



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**AZ ÉTKEZÉSI PARADICSOM UTÓÉRÉSÉT ÉS
TÁROLHATÓSÁGÁT BEFOLYÁSOLÓ
POSTHARVEST TÉNYEZŐK HATÁSÁNAK
VIZSGÁLATA**

Horváth-Mezőfi Zsuzsanna

Budapest

2025

A doktori iskola

megnevezése: Agrár- és Élelmiszertudományok Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

vezetője: Dr. Kovács Melinda
Egyetemi Tanár, MHAS
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élettani és Takarmányozástani Intézet
Élettani és Állategészségügyi Tanszék

Témavezetők: Dr. Hitka Géza
Egyetemi docens, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet
Árukezelés, Kereskedelem, Ellátási Lánc és Érzékszervi Minősítés
Tanszék

Dr. Zsom Tamás
Egyetemi docens, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet
Árukezelés, Kereskedelem, Ellátási Lánc és Érzékszervi Minősítés
Tanszék

.....
A Doktori Iskola vezetőjének
jóváhagyása

.....
A témavezetők jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS	6
2	CÉLKITÚZÉSEK.....	8
3	IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	9
3.1	A paradicsom rendszertana és eredete.....	9
3.1.1	A paradicsom rendszertana.....	9
3.1.2	A paradicsom eredete	10
3.2	A paradicsom táplálkozás-élettani jelentősége.....	10
3.3	Paradicsomtermesztés és értékesítés a világon és Magyarországon.....	11
3.4	A paradicsom fejlődése	12
3.5	A paradicsom érése és az ezzel kapcsolatos élettévékenységek	13
3.5.1	Az etilén szerepe	14
3.5.2	A paradicsom légzése	16
3.5.3	A paradicsom állományváltozása érés során	18
3.5.4	A paradicsom színeződése.....	19
3.5.5	A paradicsom ízében bekövetkező változások.....	20
3.6	A paradicsom optimális tárolási körülményei.....	21
3.7	A klorofill fluoreszcencia jelensége és szerepe az érésbiológiai folyamatok során	21
3.8	1-Metilciklopropén.....	28
3.8.1	Az 1-MCP története.....	28
3.8.2	Az 1-MCP pre-harvest alkalmazása	29
3.8.3	Az 1-MCP post-harvest alkalmazása.....	29
3.8.4	A kezelés hatékonyságát befolyásoló tényezők	30
3.8.5	Eddig elért eredmények	31
3.9	Mikrobuborékos mosás és szerepe a kertészeti termények érésgátlásában.....	33
3.10	Ultrahang.....	34
3.11	A paradicsom minőségváltozásának nyomon követésére alkalmazott főbb módszerek összefoglalása (4. táblázat).....	37
4	ANYAG ÉS MÓDSZER	38
4.1	Vizsgált paradicsomfajta és jellemzői.....	38
4.1.1	Érettségi állapotok az I. kísérlethez (1-MCP kezelés dózisának meghatározása).....	39
4.1.2	Érettségi állapotok a II. kísérlethez (1-MCP kezelés hatásának vizsgálata).....	40
4.1.3	Érettségi állapotok a III. kísérlethez (Hidegkár vizsgálata)	41
4.1.4	Érettségi állapotok a IV. kísérlethez (Mikrobuborékos mosás 1-MCP hatóanyaggal).....	42
4.1.5	Érettségi állapotok az V. kísérlethez (Mechanikai károsodás vizsgálata).....	43
4.1.6	Érettségi állapotok a VI. kísérlethez (Takarásos légzésvizsgálat előkísérlet)	44
4.1.7	Érettségi állapotok a VII. kísérlethez (Takarásos légzésvizsgálat)	44
4.2	Alkalmazott kezelések	44
4.2.1	I. kísérlet (1-MCP kezelés dózisának meghatározása).....	45

4.2.2	II. kísérlet (1-MCP kezelés hatásának vizsgálata)	45
4.2.3	III. kísérlet (Hidegkár vizsgálata).....	46
4.2.4	IV. kísérlet (Mikrobuborékos mosás 1-MCP hatóanyaggal)	46
4.2.5	V. kísérlet (Mechanikai károsodás vizsgálata)	47
4.2.6	VI. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat előkísérlet)	48
4.2.7	VII. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat).....	48
4.3	Roncsolásmentes vizsgálati módszerek.....	49
4.3.1	Színmérés	49
4.3.2	Akusztikus és impakt állománymérés	50
4.3.3	DA-index® meghatározása DA-méter® műszerrel.....	51
4.3.4	Klorofill fluoreszcencia meghatározása.....	52
4.3.5	Légzésintenzitás mérés.....	53
4.3.6	Etiléntermelés meghatározása.....	55
4.4	Digitális képfeldolgozás	55
4.5	Alkalmazott statisztikai módszerek	56
4.6	Sigmoid görbe illesztése a színváltozási adatokra	57
5	EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELEÉSÜK.....	58
5.1	I. kísérlet (1-MCP kezelés dózisának meghatározása).....	58
5.1.1	Klorofill fluoreszcencia	58
5.1.2	Akusztikus keménység.....	60
5.1.3	Szín.....	61
5.1.4	DA-index	62
5.1.5	Az I. kísérlet eredményeinek összegzése.....	63
5.2	II. kísérlet (1-MCP kezelés hatásának vizsgálata)	64
5.2.1	Optimális érettségi állapot meghatározása.....	64
5.2.2	A Polár Minősítő Rendszer (PQS) alkalmazhatóságának vizsgálata paradicsom érettségi állapotának meghatározására.....	75
5.2.3	A II. kísérlet eredményeinek összegzése	78
5.3	III. kísérlet (Hidegkárosodás vizsgálata)	79
5.3.1	Szín.....	79
5.3.2	DA-index	84
5.3.3	Akusztikus és impakt keménység	86
5.3.4	Tömegveszteség	88
5.3.5	Légzésintenzitás.....	88
5.3.6	Etiléntermelés	91
5.3.7	Klorofill fluoreszcencia	91
5.3.8	A III. kísérlet eredményeinek összegzése	93
5.4	IV. kísérlet (Mikrobuborékos mosás 1-MCP hatóanyaggal)	94
5.4.1	Szín és DA-index	95

5.4.2	Akusztikus és impakt keménység	95
5.4.3	Légzésintenzitás.....	96
5.4.4	Klorofill fluoreszcencia	97
5.4.5	A IV. kísérlet eredményeinek összegzése	98
5.5	V. kísérlet (Mechanikai károsodás vizsgálata).....	98
5.5.1	DA-index	99
5.5.2	Szín.....	99
5.5.3	Akusztikus és impakt keménység	101
5.5.4	Légzésintenzitás.....	102
5.5.5	Etiléntermelés	102
5.5.6	Klorofill fluoreszcencia	103
5.5.7	Az V. kísérlet eredményeinek összegzése	104
5.6	VI. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat előkísérlet)	105
5.7	VII. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat).....	106
5.7.1	Szín.....	106
5.7.2	DA-index	108
5.7.3	Akusztikus és impakt keménység	109
5.7.4	Tömegveszteség	110
5.7.5	Légzésintenzitás.....	110
5.7.6	A VII. kísérlet eredményeinek összegzése.....	111
6	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	112
7	Új tudományos eredmények	115
8	Összefoglalás	116
	Summary.....	118
9	Mellékletek.....	120

Rövidítések

¹ Chl*	Gerjesztett S ₁ energiaállapotú klorofill molekula
1-MCP	1-metil-ciklopropén (1-methyl-cyclopropene)
¹ O ₂ *	Szinglet oxigén (Singlet oxygen)
³ Chl*	A klorofill molekula alacsonyabb energiájú triplet-állapota
a*	CIELab vörös-zöld színezet
ABA	abszcizinsav (Absciscic Acid)
ACC	1-aminociklopropán-1-karboxilát (1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid)
ACO	ACC-oxidáz (ACC-oxidase)
ACS	ACC-szintáz (ACC-synthase)
AL	Aktinikus fény (Actinic light)
AVG	Aminoetoxi-vinilglicin (Amino-ethoxy-vinyl-glycine)
b*	CIELab kék-sárga színezet
B _N	Normalizált kék színösszetevő (Blue normalized)
C*	CIELab élénkség (Chroma)
CCD	Töltéscsatolt eszköz (Charge-coupled Device)
CFI	Klorofill fluoreszcenciás képalkotás (Chlorophyll fluorescence imaging)
Chla	Klorofill-a
CIELab	CIE által kidolgozott szabványosított színtér
F ₀	Minimális klorofill-fluoreszcencia kibocsátás
F ₀ '	A fényhez adaptálódott állapotban mért minimális fluoreszcencia
F _m	Maximális klorofill-fluoreszcencia kibocsátás
F _m '	A fényhez adaptálódott állapotban mért maximális fluoreszcencia
F _s	A folyamatos megvilágítás alatt mért aktuális, stabil fluoreszcenciaszint.
F _v	Változó fluoreszcencia
F _v '	A fényhez adaptálódott állapotban mért változó fluoreszcencia
G _N	Normalizált zöld színösszetevő (Green normalized)
h°	CIELab színezeti szög (Hue angle)
IEC	Belső etilénszint (Internal ethylene concentration)
L*	CIELab világossági tényező
LHC	fénygyűjtő komplex (Light-harvesting complex)
LSL	Hosszan pulton tartható (Long Shelf Life)
MB	Mikrobuborék (Microbubbles)
ML	Mérőfény (Measuring light)
NAA	Naftalin-ecetsav (1-Naphthaleneacetic acid)

NPQ	nem-fotokémiai kioltás (Non-photochemical quenching)
PAM	Amplitúdó moduláció (Pulse amplitude modulation)
PQS	Polár Minősítő Rendszer (Polar Qualification System)
PSI	I. számú fotoszintetikus rendszer (Photosystem I.)
PSII	II. számú fotoszintetikus rendszer (Photosystem II.)
Rel. érték	Relatív érték
R _N	Normalizált vörös színösszetevő (Red normalized)
ROI	Releváns tartomány (Region of interest)
ROS	Rendkívül reakcióképes oxigénforma (Reactive oxygen species)
S ₀	A klorofill külső elektronjának alapállapotú, nem gerjesztett energiaszintje
S ₁	A klorofill külső elektronjának magasabb energiájú, gerjesztett energiaszintje
SAM	S-adenozil-metionin (S-Adenosyl methionine)
SzL	Szabályozott légtér
UH	Ultrahang
α -CD	α -ciklodextrin (α -Cyclodextrin)

1 BEVEZETÉS

A paradicsom (*Solanum lycopersicum* L.) az egyik leggyakrabban termesztett és fogyasztott zöldség világszerte. Bár a konyhában zöldségként használjuk, botanikai szempontból gyümölcs, hiszen a virág terméséből alakul ki és magokat tartalmaz. Eredetileg Dél- és Közép-Amerikából származik, és évszázadok óta fontos része az emberi táplálkozásnak. A termesztése és elterjedése óta számos étel alapvető hozzávalójává vált, gazdagítva azok ízvilágát és tápanyagtartalmát. Jelentősége nemcsak a gasztronómiában, hanem a mezőgazdaságban, az egészségmegőrzésben és a gazdaságban is megmutatkozik. A paradicsom számos fontos tápanyagot tartalmaz, többek között C-, A- és K-vitamint, valamint káliumot, folsavat és rostokat. Különösen kiemelkedő benne a likopin nevű antioxidáns, amelynek jótékony hatását kutatások is alátámasztják. A likopin hozzájárulhat a szív- és érrendszeri betegségek, valamint bizonyos daganattípusok kockázatának csökkentéséhez. Magas víztartalma segíti a hidratációt, míg rosttartalma az egészséges emésztést támogatja.

A paradicsomtermesztés világszerte kiemelkedő jelentőségű mezőgazdasági ágazat, amely mind a helyi, mind a globális gazdaságra komoly hatást gyakorol. Széleskörűen termeszthető különböző éghajlati viszonyok között, a kis családi gazdaságoktól kezdve a nagy ipari üzemekig. A friss- és feldolgozott paradicsomtermékek iránti folyamatos kereslet innovációt eredményezett a nemesítés, a kártevők elleni védekezés és a fenntartható mezőgazdasági módszerek terén. A paradicsom gazdasági szerepe a hazai és nemzetközi piacokon egyaránt meghatározó. A legnagyobb termelő országok – például Kína, India, az Egyesült Államok és Olaszország – jelentős mennyiségű friss és feldolgozott paradicsomot exportálnak a világpiacra. A termesztéstől a feldolgozáson át a forgalmazásig számos munkahelyet teremt, így hozzájárul a foglalkoztatáshoz és a gazdasági növekedéshez is.

Világszinten az összes megtermelt friss gyümölcs és zöldség egyharmada elvész a termékellátási láncban, még mielőtt a fogyasztókhoz eljutna. Bármilyen előnyök is a friss termékek, a betakarítás utáni veszteségek miatt gyakran nem jövedelmezőek és kárba vesznek. A friss termények betakarítás utáni veszteségei különböző részfolyamatok során jelentkezhetnek, így a betakarítás, tárolás, árukezelés, csomagolás, szállítás és értékesítés során is. Ennek egyik fő oka a friss termékek romlékony jellege, hiszen betakarítás után is élettévénységeket folytatnak. A nem megfelelő betakarítási módszerek és eszközök, valamint az elégtelen tárolási és csomagolási lehetőségek szintén hozzájárulnak ezekhez a veszteségekhez.

