



Színképelemzésen alapuló módszertan a búzafajták raktári elkülönítésére és keveredésének meghatározására

NYÁRI LADISLAV^{1*}, DÓKA OTTÓ², BEDE-FAZEKAS ÁKOS³, TESCHNER GERGELY¹, KOVÁCS ATTILA¹

¹Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar

Bioműszaki és Precíziós Technológiai Tanszék, Mosonmagyaróvár

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3617-6211>

Email: ladislav.nyari@sanagro.sk

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7268-8700>

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4383-2929>

²Széchenyi István Egyetem, Informatikai és Villamosmérnöki Kar, Matematika és Fizika Tanszék, Győr

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6469-0384>

³Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földrajz- és Földtudományi Intézet

Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék, Budapest

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2905-338X>

*Corresponding author/Levelező szerző

Received/Érkezett: 2025.11.10.

Revised/Átdolgozva: 2026.03.20.

Accepted/Elfogadva: 2026.04.22.

Published/Megjelent: 2026.06.29.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az élelmiszeriparban, különösen a gabonafeldolgozás területén, az élelmiszerek nyomonkövethetősége kiemelkedő jelentőséggel bír a minőségbiztosítás és az élelmiszerbiztonság szempontjából. A gabonatételek tárolása során az egyik legnagyobb kihívást a tételek hatékony elkülönítése és pontos lokalizálása jelenti. Az optikai módszerek, mint például a színképelemzés és a közeli infravörös (NIR) spektroszkópia, ígéretes megoldásokat nyújtanak e problémák kezelésére. Ebben a tanulmányban a CIELAB színrendszer alkalmazásával vizsgáltuk a gabonatételek tárolás közbeni keveredésének mértékét és a színbeli eltérések változását. A kutatás célja annak meghatározása volt, hogy a színjellelmezők kombinált mutatójaként a HUE × C* mutató alapján milyen pontossággal lehet számszerűsíteni az egyes keveredési arányokat. Az általunk alkalmazott módszer lehetővé tette a színbeli változások objektív értékelését és a keveredések arányának meghatározását. Kísérleteink során beraktározott búzamintáknál azt vizsgáltuk, hogy hol helyezkedik el az a pont, ahol már nincs keveredés az egyes tételek között. A színméréseket D65 fényforrással felszerelt reflexiós koloriméter segítségével végeztük és minden mintát tíz ismétlésben vizsgáltunk. Az eredmények alátámasztották, hogy adott távolságra a gabonatételek keveredése már nem kimutatható. Az eredmények értékes információkat nyújtanak a gabonatételek lokalizációjához és a keveredési arány pontos szabályozásához síkraktárakban történő tárolás esetén.

Kulcsszavak: gabonaminőség, gabonátárolás, CIELAB színrendszer, optikai módszerek, nyomonkövethetőség



1. BEVEZETÉS

Az ellenőrzött élelmiszer előállítás, ezen belül gabonák feldolgozása az utóbbi évtizedekben egyre jelentősebb szerepet kap a minőségi élelmiszertermelésben. Azonban az élelmiszer alapanyagok (a termőföldtől az élelmiszer előállító üzemig) nyomon követése korlátozott mértékben megoldott. A kritikus elem a teljes „szántóföldtől az asztalig” („from-field-to-fork”) történő nyomonkövethetőség. Az élelmiszerbiztonság és azon belül az élelmiszerek nyomonkövethetősége sarkalatos pontját képezi az egyre szigorúbbá váló Európai Unió élelmiszerszabályozásnak is. Az ellátási lánc minden szereplője számára napjainkban már több rendelet (178/2002/EK, 852/2004/EK) és számos független agrár- és élelmiszeripari szabvány/rendszer (EUREPGAP, HACCP, ISO 22000, ISO 22005 stb.) határozza meg az élelmiszer-biztonságra, higiéniára és nyomon követhetőségre vonatkozó minimális előírásokat.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az élelmiszer alapanyagok teljes körű nyomonkövetése jelenleg sok esetben nem kielégítő, amely kihívást jelent az ágazat szereplői számára. A gabonák minőségének értékelésére számos módszer áll rendelkezésre, beleértve a mikrobiológiai, kémiai és optikai eljárásokat (Riba et al., 2008). Az optikai technológiák három fő csoportba sorolhatók: a spektrofotometriás módszerek, a gépi látás és a színmérés. A spektrofotometriás eljárások a látható és az infravörös spektrumok elemzésére épülnek, és kiemelkedően hatékony eszközök a gabonák összetételének és állapotának vizsgálatában. A hiperspektrális képalkotás és a kemometria kombinációja lehetővé teszi a gabonaszemek pontos osztályozását és a szennyeződések detektálását. Berman és munkatársai (2007) az infravörös spektroszkópia alkalmazásával 95 %-os pontosságot ért el ausztrál búzafajták minősítésében. Philippe és munkatársai (2018) a durum búza spektrális és morfológiai tulajdonságainak kombinált vizsgálatával 96,5 %-os és 88,3 %-os osztályozási pontosságot ért el. A VIS-NIR spektroszkópia (látható és közeli infravörös tartomány) és a gépi látás együttes alkalmazása lehetővé tette a DON (deoxinivalenol) szennyezett búzaszemek azonosítását, amely során a szennyeződések elkülönítésére 91,36 %-os pontossággal dolgoztak ki modellt (He et al., 2021). A gépi látás és a képfeldolgozási technikák alkalmazása is egyre elterjedtebb a gabonaminőség értékelésében. Zayas és munkatársai (1989), valamint Majumdar és Jayas (2000) morfológiai paraméterek alapján különböző gabonafajtákat azonosítottak, akár 98-100 %-os pontossággal. Vithu és Moses (2016) kimutatták, hogy a gépi látás hatékonyan kiválthatja a hagyományos, emberi megfigyelésen alapuló módszereket. Kar és munkatársai (2020) egy automatizált rendszert fejlesztett ki, amely képfeldolgozással azonosítja és kategorizálja a gabonaféléket, ezzel csökkentve a manuális vizsgálatok szükségességét. A mesterséges intelligencia alapú megközelítések szintén egyre nagyobb szerepet kapnak. Ebrahim (2014) gépi látással és mesterséges neurális hálózatokkal dolgozott ki modellt a búza tisztaságának ellenőrzésére, amely 96,25 %-os pontosságot ért el. A megközelítés a helyi fáziskvantálási leírók, valamint a szín- és formajellemzők integrációján alapul, mely meghaladja a hagyományos lokális leírók teljesítményét. Az SVM-RBF osztályozó gyors, pontos osztályozást tesz lehetővé, míg a kontrollált megvilágítás és precíz felvételi módszerek hozzájárulnak a megbízható minőségértékeléshez. A tárolási folyamatok során kiemelten fontos a penészesedés és a mikotoxin-szennyeződés kockázatának csökkentése.

