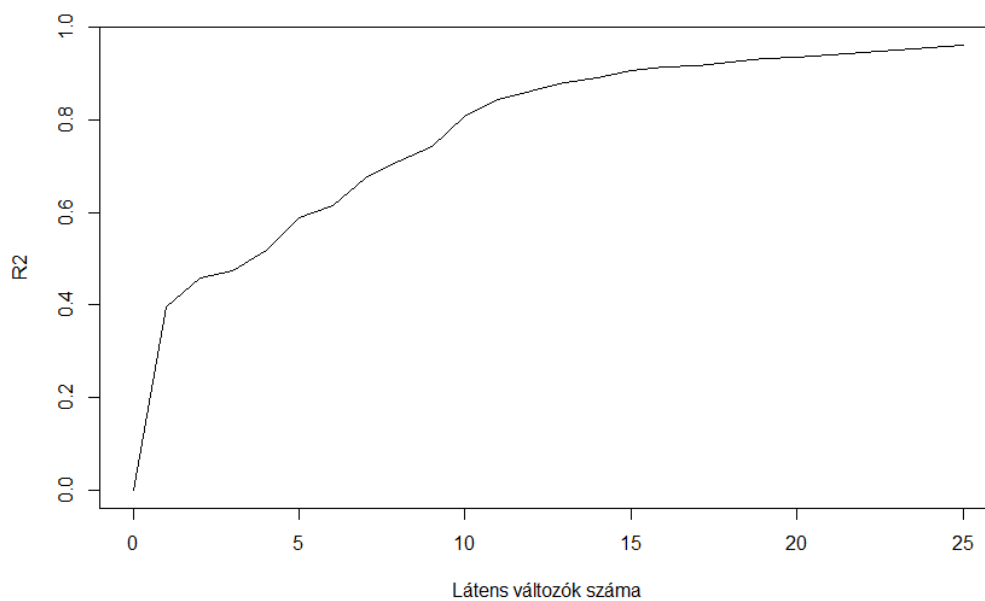
A legjobb eredményt az RMSEV értékében 25 látens változónál kaptam, a validáció négyzetes hibája 13,48 mg volt átlagosan, a legmagasabb értéket a tíz ismétlésből 15,12 mg-nál kaptam. (51. ábra).

A determinációs együttható értéke 25 látens változó esetén 10 ismétlés átlaga alapján 0,974 volt (52. ábra).

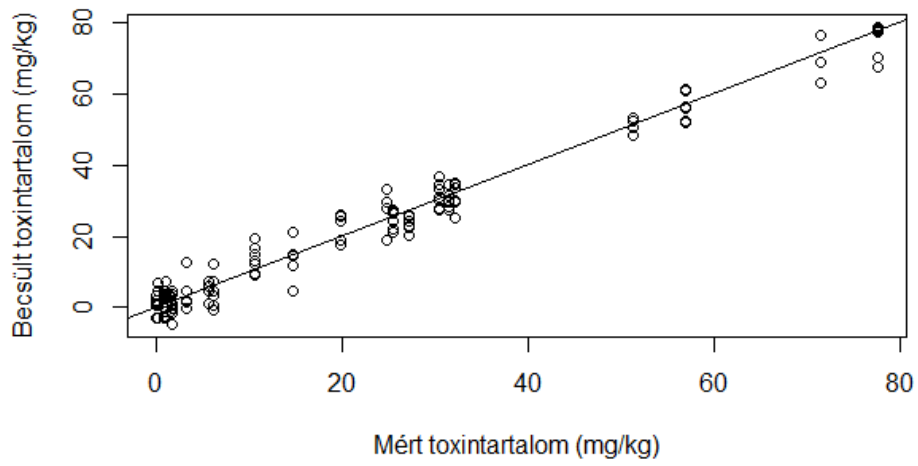
A kalibrációra és a validációra kapott becslési ábra alapján (53. ábra, 54. ábra) is látható, hogy a validációs adatok esetén jóval nagyobb mértékben szórnak az értékek, mint a kalibrációnál, az 55. ábrán látható, hogy az RMSEV legalacsonyabb. 13,48 mg/kg értékénél az RMSEC értéke jóval alacsonyabb, 4,22 mg/kg.



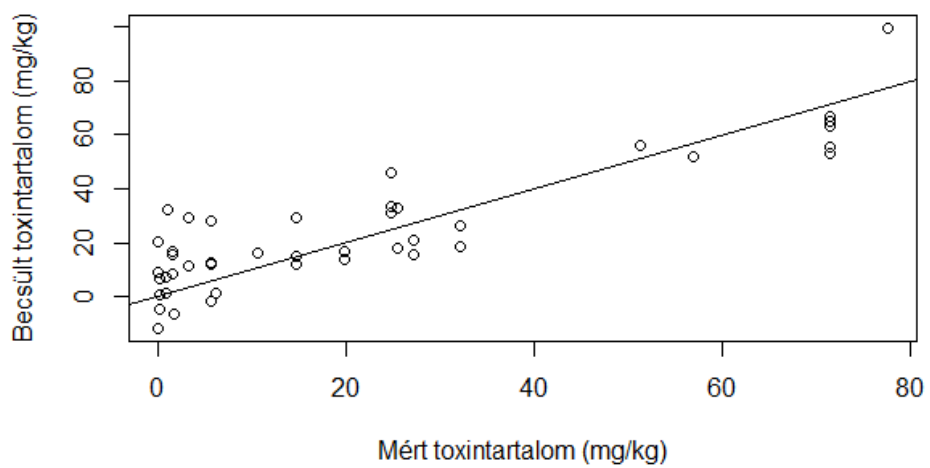
51. ábra: Összesített toxintartalom becslésére vonatkozó PLSR regresszió RMSEC és RMSEV értékei 10 véletlenszerűen kiválasztott mintakészleten végzett ismétlés alapján, különböző számú látens változó esetén



52. ábra: Összesített toxintartalom becslésére vonatkozó PLSR regresszió determinációs (R^2) együttható értékei egy kalibrációs minta-összeállítás esetén



53. ábra: Becslési ábra összesített toxintartalom becslésére egy kalibrációs minta-összeállítás esetén



54. ábra: Becslési ábra összesített toxintartalom becslésére egy validációs minta-összeállítás esetén

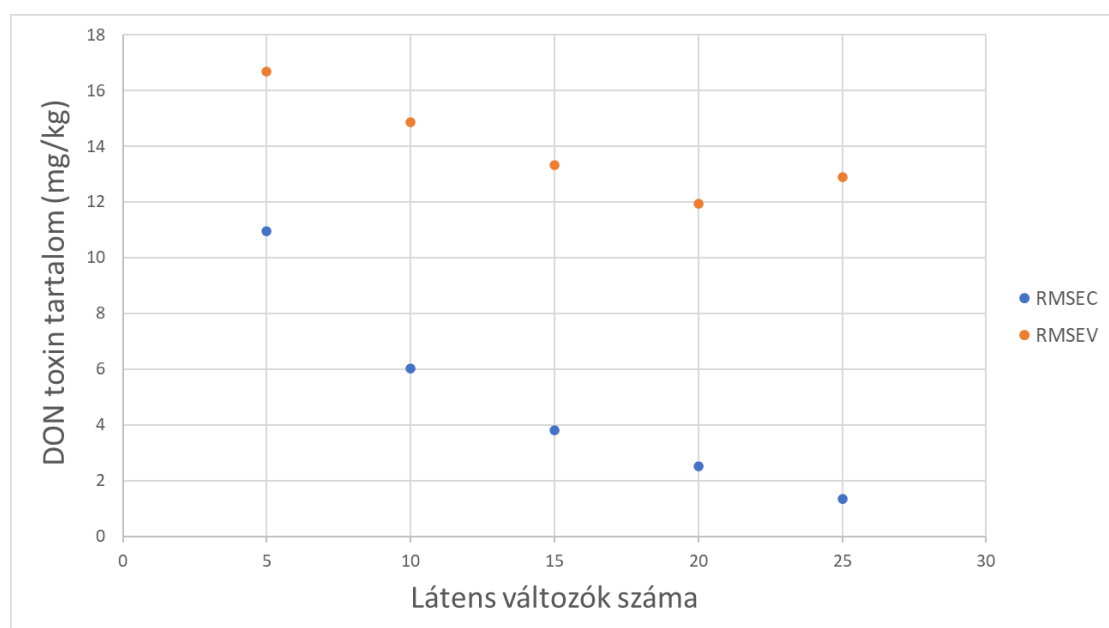
Deoxinivalenol toxin tartalom becslése

A deoxinivalenol termelése a *Fusarium culmorum* és a *Fusarium graminearum* fajokra jellemző, így ehhez a becsléshez ezeknek a csoportoknak az adatait használtam, a 13. táblázat szerint:

13. táblázat: A fuzáriummal fertőzött kukorica minták felosztása a statisztikai elemzéshez, DON toxin mennyiségének becsléséhez

Csoport	Tanuló minta (db)	Teszt minta (db)
<i>Fusarium culmorum</i> (C)	36	12
<i>Fusarium graminearum</i> (G)	36	12

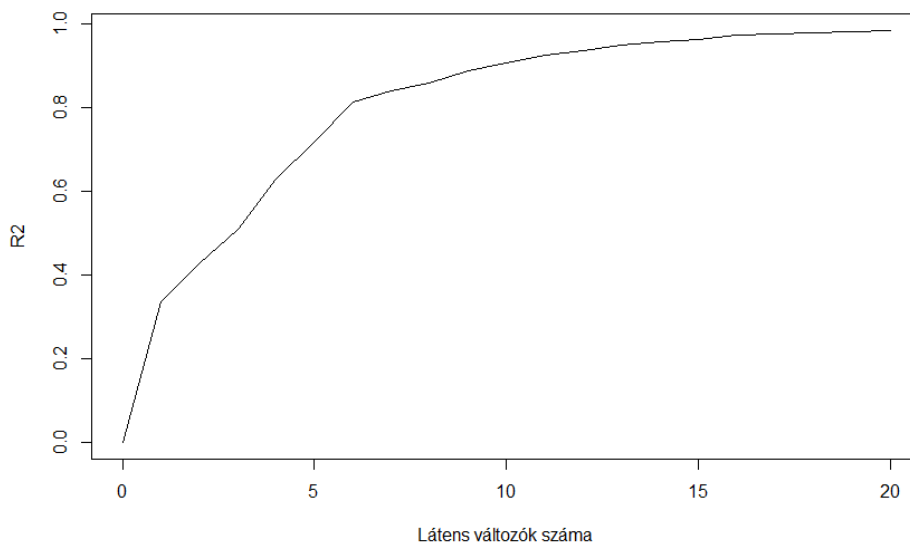
A regressziót az összesített toxintartalomhoz hasonlóan, 5 látens változónként, 10 ismétlésben végeztem.



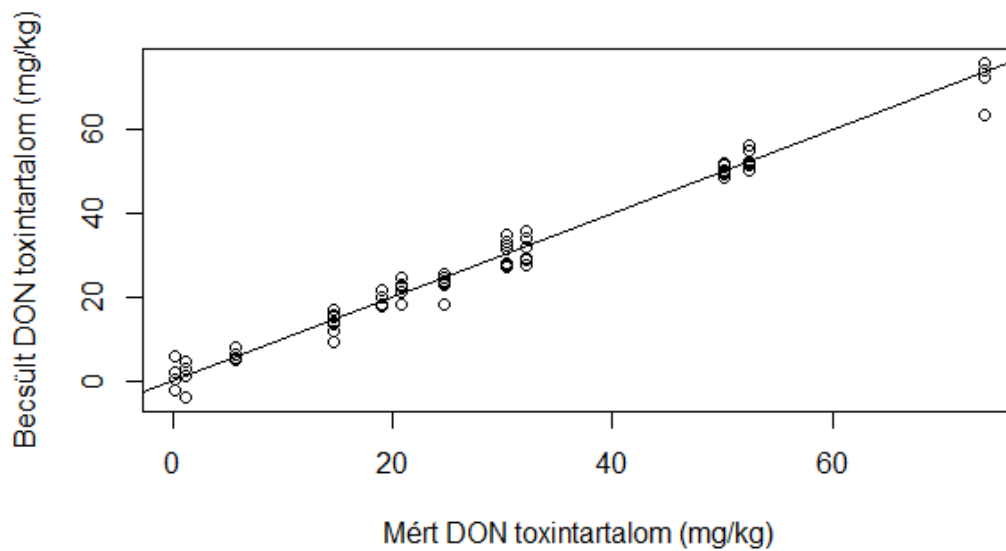
55. ábra: DON toxintartalom becslésére vonatkozó RMSEC és RMSEV érték 10 véletlenszerűen kiválasztott mintakészleten végzett ismétlés alapján, különböző számú látens változó esetén

A legalacsonyabb átlagos RMSEV értéket 20 látens változónál kaptam, amely 11,95 mg/kg volt, míg az RMSEC átlag értéke 2,5 mg/kg volt (55. ábra), ezt tükrözi a kalibráció (57. ábra) és a validáció (58. ábra) becslési ábrája is.

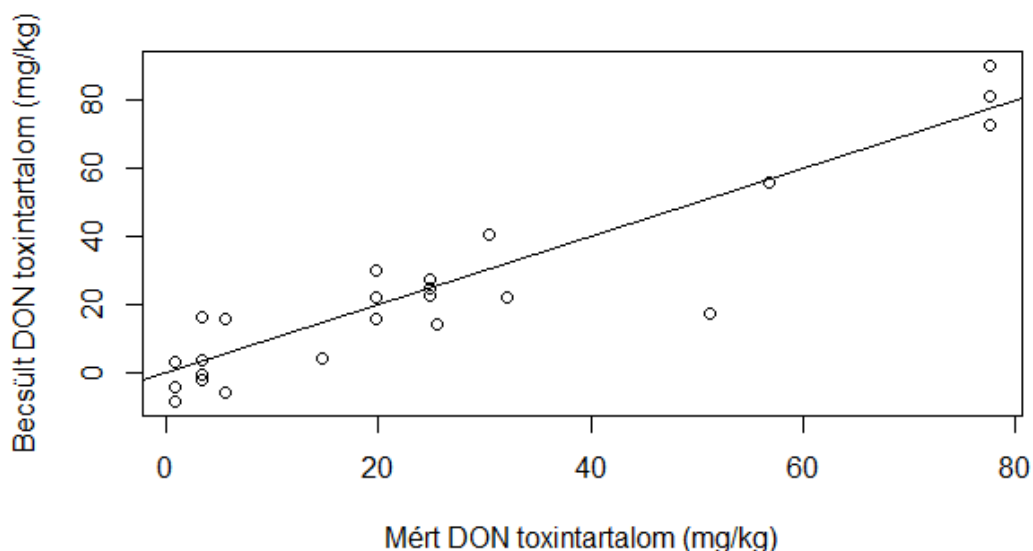
A determinációs együttható értéke 20 látens változónál 10 ismétlés átlaga alapján 0,985 volt (56. ábra).