A paradicsom esetében a szezonális termelés korlátokat szab a folyamatos ellátásnak, hiszen a friss paradicsom fogyaszthatósági ideje korlátozott, viszonylag gyorsan romlik és veszít a szedéskori minőségéből. A globálisan növekvő kereslet miatt egyre fontosabbá válik az, hogy a

friss paradicsom minél tovább eltartható legyen anélkül, hogy jelentősen romlana az érzékszervi tulajdonsága vagy tápértéke. Ezt különféle betakarítás után alkalmazott technológiákkal, tárolási stratégiákkal, valamint érésgátló módszerekkel lehet elősegíteni.

Az egyik legelterjedtebb érésgátló anyag, az 1-metil-ciklopropén (1-MCP), amely az etilén érésgyorsító természetes hormon hatásmechanizmusát gátolja, ezáltal lassítva az érési és öregedési folyamatokat a klimaktérikus gyümölcsökben, köztük a paradicsom esetében is. Az ilyen érésgátló (vagy érést késleltető) módszerek alkalmazásának elsődleges célja a szállítási- és tárolási idő meghosszabbítása, a hosszabb minőségmegőrzés és a kereskedelmi veszteségek csökkentése. A betakarítás utáni technológiák fejlesztése és alkalmazása tehát kulcsfontosságú a paradicsom ellátási láncának fenntarthatósága és gazdaságossága szempontjából.

2 CÉLKITŰZÉSEK

A paradicsom a világ egyik legjelentősebb klimatérus terménye, amelynek piaci értékét és fogyaszthatóságát leginkább az utóérés és az állományváltozás befolyásolja. A betakarítás utáni kezelések, így különösen az 1-metil-ciklopropén (1-MCP) alkalmazása lehetőséget kínál az érési folyamatok késleltetésére, ugyanakkor a kezelés hatékonyságát számos tényező – többek között az alkalmazott dózis, az érettségi állapot, a tárolási hőmérséklet és a gyümölcs mechanikai sérülékenysége – befolyásolja. A paradicsom hidegérzékenysége, gázcserejével és mechanikai stresszre adott válaszaival kapcsolatos ismeretek hiányosak, pedig ezek kulcsfontosságúak a hosszabb eltarthatóság és a minőségmegőrzés szempontjából.

Kutatásaim célja az volt, hogy átfogóan vizsgáljam a paradicsom érésének, tárolásának és élettani reakcióinak szabályozhatóságát, különös tekintettel az 1-MCP kezelés hatékonyságára, a hidegkárosodásra, a mechanikai sérülésekre, valamint a gázcsere-felületek szerepére.

Ennek érdekében az alábbi konkrét célkitűzéseket fogalmaztam meg:

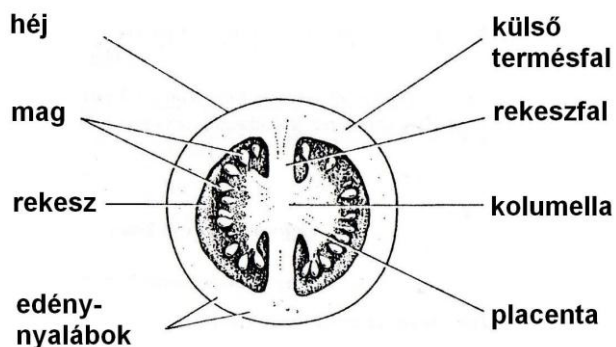
- Az optimális 1-MCP dózis meghatározása különböző érettségi stádiumokban, annak feltárására, hogy mely kezelési szintek lassítják leghatékonyabban a paradicsom szüret utáni élettani viselkedését, azaz az érését és a légzését.
- Az érettségi állapot szerepének vizsgálata az 1-MCP kezelés hatékonyságában, és annak meghatározása, hogy mely fenológiai szakaszban érdemes a kezelést alkalmazni.
- A Polár Minősítő Rendszer (PQS) alkalmazhatóságának értékelése a paradicsom érettségi állapotának meghatározására, a digitális képfeldolgozással nyert színparaméterek és a hagyományos mérési módszerek (a^* érték, DA-index[®]) összevetésével.
- A hideg hatásainak feltárása különböző tárolási hőmérsékleten (15 és 2 °C), különös tekintettel a légzésintenzitásra, etiléntermelésre, keménységi (állomány) változásokra és klorofill-fluoreszcenciára.
- A mikrobuborékos 1-MCP kezelés és ultrahangos kiegészítésének vizsgálata, hatékonyságuk összevetése a hagyományos gáz halmazállapotú kezelési formával.
- A mechanikai károsodások hatásának vizsgálata (ejtési magasság, érettségi stádium) a paradicsom légzésére, etiléntermelésére, keménységi paramétereire és fluoreszcencia értékeire, a sérülések korai detektálhatóságának feltárásával.
- A gázcsere helyének meghatározása a paradicsom felületén, különböző takarási és viaszolási kísérletek segítségével, a kocsány, ízesülés és bogyó szerepének tisztázása érdekében.

3 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1 A paradicsom rendszertana és eredete

3.1.1 A paradicsom rendszertana

A paradicsom botanikai neve jelenleg *Solanum lycopersicum*. Ez a név tükrözi a modern taxonómiai besorolást, amely a paradicsomot a burgonyafélék (*Solanaceae*) családjába és a *Solanum* nemzetségbe sorolja, ugyanabba a csoportba, mint például a burgonyát (*Solanum tuberosum*). Korábban a paradicsomot *Lycopersicon esculentum* Mill. néven is ismerték. Ezt a nevet Philip Miller vezette be 1768-ban, amikor a paradicsomot külön nemzetségbe, a *Lycopersicon*-ba sorolta (IPNI, 1768; Miller, 1768). Azonban a modern molekuláris és filogenetikai kutatások kimutatták, hogy a paradicsom szorosabb rokonságban áll a *Solanum* nemzetség más tagjaival, mint korábban gondolták (Peralta és Spooner, 2001). Ezért a tudományos közösség visszatért Linnaeus eredeti besorolásához (IPNI, 1753; Linné, 1753), és a *Solanum lycopersicum* nevet fogadta el hivatalosként. Mindkét név – *Solanum lycopersicum* és *Lycopersicon esculentum* – megtalálható a szakirodalomban, de a jelenlegi tudományos konszenzus szerint a *Solanum lycopersicum* a helyes és elfogadott elnevezés. Tehát a paradicsom a *Solanaceae* családba tartozik és $2n = 2x = 24$ kromoszómával rendelkező diploid növény (Liedl et al., 2013). A termesztett paradicsom legtöbb fajtája a *Solanum lycopersicum* var. *lycopersicum* cultivarba sorolható (Peralta és Spooner, 2006). A *Lycopersicon* nemzetség két alnemzetségre osztható, melyek az *Eulycopersicon*, (termése piros színű) és az *Eriopersicon* (termése zöld színű). A paradicsom virágzata bogernyő, termése bogyó (1. ábra), melynek alakja igen változatos. Növekedési típusai alapján három csoportba osztható: folytonos növekedésű fajták, determinált fajták és féldeterminált fajták. A paradicsom egy közepes hőigényű, magas fényigényű lágy szárú, vízigényes növény, mely számos talajtípuson eredményesen termeszthető (Helyes, 1999).



1. ábra: A paradicsombogyó morfológiai felépítése (forrás: Brandt, 2007)

3.1.2 A paradicsom eredete

A paradicsom, amely világviszonylatban az egyik legnépszerűbb termény, hosszú múltra tekint vissza, mivel eredetileg az amerikai kontinensről származik. A vad cseresznyeparadicsom-fajtákból fejlődött ki. Valószínűleg Mexikóban vonták termesztésbe először, ahol a Nahuatl nyelven „tomatl” néven ismerték (Bergougnoux, 2014). Innen terjedt tovább Dél-Amerika más részeire, például Peruba és Ecuadorba, ahol tovább nemesítették és termesztették (Kimura és Sinha, 2008). Az első írásos bizonyíték a paradicsom fogyasztására a 15. századi aztékoktól származik, akik ételeik egyik alapanyagaként használták (Kimura és Sinha, 2008). Európába csak a 16. században jutott el, amikor a spanyol konkvisztádorok (hódítók) visszatértek az Újvilágból (Bergougnoux, 2014). Kezdetben sokan mérgezőnek hitték, így termesztése és fogyasztása nem terjedt el azonnal, de végül a mediterrán konyha egyik alapvető összetevőjévé vált, különösen Olaszországban, ahol megszületett a híres 'San Marzano' fajta (Ronga et al., 2020). A paradicsom levelében és zöld részeiben tomatin halmozódik fel, mely valóban mérgező, ugyanakkor a bogyó érése során enzimikus folyamatok következtében ezen toxikus vegyületek átalakulnak nem mérgező anyagokká (Helyes, 1999).

Az első magyarországi írásos emlék a paradicsomról 1651-ből származik, és Heindel pozsonyi kertjének katalógusában szerepel. Feltételezhetően olasz-német és balkáni közvetítéssel terjedt el hazánkban. Kezdetben elsősorban főúri és polgári kertek dísznövényeként, valamint kolostorkertekben fűszernövényként volt jelen. A paradicsom nagyobb léptékű termesztése az 1880-as évektől indult meg, és az 1930-as évek végéig fokozatosan terjedt el (Boross, 1956; Somos, 1959).

3.2 A paradicsom táplálkozás-élettani jelentősége

Magyarországon 2022-ben az egy főre jutó éves zöldségfogyasztás 76,2 kg, ami alig éri el az élen járó Kína átlagának egyötödét, ahol egy ember évente 408 kg zöldséget fogyaszt. Ebből a mennyiségből a paradicsom és a paradicsomtermékek fogyasztása körülbelül 12,3 kg/fő, ami a teljes éves zöldségfogyasztás nagyjából egyhatodát teszi ki Magyarországon (World Population Review, 2025). Figyelembe véve, hogy milyen sokféle zöldséget fogyasztunk, ez az arány igen magasnak mondható.

A nyers, étkezési paradicsom átlagos tápanyagtartalma a 2. ábrán látható. Ugyanakkor egyes fajták esetében ez eltérő lehet, valamint a különböző termesztési körülmények szintén befolyásolhatják ezt (Collins et al., 2022). A bogyó több, mint 94 %-a víz, szénhidráttartalma 4 g/100 g alatt van, míg zsír- és fehérjetartalma elenyésző, mely általánosságban jellemző a gyümölcs- és zöldségfélékre. A vitaminösszetételt tekintve a paradicsomban számos vitamin megtalálható, ám

ezek közül is legjelentősebb az antioxidáns hatású C-vitamin (14 mg/100 g), amely az emberi szervezet napi C-vitamin szükségletének 23 %-át fedezi. Említésre érdemes még a K-, B₆- és A-

vitamin tartalma. Továbbá béta-karotin és kálium tartalma sem elhanyagolható, melyek szerepet játszanak a csontok, látás és bőr egészségében, valamint az idegrendszer megfelelő működésében. Mindezek mellett viszont nátriumtartalma alacsony (5 mg/100 g), ami kedvez a nátrium bevitel csökkentésére irányuló erőfeszítéseknek. A paradicsom egészségre előnyös tulajdonságait leginkább a rákmegelőzésben (Assar et al., 2016; Saini et al., 2020) betöltött szerepével kapcsolatban tanulmányozzák.

In vitro vizsgálatok kimutatták, hogy a pulzáló elektromos mező (PEF) alkalmazása önmagában akár 40%-kal, hőkezeléssel kombinálva pedig akár 238%-kal is növelheti a likopin biohasznosulását a nyers paradicsomléhez képest, így a feldolgozott paradicsomtermékek (például paradicsompüré, paradicsomszós) még jobb forrásai lehetnek ennek az antioxidánsnak (Yang et al., 2021).

Étkezési paradicsom (nyers) tápanyagtartalma (100g)		
Energia	18 kcal	74 kJ
Szénhidrátok	3,9 g	
Cukrok	2,6 g	
Rost	1,2 g	
Zsír	0,2 g	
Fehérje	0,9 g	
Víz	94,5 g	
A-vitamin ekvív.	42 µg	5%
β-karotin	449 µg	4%
Tiamin (B1-vitamin)	0,037 mg	3%
Niacin (B3-vitamin)	0,594 mg	4%
B6-vitamin	0,08 mg	6%
C-vitamin	14 mg	23%
E-vitamin	0,54 mg	4%
K-vitamin	7,9 µg	8%
Nátrium	5 mg	>1%
Kalcium	10 mg	1%
Magnézium	11 mg	3%
Foszfor	24 mg	3%
Kálium	237 mg	5%
Likopin	2573 µg	
A százalékos értékek (%) az amerikai felnőtt javasolt napi mennyiségére (RDA) vonatkoznak.		