A *Fusarium* fertőzés és az általa termelt mikotoxinok nemcsak a gabona minőségét rontják, hanem komoly élelmiszerbiztonsági kockázatot is jelentenek (Yi et al., 2022; Manandhar et al., 2018). Ennek ellenőrzésére egy költséghatékony megoldást jelenthet a CIELAB színmérő rendszer



használata, amely lehetővé teszi a különböző minőségi paraméterekkel rendelkező gabonatételek lokalizálását és a szennyezett tételek azonosítását. A tárolási időszak során a gabona minőség- és mennyiségvesztés nélküli megőrzése kulcsfontosságú (Shepherd, 1993). A tárolás leggyakrabban azért történik, mert a termék fogyasztási helye más, mint az előállítás helye, a termék szezonális, de a fogyasztás egész évben zajlik, és a további feldolgozást többek között más helyen végzik (Jayas, 2012). A tárolási rendszerek nem megfelelő kialakítása jelentős betakarítás utáni veszteségeket eredményezhet, rontva az ágazat általános termelékenységét (Nadimi et al., 2023). A gabonák eltarthatóságát befolyásoló legfontosabb tényezők közé tartozik a hőmérséklet, a páratartalom és a tárolási idő, amelyek fizikai és kémiai változásokat idézhetnek elő, mint például elszíneződést, lipioxidációt és fehérjedenaturációt (Hu et al., 2022; Qiang et al., 2024). A gabona tárolása olyan körülményeket igényel, amelyek megőrzik vagy javítják annak minőségét az aratást követően. Ennek érdekében elengedhetetlen a rovarok jelenlétének és a nedvességtartalom folyamatos ellenőrzése, amely rovarölőszerek, füstölőszerek és módosított atmoszféra alkalmazásával biztosítható. A megfelelő nedvességtartalom fenntartása és a szárítási technológiák optimalizálása szintén kulcsfontosságú. Az eltérő gabonafajták, például árpa, rizs és búza, specifikus tárolási feltételeket igényelnek a minőség megőrzése érdekében. A szállítás során a nyomonkövethetőség biztosítása elengedhetetlen, hogy az eltérő minőségű tételek elkülöníthetők legyenek (Brennan, 2017). Kísérleti eredmények igazolják, hogy bizonyos búzafajták eltérő mértékben reagálnak a tárolási körülményekre. Navnath és munkatársai (2023) megállapították, hogy az AAC Stronghold fajta ellenállóbb a károsodással szemben, míg az AAC Spitfire és CDC Defy fajta jelentősebb romlást mutattak. Nithya és munkatársai (2011) kutatásai alapján a magasabb nedvességtartalmú és magas hőmérsékleten tárolt durum búza hajlamosabb a penészesedésre és toxintermelésre. A gabonák szezonális betakarítása és folyamatos feldolgozása közötti konfliktus megoldása érdekében szükség van hatékony tárolási stratégiákra (Tong et al., 2019). Az optimális tárolási feltételek biztosítása nemcsak a termékminőség fenntartását, hanem a feldolgozási tulajdonságok megőrzését is szolgálja. Az egyes minőségi paraméterek nyomonkövetése és az automatizált vizsgálati rendszerek alkalmazása hozzájárulhat a tárolási stabilitás növeléséhez, csökkentve ezzel a gazdasági veszteségeket és az élelmiszerbiztonsági kockázatokat (Hui et al., 2025).

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 Kísérleti helyszín

Kísérleteinket Közép-Európa középső részén található Szlovákia területén (16°–23° keleti hosszúság, 47°–50° északi szélesség) végeztük, melynek területe 49035 km² (Fendeková et al., 2018). A délnyugati régióban, az alföld területén, amely a Kis-Kárpátok hátsó oldalától délre helyezkedik el, az éves csapadékmennyiség 500-650 mm között mozog (Pokorná et al., 2013; Skalský et al., 2024). A kísérletbe bevont parcellákon az éves csapadékmennyiség 2021-ben 535 mm, 2022-ben 472 mm és a 2023-as évben 744 mm volt. Az alföldek a Pannon-medence részét képezik (Kozak et al., 2013). A dél-szlovákiai Duna menti szikes mocsarak és sztyeppék a közép-európai szikes talajok legészakibb határán helyezkednek el (František, 1976). A mezőgazdasági földterületek több mint kétharmadát nagy ráfordítást igénylő őszi búza, kukorica, repce, árpa, napraforgó, cukorrépa és egyéb növények termesztésére használják (Skalský et al., 2024). A délnyugati síkvidékein hatalmas intenzíven művelt termőföldek találhatóak (Hološková et al., 2023). A 2021, 2022, 2023-as években búzafajták is ilyen egyforma szikes talajadottságú területen lettek elvetve. A különböző színű búzafajtákat négy elkülönített mezőgazdasági parcellán termesztettük. A nagy pontosságú kalibrációs vizsgálatok



elvégzéséhez jól elkülönülő színű búzafajtákat használtunk. Ezek között volt „hagyományos” köztermesztésben lévő, világosbarna szemszínű búzafajta, egy sárga színű, illetve két antociánban gazdag búzafajta. A hagyományos búzafajtákban csak nagyon kevés antocianinvegyület található (Abdel et al., 1999; Abdel et al., 2003). Az antocianinok a búza aleuron vagy maghéj részében halmozódnak fel és ezek biztosítják a szem kék, lila és vörös színét (Ficco et al., 2014). Az antociánban gazdag búzában delfinidin-3-glükózid is található meg (El-Sayed et al., 2006).

3.2 Kísérleti anyag (búzafajták)

A vizsgálatok során négy eltérő szemszínű őszi búzafajtát vontunk be: az IS-18W1161 és a Karkulka antociánban gazdag, lila szemszínű fajták; a Bonavita sárga szemszínű fajta; valamint a Genius világosbarna szemű, hagyományos fajta, amely kontrollként szolgált.

A kísérleti búzafajták rövidítései és vizsgálati éveik a következők:

- GENIUS (K): világosbarna szemszínű; 2021, 2022 és 2023.
- KARKULKA (MK): antociánban gazdag lila szemszínű; 2021 és 2023.
- BONAVIDA I (MB): sárga szemszínű; 2022.
- IS-18W1161 (AG): antociánban gazdag lila szemszínű; 2021, 2022 és 2023.
- BONAVIDA II (CS): sárga szemszínű; 2021, 2022 és 2023.

Megjegyzés: a BONAVIDA fajta két különböző termőhelyen termesztve került vizsgálatba a 2022-es évben, ezért két eltérő rövidítést (MB és CS) kapott.

3.3 Mintavétel és minta előkészítése

- A négy eltérő színű búzatételből ellenőrzött keverékmintákat készítettünk a színmérési kísérletekhez. Minden lehetséges fajtakombináció (két különböző fajta párosítása) esetében állítottunk elő kétkomponensű keverékeket.
- 2021-ben és 2022-ben a 4 fajta összes lehetséges párkombinációját (6-6 párt), míg 2023-ban 5 fajtakombinációt vizsgáltunk.
- Az egyes fajtakombinációkhoz tartozó keverési arányokat 0 % és 100 % között, 10 %-os lépésként állítottuk be. Ezek alapján 11-féle keverési arányt mértünk egy fajtapárra. Évente mintegy 60 különböző összetételű mintát vizsgáltunk meg.
- A keverékek összeállítása előtt a kiinduló tételekből vett mintákat laboratóriumi körülmények között megtisztítottuk. Fajtánként 100 gramm szemtermést mértünk ki analitikai mérlegen, majd osztályozó szitarázóval megtisztítottuk a magokat a törmelékektől és idegen anyagoktól.
- A tisztításhoz kalibrált gabonaszitákat (1,0 mm nyílású körrosta és 3,5 mm hosszúságú nyílású rosta), valamint egy laboratóriumi szitarázógépet (SWING 160) alkalmaztunk. A szitálás 5 percig tartott 140 rázás/perc frekvenciával. A folyamat során az 1,0 mm alatti frakciót (finom por és törmelék), valamint a 3,5 mm-es rosta felett fennmaradó idegen magvakat és törtszemeket eltávolítottuk.
- A szitálás után csak az ép és tiszta búzaszemeket használtuk fel a keverési mintákhoz (a 2,0 mm-nél nagyobb szemű frakcióból) biztosítva a homogén mintaminőséget. A megtisztított mintákból pontos tömegméréssel kevertük ki a kívánt arányú kétkomponensű keverékeket.



