



**SZENT ISTVÁN
EGYETEM**

Doktori értekezés tézisei

Lézer diffúz reflexiós módszer termények állapotjellemezésére

Dénes Lajos Dénes

Budapest, 2016

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

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

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

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

A doktori iskola- és a témavezetők jóváhagyó aláírása:

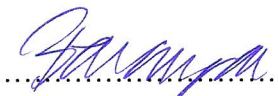
A jelölt a Szent István Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, a műhelyvita során elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.


.....

Az iskolavezető jóváhagyása


.....

A témavezető jóváhagyása


.....

A témavezető jóváhagyása

1. Bevezetés

A technológiák fejlődésével újabb módszerek kerültek előtérbe az élelmiszeripari alapanyagok vizsgálatára. A korszerű berendezések alkalmasak arra, hogy gyors és megbízható minőségi előrejelzéseket kapjunk a terményekről. Az elmúlt évtizedekben egyre elterjedtebben alkalmazták a látórendszeres technikát a manuális technikák kiváltására és a folyamatok automatizálására, amely magában foglalja a klasszikus, a hiper- és multispektrális látórendszert is.

Jelen kutatásomban a belső tulajdonságok, beltartalmi jellemzők becslésével foglalkoztam. A beltartalmi jellemzők vizsgálatának egyik legelterjedtebb módszere a NIR technika. A módszer használata során a terméket közeli infravörös sugárzás éri és a visszaverődő vagy áteresztett sugárzást mérjük. Miközben a sugárzás behatol a termékbe, annak spektrális tulajdonságai a hullámhossz függő szóródás vagy az abszorpciós folyamatok révén változnak. A változások a termék kémiai összetételétől függenek, valamint annak fényszóródási tulajdonságaitól, amelyek a mikroszerkezethez kapcsolódnak. A másik, újszerű módszer a diffúz reflexiós mérés, amelynél a termény fizikai szerkezetére és kémiai összetételére utaló információkat kaphatunk.

A mérés technika tanulmányozása után a mérőrendszer megtervezése és megépítését követő metodikai vizsgálatok után termények tárolása alatt bekövetkező változását vizsgáltam. A tárolás során hosszabb ideig tárolható terménnyel (burgonyával), valamint egy gyorsan romló és a szedést követően viszonylag rövid ideig eltartható kertészeti terménnyel (körtével) foglalkoztam. Méréseim tárgyát képezték alma szeletek, melyeknek a szárítás során lejátszódó változását követtem nyomon különböző paraméterek segítségével.

2. Irodalmi áttekintés

A NIR technikával régóta foglalkoznak és mára már rutinszerűen alkalmazott módszer az élelmiszeriparban. Számos publikáció született ebben a témakörben a különböző fizikai és beltartalmi jellemzők változásának követésére. A hiperspektrális képalkotás szerepe az utóbbi évtizedben egyre nagyobb az élelmiszerek és a mezőgazdasági termékek minőségének megítélésében, valamint a biztonságuk ellenőrzésében. Ez a technika egyesíti a spektroszkópiát a képalkotással, így spektrális és térbeli információkat egyaránt nyerhetünk a vizsgált mintáról.

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

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

3. Célok

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

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

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

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

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

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

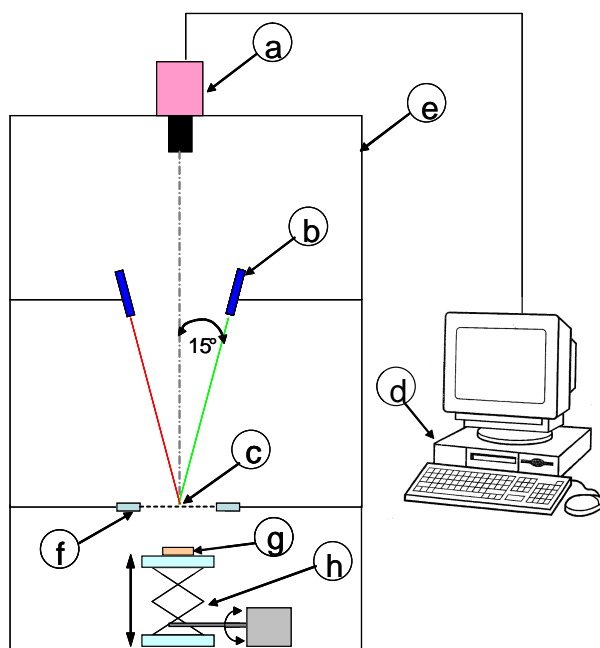
A leíró paraméterek alkalmazása tárolt és szárított minták mérési adatain, az alkalmazhatóság megállapítása érdekében.