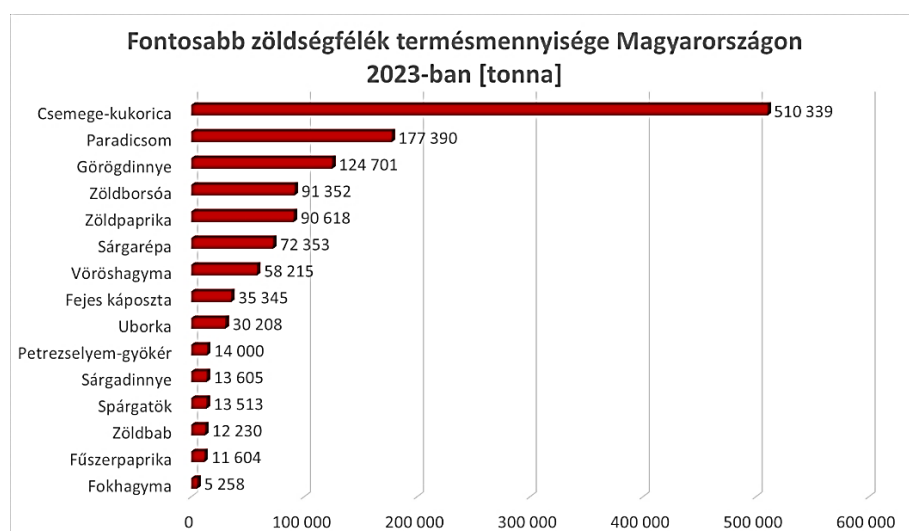
2. ábra: A paradicsom beltartalmi összetevői (forrás: USDA, 2019)

3.3 Paradicsomtermesztés és értékesítés a világon és Magyarországon

A FAO 2025-ös adatai alapján 2023-ban az egész világon nagyjából 5,5 millió hektáron termesztettek paradicsomot, 2022-ben ez az érték 5,25 millió hektár volt, míg 21-ben 5,19 millió hektár, így látható, hogy folyamatosan nő a paradicsomtermesztésre befogott terület nagysága. Az egyes országok között Kína, Nigéria és India állnak az első három helyen rendre 1,1; 1,1 és 0,85 millió hektáros termőterületekkel. Magyarország 1780 hektárral nagyjából a középmezőnyben helyezkedik el. A megtermesztett paradicsom mennyiségét tekintve 2023-ban a világon összesen több, mint 192 millió tonna paradicsomot takarítottak be és az előző évekhez képest itt is növekvő tendencia figyelhető meg, bár nem olyan jelentős. Az országokat külön-külön megvizsgálva az élen Kína (70 millió tonna), India (20 millió tonna) és Törökország (13 millió tonna) áll, megtermelve a több, mint 50%-át a világon termelt összes paradicsomnak.

Magyarország a termés mennyiséget tekintve a középmezőny elején áll 177390 tonnával (FAO, 2025). Ugyanakkor ez a 177 ezer tonna nem tekinthető kiemelkedő eredménynek, mivel az 1990-es évek elején 460 ezer tonnát is megtermeltünk.

A KSH legfrissebb adatai alapján (3. ábra) 2023-ban Magyarországon a paradicsom volt a második legtöbb termesztett zöldségféle a csemegekukorica



után. Megfigyelve az elmúlt 30 év **3. ábra:** Fontosabb zöldségfélék termésmennyisége Magyarországon 2023-ban (forrás: KSH, 2025)

eredményeit az látszik, hogy a csemegekukorica szép lassan helyet cserélt a paradicsommal, pedig az 1990-es évek elején a Magyarországon legtöbbet termesztett zöldségféle a paradicsom volt. Ám az most is elmondható, hogy egy rendkívül nagy jelentőséggel bíró zöldségről beszélünk mind magyarországi, mind világviszonylatban is.

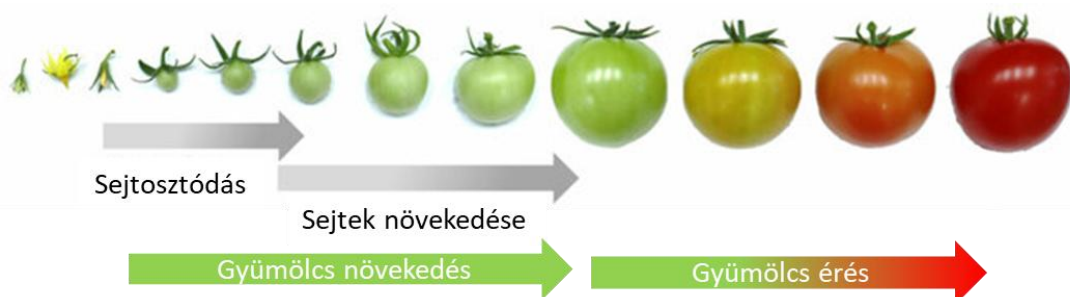
3.4 A paradicsom fejlődése

A paradicsom botanikai szempontból tulajdonképpen egy gyümölcs, mivel a virágból fejlődik ki, ráadásul egy bogyós gyümölcs, mely lehet két- vagy többrekeszű (Bertin, 2005; Mintz-Oron et al., 2008)

A gyümölcs jellemzően a virág beporzása és megtermékenyítése után fejlődik ki a magházból. A gyümölcsök magházának falában a sejtek hosszú osztódási és növekedési folyamatokon mennek keresztül, amely során a gyümölcs eléri a végső méretét. E fejlődés összetettsége ellenére a növekedés és a fejlődés három (esetenként négy) különböző fázisra osztható (Stikić et al., 2015), melyek (Guichard et al., 2001; Helyes, 1999):

1. A megtermékenyítést követő 2 hét. Ebben a szakaszban a bogyó növekedése rendkívül lassú, a sejtosztódás korlátozott, inkább a sejtek meghosszabbodásából adódó növekedés a jellemző.
2. A második fázis 3-5 hétig tart, ebben az időszakban történik meg az intenzív növekedés, mely az érést megelőző mély zöld szín eléréséig tart. A fázis végére a bogyó gyakorlatilag eléri a végső tömegét. Ezt hívjuk zöldérett állapotnak.
3. A zöldérett állapot elérése és az érés megkezdődése között eltelt idő jellemzően 2 hét. Itt még nagyon minimális növekedés figyelhető meg, ám ez nem számottevő. Majd ezt követően indul meg az érés folyamata.

A 4. ábrán látható a paradicsom fejlődésének és érésének sematikus ábrája.

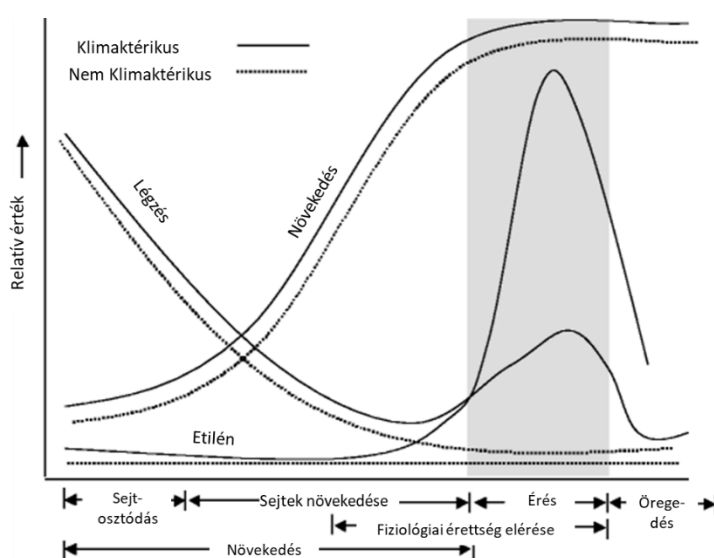


4. ábra: A paradicsom (*Solanum lycopersicum* L.) gyümölcsfejlődésének főbb szakaszai, a gyümölcs növekedésének két fő fázisát (sejtosztódás és sejtnövekedés), majd az érés megindulását és előrehaladását szemléltetve (Freschi et al., 2023 nyomán).

A bogyó méretét több tényező is meghatározza, mint például a bogyó helyzete a növényen, magok és rekeszek száma, a fürtön belüli kötődés sorrendje, valamint a különböző környezeti tényezők, melyek a bogyónövekedés során szerepet játszottak (Helyes, 1999).

3.5 A paradicsom érése és az ezzel kapcsolatos élettévékenységek

A gyümölcsök érése egy összetett folyamat, amely számos metabolikus és fiziológiai változással jár, amelyet belső szabályozás és különböző környezeti tényezők befolyásolnak. A gyümölcsérés során a légzés és az etiléntermelés törvényszerűségei alapján a gyümölcsök klimaktérikus és nem klimaktérikus csoportokra oszthatók (6.ábra) (Kou és Wu, 2018).

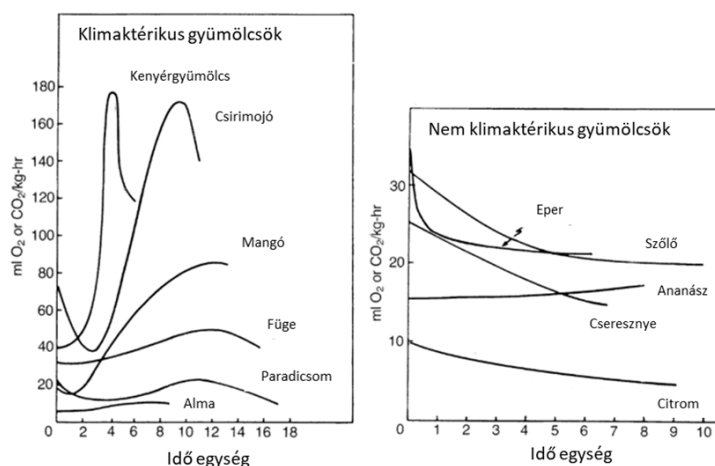


5. ábra: A klimaktérikus és nem klimaktérikus gyümölcsök növekedési, légzési és etiléntermelési tendenciái (Wills és Golding, 2016 nyomán)

A légzésintenzitás és az etiléntermelés (5. ábra) a klimaktérikus gyümölcsökben, mint például a paradicsom, a banán, a kajszibarack, az őszibarack, a mangó, az alma és a körte, az érés során jelentősen megnövekedik (Feder et al., 2020; Liu et al., 2015). A nem klimaktérikus gyümölcsök esetében, ilyen például a szőlő, a citrusfélék, a cseresznye, az eper és a görögdinnye, sem a légzésintenzitás, sem pedig az etiléntermelésben nem mutatkozik jelentős növekedés az érés során és korábban sem (Chen et al., 2020). A gyümölcs érési folyamata olyan fiziológiai és biokémiai változásokat foglal magában, mint a pigmenttermelődés, a puhulás, valamint az aroma- és ízképződés. A gyümölcsérés során

bekövetkező színváltozás a klorofill lebomlásának és a különböző pigmentek, mint például a karotinoidok vagy antociánok felhalmozódásának köszönhető és ezek aránya határozza meg a gyümölcs színét (Hu et al., 2019). Mivel a gyümölcsök érzékszervi tulajdonságai és táplálkozási, minőségi jellemzőinek nagy része az érési szakaszban alakul ki, a gyümölcsök érési folyamatának megértése fontos láncszem a táplálkozási érték, a minőség, a tárolhatóság és a veszteségek meghatározásában. Kumar és munkatársai (2014) kimutatták, hogy a gyümölcsök érési folyamatát a növényi hormonok önmagukban vagy kombináltan szabályozzák. Az etilén és az abszcizinsav (ABA) a fő közreműködők, és a szabályozásban egyéb növekedésszabályozók is részt vesznek. Az elmúlt években jelentős előrelépés történt a gyümölcsérés során végbemenő hormonális szabályozás biokémiai és molekuláris alapjainak megértésében. A különböző légzési jellegű gyümölcsök esetén azonban eltérő érésszabályozási mechanizmusokat alkalmazhatunk. A növényi hormonok közötti kölcsönhatási mechanizmus még mindig nem teljesen világos. A gyümölcsérés szabályozási hálózatának átfogó megértése nemcsak biológiai jelentőségű, hanem a gyümölcsminőség szabályozása és az eltarthatósági idő meghosszabbítása szempontjából is nagy jelentőséggel bír (Chen et al., 2020).

Más klimaktérikus gyümölcsökhöz hasonlóan a paradicsom hosszú távú tárolása és eltarthatósága szempontjából az érettségi állapot kulcsfontosságú tényező. A paradicsom termése betakarítható akár zöldérett, tört színű, érésbe forduló, félérett, halvány piros, valamint élénk piros érettségi stádiumban (Cantwell, 2010). A hosszabb távú elérhetőség,



6. ábra: A klimaktérikus és nem klimaktérikus gyümölcsök légzési mintázata (Seymour et al., 2012 nyomán)

a forgalmazás és az eltarthatósági idő érdekében azonban a legtöbb országban többnyire a zöldérett stádiumban takarítják be (Hatami et al., 2013; Maul et al., 1998). Bár ez Magyarországon nem bevett szokás, itt jellemzően halvány piros, vagy élénk piros érettségi állapotban történik a szüret, gyakorlatilag a fogyasztói érettség állapotához legközelebb.