56. ábra: DON toxintartalom becslésére vonatkozó PLSR regresszió determinációs (R^2) együttható értékei egy kalibrációs minta-összeállítás esetén



57. ábra: Becslési ábra DON toxintartalom becslésére egy kalibrációs minta-összeállítás esetén



58. ábra: Becslési ábra összesített toxintartalom becslésére egy validációs minta-összeállítás esetén

Fumonizin B₁ és B₂ toxin tartalom becslése

A fumonizinek becslése esetén a *Fusarium verticilloides*-szel mesterségesen fertőzött és a nem-fertőzött csoportok mintáit használtam a 14. táblázat szerint.

Mivel 5 és 20 látens változó esetén számottevően nagyobb RMSEC és RMSEV értékek adódtak, itt csak 5 ismétlést végeztem (15. táblázat).

14. táblázat: A fuzáriummal fertőzött kukorica minták felosztása a statisztikai elemzéshez, fumonizin becslése esetén

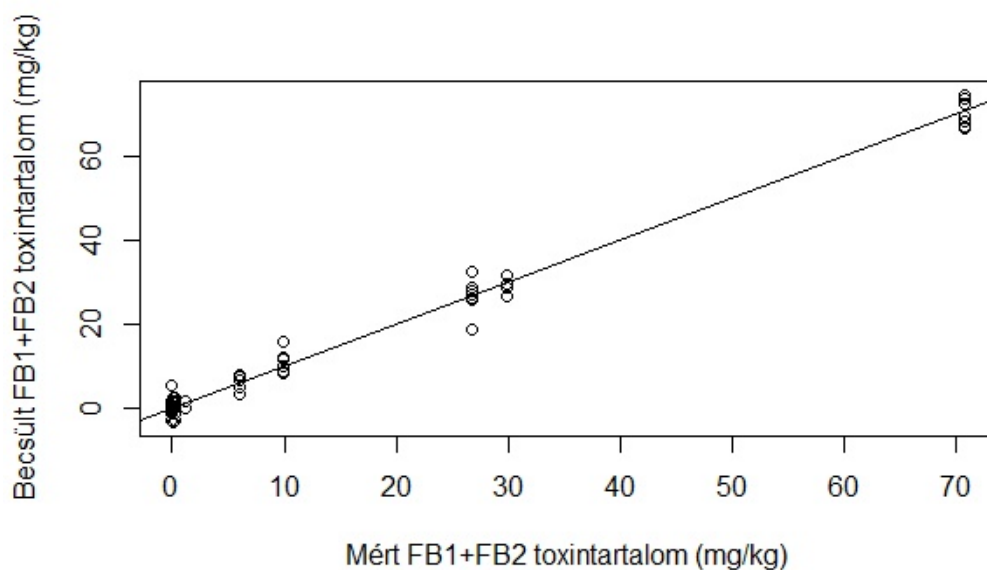
Csoport	Tanuló minta (db)	Teszt minta (db)
Természetesen fertőzött (NI)	24	8
<i>Fusarium verticilloides</i> (V)	36	12

15. táblázat Fumonizintartalom PLSR becslése esetén az RMSEV értéke

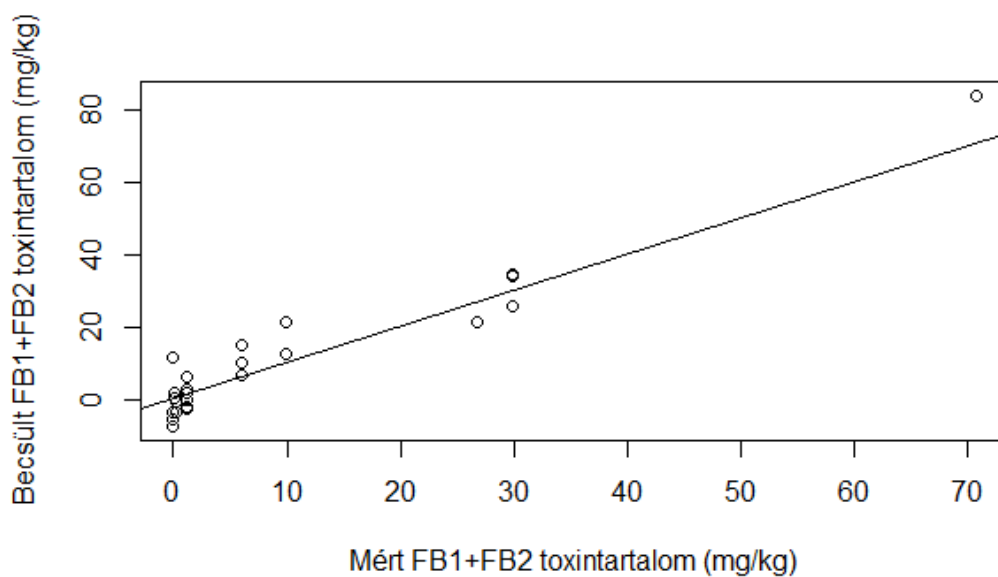
Látens változók száma	Ismétlés	RMSEV (átlag) (mg)
5	5	14,88
10	10	13,32
15	10	13,26
20	5	18,95

A legjobb eredményt 15 látens változó esetén kaptam, ahol a RMSEV értéke 13,26 mg volt, az RMSEC értéke pedig 1 mg alatti. A kapott értékek relatíve jól illeszkedtek a modell szerint, bár a

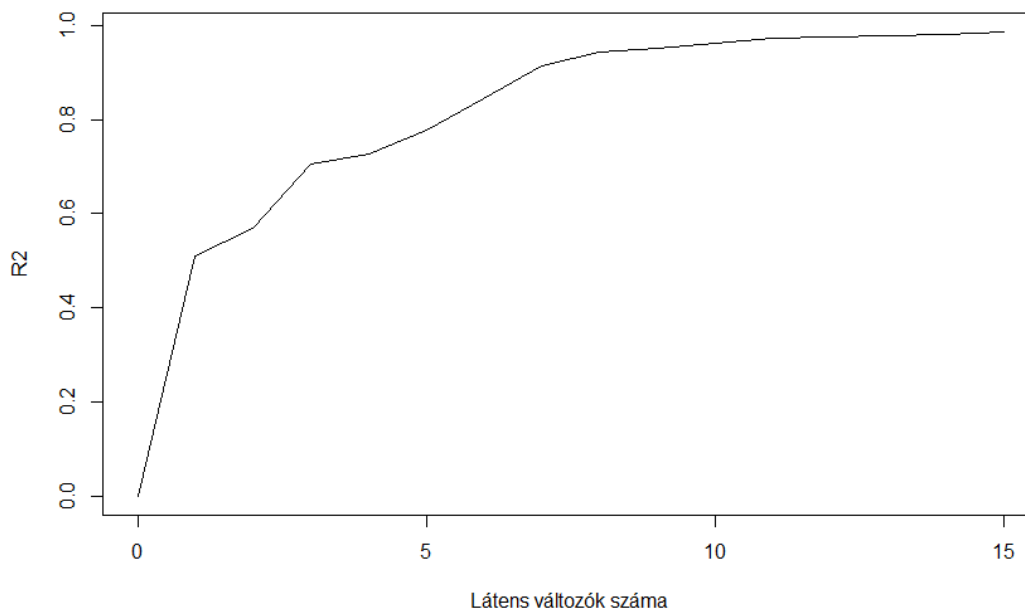
minták száma viszonylag alacsony volt (59. ábra, 60. ábra). A determinációs együttható értéke 15 látens változónál 10 ismétlés átlaga alapján 0,986 volt (61. ábra).



59. ábra: Becslési ábra fumonizin (FB₁+FB₂) toxintartalom becslésére egy kalibrációs minta-összeállítás esetén



60. ábra: Becslési ábra fumonizin (FB₁+FB₂) toxintartalom becslésére egy validációs minta-összeállítás esetén



61. ábra: Fumonizin (FB₁+FB₂) toxintartalom becslésére vonatkozó PLSR regresszió determinációs (R²) együttható értékei egy kalibrációs minta-összeállítás esetén

Az Európai Bizottság 2006/576/EK ajánlása „*A deoxinivalenol, a zearalenon, az ochratoxin-A, a T-2, a HT-2 és a fumonizinek állati takarmányozásra szánt termékekben való előfordulásáról*” szerint a kukoricafélék és kukoricakészítményekre, mint takarmány-alapanyagokra a fumonizin B₁+B₂ toxin tartalomra vonatkozó irányérték 60 mg/kg (M6 melléklet). Ez alapján, illetve az elért 13 mg/kg négyzetes hiba érték alapján várhatóan, alkalmazott PLSR modellt továbbfejlesztve lehetőség nyílna a takarmányok esetén gyakorlati szempontból is értékes eredmény elérésére.

Jelen eredmények szerint a kukorica termékek mikotoxin-tartalmának vizsgálata megvalósítható hiperspektrális látórendszer alkalmazásával, viszont az elért pontosság még viszonylag alacsony, így alkalmazásának fejlesztése a továbbiakban elsősorban takarmányok esetén lehet célszerű. Másrészt, a módszer nem teszi lehetővé a mikotoxinok közvetlen kimutatását, hanem a mintában az anyagcsere okozta kémiai változásokról ad tájékoztatást (HE és SUN, 2015).

A módszerrel a kukoricatermékek nagyobb mennyiségének mérése is megvalósítható lehet, illetve megfelelő kalibráció mellett a laboratóriumi analitikai méréseket kiegészítheti, így hozzájárulva a takarmányok élelmiszerbiztonságának fejlesztéséhez.

4.5.2 Csoportok osztályozása szennyezettségi szint, fuzárium fajok és kukorica hibrid szerint

Az osztályozás során a minták 75%-ával végeztük a modell kalibrálását és a minták 25%-án a validálást.

Csoportok osztályozása szennyezettségi szint szerint

A szintek szerinti osztályozás esetén minden csoport adata felhasználásra került. A minták felosztását 16. táblázat mutatja. A mintákat összesített mikotoxin-szennyezettség (DON és fumonizinek) alapján három kategóriába soroltuk:

- magasan szennyezett: 30 mg/kg fölött (56 minta)
- közepesen szennyezett: 15 mg/kg és 30 mg/kg között (32 minta)
- alacsonyan szennyezett: 15 mg/kg alatt (88 minta)

16. táblázat: A fuzáriummal fertőzött kukorica minták felosztása szennyezettségi szint szerinti osztályozás esetén

Csoport	Tanuló minta (db)	Teszt minta (db)
Természetesen fertőzött (NI)	24	8
<i>Fusarium culmorum</i> (C)	36	12
<i>Fusarium graminearum</i> (G)	36	12
<i>Fusarium verticilloides</i> (V)	36	12

A modellépítést és validálást különböző számú látens változó mellett 10 alkalommal, gomba csoportonként adott arányú, véletlenszerűen kiválasztott mintákkal elvégeztem (16. táblázat).

A validáció során a legjobb eredményt 15 látens változónál kaptam (17. táblázat, 18. táblázat), ahol a helyesen osztályozott minták arányainak átlaga a 10 ismétlés alapján elérte a 98,8%-ot.

A helyesen osztályozott minták aránya szerint a legalacsonyabb érték a közepesen szennyezett csoportra vonatkozóan adódott, ezt követi a magasan, majd az alacsonyan szennyezett csoport (18. táblázat).

17. táblázat: Fertőzöttségi szint szerinti PLS-DA osztályozás validálási eredményeinek átlaga 10 ismétlés után

Látens változók száma	Helyesen osztályozott minták arányának átlaga (%)
10	90,6
15	98,8
20	96,9

18. táblázat: Szennyezettségi szint szerinti PLS-DA osztályozás validációjának tévesztési mátrixa 15 látens változó mellett 10 ismétlés átlaga alapján

prediktált osztály	valós osztály		
	Magas	Közepes	Alacsony
Magas	99%	1%	0%
Közepes	0%	98%	0%
Alacsony	1%	1%	100%

Csoportok osztályozása fuzárium fajok szerint

A különböző fuzárium fajok osztályozása esetén a közepesen és magasan szennyezett csoportokat vizsgáltam az ismert, mesterségesen befertőzött csoportokon belül. Tehát mind a *Fusarium culmorum* (C), *Fusarium graminearum* (G) és *Fusarium verticilloides* (V) csoportból 24 minta képezte a kalibrációs minták csoportját és 8-8 mintán, összesen 24 mintán végeztem a validálást.

A Fuzárium törzsek osztályozása PLS-DA módszerrel eredményes volt. A 20. táblázat mutatja a Fuzárium törzsek PLS-DA osztályozásának validálására vonatkozó tévesztési mátrixot 25 látens változó mellett, 10 ismétlés alapján. 25 látens változó mellett a helyesen osztályozott minták aránya a validálás során meghaladta a 99%-ot (19. táblázat), csak a *F. graminearum* csoportban volt téves osztályozás (20. táblázat).