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

4. Anyagok és módszerek

4.1. Diffúz reflexión alapuló mérőrendszer fejlesztése

Kísérleteim során egy saját tervezésű és összeállítású diffúz reflexiós mérőrendszerrel dolgoztam (1. ábra). Az automatizált mérőrendszer fő-része egy 12 bit felbontású monokróm CCD IP kamera (Photon Focus MV1–D1312), melynek maximális térbeli felbontása 1312×1082 pixel és spektrális érzékenysége 320 – 1080 nm tartományú. Fényforrásként 7 db szilárdtest lézer dióda modul építettem be (532 ± 5 , 635 ± 5 , 650 ± 5 , 780 ± 5 , 808 ± 5 , 850 ± 5 és 1064 ± 5 nm). A lézer fényforrások szimmetrikusan, kör alakban találhatók a mérendő minta felett, 15° beesési szöggel. Ez a beállítás tette lehetővé, hogy a sugárzott fotonok nagy többsége behatoljon a szövetekbe és a fókuszpontjuk ugyanabba a körülbelül 2 mm átmérőjű körbe essen, valamint a tükröződésből származó problémákat kiküszöbölje.



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

Az intenzitás profil és paraméterei

A fényudvarra jellemző intenzitásprofilot úgy készítettem el az eredeti képekből, hogy a középponttól pixelenként növelt átmérőjű gyűrűben átlagoltam az intenzitás értékeket. Fontos szempont a profilok feldolgozásánál, hogy olyan objektív paramétereket alkalmazzunk, melyek jól definiálhatóak és a profilra jellemző eredményt adnak. Ilyen az úgynevezett félérték szélesség

(Full Width at Half Maximum, FWHM) számítása. Az FWHM a profilon meghatározott távolság a minimum és maximum intenzitás középértékén mérve. Jelen esetben ez azért érdekes, mert a behatolási mélységgel arányos az FWHM. Meghatározható a profil inflexiós pontja (IP) (első derivált minimumának helye), valamint a logaritmikus profil lefutásának meredeksége (SLOPE).

4.2. Módszertani vizsgálatok és eszközei

A módszertani vizsgálatok célja az eszközök optimális beállítása, valamint a rendszer stabilitásának (reprodukálhatóságának) elemzése. Az ismételhetőség vizsgálatához felhasználtam egy Programozható Logikai Vezérlőt (PLC, Zelio Logic SR3), valamint egy léptető motort (Robotron SPA 42/100-558) a diffúz reflexiós képalkotó berendezésen kívül. Az alkalmazott léptetőmotor $n=100$ lépés/teljes fordulatra volt képes, ami $3,6^\circ$ lépésenkénti elfordulásnak felel meg. A mérések során használt gyümölcsöt (Idared alma) egy tengelyre szúrtam, amelyet a léptetőmotor forgatott. A körbemérést hét ismétléssel végeztem el, léptetésenként készítettem lézerrel indukált diffúz reflexiós képeket mind a hét hullámhosszon (532-1064 nm). A kiértékeléshez variációs koefficiens (CV%) használtam.

4.3. Almaszáritási kísérlet

A modellezés során két különböző optikai módszerrel követtem nyomon az almaszeletek nedvességtartalmának változását szárítás során. A mintaelőkészítésnél az almamintákat a hámozást követően 3 cm átmérőjű és 1 cm vastagságú korongokra vágtam. A szárítás Venticell 222 laboratóriumi szárítóberendezésben történt 65°C -on, maximális légáram mellett, óránkénti mintavételezéssel (0–7 óra). Az almaszeletek kétféle nedvességtartalmát (száraz és nedves bázisra vonatkoztatott) az adott mérési időpontokban mért és a tömegállandóságig (24 órán keresztül) szárított tömegből határoztam meg. A különböző mérési időpontokban az eltérő nedvességtartalmú almaszeleteket első lépésben lézer diffúziós technikával, majd ezt követően közeli infravörös (NIR) reflexión alapuló technikával mértem (1000-1700 nm tartományban 2 nm spektrális lépésközzel). A NIR módszerrel mért adatpontokon SNV normálást végeztem.