3.5.1 Az etilén szerepe

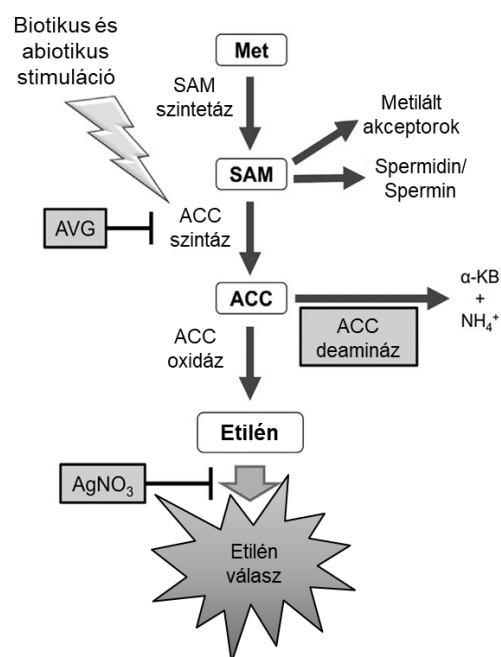
Az etilén a legegyszerűbb növényi hormon, amely mindössze két szénatomból és négy hidrogénből áll, továbbá a biotikus és abiotikus stresszhatásokra adott növényi válaszok számos aspektusát közvetíti. A legtöbb stresszre válaszul a növények etilént termelnek, ami viszont lassítja

a növekedésüket. Ideális stresszhormon, mely a stressz megszűnésével gyorsan diffundál (Klee és Giovannoni, 2011). Az etilén egy endogén hormon, amely fontos szabályozó szerepet játszik a növények növekedésében és fejlődésében, például a gyökeresedésben, a gyümölcserésben és a levelek hullajtásában is (Jiang et al., 2024; Khan et al., 2023). A gyümölcs fejlődési stádiuma határozza meg az etilén szintézisének, érzékenységének és válaszának szintjét. A növényekben két etiléntermelő rendszert különböztetünk meg. Az 1-es rendszer az éretlen gyümölcsökben és a vegetatív szövetekben termelődő alap etilént jelenti, amelynek termelődése önmagát gátló módon szabályozott. A 2-es rendszer a klimaktérikus gyümölcsök érésében és a virágok öregedésében játszik szerepet, és ez a folyamat önmagát serkentő (autokatalitikus) módon működik (Yokotani et al., 2009). Az 1-es rendszer néven ismert fázisban a külső forrásból származó (exogén) etilénnel történő kezelés negatív hatással van az érésre (Li et al., 2022). A 2-es rendszer nevű fázisba való átmenet során a gyümölcsökben hirtelen légzésintenzitás-növekedés következik be. Ezt a gyümölcsök endogén (belső, a termés által termelt) etilénszintézisének nagymértékű növekedése kíséri, az etilénkoncentráció több mint 100-szoros növekedését mutatva, amelyet autokatalitikus etiléntermelés jellemez (Shi et al., 2023). Ezenkívül a sejtfa lebontásával, a karotinoidok bioszintézisével, a gyümölcsök puhulásával, a pigmentek felhalmozódásával és az aromával kapcsolatos gének kifejeződését közvetlenül vagy közvetve segíti elő (Barry és Giovannoni, 2007; Klee és Giovannoni, 2011; Sun et al., 2024, 2023; Zheng et al., 2023).

Az etilén szintézise erősen szabályozott. A bioszintetikus útvonal egyszerű, mindössze két enzimből áll. Az S-adenozil-metionint (SAM) az ACC-szintáz (ACS) alakítja át 1-aminociklopropán-1-karboxiláttá (ACC). Az ACC-t ezt követően az ACC-oxidáz (ACO) alakítja át etilénné (7. ábra) (Barry és Giovannoni, 2006; Nakatsuka et al., 1999; Rottmann et al., 1991).

Az érési folyamatok tekintetében Theologis (1992) szerint az etilén inkább egyfajta szabályzóként, mintsem a gyümölcserés kiváltójaként hat. Ez azt jelenti, hogy folyamatosan jelen kell lennie ahhoz, hogy a szükséges gének átíródását fenntartsa. Később Hoeberichts és munkatársai (2002) arról számoltak be, hogy az etilén érzékelése szükséges a paradicsom érésével kapcsolatos gének kifejeződéséhez és a kapcsolódó fiziológiai változásokhoz még az érés előrehaladott szakaszában is. Az etilénnak a paradicsomgyümölcs érésében betöltött egyértelmű szerepét az etiléntermelés megváltozott szintjével rendelkező transzgenikus (genetikailag módosított) növények kifejlesztésével tisztázták (Klee et al., 1991; Oeller et al., 1991). Az etilén érzékelésének kémiai gátlása, különösen az 1-MCP-vel, ugyanezt bizonyította (Sisler és Blankenship, 1993; Sisler és Serek, 1997). Az aromaképződés is erősen függ az etilén szintjétől és hatásától (Alexander és Grierson, 2002; Flores et al., 2002; Rupasinghe et al., 2000).

Zhu és munkatársai (2005) áttekintő tanulmányukban aktualizálták az etilén szerepét a klimaktérikus gyümölcsök – például a paradicsom – illó aromakomponenseinek bioszintetikus útvonalaiban. Egyben azt is tisztázták, hogy az illékony aromakomponensek termelődése részben vagy teljesen az etiléntől függ. Mindezek mellett egy alacsony etilén szint részt vesz a sebgyógyulásban és a különböző fertőzésekre adott válaszreakciókban néhány klimaktérikus és nem klimaktérikus gyümölcsben (Pech et al., 2002; Saltveit, 1999; van Loon et al., 2006).



7. ábra: Az etilénszintézis sematikus ábrája (Malambane et al., 2018 nyomán)

A paradicsom a közepes etiléntermelők közé sorolható a banánnal és fügével együtt (1. táblázat). Ez alapján az érett paradicsom etiléntermelése 20°C-on nagyjából 1-10 µL/kg h közé tehető.

1. táblázat: Különböző termények osztályba sorolása etiléntermelésük alapján (Kader (2002) nyomán)

Osztály	Etiléntermelés 20°C-on (µL/kg h)	Termény
Nagyon alacsony	<0,1	spárga, cseresznye, citrusfélék, szőlő, eper, burgonya
Alacsony	0,1-1	áfonya, szeder, uborka, paprika, ananász, görögdinnye
Közepes	1-10	banán, füge, mangó, paradicsom
Magas	10-100	alma, barack, kivi, avokádó, körte, szilva
Nagyon magas	>100	maracuja, datolyaszilva

3.5.2 A paradicsom légzése

Termőföldi növények esetében a légzés és ezáltal a vízvesztés elsősorban a sztómákon (gázcserenyílásokon) keresztüli transpiráció (párologtatás) révén történik (8. ábra).

Számos vizsgálat alátámasztja, hogy a paradicsomnövény esetében a gázcserenyílások legnagyobb számban a levelek fonák oldalán találhatóak (Brodribb et al., 2016; Sack és Holbrook, 2006; Torres Quezada és Gandini Taveras, 2023), ahol a sűrűségük az adott fajtától függően akár 50-150 sztóma/mm² is lehet (Torres Quezada és Gandini Taveras, 2023). A fotoszintetizáló szárakon szintén jelen vannak sztómák, melyek később lenticellákká alakulhatnak át (Sanjayanti et al., 2024). A paradicsom termése ezzel szemben asztomatikus, tehát a bogyó bőrszövege nem

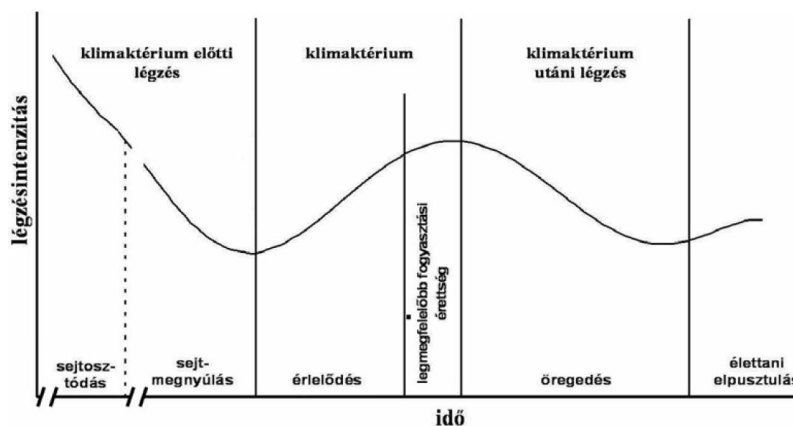
tartalmaz sztómákat (Minorsky, 2020). Továbbá a bogyón lenticella sem található, mivel a bogyó külső rétege (exocarp) vékony, sima és fényes (Torres Quezada és Gandini Taveras, 2023), tehát másodlagos megvastagodás nem figyelhető meg rajta. Ezzel szemben a lenticellák általában a másodlagosan megvastagodott szöveteken találhatóak meg (Zhong et al., 2024).



8. ábra: A paradicsom levél fonákján található gázcsere nyílások (forrás: Torres Quezada és Gandini Taveras, 2023)

Fich és munkatársai (2020) a világ különböző tájairól származó 398 paradicsomváltozatot vizsgáltak meg, majd hét olyan fajtát választottak ki részletes elemzésre, amelyek a legnagyobb és legkisebb transzspirációs vízvesztést mutatták. Arra jutottak, hogy a bogyó esetében a gázcsere elsősorban a trichomákhoz (szőrök) kapcsolódó poláris pórusokon keresztül történik. Ezek a mikroszkopikus pórusok a kutikula vízáteresztésének fő útvonalai, és a trichomák eltávolításával szabaddá válnak. Ugyanakkor felmerül a kérdés, hogy vajon a bogyó ízesülése milyen mértékben játszik szerepet a légzés során, tekintve, hogy a zöld növényi szárakon is találhatóak sztómák.

Mivel a légzésintenzitás lecsökkentése a tárolás során kedvező a minőségmegőrzés szempontjából, a termények légzésének pontos mérése fontos tényezővé vált a kutatásokban (Wareham és Persaud, 1999). A betakarított kertészeti termékek légzése során a bennük tárolt oxigén, illetve a környezetből felvett



9. ábra: A klimaktérikus légzés szakaszai (Biale és Young, 1981 nyomán)

oxigén kerül felhasználásra. A biológiai oxidáció eredményeként pedig szén-dioxid keletkezik (Calegario et al., 2001). A paradicsom érésének egyik legfontosabb mutatója a légzésintenzitás és az etiléntermelés (Maharaj et al., 1999; Meir et al., 1992).

Mivel a paradicsom az utóérő gyümölcsök közé sorolható, így a légzése klimaktérikus jelleget mutat (9. ábra). Ez abban nyilvánul meg, hogy az érés beindulását megelőzően egy klimaktérikus

minimum figyelhető meg a légzésintenzitásban, amit egy klimaktérikus maximum követ, majd újra lecsökken a termény légzésintenzitása (Andrews, 1995).

3.5.3 A paradicsom állományváltozása érés során

A gyümölcsök és zöldségek állománya elsősorban a turgornyomásból (a sejt belsejében lévő víz által a sejtfalra kifejtett nyomás), a sejtfalak összetételéből, valamint a középső lamella – a sejtek közötti „ragasztóanyag” – állapotából adódik. A paradicsom víztartalma körülbelül 93–95%, szárazanyagtartalma 5–7%, melynek 80–90%-a vízoldható. A paradicsomtermékek állományát leginkább a - főleg a sejtfalakból származó -oldhatatlan szilárd anyagok határozzák meg (Barrett et al., 2010). A növények elsődleges sejtfala – így a paradicsomé is – három fő poliszacharid-típusból áll: cellulóz, hemicellulóz (a paradicsomban főként xiloglükán), valamint pektinek. A paradicsomban – ahogy más lédús gyümölcsökben is – az érés során a legjelentősebb változások a pektin-poliszacharidokban zajlanak. A pektin a legösszetettebb szerkezetű sejtfal-poliszacharid, és kulcsszerepe van a sejtek összetartásában. Az érés során a pektin-polimerek enzimek hatására lebomlanak (Steele et al., 1997; Wang et al., 2018). Bourne (2002) szerint a feldolgozásra szánt paradicsom állományát befolyásoló tényezők két csoportra oszthatók (2. táblázat).

2. táblázat: A feldolgozásra szánt paradicsom állományát befolyásoló tényezők (Bourne, 2002 nyomán)

Termesztési tényezők	Szövet-specifikus tényezők
fajta vagy hibrid típusa,	sejtfal kémiai összetétele,
szedési érettség, érettségi fok,	sejtfalat puhító enzimek aktivitása,
agrotechnikai tényezők	turgornyomás,
pl. trágyázás, öntözés, napfény,	sejtek alakja, méreteloszlása,
környezeti stresszhatások	sejtek közti üregek mennyisége és eloszlása,
pl. aszály, sóstressz, fagy.	specializált szövetek aránya és elrendeződése

A paradicsom állománya az egyik legfontosabb minőségjellemző, amely a vásárlók és fogyasztók döntéseit jelentősen befolyásolja. A paradicsom keménysége az érettség előrehaladtával – a frissen szüretelttől a túlérrettig – folyamatosan csökken, ezzel együtt csökken az elfogadhatóság is (Batu, 2004). Radzevičius és társai (2012) különböző fajtájú és érettségi állapotú paradicsomok keménységét vizsgálták. Arra jutottak, hogy az érés folyamán, míg a paradicsom a zöldérett állapotból eljut a teljes érettségig, akár harmadára is csökkenhet a keménysége. A kemény paradicsom jól eladható a szupermarketekben, míg a puha bogyókat nehezebb értékesíteni, és a feldolgozásuk is nehezkesebb (Batu, 1995). A konzerviparban – különösen az egész konzervparadicsom esetében – a keménység az egyik legfontosabb minőségi mutató. Ez összefügg az érettségi állapottal, valamint azzal, mennyire érzékeny a gyümölcs a

szület és a feldolgozás közbeni sérülésekre (Arazuri et al., 2007). A betakarításkor, valamint azt követően jellemzően kétféle mechanikai erő éri a paradicsomot: az egész bogyót érő, valamint a pontszerű nyomóerő. A túl nagy nyomás zúzódást vagy repedést okozhat, míg a pontszerű szúrások fokozzák a seblégzést, ami gyorsabb romlást és esztétikai hibát, továbbá mikrobiológiai eredetű romlást eredményez (Allende et al., 2004). Sirisomboon és munkatársai (2012) roncsolásos állományvizsgálat során kapott különböző jellemzőket (például rugalmasság, deformáció, relaxáció, folyáshatár) vizsgáltak eltérő érettségi állapotú paradicsomokon. Eredményeik szerint ezen jellemzők alkalmasnak bizonyultak az érés előrehaladtával bekövetkező állományváltozás detektálására a paradicsom esetében.