3.4 Színmérés

- Minden előkészített keverékmintából 200 darab búzaszemlet vettünk ki a színméréshez és egy rétegben helyeztük a búzaszemeket a műszer mintakamrájába. Ez a mintaméret biztosította, hogy a minta kellően reprezentálja a keverék színjellemzőit.
- A méréseket egy HunterLab ColorFlex (45° megvilágítási és 0° megfigyelési geometria) reflexiós koloriméterrel végeztük laboratóriumi körülmények között. Minden mérési sorozat előtt a készüléket fehér és fekete etalonfelületekkel kalibráltuk.
- A színjellemzők rögzítéséhez a szabványos CIELAB színrendszert alkalmaztuk. A műszer minden mintánál mérte az L* (világosság), a* (vörös-zöld) és b* (kék-sárga) színtengely értékeit. Ezekből kiszámítottuk az összes színkülönbség értékét (ΔE^*), valamint a színárnyalatot (HUE) és a színtelítettséget (C*), amely paramétereket az elemzéshez használtunk fel.
- A keverékminták színmérését tíz ismétlésben végeztük. A tíz ismétlésből számított átlag értékét vettük alapul, ami csökkentette a véletlenszerű mérési hibák hatását és növelte a színadatok megbízhatóságát.

3.5 Statisztikai elemzés

- Kétszakaszos elemzést végeztünk annak érdekében, hogy egyrészt kiválasszuk a legmegfelelőbb színváltozót a kilenc jelölt színváltozó közül, másrészt megvizsgáljuk, hogy az első lépésben kiválasztott színváltozó alapján megkülönböztethetők-e a különböző búzafajta homogén és heterogén keverékreszei.
- Az első lépésben korrelációanalízist hajtottunk végre. Meghatároztuk a Pearson-féle korrelációs együtthatók abszolút értékét (Pearson, 1895) a kilenc jelölt színváltozó és a két búzafajta aránya között az összes 17 gabonakeverékben. Az egyes színváltozók esetében kiszámítottuk a 17 korrelációs együttható átlagát, maximumát és szórását. Az eredmények alapján (részletes kifejtés a következő szakaszban) a HUE \times C* színváltozó egyértelműen kiemelkedett a vizsgált változók közül, mivel a legmagasabb átlagos és maximális korrelációs együtthatót, valamint a legkisebb szórást mutatta. Ennek alapján a második lépésben a HUE \times C* színváltozót használtuk.
- A 17 gabonakeverék mindegyikére lineáris modellt kalibráltunk, ahol a HUE \times C* független változóként, míg a két búzafajta aránya válaszváltozóként szerepelt. A kalibrációs adathalmazt a modell betanítására használtuk, majd a kalibrált modell segítségével előrejeleztük a kétfajta búza arányát az értékelési adathalmazon mért HUE \times C* színváltozó alapján. A modell teljesítményét mérőszámokkal (determinációs együttható – R^2 , gyökátlagos négyzetes hiba – RMSE) értékeltük mind a kalibrációs, mind az értékelési adathalmazon. Ezen túlmenően a megfigyelt és a becsült fajtaarányokat binarizáltuk (azaz homogén vagy heterogén keverékként osztályoztuk), majd a modell által generált zavaró mátrix alapján további teljesítménymutatókat számítottunk ki: a valódi pozitív arányt (TPR) és a precizitást.
- A statisztikai elemzéseket és az ábrázolást az R statisztikai szoftver (R Core Team, 2024) és annak 'caret' (Kuhn, 2008), valamint 'ggplot2' (Wickham, 2016) csomagjai segítségével végeztük el.



4. EREDMÉNYEK

4.1 A raktári keveredési zónák vizsgálata spektrofotometriás módszerrel a 2021–2023 közötti kísérleti évek alapján

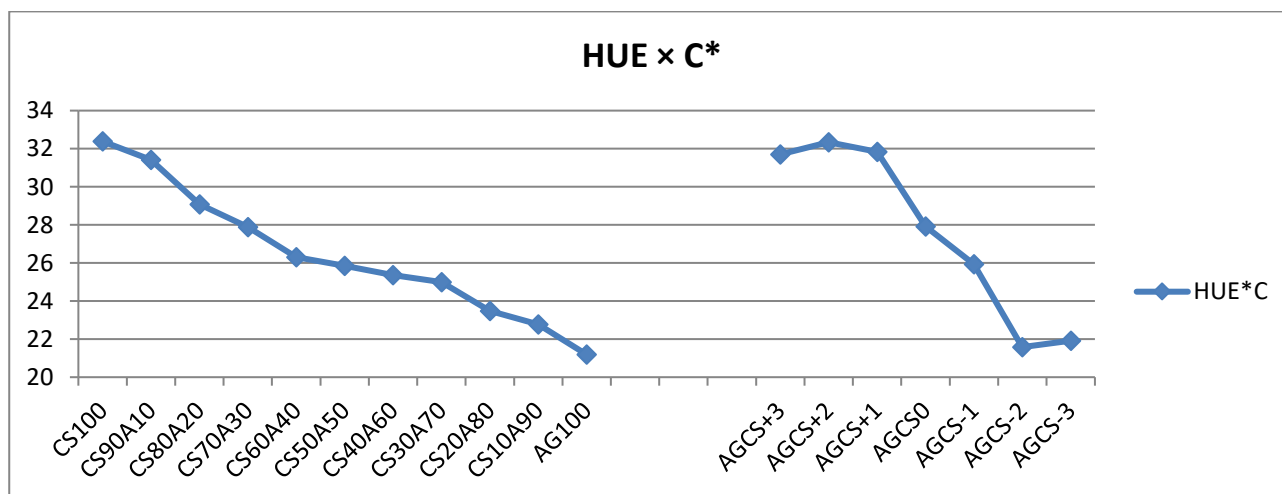
A kutatás célja annak vizsgálata volt, hogy a spektrofotometriás úton meghatározott HUE × C* mutató segítségével mennyire pontosan lehet számszerűsíteni a különböző búzafajták keveredési arányát raktári körülmények között. A vizsgálatok alapját a korábban meghatározott kalibrációs regressziós egyenesek képezték, amelyeket standard keverési minták alapján hoztunk létre. A lineáris regressziós modellek értékeit a vizsgált években az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: A HUE × C* alapú lineáris regressziós modellek statisztikai jellemzői (2021–2023)

Év	R ² tartomány	R ² átlag	RMSE (%)
2021	0,808–0,980	0,93	2,4
2022	0,885–0,987	0,94	2,0
2023	0,940–0,980	0,96	1,6

4.2 2021 – A keveredési modell kísérleti vizsgálata

A 2021-es kísérleti évben négy eltérő színárnyalatú búzafajtát (K, MK, AG, CS) öntöttünk le egymás mellé úgy, hogy azok fizikai kontaktusba kerültek, ezáltal természetes keveredési zónák jöttek létre. A mintavételezést gabona mintavevő szondával (stekkerrel) végeztük az érintkezési zónák középpontjától (0 pont) kiindulva 30 cm-es lépésekben, mindkét irányban és több rétegben. A spektrális adatok alapján pontonkénti keveredési arányok a kalibrációs egyenesek segítségével pontosan meghatározhatóak voltak. A HUE × C* mutató egyértelmű és jól követhető kapcsolatot mutatott a búzafajták keveredési arányával. A módszer megbízhatóságát az is alátámasztotta, hogy nemcsak a keveredés mértéke, hanem annak térbeli kiterjedése is pontosan meghatározhatóvá vált.