19. táblázat: Fuzárium fertőzés szerinti PLS-DA osztályozás validálási eredményeinek átlaga 10 ismétlés után

Látens változók száma	Helyesen osztályozott minták arányának átlaga (%)
10	90,5
15	97,1
20	97,5
25	99,6
30	99,2
35	94,8

20. táblázat: Fuzárium fertőzés szerinti PLS-DA osztályozás validációjának tévesztési mátrixa 25 látens változó mellett 10 ismétlés átlaga alapján

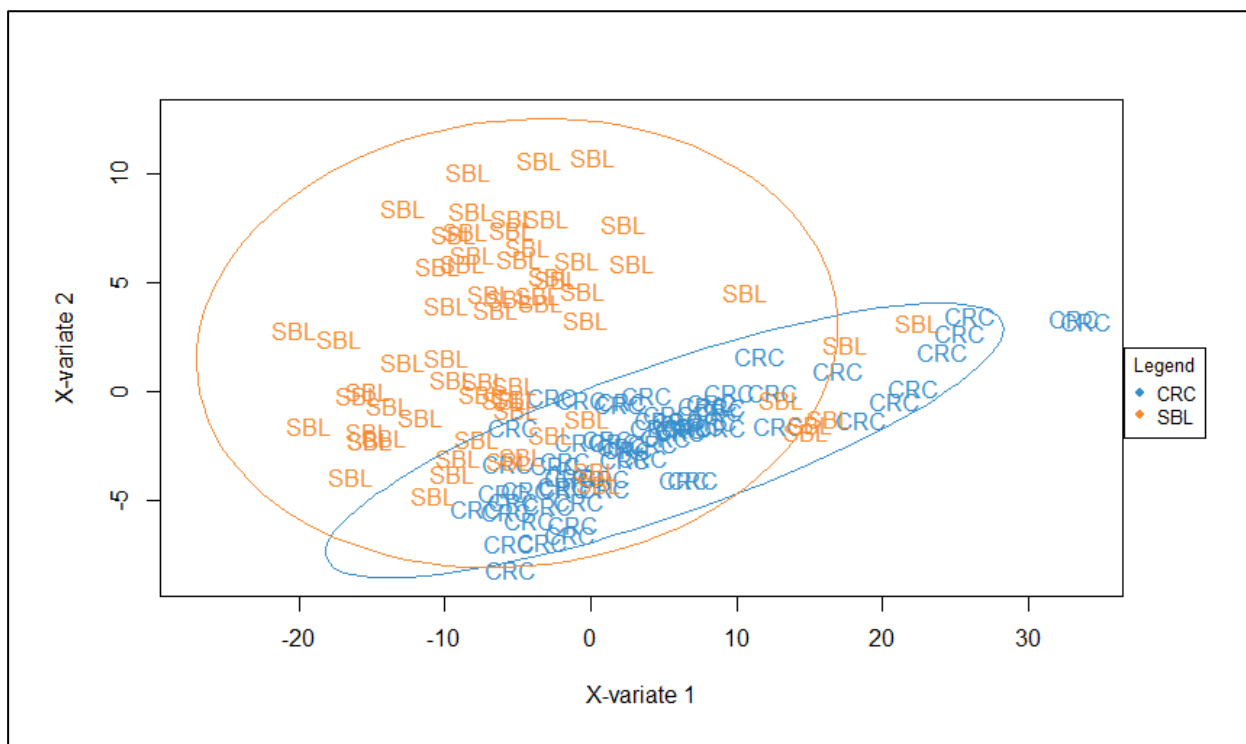
prediktált osztály	valós osztály		
	<i>F. culmorum</i> (C)	<i>F. graminearum</i> (G)	<i>F. verticilloides</i> (V)
<i>F. culmorum</i> (C)	100%	1%	0%
<i>F. graminearum</i> (G)	0%	99%	0%
<i>F. verticilloides</i> (V)	0%	0%	100%

Csoportok osztályozása kukorica hibrid szerint

A hibridek szerinti PLS-DA osztályozás szintén eredményes volt, 10 látens változó mellett (62. ábra), a hatékonyságot a validálás 10 ismétlés átlaga alapján készült tévesztési mátrixa mutatja (21. táblázat).

21. táblázat: Kukorica hibrid szerinti PLS-DA osztályozás validációjának tévesztési mátrixa 10 látens változó mellett 10 ismétlés átlaga alapján

prediktált osztály	valós osztály	
	CRC	SBL
CRC	98%	0%
SBL	2%	100%



62. ábra: Fuzáriummal fertőzött kukorica minták hibrid szerinti PLS-DA osztályozásának eredménye (narancs: Staatbau Linz (SBL), kék: Gabonakutató Szeged (CRC))

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Megállapítottam, hogy a hiperspektrális módszerrel kapott spektrumok alapján, a normált spektrumok 1454 nm-en és 1200 nm-en mért intenzitásértékeit felhasználva érintésmentesen kimutatható kétspórás csiperkén a *Cladobotryum dendroides* fertőzés megjelenése már korai szakaszban, a tünetek megjelenése előtt és elkülöníthető a mechanikai sérüléstől. Az általam azonosított szignifikáns hullámhosszak lehetővé teszik a módszer alkalmazását ipari körülmények között, multispektrális rendszer alkalmazásával.
2. A *Cladobotryum dendroides* fertőzés jelenlétét eredményesen mutattam ki különböző antifungális szerekkel (natamycin, Prokloráz-Mn, *Bacillus subtilis* kivonat) kezelt kétspórás csiperkén hiperspektrális módszerrel 11 napon át gyűjtött spektrumok adatai alapján SVM módszerrel (helyesen osztályozott minták aránya MCCV alapján, 20% teszt minta, kezeletlen csoport: 98,5%, natamycin: 78%, Prokloráz-Mn: 88%, *Bacillus subtilis*: 91%).
3. Hiperspektrális képkalkotással kapott spektrumokon végzett főkomponens analízis eredményei alapján végzett változó szelekcióval a 980 nm, 994 nm, 1014 nm, 1397 nm és 1459 nm hullámhosszakon mért intenzitásértékek alapján sikeresen különítettem el ép, *Cladobotryum dendroides* és a *Trichoderma aggressivum* fertőzött kétspórás csiperke mintákat SVM módszerrel (helyesen osztályozott minták aránya CV alapján - kontrol: 74%, *Cladobotryum*: 76%, *Trichoderma*: 79%) és LDA módszerrel (helyesen osztályozott minták aránya CV alapján - kontrol: 96%, *Cladobotryum*: 78%, *Trichoderma*: 85%).
4. Megállapítottam, hogy görögdinnye vágási felületén az oldható szárazanyag-tartalom eredményesen becsülhető hiperspektrális képkalkotás adatai alapján kapott átlagspektrumok SNV transzformált adatain végzett PLSR módszerrel (LV=10, $R^2=0,74$, RMSEV=0,8).
5. Fumonizinek (FB₁ és FB₂) és deoxinivalenol toxin összesített mennyiségét eredményesen becsültem átlagspektrumok SNV transzformált adatain végzett PLS regressziós módszerrel a *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum* és *Fusarium verticilloides* törzsekkel mesterségesen fertőzött, illetve mesterségesen nem fertőzött darált kukorica minták esetén, hiperspektrális látórendszer alkalmazásával (RMSEC= 4,22 mg/kg, RMSEV=13,48mg/kg, $R^2=0,974$)
6. A deoxinivalenol toxin mennyiségét eredményesen becsültem átlagspektrumok SNV transzformált adatain végzett PLS regressziós módszerrel a *Fusarium culmorum* és a *Fusarium graminearum* törzsekkel mesterségesen fertőzött darált kukoricaminták esetén, hiperspektrális látórendszer alkalmazásával (RMSEC=2,5mg/kg, RMSEV= 11,95mg/kg, $R^2=0,985$)
7. Fumonizinek (FB₁ és FB₂) mennyiségét eredményesen becsültem átlagspektrumok SNV transzformált adatain végzett PLS regressziós módszerrel a mesterségesen nem-fertőzött és a *Fusarium verticilloides* törzsszel mesterségesen fertőzött darált kukoricaminták esetén, hiperspektrális látórendszer alkalmazásával (RMSEC= 0,11mg/kg, RMSEV= 13,26mg/kg, $R^2=0,986$)
8. Hiperspektrális képek átlagspektrumainak SNV transzformált adatain végzett PLS-DA módszerrel eredményesen soroltam szennyezettségi szint szerinti kategóriákba (DON és fumonizin B₁ és B₂ összege 15 mg alatt: alacsony szennyezett, 15 mg/kg – 30 mg/kg

között: közepesen szennyezett, 30mg/kg fölött: magasan szennyezett) a *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum* és *Fusarium verticilloides* törzsekkel mesterségesen fertőzött, illetve mesterségesen nem fertőzött darált kukorica mintákat (a validáció során helyesen osztályozott minták aránya 98,8%)

9. Hiperspektrális képek átlagspektrumainak SNV transzformált adatain végzett PLS-DA módszerrel eredményesen különítettem el *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum* és *Fusarium verticilloides* törzsekkel mesterségesen fertőzött darált kukorica mintákat (a validáció során helyesen osztályozott minták aránya 99,6%), valamint a fuzárium fertőzésre nézve érzékenyebb (Gabonakutató, Szeged) és rezisztensebb (Staatbau Linz), a *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum* és *Fusarium verticilloides* törzsekkel mesterségesen fertőzött, illetve mesterségesen nem fertőzött darált kukorica hibrideket (a validáció során helyesen osztályozott minták aránya 99,1%).

6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A hiperspektrális látórendszer élelmiszeripari alkalmazása egy dinamikusan fejlődő terület, ezen belül a különböző mikrobiológiai eredetű minőségromlás kimutatása még kutatási fázisban jár. Munkámmal ennek az iránynak a fejlődését igyekeztem elősegíteni, illetve a termények minőségellenőrzésére vonatkozó alkalmazhatóságát vizsgálni.

Bár a hiperspektrális látórendszer rendkívül széles körűen, alkalmazható a minőség-ellenőrzés területén, a telepítése körülményes és üzemeltetése felkészültséget kíván. Ahogy a szakirodalomban is találunk rá példát (LORENTE ET AL., 2011; ESQUERRE, GOWEN, DOWNEY, O'DONNELL, 2012), munkám során eredményesen alkalmaztam néhány kiválasztott hullámhosszon mért intenzitásérték adatai alapján épített modellt a különböző penész fertőzések detektálására. A szakirodalmi források és az ipari alkalmazhatóság szempontjait figyelembe véve a gyakorlat számára ideálisabb multispektrális rendszer kidolgozását javaslom. Egy ilyen rendszer képes a minőségi szempontból nem megfelelő darabokat kiválogatni, sőt a fertőzést detektálva annak elterjedését a fertőző darabok eltávolításával megelőzni. A rendszer kialakítása során további minőségjellemzők is vizsgálhatók, mint a nedvességtartalom, valamint a leggyakoribb gomba patogén baktériumok kimutatását is meg lehetne valósítani, mint a *Pseudomonas tolaasii*, akár képfeldolgozással (VÍZHÁNYÓ és FELFÖLDI, 2000). A penészek megjelenéséből fakadó minőségromlás számos termék esetén komoly gazdasági probléma, így hasonló módon egyéb termények minőségének monitorozása is olyan cél, melynek rövid időn belül közvetlen haszna lehet, például citrusfélék esetén. A speciális szenzorok technikai fejlődése, valamint árának csökkenése és az elérhető számítástechnikai eszközök számítási kapacitásának növekedése a közeljövőben várhatóan a fejlett monitoring rendszerek gyors elterjedését eredményezi az élelmiszeripar egyre több szegmensében.

Görögdinnye minták esetén a pH-érték és oldható szárazanyagtartalom becslésére hatékonyabb modell építése lehet elérhető az adatok variabilitásának növelésével. Ez megvalósítható nagyobb mintaelemszám alkalmazásával valamint különböző érettségi állapotú termények mérésével, hasonló módon, ahogy SUGIYAMA, TSUTA és SUN, (2010) végezte cukortartalom becslését sárgadinnye mintákon.

A fuzáriummal fertőzött kukoricaminták vizsgálata alapján arra a következtetésre jutottam, hogy noha a mikroszkopikus gombák jelenléte és anyagcseretevékenysége összetételbeli változást okoz, amely spektrális módszerekkel vizsgálható, a mikotoxinok közvetlen, különösen specifikus kimutatására nem volt alkalmas a munkám során alkalmazott technika.

Mivel a mikotoxinok rendkívül súlyos élelmiszerbiztonsági kockázatot jelentenek, a specifikusabb módszerek alkalmazását tartom célszerűnek ebben a vonatkozásban. A módszer alkalmazásával viszont, az általánosan alkalmazott analitikai módszerek kiegészítéseként, a takarmányok gyakorlatilag korlátlan mennyiségben ellenőrizhetőek lehetnek, ami nagymértékben hozzájárulhat az élelmiszerbiztonság fejlesztéséhez ezen a területen. A módszer ilyen irányú fejlesztése nagy lehetőségeket rejt, így a kutatás kiterjesztését javaslom további, a takarmányban potenciálisan megjelenő mikromicetákra, valamint további mikotoxinokra vonatkozóan. Kukorica esetén egy következő vizsgálat során pontosabb, robosztusabb és átfogóbb modell építését tenné lehetővé, ha nagyobb mintaelemszámú mérést végeznénk, kiegészítenénk a referenciamérések körét a további, kukoricában előforduló, törvényi szabályozás alatt álló mikotoxinokkal (zearalenon), illetve a befertőzést követően különböző időpontokban végeznénk a mintavételt. A jelen vizsgálat esetén a minták többsége messze az emberi fogyasztásra alkalmas élelmiszerek megengedett mikotoxin-tartalma feletti szennyezettségű volt, így nagyobb számú alacsonyabb mikotoxin-koncentrációjú minta vizsgálatával várhatóan jobb modell építhető erre a tartományra vonatkozóan.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkám során a hiperspektrális képalkotás alkalmazhatóságát vizsgáltam termények minőségi paramétereinek meghatározására. Az optikai módszerek alkalmazása az élelmiszeriparban kiemelkedő jelentőségű terület, különös tekintettel a hiperspektrális képalkotás lehetőségeire. Ezek a módszerek számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos érzékszervi technikákkal vagy analitikai mérésekkel szemben és sokféle célra alkalmazhatók. Ebben a munkában az alkalmazás alábbi három meghatározó témáját vizsgáltam:

1. Az érzékeny élelmiszermátrixok romlása,
2. A minőségi paraméterek eloszlása,
3. Mikotoxint termelő mikroszkopikus gombák jelenléte.

A csiperkén végzett vizsgálatok a két közismert penészfertőzés megjelenéséről igen sikeresek voltak. Ezekben a kísérletekben a mintákat mesterségesen megfertőztük a pókhálós penész és zöld penész elsődleges okozóival (*Cladobotryum dendroides*, *Trichoderma aggressivum*). A pókhálós penész vizsgálata kimutatta, hogy a normalizált hiperspektrális adatokkal, illetve SVM módszerrel a szövet tüneteinek kialakulása kimutatható és megkülönböztethető a mechanikai sérülés hatásaitól. Méréseket végeztem a különféle antifungális anyagokkal kezelt mintákon, az eredmények azt mutatták, hogy a kezeletlen mintákat, a biológiai eredetű anyagokkal kezelt mintákat és a vegyi anyagokkal kezelt mintákat el lehetett különíteni LDA és SVM módszerrel a kezelt HSI adatok felhasználásával. További vizsgálataim megmutatták, hogy a fent említett gomba eredetű fertőzések kialakulása LDA és SVM módszer segítségével kimutatható, a PCA eredményei alapján kiválasztott hullámhosszakon kapott intenzitásértékek felhasználásával.

A minőségi paraméterek eloszlását a görögdinnye vágási felületén SSC és pH-értékek szempontjából vizsgáltam, emellett a kiválasztott ROI-k távolságát a minták középpontjától is PLSR segítségével becsültem. A módszer alkalmazása sikeres volt az SSC és a sugár becslésére, azonban a pH-értékre nem.