4.4. Burgonya tárolási kísérlet

A kísérlet során 110 db kereskedelmi forgalomból származó burgonyát használtam fel. A mintákat szobahőmérsékleten tároltam 33 napig, roncsolásmentes mérési módszerekkel (lézer diffúziós, akusztikus, ütésvizsgálati méréssel) vizsgáltam heti két alkalommal. A roncsolásmentes fizikai módszereket referenciaként alkalmaztam, az optikai diffúz reflexiós módszer mellett.

4.5.Körte tárolási kísérlet

Egy tárolási kísérlet kutatócsoportjának tagjaként vettem részt az alábbi kísérletben, mely kísérlet során 120 db körte minta (*Pyrus communis cv. Bosc kobak*) lett vizsgálva, melyeket véletlenszerűen négy csoportra lettek osztva. A minták optimális hőmérsékleten (0-2 °C) betárolásra kerültek és kéthetente egy csoport lett kitárolva, amely szobahőmérsékleten (22±2 C°) további két hétig lett tárolva. A teljes tárolási kísérlet 60 napig tartott. A kitárolt mintákon kétnaponta (hétfőket kivéve) roncsolásmentes mérések lettek végezve (lézer diffúziós, klorofill fluoreszcenciás, akusztikus, ütésvizsgálati méréssel).

4.6.Monte Carlo szimuláció

A Monte Carlo (MC) szimuláció során a foton útját és irányát valószínűségi változókkal határozzák meg, amit a szöveti tulajdonságok nagyban befolyásolnak. A disszertációban bemutatott szimulációs profilok elkészítéséhez egyedi fejlesztésű (Baranyai and Zude 2009) Monte Carlo szimulációs programot használtam. A szimuláció során fix paramétereket határoztam meg, amelyek a mérési eredményekhez hasonló körülményeket teremtenek. Az MC szimuláció során a szövet szerkezetére és anyagi minőségére jellemző három paraméter (abszorpció= μ_a [cm^{-1}], scattering tényező = μ_s [cm^{-1}] és anizotrópia = n [g]) nagymértékben befolyásolja minden foton teljes útját, ezért a szimuláció során ezt a három tényezőt változtattam és így szimuláltam le a diffúziós profilekat. Minden profil esetén ismertek ezek az értékek és ezeken felül számolható a behatolási mélységgel egyenértékű $1/\mu_{\text{eff}}$ (Wilson and Jacques 1990) és a diffúziós tényező $1/\mu_l$ (Wilson and Jacques 1990). A profilkészítés során szakirodalmi adat alapján a kertészeti termények mért μ_a és μ_s értékeit a következő intervallumban választottam ki (Qin and Lu 2008): a μ_s érték 5-15 cm^{-1} tartományban mozog, míg a μ_a 0,02-1,2 cm^{-1} .

4.7.Felhasznált szoftverek és statisztikai módszerek

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

5. Eredmények és értékelés

5.1. Módszertani vizsgálatok eredményei

Ismételhetőség értékelése

A képekből készült intenzitás profilok felhasználásával vizsgáltam a minta ugyanazon pontján meghatározott tulajdonságait. A profilok jellemzésére az FWHM paramétert használtam. A hét ismétléssel felvett görbék közel azonos lefutásúak. Az eltérések számszerűsítése érdekében kiszámítottam a százalékos szórást minden elforgatási szögnél. Az 532 nm hullámhosszon a variációs koefficiens kisebb, mint 5% ($2,37 \pm 0,67$ % a teljes ismétlés során), ami elfogadható, figyelembe véve, hogy ez a mérés a léptetőmotor pozicionálási hibájával is terhelt. Az 1064 nm hullámhosszon a variációs koefficiens megfigyelt eltérése 14-39,8 CV% tartományban mozgott, átlagosan $22,6 \pm 4,9$ CV%. A mérési eredmények alátámasztják a feltételezést, hogy a kamera érzékenységi határán (1080 nm) az ismételhetőség jelentősen romlik, 1064 nm hullámhosszon a kamera a többi alkalmazott hullámhossztól jelentősen eltérő hibával dolgozott.