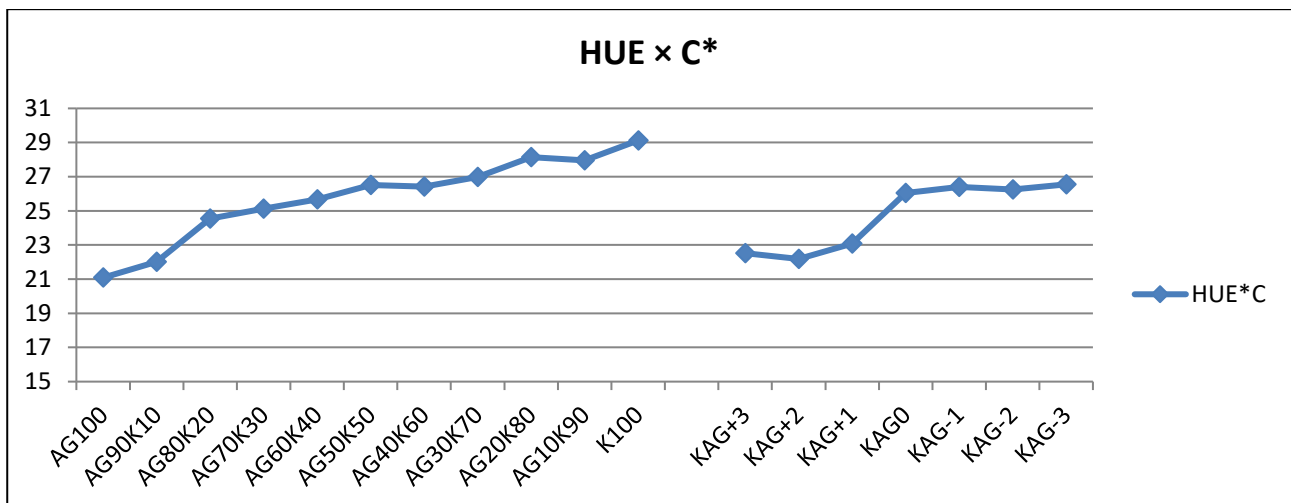


1. ábra: A CS és az AG búzaminták keverékei

Az 1. ábra szerint az első szakasz CS100 és AG100 különböző arányú keverékeinek spektrális jellemzőit mutatja. A keverési arány 10 %-os lépésekben változik (pl. CS90AG10, CS80AG20 stb.), és a HUE × C* értékek csökkenő trendet mutatnak a CS100-tól az AG100 felé haladva.

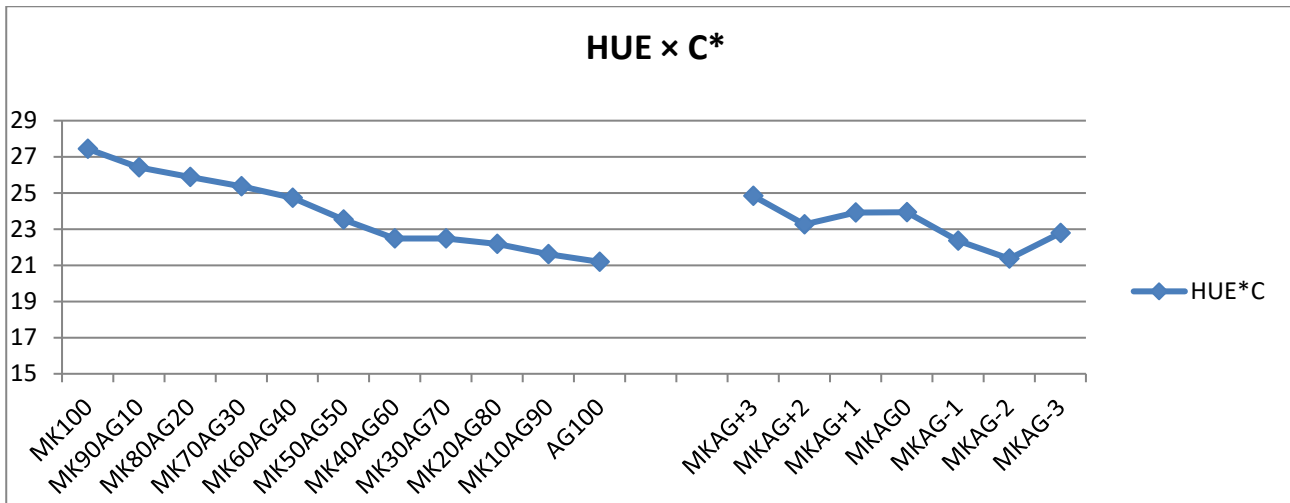


Ez a tendencia azt jelzi, hogy a két búzafajta spektrális jellemzői eltérnek, és a változás egyértelműen nyomkövethető a keveredési arány függvényében. Az 1. ábránál a jobb oldali szakasz (Raktári keveredés vizsgálata – AGCS-jelölés). A jobb oldali adatok a raktárban lévő búzahalmazok keveredésének spektrális változásait szemléltetik. Az AGCS0 a keveredési zónát jelöli, míg AGCS-1, AGCS-2, AGCS-3 az egyik gabonahalmaz felé, AGCS+1, AGCS+2, AGCS+3 pedig a másik irányba történő távolodást mutatják. Az ábra ezen szakasza azt bizonyítja, hogy a HUE × C* értékek a keveredési zóna közepén jelentősen változnak, majd a halmazok szélein stabilizálódnak. Az adatokból megállapítható, hogy a keveredés hatása egy bizonyos távolságon (kb. 120 cm) belül még kimutatható, azon túl pedig a gabonahalmazok spektrálisan elkülöníthetők. A trendvonal éles csökkenést mutat a keveredési zónán belül, majd az egyes búzahalmazoknál stabilizálódik, ami azt igazolja, hogy a két búzafajta között egy jól körülhatárolható átmeneti zóna található a raktárban.



2. ábra: Az AG és a K búzaminták keverékei

Az AG és K búzafajták keveredését bemutató 2. ábra szintén két részből áll. A bal oldali szakaszban a kalibrációs keverékek eredményei láthatók, ahol a HUE × C* értékek egyenletes növekedést mutattak az AG100-tól a K100 felé haladva. Ez a trend jól érzékelteti a két fajta közötti spektrális eltérést és megerősíti, hogy a kalibrációs görbe segítségével a keverési arányok pontosan meghatározhatók. A jobb oldali szakasz a raktári minták vizsgálatát ábrázolja: a keveredési zónában a görbe érezhető változásokat mutatott, majd a zóna szélein stabilizálódott. Ez arra utal, hogy a keveredés hatása a raktárban jól körülhatárolható, és kb. 120 cm távolság után a gabonahalmazok már homogénnek tekinthetők.