A különféle *Fusarium* fajokkal mesterségesen fertőzött kukorica minták vizsgálatát egyrészt a termelt mikotoxin-koncentráció becslésére, másrészt a fajok, a toxinszintek és a hibridek megkülönböztetésére vonatkozóan végeztem el. A mintákat hiperspektrális mérésekkel és PLS-DA módszerrel hatékonyan különítettem el, kukorica hibrid, összesített toxinszint és *Fusarium* fajok alapján. Az FB1 és FB2, valamint a DON toxin és az összesített toxintartalom becslése HSI technikával és PLSR regresszióval megvalósítható, azonban a hiba nagysága szükségessé teszi a mérések és a kalibrálás kiterjesztését, a módszer esetleges későbbi terepi felhasználáshoz takarmány minőség-ellenőrzésére.

SUMMARY

In my work, I investigated the application of hyperspectral imaging for the testing of quality parameters of crops. The application of optical methods in the food sector is an emerging field, especially regarding the implementation of hyperspectral imaging. These methods provide several advantages over traditional sensory techniques or analytical measurements and can be applied for numerous purposes. In this work the following three main topics of the application were studied:

1. Deterioration of sensitive food matrices
2. Distribution of quality parameters
3. Presence of mycotoxin-producing micromycetes.

The study of the growth of two well-known fungal pathogens on white button mushroom was quite successful. In these experiments, samples were artificially infected with the main causal agents of cobweb disease: *Cladobotryum dendroides* and green mould: *Trichoderma aggressivum*. The study of cobweb disease showed that the development of the symptoms on the tissue can be detected and differentiated from the effects of mechanical damage with the normalized hyperspectral data and SVM method. Samples treated with different antifungal materials were measured, the results showed that untreated samples, samples treated with materials of biological origin and samples treated with chemicals could be separated using HSI data processed with LDA and SVM. Further studies showed that the development of the abovementioned fungal diseases can be detected via LDA and SVM, using the intensity values at few wavebands selected according to (previous) PCA results.

The distribution of quality parameters on the cross-section of watermelon was investigated by means of SSC and pH value, additionally, the distance of the given ROI from the central point of the samples was predicted using PLSR. The application of the method was successful for the prediction of SSC and radius but not for pH value.

The studies of maize samples artificially infected with different *Fusarium* species was carried out on one hand, for the prediction of the produced mycotoxins concentrations, on the other hand, to discriminate the species, toxin levels and hybrids. Samples were effectively separated with hyperspectral measurements and PLS-DA method according to maize hybrid, cumulated toxin levels and *Fusarium* species. The prediction of FB₁ and FB₂ as well as DON toxin, and the cumulated toxin content was possible using HSI technique and PLSR regression, however, the magnitude of the error necessitate extended measurements and calibration for potential field use in the future, in the quality control of the feed.

8. MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

- AGUIRRE, L., FRIAS, J. M., BARRY-RYAN, C., és GROGAN, H. (2008). Assessing the effect of product variability on the management of the quality of mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Postharvest Biology and Technology*, 49(2), 247–254. p.
- ALANDER, J. T., BOCHKO, V., MARTINKAUPPI, B., SARANWONG, S., és MANTERE, T. (2013). A Review of Optical Nondestructive Visual and Near-Infrared Methods for Food Quality and Safety. *International Journal of Spectroscopy*, 2013, 1–36. p.
- ALISHAHI, A., FARAHMAND, H., PRIETO, N., és COZZOLINO, D. (2010). Identification of transgenic foods using NIR spectroscopy: A review. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 75(1), 1–7. p.
- AMODIO, M. L., CAPOTORTO, I., CHAUDHRY, M. M. A., és COLELLI, G. (2017). The use of hyperspectral imaging to predict the distribution of internal constituents and to classify edible fennel heads based on the harvest time. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 1–10. p.
- ANDRÉS, S., SILVA, A., SOARES-PEREIRA, A. L., MARTINS, C., BRUNO-SOARES, A. M., és MURRAY, I. (2008). The use of visible and near infrared reflectance spectroscopy to predict beef *M. longissimus thoracis et lumborum* quality attributes. *Meat Science*, 78(3), 217–224. p.
- ARIANA, D. P., és LU, R. (2010). Evaluation of internal defect and surface color of whole pickles using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 96(4), 583–590. p.
- BARBEDO, JAYME G.A., TIBOLA, C. S., és FERNANDES, J. M. C. (2015). Detecting *Fusarium* head blight in wheat kernels using hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 131, 65–76. p.
- BARBEDO, JAYME GARCIA ARNAL, TIBOLA, C. S., és LIMA, M. I. P. (2017). Deoxynivalenol screening in wheat kernels using hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 155, 24–32. p.
- BARBIN, D. F., ELMASRY, G., SUN, D.-W., és ALLEN, P. (2012). Predicting quality and sensory attributes of pork using near-infrared hyperspectral imaging. *Analytica Chimica*

Acta, 719, 30–42. p.

- BARKER, M., és RAYENS, W. (2003). Partial least squares for discrimination. *Journal of Chemometrics*, 17(3), 166–173. p.
- BARNES, R. J., DHANOA, M. S., és LISTER, S. J. (1989). Standard Normal Variate Transformation and De-Trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra. *Applied Spectroscopy*, 43(5), 772–777. p.
- BAURIEGEL, E., GIEBEL, A., GEYER, M., SCHMIDT, U., és HERPPICH, W. B. (2011). Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2), 304–312. p.
- BÁZÁR, G. (2011). Közeli infravörös spektroszkópia alkalmazási lehetőségei sertéshús és húskészítmények, valamint sertézsír minősítésében. (Doktori disszertáció, Kaposvári Egyetem)
- BLAKEY, R. J., BOWER, J. P., és BERTLING, I. (2009). Influence of water and ABA supply on the ripening pattern of avocado (*Persea americana* Mill.) fruit and the prediction of water content using Near Infrared Spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 53(1–2), 72–76. p.
- BLASCO, J., ALEIXOS, N., GÓMEZ, J., és MOLTÓ, E. (2007). Citrus sorting by identification of the most common defects using multispectral computer vision. *Journal of Food Engineering*, 83(3), 384–393. p.
- BROSNAN, T., és SUN, D.-W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 3–16. p.
- CARLINI, P., MASSANTINI, R., és MENCARELLI, F. (2000). Vis-NIR Measurement of Soluble Solids in Cherry and Apricot by PLS Regression and Wavelength Selection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(11), 5236–5242. p.
- CHAUDHRY, M. M. A., AMODIO, M. L., BABELLAHI, F., DE CHIARA, M. L. V., AMIGO RUBIO, J. M., és COLELLI, G. (2018). Hyperspectral imaging and multivariate accelerated shelf life testing (MASLT) approach for determining shelf life of rocket leaves. *Journal of Food Engineering*, 238(2), 122–133. p.
- CHEN, S., XIONG, J., GUO, W., BU, R., ZHENG, Z., CHEN, Y., LIN, R. (2019). Colored rice quality inspection system using machine vision. *Journal of Cereal Science*, 88, 87–95. p.

- DALE, L. M., THEWIS, A., BOUDRY, C., ROTAR, I., DARDENNE, P., BAETEN, V., és PIERNA, J. A. F. (2013). Hyperspectral Imaging Applications in Agriculture and Agro-Food Product Quality and Safety Control: A Review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 48(2), 142–159. p.
- DAVIES, E. R. (2000). *Image Processing for the Food Industry* (Vol. 37). World Scientific. [S.l.] 312 p.
- DE JÓDAR LÁZARO, M., LUNA, A. M., LUCAS PASCUAL, A., MARTÍNEZ, J. M. M., CANALES, A. R., MADUEÑO LUNA, J. M., SÁNCHEZ, M. B. (2020). Deep learning in olive pitting machines by computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105304.
- DIEGO, C. Z., és PARDO-GIMÉNEZ, A. (Szerk.). (2017). *Edible and Medicinal Mushrooms*. Chichester, UK: Wiley, 592 p.
- DOS SANTOS, C. A. T., LOPO, M., PÁSCOA, R. N. M. J., és LOPES, J. A. (2013). A Review on the Applications of Portable Near-Infrared Spectrometers in the Agro-Food Industry. *Applied Spectroscopy*, 67(11), 1215–1233. p.
- DU, C.-J., és SUN, D.-W. (2004). Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science és Technology*, 15(5), 230–249. p.
- ELMASRY, G., SUN, D.-W., és ALLEN, P. (2012). Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef. *Journal of Food Engineering*, 110(1), 127–140. p.
- ELMASRY, G., WANG, N., ELSAYED, A., és NGADI, M. (2007). Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 98–107. p.
- ESQUERRE, C. , GOWEN, A.A., DOWNEY, G., O'DONNELL, C. P. (2012). Wavelength selection for development of a near infrared imaging system for early detection of bruise damage in mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(5), 537–546. p.
- FENG, Y.-Z., ELMASRY, G., SUN, D.-W., SCANNELL, A. G. M., WALSH, D., és MORCY, N. (2013). Near-infrared hyperspectral imaging and partial least squares regression for rapid

- and reagentless determination of Enterobacteriaceae on chicken fillets. *Food Chemistry*, 138(2–3), 1829–1836. p.
- FENG, Y.-Z., és SUN, D.-W. (2013a). Determination of total viable count (TVC) in chicken breast fillets by near-infrared hyperspectral imaging and spectroscopic transforms. *Talanta*, 105, 244–249. p.
- FENG, Y.-Z., és SUN, D.-W. (2013b). Near-infrared hyperspectral imaging in tandem with partial least squares regression and genetic algorithm for non-destructive determination and visualization of *Pseudomonas* loads in chicken fillets. *Talanta*, 109, 74–83. p.
- FIRTHA, F. (2011). Argus szoftver.
- FIRTHA, F., és ÉDER, G. (2012). CuBrowser Matlab algorithm.
- FLETCHER, J. T., és GAZE, R. H. (2008). *Mushroom pest and disease control: A color handbook*. London: Manson Publishing, 2008. 192 p.
- FU, X., és YING, Y. (2016). Food Safety Evaluation Based on Near Infrared Spectroscopy and Imaging: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(11), 1913–1924. p.
- GARRIDO-NOVELL, C., PÉREZ-MARIN, D., AMIGO, J. M., FERNÁNDEZ-NOVALES, J., GUERRERO, J. E., és GARRIDO-VARO, A. (2012). Grading and color evolution of apples using RGB and hyperspectral imaging vision cameras. *Journal of Food Engineering*, 113(2), 281–288. p.
- GASTON, E. (2010). Visible and Hyperspectral Imaging Systems for the Detection and Discrimination of Mechanical and Microbiological Damage of Mushrooms. (Doktori disszertáció, Dublin Institute of Technology).
- GASTON, E., FRIAS, J. M., CULLEN, P., és DONNELL, C. O. (2011). Hyperspectral Imaging for the Detection of Microbial Spoilage of Mushrooms. Athens. (Prezentáció) MCF1004 at the 11th International Conference of Engineering and Food. Athens, Greece, 2011. május <https://arrow.dit.ie/schfsehcon/2/>
Lekérdezés időpontja: 2013.11.26.
- GASTON, E., FRÍAS, J. M., CULLEN, P. J., O'DONNELL, C. P., és GOWEN, A. A. (2010a). Prediction of polyphenol oxidase activity using visible near-infrared hyperspectral imaging on mushroom (*Agaricus bisporus*) caps. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(10), 6226–6233. p.

- GASTON, E., FRÍAS, J. M., CULLEN, P. J., O'DONNELL, C. P., és GOWEN, A. A. (2010b). Visible-Near Infrared Hyperspectral Imaging for the Identification and Discrimination of Brown Blotch Disease on Mushroom (*Agaricus Bisporus*) Caps. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18(5), 341–353. p.
- GEÖSEL, A., SIPOS, L., STEFANOVITS-BÁNYAI, É., KÓKAI, Z., és GYÖRFI, J. (2011). Antioxidant, polyphenol and sensory analysis of *Agaricus bisporus* and *Agaricus subrufescens* cultivars. *Acta Alimentaria*, 40, 33–40. p.
- GJERDE, B., és MARTENS, H. (1987). Predicting carcass composition of rainbow trout by near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 104(1–5), 137–148. p.
- GÓMEZ-SANCHIS, J., BLASCO, J., SORIA-OLIVAS, E., LORENTE, D., ESCANDELL-MONTERO, P., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J. M., ALEIXOS, N. (2013). Hyperspectral LCTF-based system for classification of decay in mandarins caused by *Penicillium digitatum* and *Penicillium italicum* using the most relevant bands and non-linear classifiers. *Postharvest Biology and Technology*, 82, 76–86. p.
- GOWEN, A. A., O'DONNELL, C. P., TAGHIZADEH, M., GASTON, E., O'GORMAN, A., CULLEN, P. J., DOWNEY, G. (2008). Hyperspectral imaging for the investigation of quality deterioration in sliced mushrooms (*Agaricus bisporus*) during storage. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2(3), 133–143. p.
- GOWEN, A., O'DONNELL, C., CULLEN, P., DOWNEY, G., és FRIAS, J. (2007). Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science és Technology*, 18(12), 590–598. p.
- GOWEN, A. A., FENG, Y., GASTON, E., és VALDRAMIDIS, V. (2015). Recent applications of hyperspectral imaging in microbiology. *Talanta*, 137, 43–54. p.
- GOWEN, A. A., TAGHIZADEH, M., és O'DONNELL, C. P. (2009). Identification of mushrooms subjected to freeze damage using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 93(1), 7–12. p.
- GRASSI, S., és ALAMPRESE, C. (2018). Advances in NIR spectroscopy applied to process analytical technology in food industries. *Current Opinion in Food Science*, 22, 17–21. p.
- GROGAN, H. M., és GAZE, R. H. (2000). Fungicide resistance among *Cladobotryum* spp. —

- causal agents of cobweb disease of the edible mushroom *Agaricus bisporus*. *Mycological Research*, 104(3), 357–364. p.
- GYÓRFI, J. (Szerk.). (2010). *Gombabiológia, gombatermesztés*. Budapest: Mezőgazda Kiadó. 350 p.
- HAGEN, N. (2012). Snapshot advantage: a review of the light collection improvement for parallel high-dimensional measurement systems. *Optical Engineering*, 51(11), 111702. p.
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., és ANDREAS, B. (1995). Flexible discriminant and mixture models. *Neural Networks and Statistics*, 1–23. (Szerk.: Kay J., Titterington D.). Oxford, UK: Oxford UP ,
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&sq=intitle:Flexible+Discriminant+and+Mixture+Models#0>
Lekérdezés időpontja: 2015.03.31.
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., és FRIEDMAN, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, [S.l.]. 745 p.
- HE, H.-J., és SUN, D.-W. (2015). Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products. *Trends in Food Science és Technology*, 46(1), 99–109. p.
- HERNÁNDEZ-HIERRO, J. M., ESQUERRE, C., VALVERDE, J., VILLACRECES, S., REILLY, K., GAFFNEY, M., DOWNEY, G. (2014). Preliminary study on the use of near infrared hyperspectral imaging for quantitation and localisation of total glucosinolates in freeze-dried broccoli. *Journal of Food Engineering*, 126, 107–112. p.
- HILDRUM, K. I., ISAKSSON, T., NAES, T., és TANDBERG, A. (Szerk.). (1992). *Near Infrared Spectroscopy Bridging the Gap between Data Analysis and NIR Applications*. Ellis Horwood Limited [S.l.]. 473 p.
- HUANG, H., LIU, L., és NGADI, M. O. (2014). Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety. *Sensors* (Basel, Switzerland), 14, 7248–7276. p.
- IVORRA, E., GIRÓN, J., SÁNCHEZ, A. J., VERDÚ, S., BARAT, J. M., és GRAU, R. (2013). Detection of expired vacuum-packed smoked salmon based on PLS-DA method using hyperspectral images. *Journal of Food Engineering*, 117(3), 342–349. p.
- J. LAMMERTYN, B. NICOLAÏ, K. OOMS, V. DE SMEDT, és J. DE BAERDEMAEKER.