A diffúz reflexiós profilok sztenderdizálása

Az ismételhetőség vizsgálata és a kutatás során végzett méréseim eredményei megerősítettek abban, hogy a módszer alkalmazható kertészeti termények jellemzésére. Ugyanakkor a mért profilok sztenderdizálása elengedhetetlen a mérés körülményeitől független objektív értékeléshez. Első lépésként olyan transzformációkat alkalmaztam, melyekkel a különböző integrációs idővel készített diffúziós profilok azonosan kezelhetők. Megfigyelhető volt, hogy az integrációs idő csökkenésével csökkent a profil plató mérete és a profil szélessége is.

Ennél a méréssorozatnál fő cél volt a különböző integrációs idővel kapott intenzitás profilok olyan transzformációja, mellyel függetleníteni tudjuk a záridőtől a méréseket, ezért egy saját összeállítású egyenletet alkalmaztam a profilok transzformációjához. Az egyenlet alkalmazásával szemmel láthatóvá vált, hogy az alacsony záridővel végzett mérések jelentős zajjal terheltek. A nagy sötétzajra való tekintettel a 10 ms záridő alatt nem javaslom diffúz reflexiós képek rögzítését.

A transzformáció után szinte egy görbévé simultak a profilok. Ennek statisztikai bizonyítása céljából távolságonként variációs koefficient (CV%) számoltam. Az értékelhető részek CV% $\leq 1\%$ eredménye alátámasztja, hogy a különböző integrációs idővel készített diffúziós profilok sztenderdizálhatóak a telítésbe lépő részek figyelmen kívül hagyása mellett.

5.2. Almazárítás kísérlet eredményei

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

5.3. Burgonya tárolás eredményei

A diffúz reflexiós paraméterek és a keménység tényezők összehasonlításával láthatóvá vált, hogy a kétféle módszerrel mért eredmények hasonló változásra utalnak. A 635 nm hullámhosszúságú lézerrel mért átlagos FWHM értékeknél összefüggés tapasztalható az akusztikus és dinamikus keménységértékekkel. Minden esetben exponenciális összefüggés tapasztalható, a dinamikus keménység és az optikai paraméter között a legszorosabb az összefüggés ($r^2 = 0,96$; $RMSEP = 6,136\%$; $RPD = 5,48$). Az impakt keménységgel kapott szorosabb összefüggést az magyarázza, hogy az akusztikus keménység globális keménységre utal (Muha 2008), viszont az impakt keménység felületi keménységre (ez a jellemző azonos helyen mért, mint a diffúz reflexiós módszer esetében). A keménység és a diffúz reflexiós tényező között - a 635 nm hullámhosszúságú lézerrel mért eredményekhez hasonlóan - szoros összefüggést tapasztaltam, amely egybevág Lu és Peng (2006) által mért eredményekkel.

5.4. Körte tárolási kísérlet eredményei

A kísérlet során különböző tárolási körülményekkel szimuláltuk az ideális és nem ideális tárolást. A kétféle hőmérsékleten (hűtő és szoba) tárolt minták fizikai paraméterei eltérő sebességgel változtak a tárolási idő függvényében. A tömegvesztés a víztartalom változását mutatja, ami hatással van a szerkezetre. A kitárolások után lineáris az összefüggés a tömegvesztés és a tárolási idő között az egyes csoportokban, valamint a körteminták eltérő mértékben veszítették tömegüket. Az eltérő sebességre utal mérési pontokra illesztett egyenesek meredekség értékeinek változása (meredekség = 0,648 - 0,412). Az első kitárolást követően figyelhető meg a legintenzívebb tömegvesztés változás (meredekség=0,648).

A körtemintákról a 635 nm hullámhosszúságú lézerrel készített profilok FWHM értékei között hasonló tendencia figyelhető meg, mint a tömegveszteség változásánál a tárolási idő függvényében. Az eredmények alapján elmondható, hogy a diffúz reflexiós profilok FWHM értékei hasonló tendenciát mutatnak, mint a tömegveszteség változása.