3.5.4 A paradicsom színeződése

Az érett paradicsom jellegzetes vörös színe a termésben található karotinoid, likopin és β -karotin lerakódásának köszönhető, amelyek a zöldből vörösbe való színátmenethez kapcsolódnak, amikor a kloroplasztiszok kromoplasztiszokká alakulnak át. A paradicsom érési szakaszában, azaz amikor a piros/narancs színezet az emberi szem számára láthatóvá válik a likopin elkezd felhalmozódni, és koncentrációja 500-szorosára nő az érett gyümölcsökben (Fraser et al., 1994). Az érés és az ízek kialakulásának egyik kulcsfontosságú folyamata tehát a kloroplasztiszok kromoplasztiszokká történő átalakulása. Ez az átalakulás többféle szerkezeti változással jár együtt, amelyek jelentősen befolyásolják a gyümölcs beltartalmát és ízvilágát. A kloroplasztiszok elveszítik fotoszintetikus működésüket, mivel a bennük lévő tilakoid membránok szétesnek, miközben a kromoplasztiszokban egyre több plasztoglobula jelenik meg. Ezek a kis struktúrák nagy mennyiségben halmozják fel a karotinoidokat – főként a likopint és a β -karotint – kristályos formában. Az ezen pigmentek okozta színváltozás a jól látható jele annak, hogy a gyümölcs megérett, és fogyasztásra alkalmas. Ráadásul ezek a vegyületek táplálkozási szempontból is fontosak, mivel az A-vitamin előanyagai és erős antioxidánsok (Klee és Giovannoni, 2011). A kromoplasztiszok és a bennük található plasztoglobulák fehérjeösszetételét több növényfajban is megvizsgálták. A paradicsom kromoplasztiszai különösen aktívak anyagszere szempontból. Számos enzim kimutatható bennük, amelyek karotinoid-, aminosav- és zsírsavsintézisben vesznek részt (Barsan et al., 2010).

A kloroplasztiszok kromoplasztiszokká alakulása, a klorofill és a membránszerkezetek lebomlása, valamint a karotinoidok fokozott felhalmozódása együttesen jellemzik az érési folyamatot, különösen a paradicsom esetében. Ez egyirányú, vissza nem fordítható változás. A karotinoidok szintézisének egyik kulcslépése a fitoén-szintáz enzim működése, amelynek aktivitását az etilén erősen befolyásolja. Ez utal a hormon- és a kromoplasztfejlődés szoros

kapcsolatára. Az etilén emellett gátolja a likopin β -cikláz gén működését is, amely különben a vörös likopint narancssárga β -karotinná alakítaná át (Alba et al., 2005).

3.5.5 A paradicsom ízében bekövetkező változások

A legtöbb, emberek által fogyasztott gyümölcs – így a paradicsom is – úgy alakult ki az evolúció során, hogy vonzza az állatokat, amik segítenek a magok szétszórásában. Amikor a paradicsommagok teljesen megérnek, a gyümölcsben olyan kémiai változások mennek végbe, amelyek vonzóvá teszik azt az állatok számára. A sejtfalak szerkezete is megváltozik, amely puhulást eredményez. Ahogy a kloroplasztizok kromoplasztizokká alakulnak át, nagy mennyiségű karotinoid, főként likopin és β -karotin szintetizálódik. Ez vizuális jelzést ad arra, hogy a gyümölcs érett. Az érési folyamatot irányító egyik kulshormon, az etilén, nemcsak a színt és az állományt befolyásolja, hanem a glikoalkaloid-tartalmat is megváltoztatja (Iijima et al., 2009). Az éretlen paradicsomban nagy mennyiségben megtalálható α -tomatin nevű vegyület a kesernyés ízért felelős. Az érés folyamán a szintje – az etilén hatására – jelentősen lecsökken (Iijima et al., 2009), így a gyümölcs íze kellemesebb lesz (Rick et al., 1994). Végül bizonyos, az ízhez hozzájáruló vegyi anyagok kezdenek el felhalmozódni, melyeknek a paradicsom esetében három fő csoportja van: ezek a cukrok, a savak és az illékony anyagok. Ezek együtt, a gyümölcs puhaságával és színével együtt olyan kombinációt alkotnak, amelyet az agy „paradicsomként” azonosít. Bár a cukrok és a savak feltétlenül szükségesek a jó ízhez, az illékony anyagok azok, amelyek valóban meghatározzák a paradicsom egyedi ízjegyeit (Baldwin et al., 2000). A paradicsom ízéhez 20–30 illékony vegyület járul hozzá pozitívan – vagyis ezek olyan mennyiségben vannak jelen, hogy képesek érzékelhetően stimulálni a szaglásunkat. Ezek az anyagok aminosavakból, zsírsavakból és karotinoidokból származó vegyületek. Kémiai sokféleségük ellenére van egy közös fontos tulajdonságuk: mindegyikük valamilyen, az emberi táplálkozásban nélkülözhetetlen vegyi anyagból származik. Ezek közé tartoznak az esszenciális aminosavak, mint a fenilalanin, a leucin vagy az izoleucin, valamint az esszenciális zsírsavak, például a linolénsav. A β -karotin – amely az A-vitamin előanyaga – szintén egy kiemelkedően fontos aromaanyag, hiszen közvetlen előanyaga a β -iononnak, amely jelentős mértékben hozzájárul a paradicsom illatához (Goff és Klee, 2006). Ha figyelembe vesszük, hogy egy paradicsomgyümölcsben körülbelül 1000 kimutatható metabolit van (Iijima et al., 2008), akkor figyelemre méltó, hogy gyakorlatilag az összes fontos aromaanyag alapvető tápanyagokból származik. Ez erősen utal a koevolúcióra, vagyis arra, hogy a növények és állatok fejlődése szorosan összefonódott. A növények olyan vegyületeket állítanak elő, amelyek vonzóak az állatok számára, az állatok pedig úgy fejlődtek ki, hogy felismerjék és felkutassák azokat a vegyületeket, amelyek a fontos tápanyagok jelenlétét jelzik (Klee és Giovannoni, 2011).

Az érés kezdetén a fejlődés során felhalmozódott keményítő glükózzá és fruktózzá bomlik le, ezek az érett gyümölcs két fő cukortípusai (Ho et al., 1982). Ez a két cukor a gyümölcs friss tömegének 2-4%-át teszi ki. A szerves savak, elsősorban a citrom- és almasav, szintén nagy mennyiségben fordulnak elő. Az érett gyümölcsök pH-értéke általában 4 körül van. Mind a cukrok, mind a savak kritikusak a jó íz szempontjából, bár a különböző egyének eltérő preferenciákkal rendelkeznek az édesség és a savak egyensúlya tekintetében (Centeno et al., 2011).

3.6 A paradicsom optimális tárolási körülményei

Az értékesítés során a hőmérséklet az egyik legfontosabb tényező, amely hatással van a paradicsom minőségére, mivel közvetlenül befolyásolja a veszteségek mértékét. A hőmérséklet megfelelő szabályozása a leghatékonyabb módszer a friss termékek minőségének megőrzésére az ellátási lánc teljes szakaszában (Arah et al., 2015).

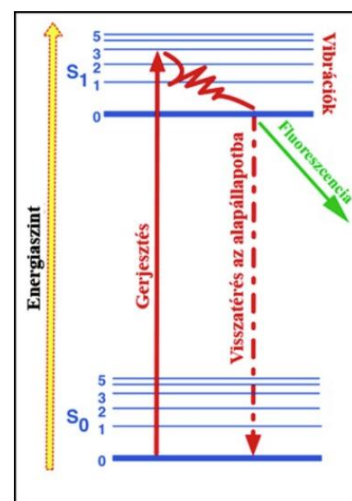
Tekintettel a paradicsomnövény és így a termése meleg égvövi eredetére, a környezeti hőmérséklet hatással lehet a paradicsom színére, keménységére és ízére is (Tadesse et al., 2015). A 10 °C alatti tárolás rontja a paradicsom színekialakulását (Khairi et al., 2015), ugyanakkor a 20 °C feletti tárolási hőmérséklet a keménység csökkenését és nagyobb tömegvesztést eredményez (Tadesse et al., 2015). A hűtve tárolás csökkenti a paradicsom metabolikus aktivitását, míg a magasabb hőmérséklet növeli a párologtatás, a légzés és az etiléntermelés mértékét. A túl alacsony hőmérséklet viszont minőségromlást okozhat a hidegkárosodás megjelenése miatt (Atanda et al., 2011). A paradicsom hidegérzékeny és fiziológiai károsodást szenved, ha 10 °C alatti hőmérsékleten tárolják. A hidegkárosodás tünetei közé tartozik a lassú és rendellenes érés, a megnövekedett fogékonyság a különböző betegségekre, a fokozottabb párologtatás, valamint a felszíni besüppedések kialakulása. Ezek a tünetek különösen akkor jelentkeznek, amikor a paradicsomot hideg környezetből melegebb, nem hűtött helyiségbe helyezik át (Paull, 1990). A pirosra érett paradicsom rövidebb ideig tárolható, de jobban tűri az alacsony hőmérsékletet, mint a zöldérett egyedek (Rubatzky és Yamaguchi, 1997), azaz a hidegérzékenységi érettségi állapottól is függ. A legtöbb tanulmány szerint a körülbelül 10 °C-os tárolási hőmérséklet a legalkalmasabb a paradicsom minőségének megőrzésére (Cantwell, 2010; Khairi et al., 2015; Ponce-Valadez et al., 2015), valamint a puhulás lassítására (Orhewere et al., 2019). A relatív páratartalom szintén fontos tényező a paradicsom tárolásánál (Ramaswamy, 2015), mivel hatással van az állományra és a tömegvesztésre is (El-Ramady et al., 2015), a párologtatás mértékére gyakorolt hatása révén. Az optimális relatív páratartalom paradicsom esetében 85-95% (Tan, 2006).

3.7 A klorofill fluoreszcencia jelensége és szerepe az érésbiológiai folyamatok során

A fotoszintézis folyamata a növényi sejtek kloroplasztjaiban zajlik és két fő részre osztható: a fényszakaszra és a sötétszakaszra. A fényszakasz a tilakoid membránrendszerben megy végbe,

és lényegében elektronátvitelen alapuló redoxreakció. Itt a fényenergia lehetővé teszi, hogy egy elektron egy donorról egy akceptor molekulára kerüljön a redoxpotenciál különbsége révén. A fotoszintézisben részt vevő pigmentek a 400–700 nanométer közötti hullámhossztartományban képesek elnyelni a fényt. Két hullámhosszon – kb. 440 nm-nél és 660 nm-nél – a fényelnyelés különösen intenzív, amelyek megfelelnek a kék és a vörös fénytartományoknak. A zöld fényt ezzel szemben nem hasznosítják, hanem visszaverik, ezért a növények jellemzően zöld színűnek tűnnek. Természetesen a növények színe más típusú pigmentek jelenlététől is függhet (Allaga, 2014).

Az olyan molekulákat vagy molekularészeket, amelyek képesek a látható fény bizonyos hullámhosszait elnyelni, kromofóroknak nevezzük. Ezzel szemben fluorokrómoknak azokat a vegyületeket hívjuk, amelyek fény hatására nem véglegesen nyelik el a fényenergiát, hanem az elnyelt fotonok hatására gerjesztett állapotba kerülnek, majd nagyon rövid időn belül visszatérnek az eredeti, az ún. alapállapotukba, miközben a felvett energiát más hullámhosszú fény formájában kisugározzák. Ezt az energiakibocsátással kísért visszatérési folyamatot nevezzük fluoreszcenciának (Csikós, 2012). A fotoszintézissel kapcsolatos fontosabb hullámhosszokat a 3. táblázat részletezi.



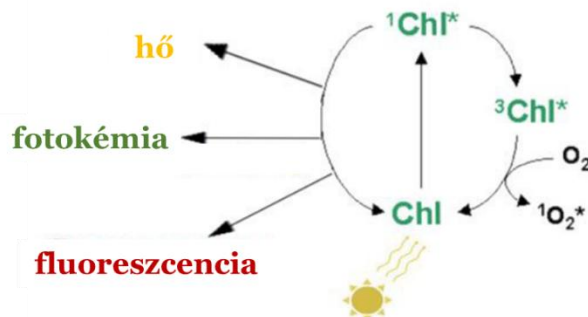
10. ábra: A fluoreszcencia kialakulása (forrás: A Jablonski diagram alapján Csikós, 2012)

A klorofill pigmentfehérje-komplexek formájában fordul elő a zöld növényi részekben található PSII-ben (II. fotoszintetikus rendszer), PSI-ben (I. fotoszintetikus rendszer) és az egyes reakcióközpontokhoz kapcsolódó fénygyűjtő komplexekben (LHC) (Baker, 2008). Amikor egy fénykvantum (foton) eléri a molekulát, az képes egy külső elektront magasabb energiájú, úgynevezett S_1 szintre gerjeszteni, vagyis az elektron egy távolabbi pályára lép (10. ábra) (Allaga, 2014).

A klorofill által elnyelt fényenergia háromféleképpen hasznosulhat (11. ábra):

- a fotoszintézis (fotokémia) hajtóereje lehet (az energiát egy másik molekulának adja át, amely ezt követően elektronleadással egy elektronakceptor molekulán keresztül kerül alapállapotba),
- hő formájában kerül kibocsátásra, amelyet nem-fotokémiai kioltásnak (NPQ) nevezünk,
- fényként, azaz fluoreszcenciaként kerül visszasugárzásra (Niyogi, 2000; Niyogi et al., 2015).