- (1998). Non-Destructive Measurement of Acidity, Soluble Solids, And Firmness of Jonagold Apples Using Nir-Spectroscopy. *Transactions of the ASAE*, 41(4), 1089–1094. p.
- JACKMAN, P., és SUN, D.-W. (2013). Recent advances in image processing using image texture features for food quality assessment. *Trends in Food Science és Technology*, 29(1), 35–43. p.
- JAKUCS, E., és VAJNA, L. (Szerk.). (2003). Mikológia. Agroinform, [S.l.]. 478 p.
- JIE, D., XIE, L., RAO, X., és YING, Y. (2014). Using visible and near infrared diffuse transmittance technique to predict soluble solids content of watermelon in an on-line detection system. *Postharvest Biology and Technology*, 90, 1–6. p.
- KAKANI, V., NGUYEN, V. H., KUMAR, B. P., KIM, H., és PASUPULETI, V. R. (2020). A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2(2), 100033. p.
- KALÁČ, P. (2009). Chemical composition and nutritional value of European species of wild growing mushrooms: A review. *Food Chemistry*, 113(1), 9–16.
- KAMRUZZAMAN, M., ELMASRY, G., SUN, D.-W., és ALLEN, P. (2012). Prediction of some quality attributes of lamb meat using near-infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis. *Analytica Chimica Acta*, 714, 57–67. p.
- KEMÉNY, S., és DEÁK, A. (2000). Kísérletek tervezése és értékelése. Budapest, Műszaki Könyvkiadó. 492 p.
- KOBAYASHI, K.-I., MATSUI, Y., MAEBUCHI, Y., TOYOTA, T., és NAKAUCHI, S. (2010). Near Infrared Spectroscopy and Hyperspectral Imaging for Prediction and Visualisation of Fat and Fatty Acid Content in Intact Raw Beef Cuts. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18(5), 301–315. p.
- KOKLU, M., és OZKAN, I. A. (2020). Multiclass classification of dry beans using computer vision and machine learning techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105507. p.
- KOVÁCS, G. (2015). *Statisztikai modellek értékelő eljárásai*. (Szakdolgozat, ELTE, Budapest). https://web.cs.elte.hu/blobs/diplomamunkak/bsc_matelem/2015/kovacs_gergely.pdf
- Lekérdezés időpontja: 2020.04.27.

- LEIVA-VALENZUELA, G. A., LU, R., és AGUILERA, J. M. (2013). Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging. *Journal of Food Engineering*, 115(1), 91–98. p.
- LIU, D., ZENG, X.-A., és SUN, D.-W. (2013). NIR Spectroscopy and Imaging Techniques for Evaluation of Fish Quality—A Review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 48(8), 609–628. p.
- LIU, Y., PU, H., és SUN, D.-W. (2017). Hyperspectral imaging technique for evaluating food quality and safety during various processes: A review of recent applications. *Trends in Food Science és Technology*, 69, 25–35. p.
- LORENTE, D., ALEIXOS, N., GÓMEZ-SANCHIS, J., CUBERO, S., GARCÍA-NAVARRETE, O. L., és BLASCO, J. (2011). Recent Advances and Applications of Hyperspectral Imaging for Fruit and Vegetable Quality Assessment. *Food and Bioprocess Technology*, 5(4), 1121–1142. p.
- LORENTE, D., BLASCO, J., SERRANO, A. J., SORIA-OLIVAS, E., ALEIXOS, N., és GÓMEZ-SANCHIS, J. (2012). Comparison of ROC Feature Selection Method for the Detection of Decay in Citrus Fruit Using Hyperspectral Images. *Food and Bioprocess Technology*, 6(12), 3613–3619. p.
- LORENTE, DELIA, ALEIXOS, N., GÓMEZ-SANCHIS, J., CUBERO, S., és BLASCO, J. (2011). Selection of Optimal Wavelength Features for Decay Detection in Citrus Fruit Using the ROC Curve and Neural Networks. *Food and Bioprocess Technology*, 6(2), 530–541. p.
- LÜ, Q., TANG, M. J., CAI, J. R., ZHAO, J. W., és VITTAYAPADUNG, S. (2011). Vis/NIR hyperspectral imaging for detection of hidden bruises on kiwifruits. *Czech Journal of Food Sciences*, 29(6), 595–602. p.
- LU, R., és PENG, Y. (2006). Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161–171. p.
- MAGWAZA, L. S., OPARA, U. L., NIEUWOUDT, H., CRONJE, P. J. R., SAEYS, W., és NICOLAÏ, B. (2012). NIR Spectroscopy Applications for Internal and External Quality Analysis of Citrus Fruit—A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 425–444. p.
- MALACHOVÁ, A., SULYOK, M., BELTRÁN, E., BERTHILLER, F., és KRŠKA, R. (2014). Optimization and validation of a quantitative liquid chromatography–tandem mass

- spectrometric method covering 295 bacterial and fungal metabolites including all regulated mycotoxins in four model food matrices. *Journal of Chromatography A*, 1362, 145–156. p.
- MATLAB. (2016). Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc. (szoftver)
- MCGLONE, V.A., ABE, H., és KAWANO, S. (1997). Kiwifruit Firmness by near Infrared Light Scattering. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 5(2), 83–89. p.
- MCGLONE, V.ANDREW, JORDAN, R. B., és MARTINSEN, P. J. (2002). Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for ‘Royal Gala’ apple. *Postharvest Biology and Technology*, 25(2), 135–144. p.
- MCMULLIN, D., MIZAIKOFF, B., és KRSKA, R. (2014). Advancements in IR spectroscopic approaches for the determination of fungal derived contaminations in food crops. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 407(3), 653–660. p.
- MEILGAARD, M. C., CARR, B. T., és CIVILLE, G. V. (1999). *Sensory Evaluation Techniques, Third Edition*. Taylor és Francis. [S.l.] 416 p.
- MICHELSBURG, M. (2014). *Materialklassifikation in optischen Inspektionssystemen mithilfe hyperspektraler Daten*. (Doktori disszertáció, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Németország) <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000043415>
Lekérdezés időpontja: 2019.07.06.
- MYCOBANK Fungal databases. (2014). <http://www.mycobank.org/>
Lekérdezés időpontja: 2014.07.01.
- NI, Y., MEI, M., és KOKOT, S. (2011). Analysis of complex, processed substances with the use of NIR spectroscopy and chemometrics: Classification and prediction of properties — The potato crisps example. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 105(2), 147–156. p.
- NICOLAÏ, B. M., BEULLENS, K., BOBELYN, E., PEIRS, A., SAEYS, W., THERON, K. I., és LAMMERTYN, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46(2), 99–118. p.
- OZAKI, Y., MCCLURE, W. F., és CHRISTY, A. A. (Szerk.). (2006). *Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology*. Hoboken, NJ, USA: Wiley. 480 p.

- PAZDERNIK, D. L., KILLAM, A. S., és ORF, J. H. (1997). Analysis of Amino and Fatty Acid Composition in Soybean Seed, Using Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *Agronomy Journal*, 89(4), 679–685. p.
- PEDRO, A. M. K., és FERREIRA, M. M. C. (2005). Nondestructive Determination of Solids and Carotenoids in Tomato Products by Near-Infrared Spectroscopy and Multivariate Calibration. *Analytical Chemistry*, 77(8), 2505–2511. p.
- POREP, J. U., KAMMERER, D. R., és CARLE, R. (2015). On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. *Trends in Food Science és Technology*, 46(2), 211–230. p.
- PRIETO-SIMÓN, B., NOGUER, T., és CAMPÀS, M. (2007). Emerging biotools for assessment of mycotoxins in the past decade. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26(7), 689–702. p.
- PRIETO, N., ANDRÉS, S., GIRÁLDEZ, F. J., MANTECÓN, A. R., és LAVÍN, P. (2006). Potential use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the estimation of chemical composition of oxen meat samples. *Meat Science*, 74(3), 487–496. p.
- QIAO, J., NGADI, M. O., WANG, N., GARIÉPY, C., és PRASHER, S. O. (2007). Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system. *Journal of Food Engineering*, 83(1), 10–16. p.
- RAJKUMAR, P., WANG, N., EIMASRY, G., RAGHAVAN, G. S. V., és GARIÉPY, Y. (2012). Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 194–200. p.
- ROHART, F., GAUTIER, B., SINGH, A., és LÊ CAO, K.-A. (2017). mixOmics: An R package for ‘omics feature selection and multiple data integration. *PLOS Computational Biology*, 13(11), e1005752. p.
- RONG, D., WANG, H., XIE, L., YING, Y., és ZHANG, Y. (2020). Impurity detection of juglans using deep learning and machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105764. p.
- RUIZ-ALTISENT, M., RUIZ-GARCIA, L., MOREDA, G. P., LU, R., HERNANDEZ-SANCHEZ, N., CORREA, E. C., GARCÍA-RAMOS, J. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 176–194. p.

- RUMPF, T., MAHLEIN, A.-K., STEINER, U., OERKE, E.-C., DEHNE, H.-W., és PLÜMER, L. (2010). Early detection and classification of plant diseases with Support Vector Machines based on hyperspectral reflectance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1), 91–99. p.
- SÁNCHEZ, M.-T., TORRES, I., DE LA HABA, M.-J., és PÉREZ-MARÍN, D. (2014). First steps to predicting pulp colour in whole melons using near-infrared reflectance spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 123, 12–18. p.
- SANKARAN, S., MISHRA, A., EHSANI, R., és DAVIS, C. (2010). A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(1), 1–13. p.
- SARANWONG, S., HAFF, R. P., THANAPASE, W., JANHIRAN, A., KASEMSUMRAN, S., és KAWANO, S. (2011). A Feasibility Study Using Simplified near Infrared Imaging to Detect Fruit Fly Larvae in Intact Fruit. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19(1), 55–60. p.
- SAVITZKY, A., és GOLAY, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627–1639. p.
- SENTHILKUMAR, T., JAYAS, D. S., WHITE, N. D. G., FIELDS, P. G., és GRÄFENHAN, T. (2017). Detection of ochratoxin A contamination in stored wheat using near-infrared hyperspectral imaging. *Infrared Physics és Technology*, 81, 228–235. p.
- SENTHILKUMAR, THIRUPPATHI, JAYAS, D. S., WHITE, N. D. G., FIELDS, P. G., és GRÄFENHAN, T. (2016). Detection of fungal infection and Ochratoxin A contamination in stored barley using near-infrared hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 147, 162–173. p.
- SERRANTI, S., CESARE, D., és BONIFAZI, G. (2013). The development of a hyperspectral imaging method for the detection of Fusarium-damaged, yellow berry and vitreous Italian durum wheat kernels. *Biosystems Engineering*, 115(1), 20–30. p.
- SIERRA, V., ALDAI, N., CASTRO, P., OSORO, K., COTO-MONTES, A., és OLIVÁN, M. (2008). Prediction of the fatty acid composition of beef by near infrared transmittance spectroscopy. *Meat Science*, 78(3), 248–255. p.
- SIVERTSEN, A. H., KIMIYA, T., és HEIA, K. (2011). Automatic freshness assessment of cod

- (Gadus morhua) fillets by Vis/Nir spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 103(3), 317–323. p.
- STATSOFT, I. (2013). Electronic statistics textbook. <http://www.statsoft.com/textbook/support-vector-machines/>
Lekérdezés időpontja: 2013.12.21.
- STEVIK, A. M., DUUN, A. S., RUSTAD, T., O'FARRELL, M., SCHULERUD, H., és OTTESTAD, S. (2010). Ice fraction assessment by near-infrared spectroscopy enhancing automated superchilling process lines. *Journal of Food Engineering*, 100(1), 169–177. p.
- SUGIYAMA, J., és TSUTA, M. (2010). Visualization of Sugar Distribution of Melons by Hyperspectral Technique. In: DA-WEN SUN (Szerk.) *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*. Elsevier. [S.l.] 349–368 p.
- SUN, T., HUANG, K., XU, H., és YING, Y. (2010). Research advances in nondestructive determination of internal quality in watermelon/melon: A review. *Journal of Food Engineering*, 100(4), 569–577. p.
- SZALAY, K. D. (2014). Távérzékelésre és spektroszkópiára alapozott őszi búza fajtaazonosító eljárás. (Doktori disszertáció, Szent István Egyetem, Gödöllő)
- TAGHIZADEH, M., GOWEN, A. A., és O'DONNELL, C. P. (2011a). Comparison of hyperspectral imaging with conventional RGB imaging for quality evaluation of *Agaricus bisporus* mushrooms. *Biosystems Engineering*, 108(2), 191–194. p.
- TAGHIZADEH, M., GOWEN, A. A., és O'DONNELL, C. P. (2011b). The potential of visible-near infrared hyperspectral imaging to discriminate between casing soil, enzymatic browning and undamaged tissue on mushroom (*Agaricus bisporus*) surfaces. *Computers and Electronics in Agriculture*, 77(1), 74–80. p.
- TAGHIZADEH, M., GOWEN, A., és O'DONNELL, C. P. (2009). Prediction of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) moisture content using hyperspectral imaging. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 3(4), 219–226. p.
- TAGHIZADEH, M., GOWEN, A., WARD, P., és O'DONNELL, C. P. (2010). Use of hyperspectral imaging for evaluation of the shelf-life of fresh white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored in different packaging films. *Innovative Food Science és Emerging Technologies*, 11(3), 423–431. p.