Az egyenértékű tárolási idő bevezetése

A fizikai változások modellezése érdekében szükség volt az eltérő hőmérsékleten tárolt minták fizikai jellemzőinek egyenértékesítésére. A tömegveszteséget, mint az adott tárolási körülményt jól jellemző paramétert vettük alapul az egyenértékű tárolási idő érték (Storage Time Equivalent Value, STEV) számításához. A transzformációról részletesebben az elkészült publikációnkban írunk (Zsom et al. 2014). Az ekvivalens tárolási idő bevezetésével a különböző hőmérsékleten tárolt minták mért jellemzői az eredetileg eltérő időbeli változásuk ellenére egységesen elemezhetővé váltak. A fizikai jellemzők változása (pl. puhulás) exponenciális egyenlettel közelíthető a tárolási idő függvényében. Az ekvivalens tárolási idő bevezetésével a négy tárolási csoport szakaszossága megszűnt, egy egyenesre sorolódtak a pontok.

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

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

A keménység és a diffúz reflexiós paraméterek kapcsolata

A keménység és a diffúz reflexiós paraméterek hasonló lefutásúak. A diffúz reflexiós paraméterek és a keménység tényezők összehasonlításával láthatóvá válik, hogy a két különböző módszerrel mért eredmények hasonló változásra utalnak. 635 nm hullámhosszú lézerrel mért profilok FWHM értékeinek változását hasonlítom össze az akusztikus és dinamikus keménység értékekkel. Az akusztikus esetében exponenciális összefüggés ($R^2 \geq 0,89$), a dinamikus keménységgel szorosabb lineáris összefüggés ($R^2 = 0,957$) tapasztalható.

5.5. Monte Carlo szimuláció

Monte Carlo szimulációt végeztem a módosított Gompertz függvény (MGF) együtthatói és a biológiai szövet optikai tulajdonságai (μ_a , μ_s , g) közötti kapcsolat felderítésére. Az illesztéssel kapott predikciós modelleket (lineáris (MLR) és non-lineáris (SVM, kernel: radial)) alkalmaztam a különböző paraméterek becslésére.

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

A diffúziós együttható ($1/\mu_t$) MLR módszerrel történő becslés értékeiben megfigyelhető egyfajta elfordulás a mért és becsült paraméterek között, ami az SVM módszerrel nem volt tapasztalható. Az SVM becsléssel közel egy egyenesre tudta hozni a $1/\mu_t$ értékeit alacsonynak mondható hibával ($\text{RMSEP}=5,71\%$), autokorreláció mentesen ($\text{DW}=2,2$) és szoros illesztkedést mutató determinációs együttható ($R^2=0,95$) mellett.

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

5.6.SVM modellekkel becsült optikai paraméterek

A körte mérési eredményeket használtam fel ahhoz, hogy az optikai paramétereket (μ_a , μ_s' , $1/\mu_{\text{eff}}$ és $1/\mu_t$) MC szimuláció során kapott legjobb modellek (SVM) segítségével becsüljem meg. A körte tárolás becsült optikai paraméterei és a 635 nm hullámhosszon mért FWHM értékek összefüggéseinél az abszorpció együtthatóval (μ_a) tapasztalható a legszorosabb lineáris összefüggés ($R^2 = 0,878$).

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

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

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

7. JAVASLATOK

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

8. ÖSSZEFOGLALÁS

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

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

A doktori munkámban számítógépes látórendszeren alapuló, diffúz reflexiós mérési és kiértékelési módszer kidolgozását tűztem ki célul. Az irodalmi feldolgozás után a munka a mérőrendszer megtervezésével és megépítésével folytatódott. Számos élelmiszeren és terményen végeztem méréseket, többek között almát szárítottam, valamint burgonyával és körtével végeztem tárolási kísérletet. Az alkalmazhatóság és optimális beállítás egy nem elhanyagolható szempont a műszer tesztelése során. A jelenleg használt mérőműszer fő részét képezi egy 12 bit felbontású CCD kamera. Az irodalmi feldolgozás arra világított rá, hogy a kutatók különböző kamerákat (pl.: hiperspektrális, monokromatikus és RGB kamerákat, melyeknek felbontása is eltérő lehet) alkalmaznak. Fontosnak tartottam az egységesítést, hogy az eltérő kamerákkal készített diffúz reflexiós képek összevethetőek legyenek. Meghatározó beállítás a záridő, mely a diffúziós folt nagyságát és a tútelített pixelek számát befolyásolja. A felbontás és a záridő függetlenítése céljából elkészült egy, a sztenderdizált profilok számításához használható képletet. A diffúziós profilok jellemzéséhez használható jelzőszámok meghatározása során a profil meredekségét (SLOPE), inflexiós (IP) pontját, félérték szélességét (FWHM), valamint az illesztett módosított Gompertz függvény (MGF) paramétereit vizsgáltam. A tapasztalatok és a mérési eredmények alapján az FWHM érték változása bizonyult a legjobbnak a profilok jellemzésére. Az FWHM szoros korrelációt mutat a profilokra illesztett négy paraméteres MGF függvény delta paraméterével. A két független tárolási kísérlet (körte, burgonya) során mért dinamikus keménység értékek változása szoros összefüggésben volt a 635 nm hullámhosszúságú