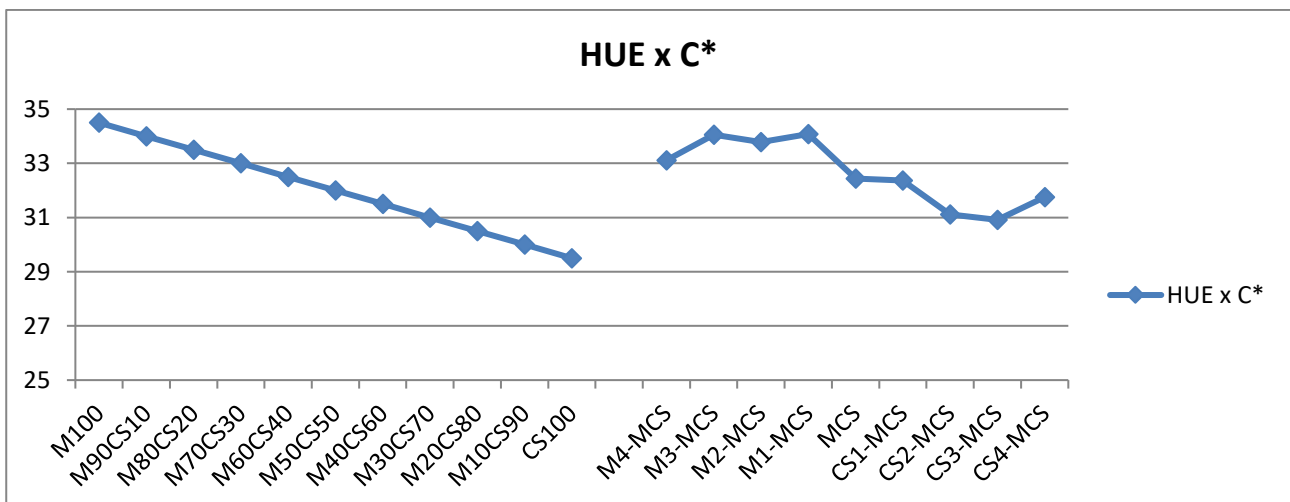


3. ábra: Az MK és az AG búzaminták keverékei

A 3. ábra az MK és AG antociános búzafajták keveredését mutatja. A kalibrációs sorban a HUE x C* értékek enyhe, de következetes csökkenést jeleztek, ami arra utal, hogy a két fajta között csak kismértékű színbeli eltérés áll fenn. Ennek ellenére a keverési arányok laboratóriumi körülmények között még modellezhetőek. A raktári adatokban a görbe már sokkal laposabb lefutást mutatott, a változások kevésbé voltak markánsak, így a keveredési zóna határai nehezebben voltak azonosíthatók. Ez arra világít rá, hogy a hasonló színprofilú fajták esetében a színeképelemzés korlátozottabb érzékenységgel rendelkezik és a gyakorlati elkülönítés bonyolultabb.

4.3 2022 – A keveredési modell kísérleti vizsgálata

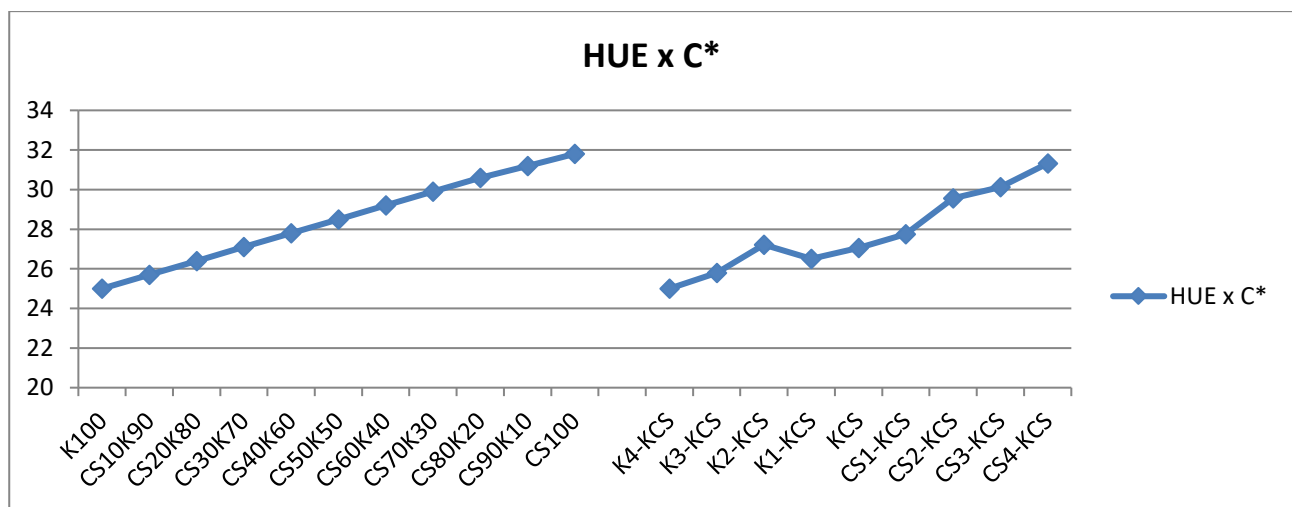
A 2022-es kísérletek során az AG, MB, CS és K fajták ismételten érintkeztek egymással, így a gabonák keveredése újra megfigyelhető volt. A kapott eredményeket a korábbi standard keverési minták grafikonjaival vetettük össze, és az összehasonlítás megerősítette, hogy a raktárban tárolt minták fajtánkénti összetétele spektrálisan pontosan meghatározható. A mérések alapján megállapítható volt, hogy a keveredés hatása nagyjából 120 cm-es távolságig mutatható ki, ezen túl a gabonahalmazok színeképi szempontból homogénnek tekinthetők.



4. ábra: M és a CS búzaminták keverékei

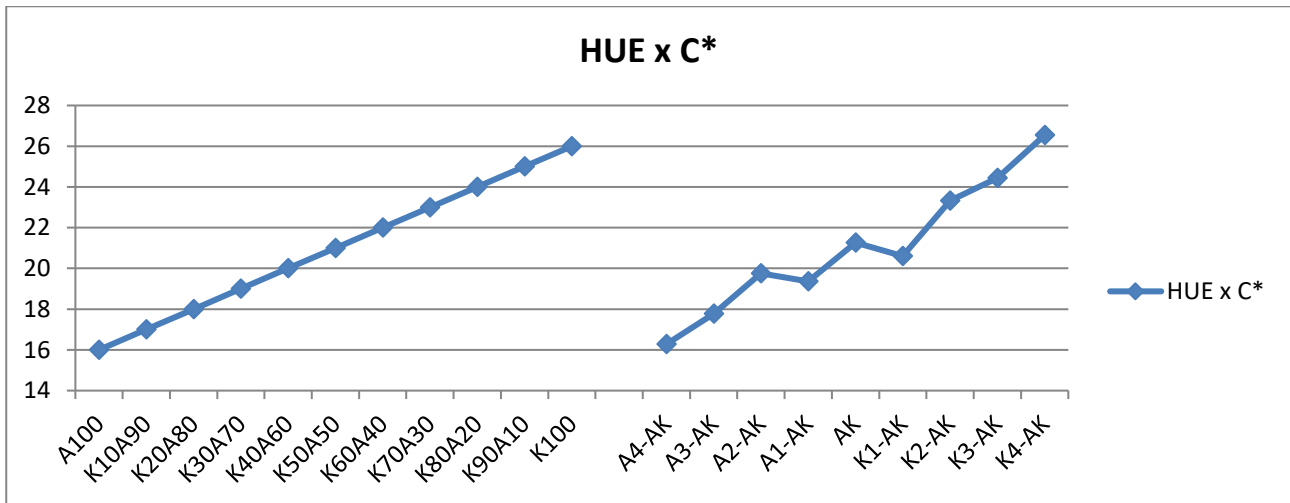


A 4. ábra a két sárga színű búzafajta (M és CS) keveredésének vizsgálatát szemlélteti. A kalibrációs sor eredményei alapján a $HUE \times C^*$ értékek mérsékelt, de folyamatos csökkenő tendenciát mutattak az M100-tól a CS100 felé haladva. Az eltérések nagyságrendje viszonylag csekély, ami a két fajta közeli spektrális tulajdonságaira utal. Ez azt jelzi, hogy bár a keveredési arányok színképelemzéssel elviekben meghatározhatók, az elkülönítés pontossága korlátozottabb, mint markánsabb színbeli különbségekkel rendelkező fajták esetében. A raktári mérések során kapott görbe lapos lefutása és a keveredési zóna határainak kevésbé éles jellege szintén a spektrális különbségek alacsony mértékét támasztja alá. Mindez arra utal, hogy a két búzahalmaz elkülönítése gyakorlati környezetben nehezített és a keveredés térbeli kiterjedése csak jelentősebb bizonytalanság mellett határozható meg.