- TAO, F., PENG, Y., LI, Y., CHAO, K., és DHAKAL, S. (2012). Simultaneous determination of tenderness and *Escherichia coli* contamination of pork using hyperspectral scattering technique. *Meat Science*, 90(3), 851–857. p.
- VÍZHÁNYÓ, T., és FELFÖLDI, J. (2000). Enhancing colour differences in images of diseased mushrooms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(2), 187–198. p.
- WANG, H.-H., és SUN, D.-W. (2002). Correlation between Cheese Meltability Determined with a Computer Vision Method and with Arnott and Schreiber Tests. *Journal of Food Science*, 67(2), 745–749. p.
- WANG, L., SUN, D.-W., PU, H., és CHENG, J.-H. (2017). Quality analysis, classification, and authentication of liquid foods by near-infrared spectroscopy: A review of recent research developments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(7), 1524–1538. p.
- WANG, WEI, HEITSCHMIDT, G. W., NI, X., WINDHAM, W. R., HAWKINS, S., és CHU, X. (2014). Identification of aflatoxin B1 on maize kernel surfaces using hyperspectral imaging. *Food Control*, 42, 78–86. p.
- WANG, WEILIN, LI, C., TOLLNER, E. W., GITAITIS, R. D., és RAINS, G. C. (2012). Shortwave infrared hyperspectral imaging for detecting sour skin (*Burkholderia cepacia*)-infected onions. *Journal of Food Engineering*, 109(1), 38–48. p.
- WANI, B. A., BODHA, R. H., és WANI, A. H. (2010). Nutritional and medicinal importance of mushrooms. *Journal of Medicinal Plants*, 4(24), 2598–2604. p.
- WILLIAMS, P. J., GELADI, P., BRITZ, T. J., és MANLEY, M. (2012a). Growth characteristics of three *Fusarium* species evaluated by near-infrared hyperspectral imaging and multivariate image analysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96(3), 803–813. p.
- WILLIAMS, P. J., GELADI, P., BRITZ, T. J., és MANLEY, M. (2012b). Investigation of fungal development in maize kernels using NIR hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Journal of Cereal Science*, 55(3), 272–278. p.
- WILLIAMS, P. J., GELADI, P., BRITZ, T. J., és MANLEY, M. (2012c). Near-infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate image analysis to study growth characteristics and differences between species and strains of members of the genus *Fusarium*. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 404(6–7), 1759–1769. p.
- WILLIAMS, PAUL, MANLEY, M., FOX, G., és GELADI, P. (2010). Indirect detection of

- Fusarium verticillioides in maize (*Zea mays* L.) kernels by NIR hyperspectral imaging. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18(1), 49. p.
- WILLIAMS, P., és NORRIS, K. (2001). *Near-infrared technology in the agricultural and food industries*. American Association of Cereal Chemists, Inc., 2nd Edition [S.l.] 312 p.
- WISE, B. M., GALLAGHER, N. B., és WINDIG, W. (2006). *Chemometrics Tutorial for PLS – Toolbox and Solo*. [S.l.], [s.n.], [s.a.]
- WOLD, J. P., O'FARRELL, M., HØY, M., és TSCHUDI, J. (2011). On-line determination and control of fat content in batches of beef trimmings by NIR imaging spectroscopy. *Meat Science*, 89(3), 317–324. p.
- WOLD, S., ESBENSEN, K., és GELADI, P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2(1–3), 37–52. p.
- WU, D., és SUN, D. W. (2013a). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review - Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 19, 1–14. p.
- WU, D., és SUN, D. W. (2013b). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review - Part II: Applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 19, 15-28. p.
- WU, J., PENG, Y., LI, Y., WANG, W., CHEN, J., és DHAKAL, S. (2012). Prediction of beef quality attributes using VIS/NIR hyperspectral scattering imaging technique. *Journal of Food Engineering*, 109(2), 267–273. p.
- XU, Q.-S., és LIANG, Y.-Z. (2001). Monte Carlo cross validation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 56(1), 1–11. p.
- XUE, J., és SU, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17. p.
- YING, Y., és LIU, Y. (2008). Nondestructive measurement of internal quality in pear using genetic algorithms and FT-NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 206–213. p.
- YOON, S. C., PARK, B., LAWRENCE, K. C., WINDHAM, W. R., és HEITSCHMIDT, G. W. (2011). Line-scan hyperspectral imaging system for real-time inspection of poultry

carcasses with fecal material and ingesta. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(2), 159–168. p.

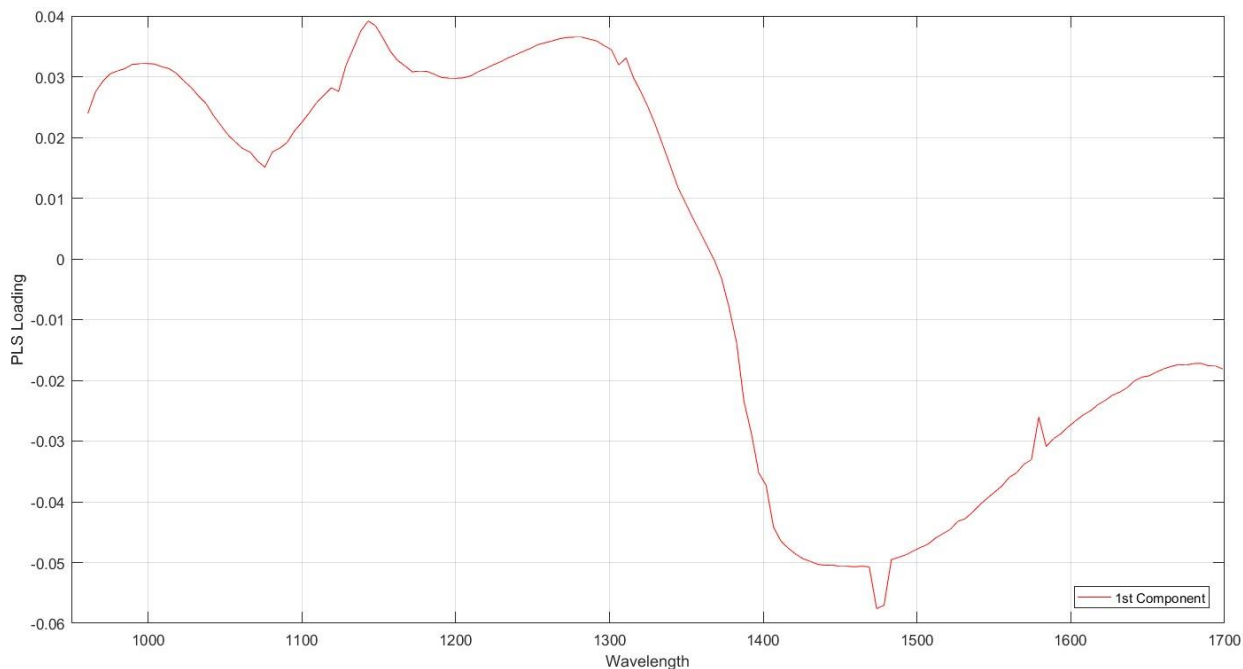
ZUDE, M. (Szerk.) (2008). *Optical Monitoring of Fresh and Processed Agricultural Crops*. CRC Press. [S.l.] 576 p.

M2: Natamycin-nel kezelt csiperke és képe 1200 nm-en a CuBrowser kezelőfelületén

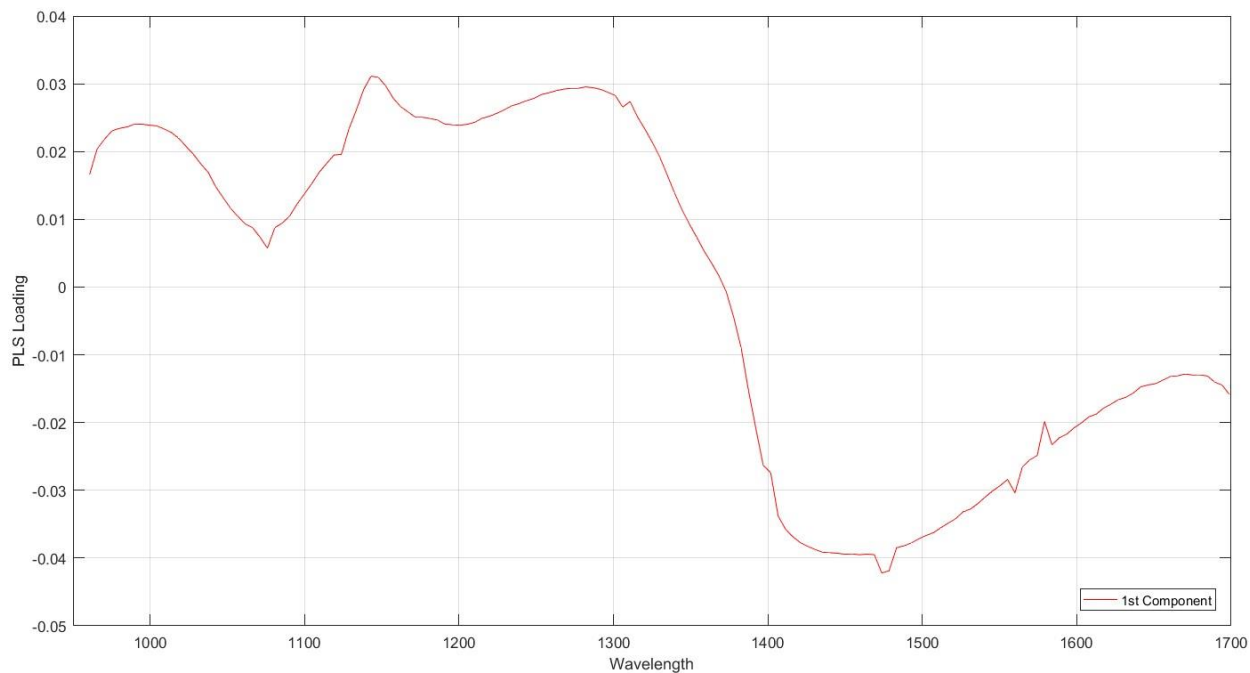
Dátum	RGB kép	1200nm	1200nm normált
05.03.			
05.06.			
05.07.			
05.08.			
05.09.			
05.13.			

(fekete, vörös jelölés: *Cladobotrium* okozta folt; kék, zöld jelölés: mechanikailag sérült szövet)

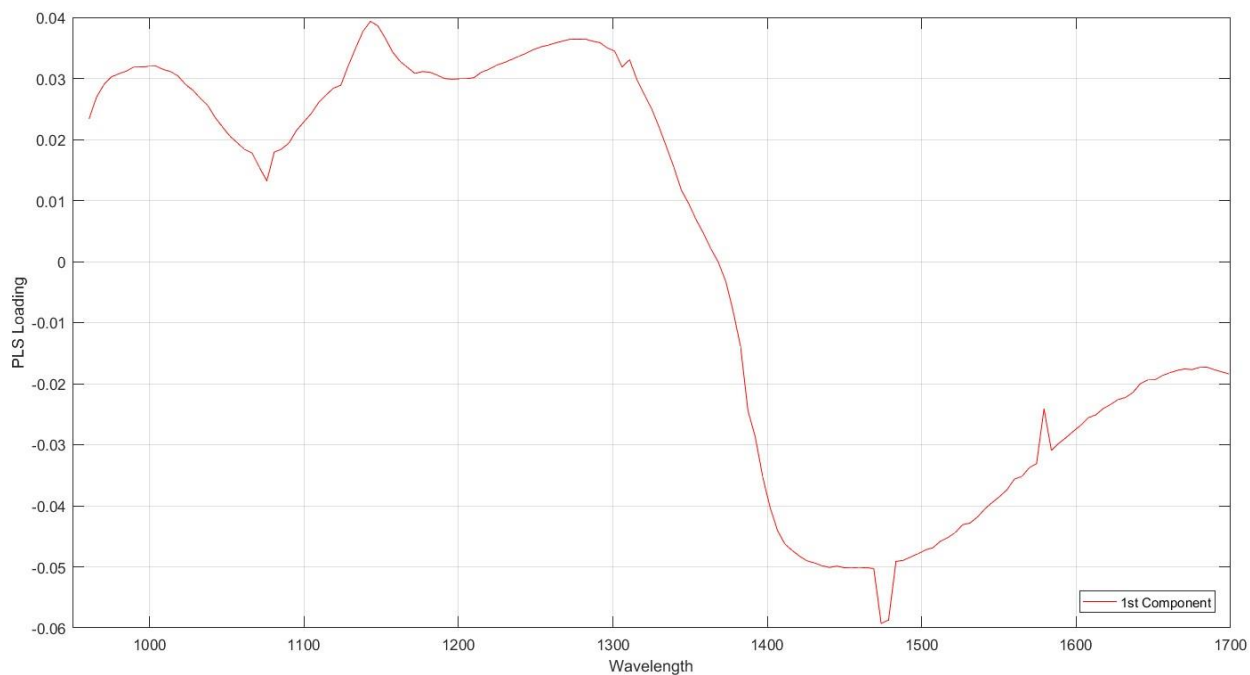
M3: Görögdinnye vágási felületén, hiperspektrális látórendszerrel végzett mérések adatai alapján alkotott PLSR modellek súlyfaktor ábrái