lézerrel mért FWHM változásával, ami megerősíti Lu és Peng (2006) barackok méréséből származó eredményeit.

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

9. Irodalomjegyzék

- Baranyai L. and M. Zude, (2009): Analysis of laser light propagation in kiwifruit using backscattering imaging and Monte Carlo simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69(1), p.33–39. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.011>
- Lu R. and Y. Peng, (2006): Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), p.161–171. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.11.004>
- Muha V., (2008): *Dinamikus módszerek kertészeti termények jellemzésére*. Retrieved from http://phd.lib.uni-corvinus.hu/286/2/muha_viktoria_thu.pdf
- Qin J. and R. Lu, (2008): Measurement of the optical properties of fruits and vegetables using spatially resolved hyperspectral diffuse reflectance imaging technique. *Postharvest Biology and Technology*, 49(3), p.355–365. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.010>
- Wilson B.C. and S.L. Jacques, (1990): Optical reflectance and transmittance of tissues: principles and applications. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 26(12), p.2186–2199. <http://doi.org/10.1109/3.64355>
- Zsom T., V. Zsom-Muha, D. Dénes, G. Hitka, L. Nguyen and J. Felföldi, (2014): Non-destructive postharvest quality monitoring of different pear and sweet pepper cultivars. *ACTA ALIMENTARIA*, 43(Suppl 1), p.206–214.

10. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Impakt faktoros folyóiratcikk

L D Dénes, V Zsom-Muha, L Baranyai, J Felföldi
Modelling of apple slice moisture content by optical methods
ACTA ALIMENTARIA 41: pp. 39-51. (2012)

Szöllősi Dániel, **Dénes Lajos Dénes**, Dr. Firtha Ferenc, Kovács Zoltán, Dr. Fekete András
Comparison of six multiclass classifiers by the use of different classification performance indicators
JOURNAL OF CHEMOMETRICS 26:(3-4) pp. 76-84. (2012)

Zsom T, Zsom-Muha V, **Dénes D**, Hitka G, Nguyen L, Felföldi J
Non-destructive postharvest quality monitoring of different pear and sweet pepper cultivars
ACTA ALIMENTARIA 43: pp. 206-214. (2014)

Nem impakt faktoros idegen nyelvű folyóiratcikk

D L Dénes, V Parrag, J Felföldi, L Baranyai
Influence of parameters of drying on laser induced diffuse reflectance of banana discs
JOURNAL OF FOOD PHYSICS XXVI: pp. 11-16. (2013)

E Várvölgyi, **L D Dénes**, J Soós, L Baranyai, Z Kovács, J Felföldi
Monitoring the roasting process of Arabica coffee by vision system, NIR and electronic tongue methods
HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING 25: pp. 46-50. (2013)

Konferencia kiadványban megjelent teljes terjedelmű közlemény idegen nyelven

L D Denes, E Várvölgyi, L Baranyai, J Soós, G Szabó, J Felföldi
Modelling diffuse reflection profiles of apple by Monte Carlo simulation and nonlinear curve fitting
In: Magó László, Kurják Zoltán, Szabó István (szerk.)
Synergy 2013 - CD of Full Papers: 3rd International Conference of CIGR Hungarian National Committee and Szent István University, Faculty of Mechanical Engineering & 36th R&D Conference of Hungarian Academy of Sciences, Committee of Agricultural and Biosystem Engineering, "Engineering, Agriculture, Waste Management and Green Industry Innovation".
Konferencia helye, ideje: Gödöllő, Magyarország, 2013.10.13-2013.10.19. Gödöllő: SZIE Gépészmérnöki Kar, 2013. Paper P06-5-181.
(ISBN:978-963-269 359-0)