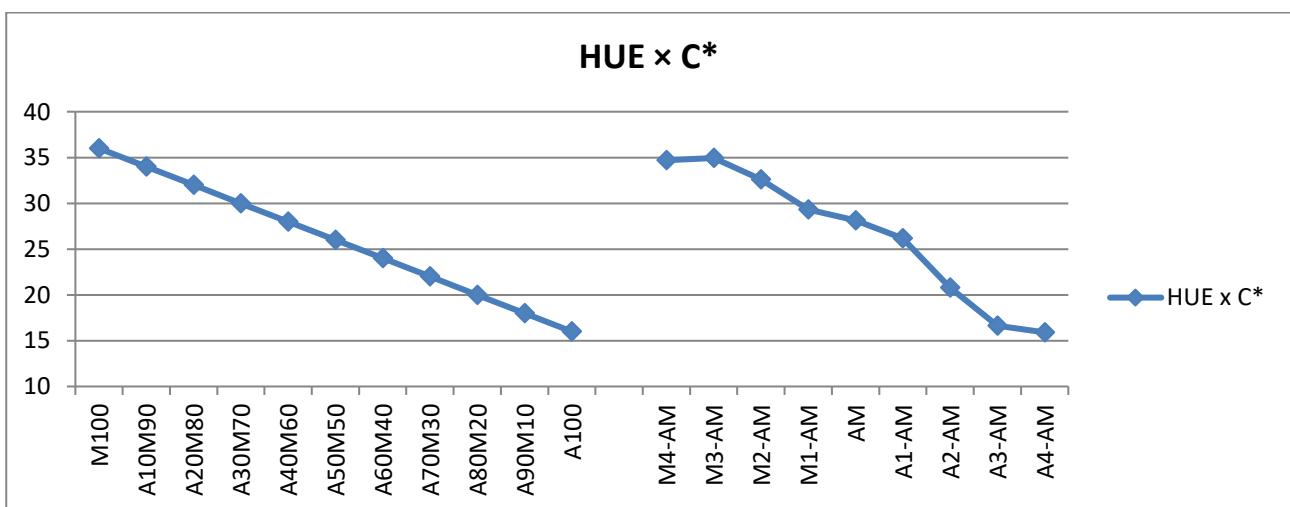
5. ábra: A K és a CS búzaminták keverékei

Az 5. ábra a hagyományos színű őszi búza (K) és a sárga színű búza (CS) keverését szemlélteti. A kalibrációs sorban a $HUE \times C^*$ értékek egyértelműen növekvő tendenciát mutattak a K100-tól a CS100 felé haladva, ami a két fajta markáns spektrális különbségét igazolja. Ez a folyamatos és jól követhető változás lehetővé teszi a keveredési arányok pontos meghatározását, illetve az ismeretlen minták összetételének visszakövetkeztetését, ami raktározási és minőségellenőrzési szempontból kiemelt jelentőséggel bír. A raktári vizsgálatok során kapott adatok szintén jól körülhatárolható átmeneti zónát jeleztek. A $HUE \times C^*$ értékek gyors változása a keveredési határ térbeli lokalizálhatóságát támasztja alá. A görbe stabilizálódása azt mutatja, hogy kb. 120 cm távolság után a gabonahalmazok spektrálisan homogének és egyértelműen elkülöníthetők.



6. ábra: Az A és a K búzaminták keverékei

A 6. ábra a hagyományos színű őszi búza (K) és az antociános búza (A) keveredésének vizsgálatát szemlélteti. A kalibrációs sorban a HUE \times C* értékek egyértelmű, lineárisan emelkedő tendenciát mutattak az A100-tól a K100 felé haladva, amely a két búzafajta markáns spektrális különbségét támasztja alá. Ez a tendencia megerősíti, hogy a színeképelemzés pontosan alkalmazható a keveredési arányok meghatározására, így az ismeretlen minták összetétele megbízhatóan visszakövethető. A raktári adatok szintén jól kirajzolódó átmeneti zónát jeleztek: az A dominanciájától (A4–A1) a K dominanciája felé (K1–K4) fokozatos változás figyelhető meg. A HUE \times C* értékek gyors változása a keveredési zónában egy élesen meghatározható határ meglétére utal, amely a gyakorlatban kb. 120 cm-en belül érzékelhető. A görbe végső stabilizálódása igazolja, hogy ezen a távolságon túl a gabonahalmazok spektrálisan homogének és egyértelműen elkülöníthetők.



7. ábra: Az M és az A búzaminták keverékei

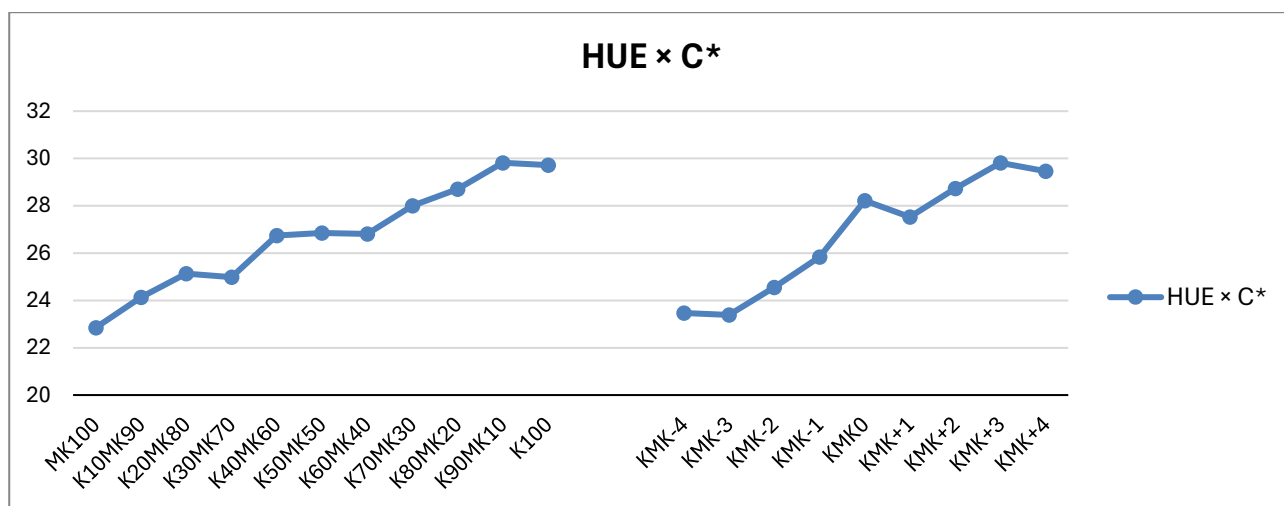
A 7. ábra a sárga búza (M) és az antociános búza (A) keveredésének vizsgálatát mutatja. A kalibrációs sorban a HUE \times C* értékek folyamatos, jól követhető csökkenést jeleztek az M100-tól az A100 felé, ami a kétfajta markáns spektrális eltérését igazolja. A raktári adatokban egyértelműen kirajzolódó



átmeneti zóna volt azonosítható: az M dominanciájától (M4–M1) az A dominanciája felé (A1–A4) a HUE × C* értékek éles változást mutattak. A keveredési határ így jól elkülöníthető, míg a görbe stabilizálódása jelzi, hogy kb. 90-120 cm távolságon túl a két gabonahalmaz spektrálisan homogénnek tekinthető.