Környezeti hőmérsékleten a fluoreszcencia nagy része a PSII-hez kapcsolódó klorofill-a molekulákból származik (Krause és Weis, 1991) és a fotoszintetikus aktivitás egyik mérőszáma, mely különösen a II. fotoszintetikus rendszerről (PSII) ad információt (Krause és Weis, 1991; Moustakas et al., 2022, 2021; Murchie és Lawson, 2013).



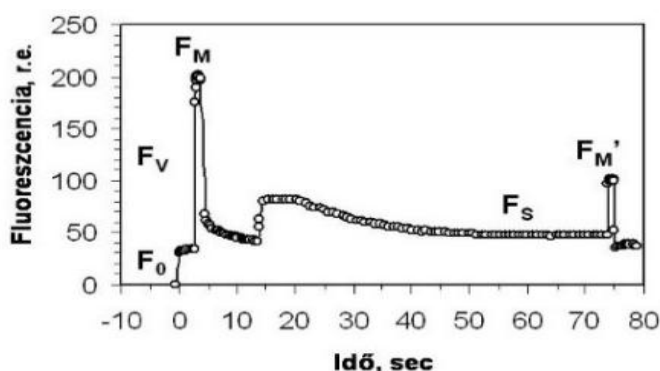
11. ábra: A gerjesztett S_1 energiaállapotú klorofill molekula ($^1\text{Chl}^*$) alapállapotba történő visszatérésének 3 útja. A leggyorsabb lecsengési útvonal a fotokémiai reakció (Niyogi, 2000; Niyogi et al., 2015). Amennyiben a $^1\text{Chl}^*$ nem ezen három fő módon tér vissza az alapállapotba, belső konverziók vagy relaxáció révén alacsonyabb energiájú triplet-állapotba ($^3\text{Chl}^*$) kerül. Ez a $^3\text{Chl}^*$ reakcióba léphet molekuláris oxigénnel (O_2), amely során szinglet oxigén ($^1\text{O}_2^*$) keletkezik – ez egy rendkívül reakcióképes oxigénformát (ROS) jelent (Moustakas et al., 2020; Niyogi, 2000; Niyogi et al., 2015) (Moustaka és Moustakas, 2023 nyomán).

A pigmentek által elnyelt fénynek nagyjából 8%-a ily módon – fluoreszcenciaként – kerül vissza a környezetbe. Ez az energia nem hasznosul a fotoszintézisben, így a folyamat szempontjából energiavesztésként értelmezhető (Allaga, 2014). Ez a három folyamat nem egymástól függetlenül, hanem egymással versengve zajlik. Éppen ezért a klorofill-fluoreszcencia intenzitása fontos információt ad a fotokémiai kvantumhatásfokról (Baker, 2008; Butler, 1978; Pfündel, 1998). Minél nagyobb a fluoreszcencia mértéke, annál rosszabbul hasznosítja a fényt a növény (Krause és Weis, 1991; Moustakas et al., 2022a, 2021). Ez a lecsökkent fényhasznosítás információt szolgáltat a növényi szövetek épségéről, károsodásáról. A fluoreszcencia képes a látható tünetek megjelenése előtt jelezni a károsodást, ezáltal alkalmas lehet a különböző károsodások korai diagnosztizálására (Allaga, 2014).

Miután Kautsky és Hirsch (1931) megfigyelte, hogy a sötétbe alkalmazkodott (sötétadaptálódott) levelek megvilágítása által kiváltott fluoreszcencia-változások minőségileg összefüggnek a CO_2 -asszimiláció változásával, nyilvánvalóvá vált számukra, hogy bizonyos körülmények között a fotoszintetikus szervezetek fluoreszcencia-kibocsátása összefügg a fotoszintetikus sebességükkel (McAlister és Myers, 1940). A klorofill fluoreszcenciás mérések alapja a Kautsky-effektus (Kautsky et al., 1960; Krause és Weis, 1991), mely a 12. ábrán látható:

Egy egészséges, sötétbe alkalmazkodott növényben a fotoszintetikus kapacitás maximálisan rendelkezésre áll, és így a klorofill-fluoreszcencia hozama minimális (F_0). A fotoszintetikus

kapacitás nullára csökkenthető herbicid vagy olyan erős fényimpulzus hatására, amely átmenetileg elzárja a fotoszintetikus elektrontranszport útvonalat. Ha a fotoszintetikus hozam nulla, a fluoreszcencia-kibocsátás eléri a maximumot (F_m) (Govindjee, 2004).



$$F_v = F_m - F_0 \quad [1]$$

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{F_m - F_0}{F_m} \quad [2]$$

12. ábra: A klorofill fluoreszcencia görbe jellemző lefutása (forrás: Zsom, 2007)

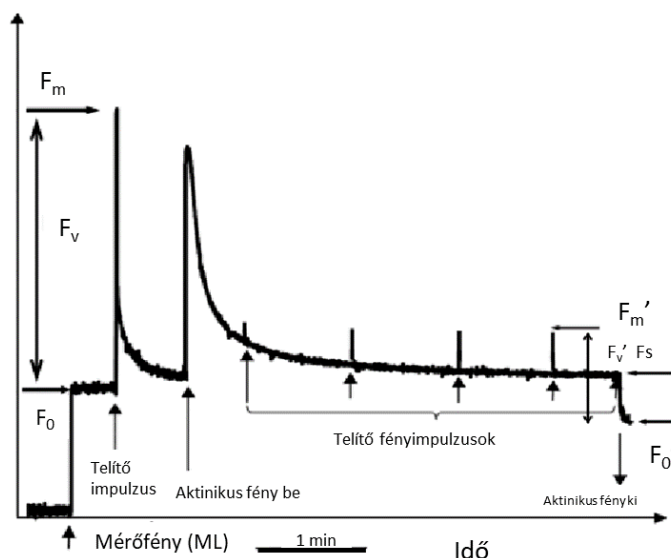
A változó fluoreszcencia (F_v) úgy számítható ki, hogy a klorofill fluoreszcencia maximális (F_m) és minimális (F_0) értékei közötti különbséget vesszük [1] (Maxwell és Johnson, 2000; Pomodakis et al., 2005). A PSII reakciócentrumainak fényhasznosítási hatékonyságát – vagyis a zöld növényi szövetek fényenergia-felhasználásának képességét, valamint a kloroplasztok aktivitását – az F_v/F_m hányados fejezi ki [2]. Ez az érték optimális esetben 0,83 és 0,85 közé esik. Ha a növényt külső vagy belső stresszhatások érik, és ez fiziológiai változásokat idéz elő, akkor az F_v/F_m arány csökkenése figyelhető meg (Kosson, 2003; Pomodakis et al., 2005; Urbano Bron et al., 2004).

3. táblázat: A fotoszintézissel kapcsolatos fontosabb hullámhosszok

Hullámhossz (nm)	Típus	Eredet	Irodalmi forrás
430-440	Gerjesztés	Klorofill <i>a</i> abszorpciós maximum (kék tartomány)	(Chen and Blankenship, 2011)
450-460	Gerjesztés	Klorofill <i>b</i> abszorpciós maximum (kék-zöld tartomány)	(Croce, 2012; Kume et al., 2018)
~640	Gerjesztés	Klorofill <i>b</i> abszorpciós maximum (vörös tartomány)	(Simkin et al., 2022)
650-675	Gerjesztés	Klorofill <i>a</i> abszorpciós maximum (vörös tartomány)	(Gitelson et al., 1996)
685-690	Emisszió (fluoreszcencia)	PSII fő emissziós csúcs	(Franck et al., 2002)
730-740	Emisszió (fluoreszcencia)	PSI fő emissziós csúcs (far-red tartomány)	(Croce et al., 1996)

A klorofill-a fluoreszcencia többféle módszerrel is mérhető, például a mérőfény nagy frekvenciájú fel- és lekapcsolásával („modulálás”) működő PAM technikával. A mérés megkezdése előtt a növényi részt

néhány percre sötétbe kell szoktatni (sötétadaptáció). Ennek időtartama attól függ, hogy előtte milyen erősségű fény érte, valamint milyen növényről van szó. A fluoreszcencia sötétben mért minimális értékét (F_0) gyenge intenzitású mérőfényvel (ML) határozzák meg. A sötétben mért maximális fluoreszcencia (F_m) értékét egy telítő fényimpulzus segítségével mérik. Amikor a levelet aktinikus (napsugárzás intenzitású) fényvel (AL) világítják meg – ez az



13. ábra: Az egyes klorofill-a fluoreszcencia alapparaméterek mérése PAM módszerrel, sötétadaptált növénymintán (Moustakas et al., 2020 nyomán)

alkalmazott világítási intenzitás –, akkor egy újabb telítő fényimpulzussal meghatározható a fényhez adaptálódott állapotban mért maximális fluoreszcencia (F_m') értéke is (13. ábra). A fényben kialakuló állandósult fluoreszcenciaszintet (F_s) közvetlenül az AL kikapcsolása előtt mérik meg. Ezután a fényhez adaptált állapotban mért minimális fluoreszcenciaértéket (F_0') rögzítik. A F_m' és F_0' közötti különbség adja a fényben mért változó fluoreszcenciát (F_v') (Moustaka és Moustakas, 2023).

Az abiotikus vagy biotikus stresszhatások nem mindig egyenletesen befolyásolják a növényi részek egészének fotoszintézisét (Chaerle et al., 2007; Jin et al., 2022; Moustaka et al., 2022; Sperdouli et al., 2022), ezért a zöld részek felületén a fotoszintetikus aktivitás jelentős térbeli eltéréseket mutathat (Bayçu et al., 2018; Sperdouli et al., 2021). Emiatt a hagyományos, pontszerű klorofill-fluoreszcencia mérések nem képesek pontosan tükrözni az egész növény fiziológiai állapotát. Ezekben az esetekben célszerűbb a klorofill-fluoreszcencia képalkotásos („imaging”) módszerének alkalmazása (Barbagallo et al., 2003; Bresson et al., 2015; Moustakas et al., 2022b, 2021).

A PAM-alapú fluoreszcencia képalkotás („pulse-amplitude modulation imaging”) során a fluoreszcenciajelet CCD kamerával rögzítik, így lehetőség nyílik a fotoszintetikus paraméterek térbeli eltéréseinek feltérképezésére. Ez a technika egyre elterjedtebb eszközzé válik a növényi

stresszválaszok (akár biotikus, akár abiotikus eredetűek) vizsgálatában (Arief et al., 2023; Moustakas et al., 2022b, 2021; Oláh et al., 2021; Stamelou et al., 2021).

A klorofill fluoreszcencia képalkotást (CFI) számos területen alkalmazzák, már a fenotipizálástól kezdve. Ezek a korszerű képalkotó rendszerek lehetővé teszik a növények nem invazív (roncsolásmentes) megfigyelését abiotikus vagy biotikus stresszhatás alatt is (Langan et al., 2022; Moustakas et al., 2022c, 2021; Zhang et al., 2022). Ugyanakkor a nagy érzékenyséű CFI fluorométerek lehetővé teszik a mérést alacsony klorofilltartalmú szövetekben is, mint például sok gyümölcs, ahol az érés során a kloroplasztiszok lebomlanak. Még az élénk színű gyümölcsök is tartalmazhatnak aktív kloroplasztiszokat, amelyek elegendő fluoreszcenciajelet adnak a méréshez (Nedbal et al., 2001). Viszont alacsony klorofilltartalmú szövetek – például egyes gyümölcsök, gyökerek vagy virágzatok – esetében körültekintéssel kell eljárni, mert a mért fluoreszcencia akár háttérzajból is származhat. Ha egy szövet egyáltalán nem tartalmaz klorofillt, akkor a CFI mérésének nincs értelme (Buschmann et al., 2009).