Lajos Dénes Dénes, László Baranyai, Evelin Várvölgyi, László Lovas, Gábor Szabó, József Felföldi
Monitoring the quality changes of potato during storage by means of diffuse reflection method
In: Dalmadi I, Engelhardt T, Bogó-Tóth Zs, Baranyai L, Bús-Pap J, Mohácsi-Farkas Cs (szerk.)
Food Science Conference 2013 - With research for the success of Darányi Program: Book of proceedings. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2013.11.07-2013.11.08.
Budapest: Budapesti Corvinus Egyetem, Élelmiszertudományi Kar, 2013. pp. 109-112.
(ISBN:978-963-503-550-2)

L Baranyai, **L D Dénes**, G Papucsek, J Felföldi
Monitoring color development of pepper (*Capsicum annuum*) during storage
In: Magó László, Kurják Zoltán, Szabó István (szerk.)
CD of Full Papers, Synergy 2011 – II. International Conference in Agricultural Engineering of the CIGR Hungarian National Committee, the Faculty of Mechanical Engineering of the Szent István University, and the Agricultural Engineering Board of the Hungarian Academy of Sciences, “Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry”.
Konferencia helye, ideje: Gödöllő, Magyarország, 2011.10.09-2011.10.15. Gödöllő: SZIE Gépészmérnöki Kar, 2011. Paper o7-139:1-4. 4 p.
(ISBN:978-963-269-250-0)

Tamás Zsom, Viktória Zsom- Muha, **Dénes Lajos Dénes**, Géza Hitka, József Felföldi
Monitoring of postharvest quality changes of Bosc Kobak and Conference pear cultivars by novel nondestructive methods
In: Dalmadi I, Engelhardt T, Bogó-Tóth Zs, Baranyai L, Bús-Pap J, Mohácsi-Farkas Cs (szerk.)
Food Science Conference 2013 - With research for the success of Darányi Program: Book of proceedings. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2013.11.07-2013.11.08.
Budapest: Budapesti Corvinus Egyetem, Élelmiszertudományi Kar, 2013. pp. 360-363.
(ISBN:978-963-503-550-2)

L D Dénes, L Baranyai, V Zsom-Muha, T Zsom, J Felföldi
Evaluation of color changes on banana surface using spectrophotometers and machine vision system
In: Monika Božiková, Zuzana Hlavacová, Peter Hlavác (szerk.)
Applications of Physical Research in Engineering: Scientific Monograph Part 2.. Konferencia helye, ideje: Nyitra, Szlovákia, 2011 Nyitra: Slovak University of Agriculture, Faculty of European Studies and Regional Development, 2012. pp. 91-104.
(ISBN:978-80-552-0930-2)

. E Várvölgyi, **L D Dénes**, J Soós, L Baranyai, Z Kovács, J Felföldi
Monitoring the roasting process of arabica coffee by vision system, NIR and electronic tongue methods
In: Magó László, Kurják Zoltán, Szabó István (szerk.)
Synergy 2013 - CD of Full Papers: 3rd International Conference of CIGR Hungarian National Committee and Szent István University, Faculty of Mechanical Engineering & 36th R&D Conference of Hungarian Academy of Sciences, Committee of Agricultural and Biosystem Engineering, “Engineering, Agriculture, Waste Management and Green Industry Innovation”.
Konferencia helye, ideje: Gödöllő, Magyarország, 2013.10.13-2013.10.19. Gödöllő: SZIE Gépészmérnöki Kar, 2013. Paper N06-2-136.
(ISBN:978-963-269 359-0)

Evelin Várvölgyi, Tobias Werum, **Lajos Dénes Dénes**, Zoltán Kovács, Gábor Szabó, József Felföldi, Günter Esper
Comparison of the discrimination power of the electronic tongue, near infrared spectroscopy and sensory analysis regarding the adulterant barley in robusta coffee
In: International Scientific-Practical Conference "Food Technologies & Health-2013" (2013) (Plovdiv)
Proceedings Book of International Scientific-Practical Conference "Food, Technologies & Health-2013": Food, Technologies & Health. Konferencia helye, ideje: Plovdiv, Bulgária, 2013.11.07-2013.11.08. Plovdiv: UFT Academic Publishing House, 2013. pp. 250-255.
(ISBN:978-954-24-0229-9)

Evelin Várvölgyi, **Lajos Dénes Dénes**, János Soós, Gábor Szabó, József Felföldi, Zoltán Kovács
Identification and quantification of barley as adulterant in ground roasted coffee by vision system
and sensory analysis

In: -

International Scientific-Practical Conference "Food, Technologies & Health", 2014 Proceedings
Book. Konferencia helye, ideje: Plovdiv, Bulgária, 2014.11.13 Bulgaria: UFT Academic
Publishing House, 2014. pp. 204-209.