4.4 2023 – A keveredési modell kísérlete

A 2023-as évben négy eltérő színárnyalatú búzafajta (K, MK, AG, CS) került vizsgálatra, azonos elrendezésben. A mintavételi és mérési eljárás nem változott. A keverékek (AGCS, MKCS, KCS, MKM, KAG) spektrumai mentén a 0-ás tengelytől való eltérés jól dokumentálható volt: a spektrális görbék bal és jobb oldali szakaszai jól tükrözték a fajtaösszetételben bekövetkezett változásokat. A mérések itt is igazolták, hogy 120 cm távolságon túli keveredés már nem érzékelhető, vagyis a különböző búzahalmazok spektrálisan élesen elkülönülnek.



8. ábra: Az MK és a K búzaminták keverékei

A 8. ábránál a kalibrációs sor egyértelműen növekvő trendet mutatott a HUE × C* értékekben az MK100-tól a K100 irányába, ami azt jelzi, hogy a két búzafajta spektrális jellemzői jól elkülönülnek. A raktári adatok vizsgálata során szintén jól kirajzolódott a keveredési zóna: a HUE × C* értékek a központi tartományban alacsonyabbak voltak, majd fokozatosan közelítettek a tiszta fajták spektrális értékeihez. Ez arra utal, hogy a keveredés térben jól követhető, és kb. 120 cm távolságon túl a két gabonahalmaz spektrálisan homogénként, élesen elkülönülve jelent meg. A 2023-as kísérleti év eredményei azt mutatják, hogy a keveredési zóna térbeli kiterjedése korlátozott. A legtöbb esetben az átmeneti zóna körülbelül 100-120 cm távolságig volt kimutatható a két gabonahalmaz érintkezési pontjától. Ezen a távolságon túl a minták színparaméterei már stabilak maradtak, ami azt jelzi, hogy a gabonahalmazok homogénnek tekinthetők.

5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Az elmúlt három év vizsgálatai megerősítették, hogy az őszi búza tételek közötti keveredés nem véletlenszerű, hanem jól körülhatárolható tendenciákkal írható le. A kalibrációs sorok (pl. 3. és 4. ábra) alapján a HUE × C* értékek egyértelmű tendenciát mutattak, amelyek lehetővé tették a keveredési arányok pontos meghatározását. Ez különösen igaz volt a markánsan eltérő



spektrális tulajdonságokkal rendelkező fajtákra, például az antociános és a sárga búzákra, ahol a keveredési határ élesen kirajzolódott. Ezzel szemben a spektrálisan hasonló fajták, például két sárga típus keveredése, laposabb görbéket eredményezett, ami a módszer érzékenységi korlátaira világít rá. A raktári mérések (pl. 5. és 6. ábra) következetesen kimutatták, hogy a keveredési határzóna térben lokalizálható, és kb. 100-120 cm távolságig terjed. Ezen túl a gabonahalmazok spektrálisan homogénnek tekinthetők és jól elkülöníthetők. A keveredési mintázatok pontos feltérképezése nemcsak a tudományos megértést segíti, hanem közvetlen ipari jelentőséggel is bír: lehetővé teszi a kitarolási veszteségek csökkentését, a szeparációs folyamatok hatékonyabb tervezését, valamint az élelmiszerlánc nyomonkövethetőségének biztosítását. A spektrofotometriás módszer alkalmas mind a kalibrációs modellek kidolgozására, mind a gabonák raktári keveredések térbeli lokalizálására. Ugyanakkor a homogén spektrális profilú tételek elkülönítéséhez további analitikai fejlesztések – például célzott hullámhossztartományok, NIR-spektroszkópia vagy kémiai markerek – integrálása szükséges. Az eredmények egyértelműen igazolják, hogy a színképelemzés hozzájárulhat a fenntartható tárolási stratégiákhoz és a gazdasági veszteségek mérsékléséhez. A spektrometriás vizsgálatok hatékonysága eltérő spektrális tulajdonságú gabonafajták esetében igazolt, ugyanakkor homogén spektrális profilú tételek esetén a különbségek detektálása korlátozott. Célszerű lenne a módszert kiegészíteni további analitikai technikákkal (pl. NIR-spektroszkópia, fajtaspecifikus komponensek, digitális képfeldolgozás), amelyek növelhetik a fajtaszeparáció érzékenységét. Az eredmények alapján a gabonák esetében kb. 100-120 cm-es keveredési határzóna figyelembevétele javasolt. Ez lehetővé teszi a veszteségek csökkentését, valamint a minőségi homogenitás biztosítását a további feldolgozás előtt. Célszerű lenne a módszert integrálni az ipari minőségbiztosítási rendszerekbe, ahol objektív és gyors eszközként szolgálhat a gabonatételek ellenőrzésében. További vizsgálatok indokoltak a spektrofotometriás és más optikai vagy molekuláris módszerek kombinálására, amelyek még pontosabb eredményeket nyújthatnak a spektrálisan hasonló gabonafajták elkülönítésében.



Methodology Based on Colorimetry for the Separation of Wheat Varieties in Storage and the Determination of Mixing

LADISLAV NYÁRI^{1*}, OTTÓ DÓKA², ÁKOS BEDE-FAZEKAS³, GERGELY TESCHNER¹, ATTILA KOVÁCS¹

¹Albert Kázmér Faculty of Agricultural and Food Sciences of Széchenyi István University
Department of Bioengineering and Precision Technologies, Mosonmagyaróvár, Hungary

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3617-6211>

Email: ladislav.nyari@sanagro.sk

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7268-8700>

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4383-2929>

²Széchenyi István University, Faculty of Informatics and Electrical Engineering

Department of Mathematics and Physics, Győr, Hungary

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6469-0384>

³Eötvös Loránd University (ELTE), Faculty of Science, Institute of Geography and Earth Sciences

Department of Environmental and Landscape Geography, Budapest, Hungary

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2905-338X>

*Corresponding author/Levelező szerző

ABSTRACT

Traceability of food products, particularly cereals, is crucial to ensure food safety and quality control throughout the food supply chain. One of the major challenges in grain storage is the accurate localisation and separation of different grain batches during storage and handling. Optical analytical techniques, including colour analysis and near-infrared spectroscopy, offer promising tools for addressing these challenges. This study aimed to investigate the applicability of the CIELAB colour measurement system for quantifying the mixing ratios of wheat varieties during storage. Special attention was given to the combined colour parameter $HUE \times C^*$, which was used as an indicator to estimate the proportion of different wheat varieties in mixed samples. Controlled mixtures of wheat varieties with distinct kernel colours were prepared and analysed using a HunterLab ColorFlex reflectance colorimeter equipped with a D65 light source. Each sample was measured in ten repetitions to ensure measurement reliability. Based on calibration curves established from standard mixtures, the $HUE \times C^*$ index showed a strong relationship with the mixing ratio of wheat varieties. The method allowed for the objective evaluation of colour differences and enabled the estimation of mixing proportions in stored grain batches. Storage experiments conducted between 2021 and 2023 demonstrated that grain mixing occurs within a limited spatial zone, and beyond approximately 100-120 cm, the grain batches become spectrally distinguishable and can be considered homogeneous. The results indicate that colorimetric analysis can serve as an effective and reliable tool for monitoring grain batch separation and identifying mixing zones in flat storage systems. The proposed method provides valuable support for improving traceability, optimising storage management, and enhancing quality control in cereal storage systems.