A módszert először Sowinska és munkatársai (1998) alkalmazták almán betakarításkori és tárolás utáni gyümölcs minőség vizsgálatra. Kiemelkedően magas fluoreszcenciát észleltek bizonyos pontokban, melyek szabad szemmel nem voltak láthatóak, ami a fotoszintetikus apparátus sérülésére utalt – különösen azoknál a terményeknél volt jellemző, amelyeket nem trágyáztak nitrogénnel. Ciscato és munkatársai (2008) szintén almánál alkalmazták a CFI-t a tárolhatóság becslésére a termesztési körülmények (N-, Ca- vagy vízellátás) függvényében. Buschmann és munkatársai (2009) az alma minőségbeli változásait követték nyomon az érés és tárolás során. Azt tapasztalták, hogy az F_{670}/F_{740} arány 2 hónap után jelentősen megnőtt, ami a klorofill bomlását jelezte. Huybrechts és Valcke (2007) 'Conference' körtéken végeztek hosszabb megfigyelést, amely során a fotoszintetikus aktivitás fokozatos csökkenése volt tapasztalható az érés és az öregedés alatt. Citrom esetében is használták a CFI-t: a melegvizes hősokkolás okozta károsodások a héjon már jóval a tünetek megjelenése előtt kimutathatók voltak. A sérült és ép területek közötti legjobb képalkotási kontrasztot az F_0 és F_m értékek biztosították. Az F_0 érték növekedése a sérült részeken fotoinhibíciós károsodásra utalt (Obenland és Neipp, 2005). Nedbal és munkatársai (2001) kimutatták, hogy a CFI citrom esetében alkalmas arra, hogy megkülönböztesse a látszólag hasonló kinézetű, de eltérő eredetű sérüléseket. Amennyiben a károsodást a *Penicillium digitatum* fertőzés okozta, az érintett területeken 48 órán belül – még a tünetek megjelenése előtt – növekedett az F_0 érték, míg az F_v csökkent. Ezzel szemben azok a sérült felületek, ahol az F_0 alig vagy egyáltalán nem növekedett, viszonylag stabilak maradtak, és az érés során nem terjedtek tovább. A legtisztább kontrasztot az egészséges és a fertőzött területek között az F_0/F_v arány képei adták (Nedbal et al., 2001). A CFI egy másik alkalmazása a gyümölcsök

utóérési szakaszában a szőlőszemekben történő antocianin-felhalmozódás heterogenitásának kimutatása. Az érett szőlő esetében a fenolos vegyületek mennyisége kulcsfontosságú paraméternek számít, amely meghatározza a szüret optimális időpontját, és különösen fontos a minőségi borkészítéshez. Az elemzések során a klorofill-fluoreszcenciás képeken a pixelek intenzitása szoros korrelációt mutatott a Sangiovese fajta bogyóiból készült kivonatok antocianin-koncentrációjával (Agati et al., 2008). Színes fluoreszcencia képalkotást alkalmaztak kaliforniai paprikánál, ahol az F_{440}/F_{690} , F_{440}/F_{740} és F_{690}/F_{740} arányok alapján készítettek képeket zöld és narancs/vörös színű paprikákon – tárolás előtt és után – és szignifikáns különbséget kaptak. Ez azt jelenti, hogy ez a technika ígéretes eszköz lehet automatizált gyümölcsválogató gépek számára (Buschmann et al., 2009). Saito (2009) lézerindukált fluoreszcenciával követte nyomon a saláta fejlődését a szántóföldön, a vetéstől a betakarításig. Az F_{460}/F_{685} arány végig változott az időszak során: az első hetekben a klorofilltartalom-növekedéshez kapcsolódóan nőtt, majd enyhe csökkenést mutatott. A betakarítás ideje egy olyan szakaszra esett, amikor ez az arány egy csúcs után érte el minimumát. Schlüter és munkatársai (2008) zöld leveles zöltségek (pl. galambbegysaláta) esetén vizsgálták a nagy hidrosztatikus nyomáskezeléses kísérletük (HHP) során a nyomás- és a hőkezelés hatását. 150 MPa fölötti nyomás vagy 45 °C fölötti hőmérséklet visszafordíthatatlanul csökkentette az F_v/F_m arányt, ami a friss termékek kíméletes kezelésének korlátjaira mutat rá.

Hoffmann és munkatársai (2015) szintén a klorofill-fluoreszcenciás módszert alkalmazták a paradicsomok érettségi állapotának meghatározására a betakarítás előtti és utáni folyamatok során. Az így kapott fluoreszcenciaértékeket összevetették a már bevált, reflexióra és visszaverődésre alapozott, roncsolásmentes optikai módszerekkel. Kim és munkatársai (2019) a paradicsom karotinoidtartalmát mérték, majd vizsgálták, hogy a fluoreszcencia értékek milyen pontossággal jósolják meg a karotinoidszintet, összehasonlítva a színindexek pontosságával. A kutatás során számos fluoreszcencia- és színmutató között nagyon erős korrelációt találtak. Abdelhamid és munkatársai (2021) kísérleteik alapján arra jutottak, hogy a klorofill-fluoreszcencia lassú indukcióján alapuló paraméterek alkalmazása lehetővé teszi a paradicsomok érettségi állapot szerinti pontosabb és objektívebb szétválogatását. Ez egyenletesebb osztályozást eredményez, és ezzel a módszerrel legalább olyan hatékony és megbízható, mint a színezeti szög (hue angle) alapján történő besorolás.

Bár nem közvetlenül a fluoreszcenciát méri, ám a DA-meter® nevű berendezés a klorofill pigmentek fényelnyelésén alapul. A Bolognai kifejlesztett egy egyszerű eszközt (DA-meter® – Bolognai Egyetem szabadalom, WO/2007/017732, Costa et al., 2007), amely lehetővé teszi a gyümölcsök érésének meghatározását egyszerűbb és gyorsabb módon. Ez a technika egy új érési

indexet határoz meg, az úgynevezett „Absorbance Difference indexet” (I_{AD}), amely szorosan összefügg a gyümölcs klorofilltartalmának lebomlásával. A DA-meter® tehát egy hordozható, felhasználóbarát vis/NIR (látható és közeli infravörös) műszer, amely képes mérni az úgynevezett Absorbancia-különbségi indexet (I_{AD}), ami pontos képet ad a gyümölcs érettségi állapotáról. A DA-meter® hat dióda-LED-ből áll, amelyek mind a fotodióda-detektor körül helyezkednek el:

- három LED 670 nm hullámhosszon,
- három LED pedig 720 nm hullámhosszon bocsát ki fényt (Costamagna et al., 2013).

A 670nm a klorofill a molekula abszorpciós maximumánál van, míg a 720nm-es hullámhossz nem gerjeszti a klorofill molekulákat, így egy háttérspektrum felvételére alkalmas.

Butcaru és munkatársai (2021) alma esetében vizsgálták az érettségi állapot és a DA-index® összefüggéseit és arra jutottak, hogy a DA-meter® alkalmas az almák érettségének és ezzel összefüggésben a szüreti idő pontos meghatározására. Körte esetében szintén hasonló eredményekre jutottak az érettségi állapot és a DA-index® összefüggéseit vizsgálva (Butcaru, 2021).

3.8 1-Metilciklopropén

Az endogén etiléntermelés alapvető folyamat a klimaktérikus gyümölcsök és zöldségek éréséhez, és szabályozó szerepet tölt be az etilénfüggő folyamatokban (Theologis, 1992). Ugyanakkor exogén (külső forrásból származó) etilén alkalmazása gyakori, például a banán utóérlelése során is alkalmazzák. A kereskedelmi stratégiák azonban gyakran az etilén hatásának kivédésére épülnek, mivel ezzel késleltethető az érés és az öregedés a tárolás, valamint az értékesítés során. Az etilénhatás-gátlók alkalmazása új megközelítés, amellyel jelentősen meghosszabbítható az eltarthatóság (Baswal és Ramezian, 2021).

3.8.1 Az 1-MCP története

Az 1-MCP (1-metil-ciklopropén) etilénhatás-gátló anyagot 1994-ben Sisler fedezte fel, majd 1996-ban Sisler és Blankenship szabadalmaztatták (Sisler és Blankenship, 1996). A Floralife vállalat kapott engedélyt dísznövényekre történő alkalmazására. Az Ethylbloc néven forgalmazott termék α -ciklodextrin (α -CD) / 1-MCP formában tartalmazza az anyagot, amelyet vízzel keverve gáz halmazállapotban szabadul fel a vegyület. Az USA Környezetvédelmi Hivatala (USEPA) 1999-ben jóváhagyta dísznövények kereskedelmi alkalmazására (Liu et al., 2010; USEPA, 2002). A Floralife együttműködött a Rohm and Haas (AgroFresh) céggel, és ehető termékekre is alkalmazták, ekkor kapta a SmartFresh™ nevet (Reid és Staby, 2008). Az 1-MCP az etilénhatás-gátlók közé tartozik, mivel az etilén-receptorokhoz kötődik, így megakadályozza az etilénfüggő válaszreakciókat (Sisler és Blankenship, 1996; Sisler és Serek, 2003). Az 1-MCP

biztonságosságát, toxicitását és környezeti hatásait az USEPA 2002-ben értékelte (Liu et al., 2010; USEPA, 2002). 2006-ra már több ország – köztük Ausztrália, Argentína, Franciaország, Ausztria, Kanada, Brazília, Chile, Guatemala, Honduras, Costa Rica, Izrael, Hollandia, Mexikó, Dél-Afrika, Új-Zéland, Törökország, Svájc, az Egyesült Királyság, az USA és Magyarország – is engedélyezte az élelmiszeripari felhasználást. A regisztrált termények országoként eltérhetnek, de ide tartoznak például: alma, mangó, papaya, körte, ananász, szilva, avokádó, kajszi, sárgadinnye, nektarin, kivi, őszibarack, paprika, datolyaszilva, útifű, tök, paradicsom és tulipánhagyma. Napjainkban már számos más ország is gyártja és alkalmazza az 1-MCP-t, különféle növényekre (Baswal és Ramezianian, 2021).

3.8.2 Az 1-MCP pre-harvest alkalmazása

Az 1-MCP betakarítás előtti alkalmazását több növény esetében is tesztelték, például körténél, almánál és rózsánál. A vizsgálatok szerint a betakarítás előtti kezelés csökkentheti a gyümölcselhullást, lassíthatja a színesedést és a puhulást, csökkentheti az etiléntermelést és késleltetheti az érést (Villalobos-Acuña et al., 2011). Az 1–3 héttel betakarítás előtt kezelt almafák esetében megfigyelték, hogy a kezelés csökkentette a termésben a keményítőlebontást, az etilénszintet és a gyümölcselhullást (Elfving et al., 2007). Vágott rózsák esetében az 1-MCP 10 µl/L-es előzetes permetezése akár hat nappal meghosszabbította az eltarthatóságot (vázartartamot) (Huang et al., 2017).

3.8.3 Az 1-MCP post-harvest alkalmazása

Az 1-MCP gáznemű formája előállítható α -ciklodextrinbe (α -CD) zárt 1-MCP porból, vízben történő oldással, kb. 20–30 perc alatt 20 °C-on (alacsonyabb hőmérsékleten hosszabb idő kell a teljes felszabaduláshoz, 2°C-on akár 12-16 óra). Napjainkban az 1-MCP/ α -CD forma az egyik legelterjedtebb alkalmazási mód, bár új formákat is fejlesztettek, például tablettákat és csomagolóanyagokat. Az utóbbi esetben az 1-MCP valamilyen papír alapú anyagba van zárva, és a csomagolás után fokozatosan szabadul fel (Hu et al., 2017). Az 1-MCP zárt térben a növényi szövetekbe fokozatosan szívódik fel. A vizsgálatok szerint a baracknál az 1 µl/L koncentrációjú 1-MCP 80–90%-át is képesek az etilénreceptorok megkötni (Liguori et al., 2004).

A zárt tárolókban a légzés hatására bekövetkező CO₂-koncentráció növekedés nem befolyásolja hátrányosan az 1-MCP hatékonyságát (Blankenship és Dole, 2003). Az 1-MCP sokkal erősebben kötődik az etilénreceptorhoz, mivel a kompetitív hatáshoz százszor nagyobb etilénkoncentráció lenne szükséges. A magasabb 1-MCP koncentráció alkalmazására akkor van szükség, amikor a növény új etilénreceptorokat állít elő, amelyek „helyettesítik” a már blokkolt receptorokat. Ezt a jelenséget többszöri kezeléssel végzett kísérletek is alátámasztják (Jayanty et

al., 2004; Mir et al., 2001; Mir és Beaudry, 2001). Az utóbbi időben egyre nagyobb az érdeklődés az 1-MCP vizes oldatban történő alkalmazása iránt, mivel:

- akkor is használható, ha nem áll rendelkezésre zárt helyiség,
- lehetőséget ad a termények szelektív kezelésére,
- kisebb gyümölcsmennyiség kezelése is megoldható,
- illetve alkalmazható áztatással vagy permetként a csomagolás során.

Ez különösen hasznos lehet olyan gyümölcsök esetén, mint a körte, ahol a gáz halmazállapotban történő kezelés során nehéz elérni a megfelelő hatást, így az alacsonyabb koncentrációjú vizes kezelés hatékonyabb lehet (Baswal és Ramezianian, 2021).

3.8.4 A kezelés hatékonyságát befolyásoló tényezők

3.8.4.1 A fajta hatása az 1-MCP kezelés hatékonyságára

Az 1-MCP alkalmazására adott válasz fajtánként eltérő (Dauny és Joyce, 2002; Watkins et al., 2000). Megfigyelték például, hogy a 'McIntosh' és 'Cortland' almafajták esetében az 1-MCP hatása rövidebb ideig tart, míg az 'Empire' és 'Delicious' fajtáknál tartósabb (Watkins, 2008; Watkins et al., 2000). Ugyanakkor ugyanazon fajta válasza is eltérhet különböző földrajzi területeken. Például a 'Northern Spy' almafajta alig reagált 1-MCP-re New Yorkban (Watkins, 2008), míg Ontario-ban, Kanadában jelentős hatás volt észlelhető. Ezek az eltérések klimatikus hatásokat tükrözhetnek, például a betakarításkori belső etilénszint (IEC) vagy az érés sebességének különbségeit (Tatsuki et al., 2009). Az, hogy a különböző fajták etilénreceptorainak száma hogyan befolyásolja az 1-MCP-re adott választ, még nem tisztázott.

3.8.4.2 A betakarítási érettség hatása az 1-MCP kezelés hatékonyságára

A gyümölcs belső etilénszintje a betakarítás időpontjában jelentősen befolyásolhatja az 1-MCP-re adott választ. Kimutatták, hogy a későbbi betakarítás magasabb keményítőindexhez és IEC-értékekhez, valamint puhuláshoz vezetett. A különböző időpontokban szüretelt és kezelt almák esetében a tárolás első 4 hónapjában szignifikáns különbség mutatkozott a kontroll mintához képest (Watkins, 2008).

3.8.4.3 Az 1-MCP koncentrációjának és alkalmazási idejének hatása

A kertészeti termékek betakarítás utáni minőségét befolyásolhatja az alkalmazott 1-MCP koncentrációja és a kezelés időtartama (Watkins et al., 2000). Feltételezhető, hogy a magasabb koncentráció hatékonyabb (Watkins, 2016), amit például 'Kinnow' mandarin (Baswal et al., 2020) és más citrusfélék esetében is megfigyeltek (Dou et al., 2005). Azonban 'Bramley' fajtájú alma esetében nem volt szignifikáns különbség a koncentrációk hatásaiban (Dauny és Joyce, 2002). Az 1-MCP és az etiléntermelés közötti kölcsönhatások további vizsgálatot igényelnek. Feltételezhető,

hogy földrajzi eltérések és éghajlati különbségek okozhatják az ellentmondásos eredményeket (Baswal és Ramezian, 2021).