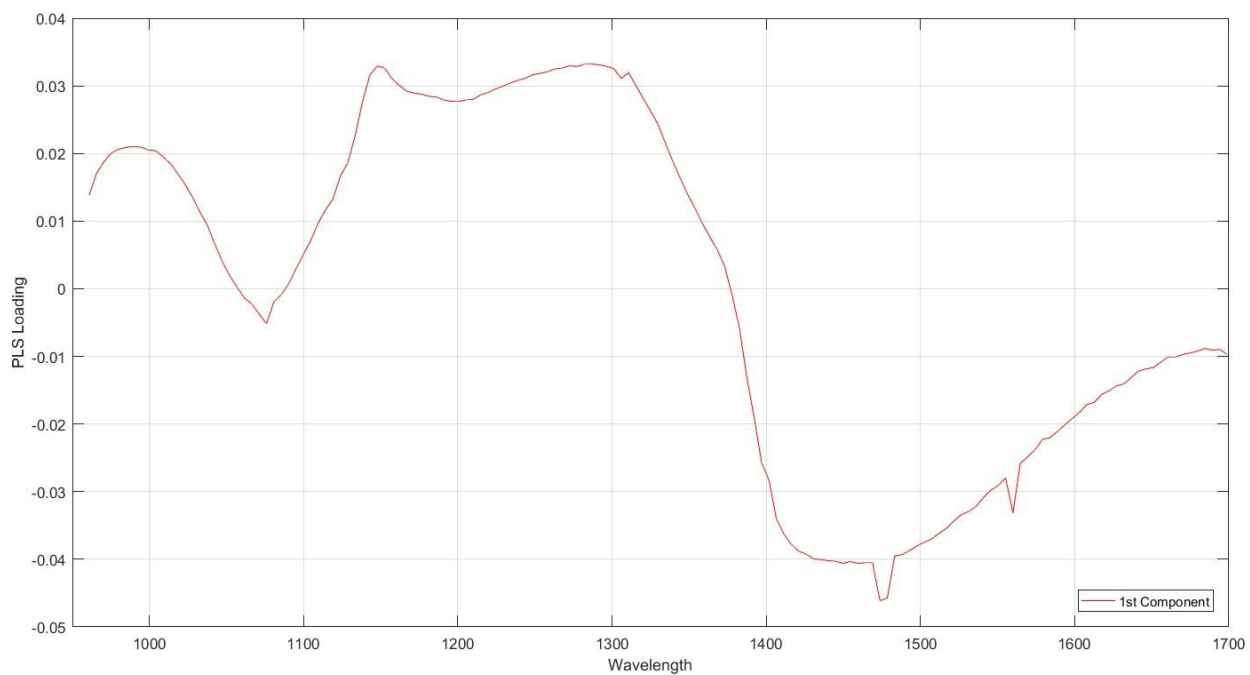
M3.1: oldható szárazanyag-tartalom (Brix) PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy minta adatain, az 1. látens változó súlyfaktor ábrája



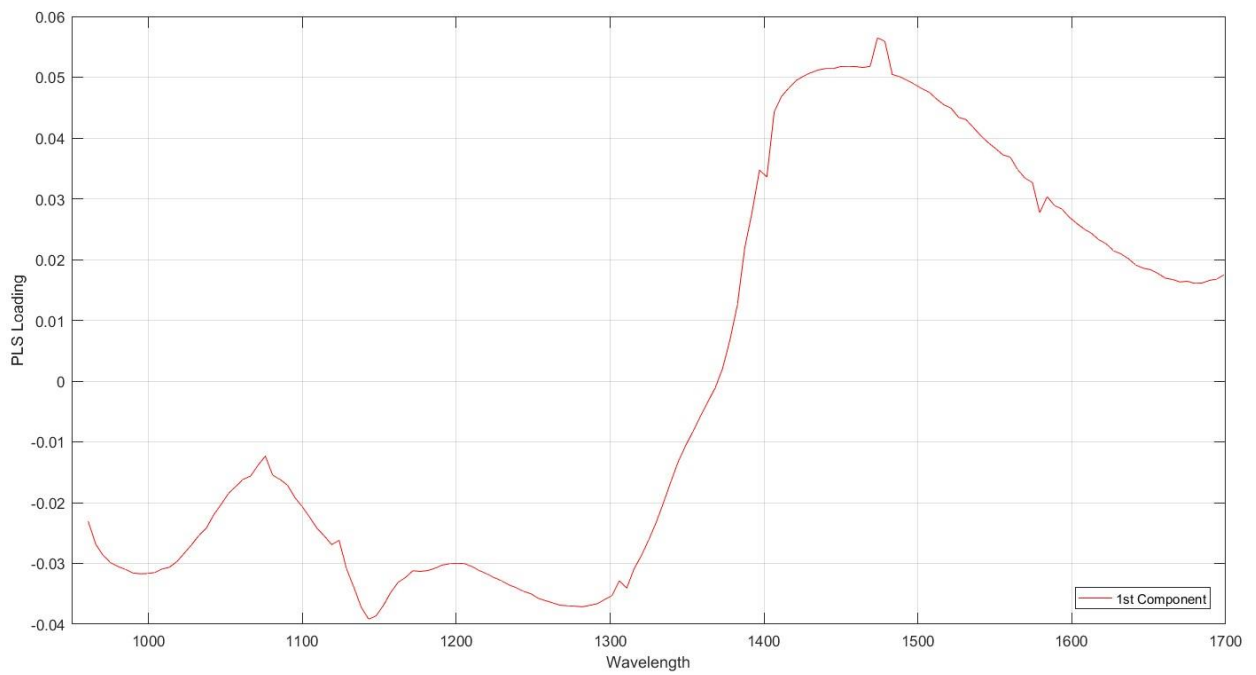
M3.2: oldható szárazanyag-tartalom (Brix) PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, az 1. látens változó súlyfaktor ábrája



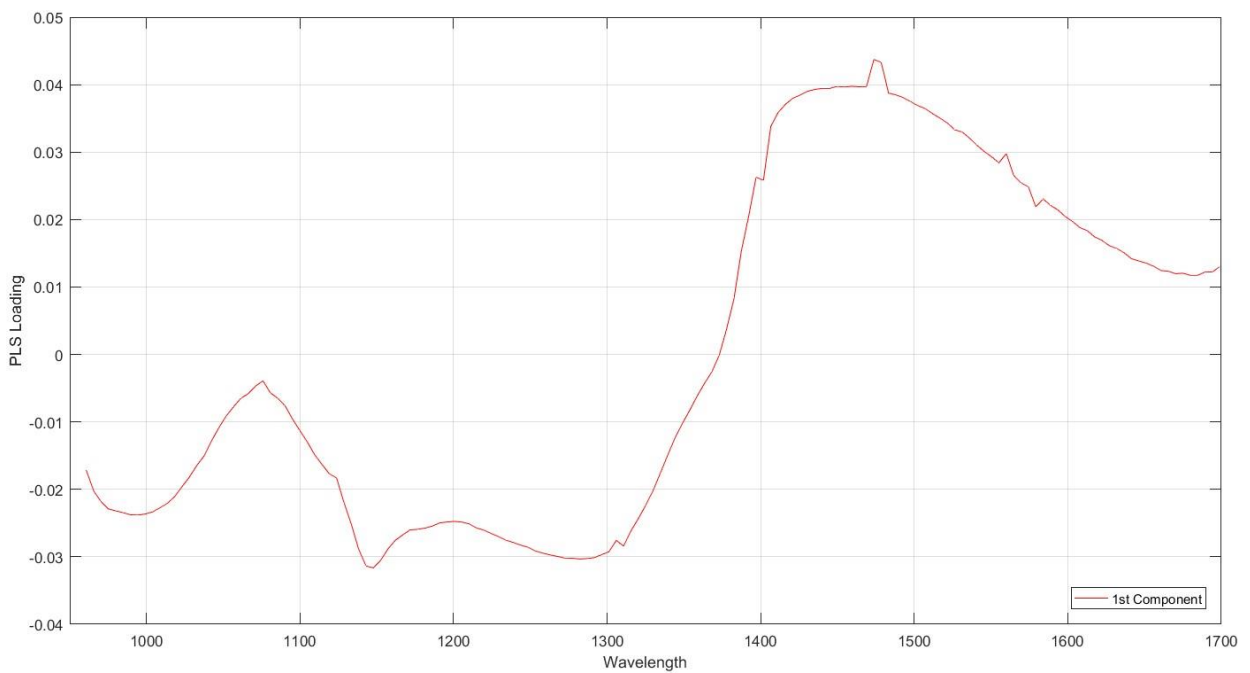
M3.3: pH-érték PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy minta adatain, az 1. látens változó súlyfaktor ábrája



M3.4: pH-érték PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, az 1. látens változó súlyfaktor ábrája



M3.5: A középponttól mért távolság PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye egy minta adatain, az 1. látens változó súlyfaktor ábrája



M3.6: A középponttól mért távolság PLSR módszerrel végzett becslésének eredménye a minták összesített adatain, az 1. látens változó súlyfaktor ábrája

M4: Argus hiperspektrális képalkotó rendszer vezérlését végző szoftver beállításai fuzáriummal fertőzött kukorica minták vizsgálata során

2015.05.27.

The screenshot displays the ARGUS hyperspectral data acquisition software interface. The main window is titled "ARGUS hyperspectral data acquisition software (Firth@rt, 2015)".

Camera and Calibration: XCamera: XEVA-USB-FPA-320-100Hz (IP=,PID=8110,SER=00001). Calibration: XEVA6179_80ms_LG_RT_new_6179.xca.

Software setting: Zeutec_NIR.ini

Calibration parameters: Calib: band 1-2: 20, 192, all, nm: 901 - 1746; Calib: nm 1-2: 967, 1535, nm/b: 3.302325; Spectral ROI, b: 18, 220, roi, nm: 961 - 1627; Spatial view, mm: 55, um/px: 171.875; Spatial ROI, px: 0, 319, roi, mm: 0 - 54.

Integration and Cooling: Integration, us: 79000; LowGain: level 0-3; ADC Vin, 4095: 2730; Cooling: settle, C: -18,15; ADC Vref, 4095: 2123; P: 3000; I: 150; D: 1; Peltier: 0; temp, C: -10,23.

Hypercube and Description: Hypercube: C:\Program Files (x86)\Xeneth\Argus\Data\Maiz; Description: Argos output: relative [27.05.2015 13:49:05]; X * Y * B: 319 * 1 * 202; Min,max: 0,42557 1; X * Y size: 54,868mm * 172um.

Display and Processing: Bright frame: whiteimage.png; Dark frame: darkimage.png; AbsRef of bright: SRT-99-050 abs reflectance.txt; Section, x: 131; Signal, Reflectance, Absolute; Histogram (signal=0.4095); Section(k=0...319) at w= 88.

Position and Movement: Y-Table port: COM1; Interface type: Zeutec; Position, um: -100000; Goto, mm: -100; Ylength, mm: 70; frame/Y-res: 1, 407.

Buttons and Controls: Save roi.png, Save signal.env, Save, Set, Stop, AllProp, Set, Save, Select file and Start.

2015.06.09.

ARGUS hyperspectral data acquisition software (Firth@rt, 2015)

XCamera: XEVA-USB-FPA-320-100Hz (IP=PID=8110.SER=00001)
drv: Xeneth typ: NIR X-B-bit: 320 256 12
Calibration: XEVA6179_80ms_LG_RT_new_6179.xca
Setting: [Open]

Video logic: ttb: []

Integration: us 83000 LowGain [] level 0-3 []
ADC Vn, 4095 2730 Cooling [] settle, C -18.15
ADC Vref, 4095 2123 P 3000 I 150 D 1
Peltier 0 temp, C -12.94

Noise th%/n 15 [] show [AllProp] [Set] [Save]
Intvl/Dur, ms 200 0 fra 0 / jump, tck drop [] [72]

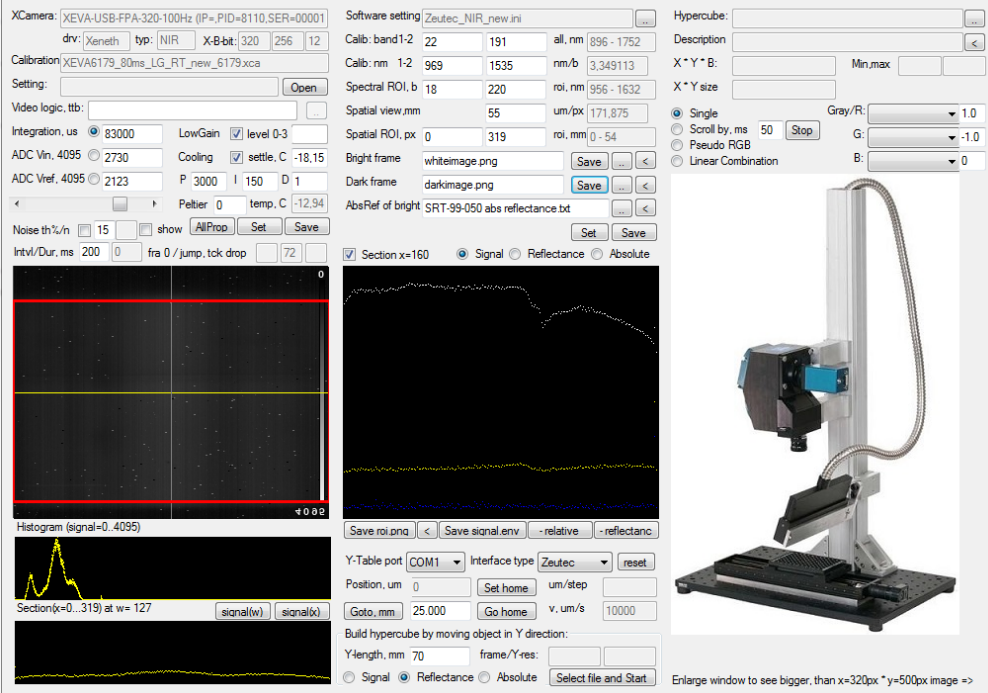
Software setting: Zeutec_NIR_new.ini
Calib: band 1-2 22 191 all, nm 896 - 1752
Calib: nm 1-2 969 1535 nm/b 3,349113
Spectral ROI, b 18 220 roi, nm 956 - 1632
Spatial view, mm 55 um/px 171,875
Spatial ROI, px 0 319 roi, mm 0 - 54
Bright frame whiteimage.png [Save] [] []
Dark frame darkimage.png [Save] [] []
AbsRef of bright: SRT-99-050 abs reflectance.txt [Set] [Save]

Hypercube: []
Description: []
X*Y*B: [] Min, max: [] []
X*Y size: []
 Single Gray/R: [] 1.0
 Scroll by, ms 50 [Stop] G: [] -1.0
 Pseudo RGB B: [] 0
 Linear Combination

Section x=160 Signal Reflectance Absolute

Save roi.png [] Save signal.env [] -relative [] -reflectanc []

Y-Table port COM1 Interface type Zeutec [] [reset]
Position, um 0 [Set home] um/step []
Goto, mm 25.000 [Go home] v, um/s 10000
Build hypercube by moving object in Y direction:
Y-length, mm 70 frame/Y-res: [] []
 Signal Reflectance Absolute [Select file and Start]



Enlarge window to see bigger, than x=320px *y=500px image =>

2015.06.10.