Keywords: grain quality, grain storage, CIELAB colour system, colorimetry, traceability, wheat mixing



REFERENCES

- Abdel, A. E., S. M., & Hucl, P. (2003). Composition and stability of anthocyanins in blue-grained wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(8), 2174-2180. <https://doi.org/10.1021/jf021043x>
- Abdel-Aal, E-S. M., & Hucl, P. (1999). A Rapid Method for Quantifying Total Anthocyanins in Blue Aleurone and Purple Pericarp Wheats. *Cereal Chemistry*, 76(3), 350-354. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.3.350>
- Berman, M., Connor, P., Whitbourn, L., Coward, D., Osborne, B., & Southan, M. (2007). Classification of sound and stained wheat grains using visible and near infrared hyperspectral image analysis. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 15(6), 351-358. <https://doi.org/10.1255/jnirs.754>
- Brennan, I. (2017). Maintaining Grain Quality During Storage and Transport. In C. Wrigley, I. Batey & D. Miskelly, (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Cereal Grains* (2nd ed., pp. 571-590). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100719-8.00020-6>
- Ebrahim, E., Kaveh, M., & Sirwan, B. (2014). Toward an automatic wheat purity measuring device: A machine vision-based neural networks-assisted imperialist competitive algorithm approach. *Measurement*, 55(1), 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.05.003>
- El-Sayed, M., Abdel-Aal, E.-S. M., Young, J. C., & Rabalski, I. (2006). Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(13), 4696-4704. <https://doi.org/10.1021/jf0606609>
- Fendeková, M., Gauster, T., Labudová, L., Vrablíková, D., Danáčová, Z., Fendek, M., & Pekárová, P. (2018). Analysing 21st century meteorological and hydrological drought events in Slovakia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(4), 393-403. <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0026>
- Ficco, D. B. M., Mastrangelo, A. M., Trono, D., Borrelli, G. M., De Vita, P., Fares, C., Beleggia, R., Platani, C., & Papa, R. (2014). The colours of durum wheat: a review. *Crop and Pasture Science*, 65(1), 1-15. <https://doi.org/10.1071/CP13293>
- František, J. T. (1976). Birds and mammals of salt marshes and salt steppes in Southern Slovakia (CSSR). *Biological Conservation*, 9(1), 29-36. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(76\)90071-9](https://doi.org/10.1016/0006-3207(76)90071-9)
- He, X., Tianxia, Z., Fei, S., Qin, L., Yong, F. & Qiuhui, H. (2021). Online detection of naturally DON contaminated wheat grains from China using Vis-NIR spectroscopy and computer vision. *Biosystems Engineering*, 201(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.11.001>
- Hološková, A., Tomáš, K. & Jiří, R. (2023). Vegetation Structure and Invertebrate Food Availability for Birds in Intensively Used Arable Fields: Evaluation of Three Widespread Crops. *Diversity*, 15(4), 524. <https://doi.org/10.3390/d15040524>
- Hu, H., Li, S., Pan, D., Wang, K., Qiu, M., Qiu, Z. & Zhang, J. (2022). The variation of rice quality and relevant starch structure during long-term storage. *Agriculture*, 12(8), 1211. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081211>
- Hui, L., Sheng, Q. & Shuaibing, Z. (2025). Essential oils in grain storage: A comprehensive review of insecticidal and antimicrobial constituents, mechanisms, and applications for grain security. *Journal of Stored Products Research*, 111(3), 102537. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102537>
- Jayas, D. S. (2012). Storing grains for food security and sustainability. *Agricultural Research*, 1(1), 21-24. <https://doi.org/10.1007/s40003-011-0004-4>
- Kar, A., Kulshreshtha, P., Agrawal, A., Palakkal, S. & Boregowda, L. (2020). *Annotation-free Quality Estimation of Food Grains using Deep Neural Network*. Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC), Cardiff, UK.



- Kozak, J., Ostapowicz, K., Bytnerowicz, A., & Wyzga, B. (2013). *The Carpathians: Integrating nature and society towards sustainability*. Springer.
- Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Majumdar, S., Jayas, D. (2000). Classification of cereal grains using machine vision: III. Texture models. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, 43(6), 1681-1687.
- Manandhar, A., Milindi, P., & Shah, A. (2018). An overview of the post-harvest grain storage practices of smallholder farmers in developing countries. *Agriculture*, 8(4), 57. <https://doi.org/10.3390/agriculture8040057>
- Nadimi, M., Hawley, E., Liu, J., Hildebrand, K., Sopiwnyk, E., & Paliwal, J. (2023). Enhancing traceability of wheat quality through the supply chain. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(4), 2495-2522. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13150>
- Navnath, S., Indore, Ch. K., Digvir, S. J., Viorica, F. B., Miranda, V., Kaiyang, T., & David, M. (2023). Mapping biochemical and nutritional changes in durum wheat due to spoilage during storage. *Heliyon*, 9(11), e22139. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22139>
- Nithya, U., Chelladurai, V., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2011). Safe storage guidelines for durum wheat. *Journal of Stored Products Research*, 47(4), 328-333. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.05.005>
- Pearson, K. (1895). *Notes on regression and inheritance in the case of two parents*. Proceedings of the Royal Society of London. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- Philippe, V., Michele, S., Juan, A. F. P., & Vincent, B. (2018). Discrimination between durum and common wheat kernels using near infrared hyperspectral imaging. *Journal of Cereal Science*, 84(1), 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.10.001>
- Pokorná, L., Pecho, J., & Faško, P. (2013). Precipitation characteristics for the Slovak republic and their link to the atmospheric circulation. *In Proceedings of the 15th International Conference on Climatology*.
- Qiang, L., Shuai, H., Yijia, Z., Dandan, Z., Siqi, Z., Liping, G., Xingbo, Z., & Chao D. (2024). Applications of novel non-thermal physical field technologies in enhancing the quality and storage stability of grains. *Journal of Stored Products Research*, 108, 102398. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102398>
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Riba, A., Mokrane, S., Mathieu, F., Lebrihi, A., & Sabaou, N. (2008). Mycoflora and ochratoxin A producing strains of *Aspergillus* in Algerian wheat. *International Journal of Food Microbiology*, 122(1-2), 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.11.057>
- Shepherd, A. W. (1993). *Economic and marketing aspects of post-harvest handling of grains*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Skalský, R., Barančíková, G., Makovníková, J., Koco, Š., Halas, J., & Kobza J. (2024). Regional topsoil organic carbon content in the agricultural soils of Slovakia and its drivers, as revealed by the most recent national soil monitoring data. *Environmental Challenges*, 14, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100816>
- Tong, C., Gao, H., Luo, S., Liu, L., & Bao, J. (2019). Impact of postharvest operations on rice grain quality: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(3), 626-640.
- Vithu, P., & Moses, J. A. (2016). Machine vision system for food grain quality evaluation: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56(1), 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.011>
- Wickham, H. (2016). *Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer.



Yi, Y., Fan, K., Shan, Y., Fu, Q., Zhou, X., Zhang, Y., & Zhang, H. (2022). Study on sampling scheme for detecting mycotoxin during wheat storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(11), 4752-4758. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11840>

Zayas, Y., Pomeranz, Y., & Lai, F. S. (1989). Discrimination of wheat and nonwheat components in grain samples by image analysis. *Cereal Chemistry*, 66(3), 233-237. https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66_233.pdf

©Copyright 2026 by the Authors.

The journal is Open Access (Platinum). This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