Evelin Várvölgyi, **Lajos Dénes Dénes**, János Soós, Zoltán Kovács, László Baranyai, Gábor
Szabó, József Felföldi

Fraudulent barley detection in two different types of Robusta coffee by optical method

In: - (szerk.)

International Conference of Agricultural Engineering - AgEng 2014 Zurich. Konferencia helye,
ideje: Zürich, Svájc, 2014.07.06-2014.07.10. [s. 1.]: European Society of Agricultural Engineers,
2014. Paper C0343. 7 p.

(ISBN:978-0-9930236-0-6)

Jozsef Felföldi, Viktoria Zsom-muha, **Denes Denes Lajos**, Gitta Ficzek, Magdolna Tóth
IN-VIVO MEASUREMENT OF APPLE RIPENESS

In: - (szerk.)

International Conference of Agricultural Engineering - AgEng 2014 Zurich. Konferencia helye,
ideje: Zürich, Svájc, 2014.07.06-2014.07.10. [s. 1.]: European Society of Agricultural Engineers,
2014. Paper P0607.

(ISBN:978-0-9930236-0-6)

L Baranyai, **L D Dénes**, G Papucsek, J Felföldi

Evaluation of Color Development Pattern on Pepper (*Capsicum annuum*) surface

In: Chinese-European Cooperation For a Long-term Sustainability. Konferencia helye, ideje:
Budapest, Magyarország, 2011.11.10-2011.11.11. Paper Paper S3/1..

Laszlo Baranyai, **Denes Lajos Denes**, Jozsef Felfoldi

Analysis of Hue Spectra During Storage of Pepper (*Capsicum Annuum*)

In: CIGR-AgEng, International Conference on Agriculturl Engineering. Konferencia helye,
ideje: Valencia, Spanyolország, 2012.07.08-2012.07.12.pp. 1-5.

Dénes Lajos Dénes, Viktória Zsom-Muha, László Baranyai, József Felföldi

Laser application to follow the drying process of apple tissue

In: 10th International Conference on Food Physics. Konferencia helye, ideje: Budapest,
Magyarország, 2012.06.04-2012.06.05.pp. 25-26.

Tamas Zsom, Viktoria Zsom-Muha, **Denes Lajos Denes**, Hella Ecseki, Jozsef Felföldi
Novel Methods for the Monitoring of Postharvest Changes of Different Pear Cultivars

In: CIGR-AgEng, International Conference on Agriculturl Engineering. Konferencia helye,
ideje: Valencia, Spanyolország, 2012.07.08-2012.07.12. Paper P2069.

Konferencia kiadványban megjelent teljes terjedelmű közlemény magyar nyelven

Dénes Lajos Dénes, Zsomné Muha Viktória, Zsom Tamás, Kovács Zoltán, Baranyai László, Felföldi József

Körte (Bosc kobak) minőségváltozásának jellemzése roncsolásmentes fizikai módszerekkel

In: Bacskainé Bódi Éva, Fekete István, Kovács Béla (szerk.)

Fiatal kutatók az egészséges ételmiszerért: Tudományos ülés. 286 p.

Konferencia helye, ideje: Debrecen, Magyarország, 2013.02.19 Debrecen: Debreceni Egyetem Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma, 2013. pp. 3-9.

(ISBN:978-963-473-601-1)

DE tudományos képzési műhelyeinek támogatása TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0024

Konferencia kiadványban megjelent összefoglaló magyar nyelven

Dénes Lajos Dénes, Baranyai László, Felföldi József

Hideg hatása a banán (*Musa cavendishii*) színének változására tárolás során

In: IX. Alkalmazott Informatika Konferencia 2011. Konferencia helye, ideje: Kaposvár, Magyarország, 2011.02.25p.

Dénes Lajos Dénes, Zsomné Muha Viktória, Baranyai László

Almaszeletek szárítási folyamatának modellezése

In: Kihívások és megoldások a XXI. század élelmiszertudományában. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.01.18-2012.01.19.p. na.