ARGUS hyperspectral data acquisition software (Firth@rt, 2015)

XCamera: XEVA-USB-FPA-320-100Hz (IP=PID=8110.SER=00001)
drv: Xeneth typ: NIR X-B-bit: 320 256 12
Calibration: XEVA6179_80ms_LG_RT_new_6179.xca
Setting: [Open]

Video logic: ttb: []

Integration: us 83000 LowGain [] level 0-3 []
ADC Vn, 4095 2730 Cooling [] settle, C -18.15
ADC Vref, 4095 2123 P 3000 I 150 D 1
Peltier 0 temp, C -11.64

Noise th%/n 15 [] show [AllProp] [Set] [Save]
Intvl/Dur, ms 200 124 fra 0 / jump, tck drop [] [93] [6]

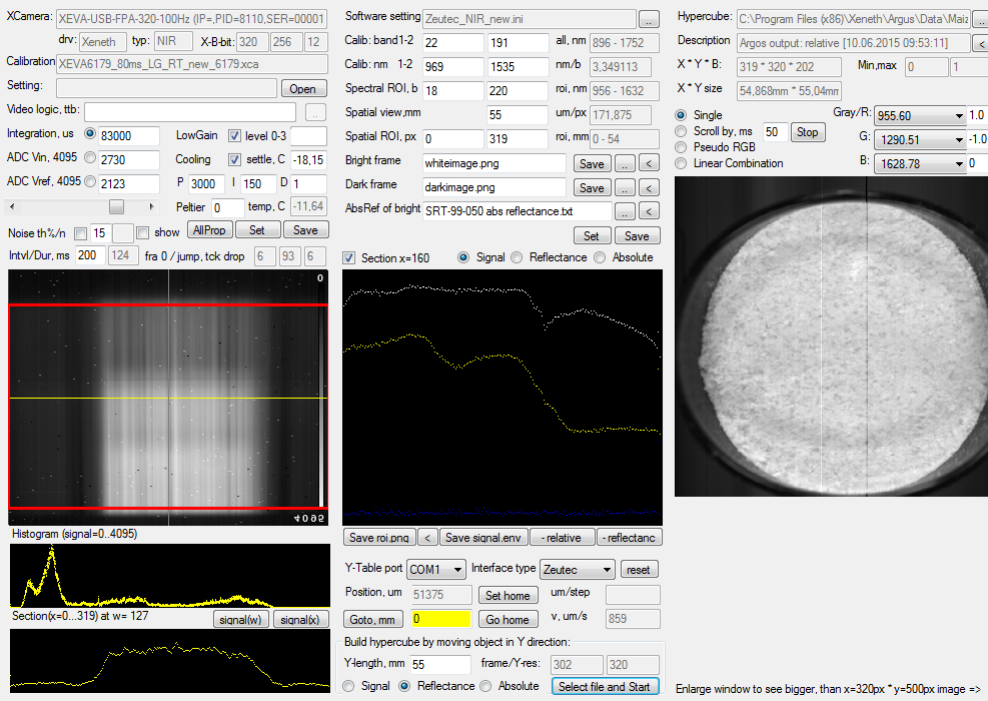
Software setting: Zeutec_NIR_new.ini
Calib: band 1-2 22 191 all, nm 896 - 1752
Calib: nm 1-2 969 1535 nm/b 3,349113
Spectral ROI, b 18 220 roi, nm 956 - 1632
Spatial view, mm 55 um/px 171,875
Spatial ROI, px 0 319 roi, mm 0 - 54
Bright frame whiteimage.png [Save] [] []
Dark frame darkimage.png [Save] [] []
AbsRef of bright: SRT-99-050 abs reflectance.txt [Set] [Save]

Hypercube: C:\Program Files (x86)\Xeneth\Argus\Data\Mat2 []
Description: Argos output: relative [10.06.2015 09:53:11] []
X*Y*B: 319 * 320 * 202 Min, max: 0 1
X*Y size: 54,868mm * 55,04mm
 Single Gray/R: [] 955.60
 Scroll by, ms 50 [Stop] G: [] 1290.51
 Pseudo RGB B: [] 1628.78
 Linear Combination

Section x=160 Signal Reflectance Absolute

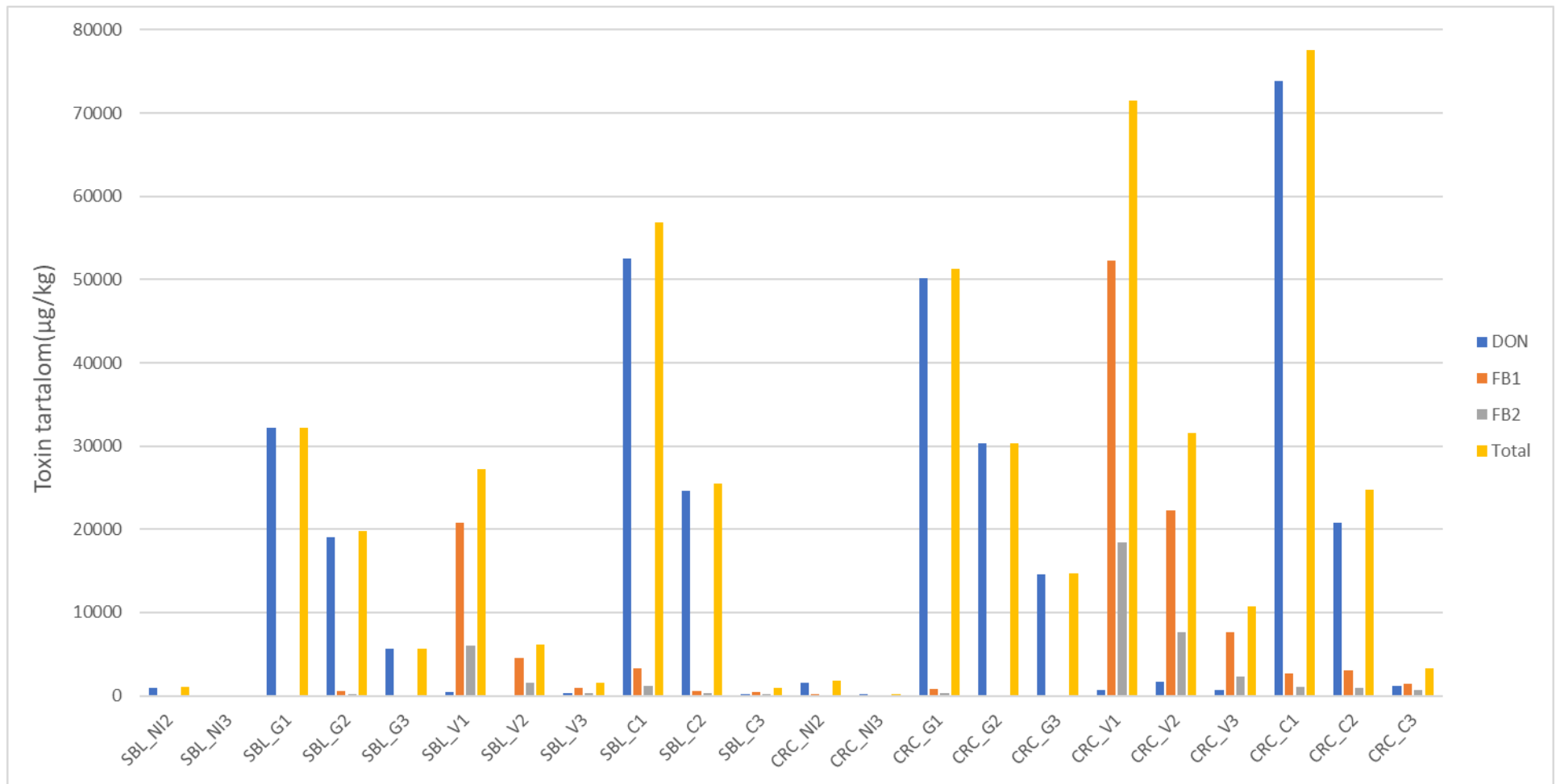
Save roi.png [] Save signal.env [] -relative [] -reflectanc []

Y-Table port COM1 Interface type Zeutec [] [reset]
Position, um 51375 [Set home] um/step []
Goto, mm 0 [Go home] v, um/s 859
Build hypercube by moving object in Y direction:
Y-length, mm 55 frame/Y-res: [302] [320]
 Signal Reflectance Absolute [Select file and Start]



Enlarge window to see bigger, than x=320px *y=500px image =>

M5: A különböző fuzáriummal fertőzött őrölt kukoricaminták csoportjainak toxin tartalma



(kék: deoxinivalenol, narancs: fumonizin B₁, szürke: fumonizin B₂, sárga:össz toxin)

M6: Az Európai Bizottság 2006/576/EK ajánlása „A deoxinivalenol, a zearalenon, az ochratoxin-A, a T-2, a HT-2 és a fumonizinek állati takarmányozásra szánt termékekben való előfordulásáról”

Mikotoxin	Takarmányozásra szánt termék	Irányérték mg/kg-ban (ppm), 12 %-os nedves- ségtartalmú takar- mányra vonatko- zóan
Deoxynivalenol	Takarmány-alapanyag (*)	
	— Gabonafélék és gabonakészítmények (**), kivéve a kukorica melléktermékeket	8
	— Kukorica melléktermékek	12
	Kiegészítő és teljes értékű takarmányok, kivéve:	5
	— sertéseknek szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok	0,9
— borjaknak (< 4 hónap), bárányoknak és gidáknak szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok	2	
Zearalenon	Takarmány-alapanyag (*)	
	— Gabonafélék és gabonakészítmények (**), kivéve a kukorica melléktermékeket	2
	— Kukorica melléktermékek	3
	Kiegészítő és teljes értékű takarmányok	
	— malacoknak és kocasüldőknek (fiatal emsék) szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok	0,1
— tenyészkocáknak és hizósertéseknek szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok	0,25	
— borjaknak, tejelő marháknak, juhoknak (beleértve a bárányokat) és kecskéknak (beleértve a gidákat) szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok	0,5	
Ochratoxin-A (**)	Takarmány-alapanyag (*)	
	— Gabonafélék és gabonakészítmények (**)	0,25
	Kiegészítő és teljes értékű takarmányok	
— sertéseknek szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok	0,05	
— baromfiknak szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok	0,1	
Fumonizin B1 + B2	Takarmány-alapanyag (*)	
	— kukoricafélék és kukoricakészítmények (***)	60
	Az alábbiaknak szánt kiegészítő és teljes értékű takarmányok:	
	— sertések, lovak (lőfélék), nyulak, kedvtelésből tartott állatok	5
	— halak	10
	— baromfi, borjak (< 4 hónap), bárányok és gidák	20
— felnőtt kérődzők (> 4 hónap) és vidra	50	

*) Azon gabonafélék és gabonakészítmények esetében, amelyekkel közvetlenül etetik az állatokat, különösen ügyelni kell arra, hogy a napi adagban való alkalmazásuk ne vezessen ahhoz, hogy az állatok a mikotoxinok magasabb szintjének legyenek kitéve, mint abban az esetben, ha kizárólag teljes értékű takarmányt használtak a napi adagban.

(**) A „gabonafélék és gabonakészítmények” fogalom nem csak a takarmány-alapanyagok forgalmáról és felhasználásáról szóló, 1996. április 29-i 96/25/EK tanácsi irányelv (HL L 125., 1996.5.23., 35. o.) mellékletének B. részében található, a főbb takarmány-alapanyagok nem kizárólagos listájának „Gabonamagvak, azokból nyert termékek és melléktermékek” című 1. címsorában szereplő takarmányokat foglalja magában, hanem más, gabonafélékből nyert takarmányt is, különösen a gabonából nyert száraztakarmányt és szalastakarmányt

(***) A „kukoricafélék és kukoricakészítmények” fogalom nem csak a 96/25/EK irányelv mellékletének B. részében található, a főbb takarmány-alapanyagok nem kizárólagos listájának „Gabonamagvak, azokból nyert termékek és melléktermékek” című 1. címsorában szereplő kukoricafélékből nyert takarmányokat foglalja magában, hanem más, kukoricafélékből nyert takarmányt is, különösen a kukoricából nyert száraztakarmányt és szalastakarmányt.

M7: A pókhálós penésszel fertőzött és fungicid szerekkel kezelt kétspórács csiperke minták mennyisége

	Fertőzött (db)	Nem fertőzött (db)
kezeletlen	15	14
natamycin	16	10
Prokloráz-Mn	13	10
<i>Bacillus subtilis</i>	17	5
Összesen:	61	39

M8: Fuzáriummal fertőzött kukorica minták száma (NI: nem fertőzött, G: *Fusarium graminearum*, V: *Fusarium verticillioides*, C: *Fusarium culmorum*)

Hibrid	Osztály	Szennyezettség szintje	Ismétlés (db)
SBL	NI	közepes	8
	NI	alacsony	8
	G	magas	8
	G	közepes	8
	G	alacsony	8
	V	magas	8
	V	közepes	8
	V	alacsony	8
	C	magas	8
	C	közepes	8
	C	alacsony	8
CRC	NI	közepes	8
	NI	alacsony	8
	G	magas	8
	G	közepes	8
	G	alacsony	8
	V	magas	8
	V	közepes	8
	V	alacsony	8
	C	magas	8
	C	közepes	8
	C	alacsony	8
Összesen:			176

9. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek,

Dr. Felföldi József és Dr. Firtha Ferenc

professzor úrnak,

az ösztönzésért és segítségért,

az ötletekért, szakmai segítségért és javaslatokért

és

a **Fizika-Automatika Tanszék** összes (jelenlegi és korábbi) munkatársának,

a segítségért és bátorításért.

Külön köszönöm a kollégák és szakemberek támogatását, akik szakmailag és emberileg nagyban hozzájárultak a disszertáció elkészüléséhez:

Köszönöm opponenseimnek, **Bázár Györgynek** és **Gere Attilának** értékes tanácsaikat és észrevételeiket,

Geösel Andrásnak az inspiráló közös munkát és segítséget a kutatásaim kezdetén,

Andreas Ziteknek, Katharina Böhmnek, Barbara Hinterstoissernek és mindenkinek a BOKU Tulln-i intézetének munkatársai közül, hogy elősegítették a szakmai fejlődésemet és támogattak az ösztöndíjas időszakban és azon túl is,

Baranyai Lászlónak, hogy mindig segítségemre sietett, mikor szükségem volt szakmai útmutatásra vagy ha gondom támadt az egyetemi intéztnivalókkal,

Sebők Andrásnak a rengeteg bátorítást és a sok jó tanácsot, amivel ellátott, hogy legyen erőm befejezni ezt a munkát,

és köszönöm **Mudassir Chaundry**-nak a tippeket és vidám beszélgetéseket.

*Köszönöm barátaimnak, különösen **Andrásnak, Juditnak** és **Tündinek**, hogy bíztak bennem és minden módon igyekeztek segíteni ezen a rögös úton.*

*Leginkább pedig köszönöm **családomnak**, akik talán a legtöbbet tapasztaltak a munkám nehézségeiből, hogy támogattak és segítettek, még a legnagyobb kétségbeesések idején is. **Keresztapámnak**, hogy lelket öntött belém, mikor szükségem volt rá. A legnagyobb köszönet a **húgomat** illeti, aki emberfeletti türelemmel hallgatott meg és támogattott végig a doktori évek alatt.*