3.8.4.4 A betakarítás előtti kezelések hatása az 1-MCP kezelés hatékonyságára

Almafák esetében a gyümölcsshullás megakadályozása érdekében a betakarítás előtt jellemzően kétféle vegyszert alkalmaznak:

- az aminoetoxi-vinilglicint (AVG), amelyet általában 2–4 héttel betakarítás előtt juttatnak ki, és csökkenti az etiléntermelést,
- valamint a naftalin-ecetsavat (NAA), amit gyakran „mentőkezelésként” használnak. Ez viszont növelheti az etiléntermelést a gyümölcsben.

Feltételezhető, hogy az AVG fokozza az 1-MCP hatását, míg a NAA gátolja azt, mivel az AVG késlelteti az érés beindulását, míg az NAA inkább gyorsítja (Yuan és Carbaugh, 2007).

3.8.4.5 A tárolási körülmények hatása az 1-MCP kezelés hatékonyságára

A tárolási körülmények szintén befolyásolják az 1-MCP hatékonyságát. Watkins és munkatársai (2000) megállapították, hogy szabályozott légterű (SzL), hűtőtárolás esetén az 1-MCP-vel kezelt gyümölcsök jobban megőrizték minőségüket, mint szobahőmérsékleten tárolva.

Továbbá a citrusfélék héjhibáinak előfordulása is sokkal jobban csökkenthető volt 4 °C-on, mint 22 °C-on (Dou et al., 2005). Azonban mivel a fajta, az érettségi állapot és a tárolási idő is befolyásoló tényező, az 1-MCP és az SzL-tárolás együttes alkalmazása növeli a hatékonyságot, mivel vannak gyümölcsök, amelyek kevésbé érzékenyek az 1-MCP-re egyéb változók hatása miatt (Baswal és Ramezian, 2021).

3.8.5 Eddig elért eredmények

A paradicsom volt az egyik első gyümölcs, amelyet Sisler és munkatársai (1996) vizsgáltak az 1-MCP kezelés vonatkozásában. Paradicsom esetében az 1-MCP gátolja az etiléntermelést, a légzést, a puhulást, a színváltozásokat és a titrálható savtartalom csökkenését, de nincs hatással a vízdoldható szárazanyag-tartalomra.

Az, hogy az 1-MCP mennyire képes gátolni a paradicsom érését, függ:

- az alkalmazott koncentrációtól,
- a kezelési időtartamtól és
- a gyümölcs érettségi állapotától.

Ezenkívül az optimális kezelési koncentráció fajtánként is eltérhet (Guillén et al., 2007, 2006; Hoeberichts et al., 2002; Mir et al., 2004; Opiyo és Ying, 2005; Sisler et al., 1996; Wills és Ku,

2002). A kezelés után a paradicsombogyó képes újra érni, de egy második 1-MCP-kezelés tovább késleltetheti az érési folyamatot (Hoerberichts et al., 2002; Mir et al., 2004). Azok a bogyók, amelyeket rózsaszín vagy világospiros állapotban kezeltek, a késleltetés után normál módon értek be (Hurr et al., 2005), míg a teljesen piros gyümölcsök csak körülbelül 1 nappal hosszabb eltarthatóságot mutattak az 1-MCP-kezelést követően (Ergun et al., 2006). Az új piaci trendek szerint a paradicsomot fürtösen, a szárral együtt értékesítik. Az 1-MCP-t hatékonynak találták a koktélpáradicsom fürtökről való leválásának megakadályozásában (Beno-Moualem et al., 2004; Lichter et al., 2006). Ugyanakkor a leválás megakadályozásához nagyobb koncentrációra lehet szükség, mint az érés gátlásához, ami korlátot jelenthet a módszer alkalmazásában erre a célra. Erre abból lehet következtetni, hogy a citrusültetvényekben gyakran alkalmaznak Ethephon permetezést, hogy a gyümölcsök könnyebben leváljanak, de ennek nem kívánt mellékhatása a lombhullás. Az 1-MCP-t ebben az esetben is hatékonynak találták, megakadályozta a levelek lehullását, miközben nem befolyásolta az Ethephon gyümölchullást kiváltó hatását (Pozo et al., 2004).

A kezelést egyéb gyümölcsök és zöldségek esetében is jó eredményekkel alkalmazták. Az 1-MCP-vel kezelt almák lassabban puhultak és magasabb maradt az oldható szénhidrát-, fenolvegyület- és antioxidánsstartalom (Gago et al., 2015). Az etilénkibocsátás is alacsonyabb volt a kezeletlen kontrollhoz képest (Choi és Jung, 2014; Sardabi et al., 2014).

Körte esetében a betakarítás utáni 1-MCP-kezeléssel jelentősen késleltethető az etiléntermelés és a puhulás (Arias et al., 2009; Escibano et al., 2017; Hitka et al., 2014), továbbá megőrizhető a keménység, az érzékszervi tulajdonságok és a mechanikai szilárdság (Rizzolo et al., 2014), valamint javult a tárolhatóság korai és késői szüret esetén is (Villalobos-Acuña et al., 2011).

A szilva esetében az 1-MCP különböző koncentrációjú alkalmazása csökkentette a puhulás mértékét, mérséklődött a színváltozás, kisebb lett a tömegvesztés, valamint alacsonyabb légzésintenzitás és etiléntermelés volt megfigyelhető. Emellett az alkalmazás csökkentette a hidegkár előfordulását és súlyosságát is (Manganaris et al., 2008), továbbá lassította a lipidperoxidációt (Singh és Singh, 2012). Fontos megállapítás, hogy a kezelés nem befolyásolta hátrányosan az alacsony savtartalmú szilvák fogyasztói elfogadottságát, amennyiben a gyümölcsök az elfogyasztás előtt megfelelően beérték (Minas et al., 2013).

Őszibarack esetében a kezelés mérsékelte a puhulást és az alapszín-vesztést (Kluge és Jacomino, 2002), míg nektarinnál csökkentette az etiléntermelést és a puhulást okozó enzimek aktivitását (Ullah et al., 2016). Nguyen és munkatársai (2016) kajsziarack esetében is vizsgálták az 1-MCP kezelés hatását, ahol szintén nagyon jó eredményeket sikerült elérni, ám az eredmények

azt mutatják, hogy rendkívül fontos, hogy a szüretet követően minél hamarabb megtörténjen a kezelés.

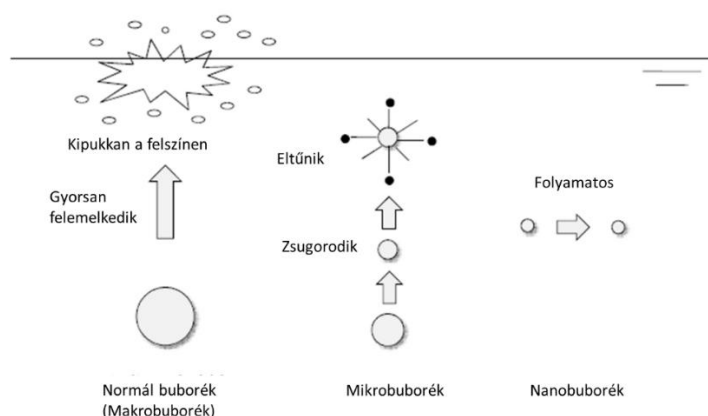
Az 1-MCP citrusfélék esetében gátolta a zöld színanyagok bomlását (Win et al., 2006), csökkentette a hidegkár előfordulását (Tavallali és Moghadam, 2015), lassította a puhulást (Asrey et al., 2012) és gátolta a sejtfalbontó enzimek működését (Baswal et al., 2020).

Banán esetében a kezelés segített szabályozni a héj úgynevezett „stay-green” rendellenességeit (Song et al., 2020), késleltette a cukorfelhalmozódást és az aromaanyagok előanyagainak képződését (Zhu, X. et al., 2020), fokozta az antioxidáns enzimek aktivitását (Xu et al., 2019), késleltette az érési folyamatokat (Manigo és Limbaga, 2019).

Szőlő esetében segített megőrizni a bioaktív anyagokat (fenolok, antociánok) (Bellincontro et al., 2006), lassította a kocsány barnulását (Li et al., 2015) és javította az általános minőséget (Wang et al., 2019).

3.9 Mikrobuborékos mosás és szerepe a kertészeti termények érésgátlásában

A kertészeti termékek posztharvest kezelése területén egy új kutatási irányként merült fel az elmúlt másfél évtizedben az ún. mikrobuborékos mosás technológiája. A mikrobuborékok (MB) méretét illetően számos különböző álláspont található a tudományos irodalomban. Egyesek szerint 50 µm alatti átmérővel rendelkeznek (Liu et al., 2018; Wu et al., 2019). Míg több irodalomban is 50-200 µm között határozzák meg a méretét (Aan et al., 2015; Majid et al., 2018). Juwana és munkatársai (2018) szerint a buborékok mérete 1-1000 µm között, míg ezzel szemben Zhang és munkatársai (2018) szerint néhány tíz nm és néhány tíz µm között helyezkedik el. Azonban 2017 óta az ISO (International



14. ábra: A makro-, mikro- és nanobuborékokat bemutató sematikus ábra (Takahashi et al., 2007 nyomán)

Organization for Standardization) bevezetett egy szabványosított definíciót a mikrobuborékokra. E szerint a mikrobuborékokat olyan buborékoknak tekintik, amelyek átmérője 1–100 µm közé esik (ISO 20480-1, 2017). Méretük és sűrűségük szoros összefüggésben áll az alkalmazott levegő nyomásával, a mikrobuborékokat előállító generátor teljesítményével, a vízmennyiséggel és a hőmérséklettel (Takahashi, 2005).

Az elmúlt évtizedekben nagymértékben megnőtt az érdeklődés a mikrobuborékok alkalmazása iránt, köszönhetően a nagy felület-térfogat aránynak (Temesgen et al., 2017), az alacsony emelkedési sebességnek (14. ábra) (Terasaka et al., 2011), a hatékonyabb gázhasznosításnak (Zhang et al., 2018), a gyorsabb tömegátadásnak (Wu et al., 2019) és a gyorsabb szennyezőanyag eltávolításnak (Azuma et al., 2019).

Korábban a mikrobuborékok előállítását energiaigényes folyamatnak tartották, ami gazdaságilag nem volt életképes, mivel a buborékok képzéséhez nagy teljesítményű kompressziós vagy ultrahangos kavitációs eszközök kellettek (Zimmerman et al., 2008). Az utóbbi időben azonban alacsonyabb teljesítményű mikrobuborék-generátorokat fejlesztettek ki, mint például: gömbtest alapú rendszereket (Sadatomi et al., 2005), fűvókás lemezeket (Sadatomi et al., 2012), venturi csöveket (Afisna et al., 2017), membránokat (Kukuzaki et al., 2010; Liu et al., 2013), valamint folyadékoszcillátoros megoldásokat (Hanotu et al., 2017; Kamaroddin et al., 2020). Ezek a generátorok a folyadékáramlás korlátozásával nyomásesést idéznek elő, így a gázbeszívás automatikus (Parmar és Majumder, 2013).

A mikrobuborékos mosást számos területen alkalmazzák. Nguyen (2017) sárgadinnye 1-MCP-vel kombinált mikrobuborékos mosása révén jelentős lassulást tapasztalt a dinnye érésmenetében a tárolás során. Pongprasert és Srilaong (2014) szintén hasonló következtetésre jutottak banán esetében a mikrobuborékos 1-MCP kezelést követően. Visy és munkatársai (2021) sertés hosszúkaraj nedves pácolása során ultrahanggal (UH) kombinált mikrobuborékos technológiát alkalmaztak. Arra jutottak, hogy mind az UH, mind a mikrobuborék, mind ezek kombinációja javította a pácolás hatékonyságát. Az oxidáló tulajdonsággal rendelkező gázok, mint például az oxigén és az ózon mikrobuborékjai nagy potenciállal rendelkeznek a vízfertőtlenítésben, mivel szabad gyököket hoznak létre (Agarwal et al., 2011). A mikrobuborékok összeomlása során keletkező -OH gyökök javíthatják a fertőtlenítő képességet (Takahashi et al., 2007). Számos kutatás igazolta, hogy az ózon mikrobuborékok sokkal hatékonyabbak a mikrobapopulációk gátlásában, mint a hagyományos ózonkezelés (Jyoti és Pandit, 2004; Sumikura et al., 2007). Továbbá, amikor a mikrobuborékok érintkezésbe kerülnek a felülettel, szétpukkadnak, és ezzel nyíróerőt és felületi feszültséget szabadítanak fel, amely elősegíti a szennyeződések leválását a minta felületéről, így tisztító hatást idéznek elő (Tsuge, 2014).

3.10 Ultrahang

A hang a részecskék (vagyis atomok és molekulák) rezgése egy rugalmas közegben. Amikor a rezgés elindul, a részecskék továbbadják mozgásukat a szomszédjaiknak, azok pedig újabb részecskéknek, ez helyi nyomásváltozást eredményez. Így a rezgő mozgás mechanikusan továbbterjed, és hanghullámot (vagy akusztikus hullámot) hoz létre (Cheeke és Cheeke, 2010). A

hang és az ultrahang a frekvenciában tér el egymástól: a hanghullámok az emberi fül számára hallható frekvenciatartományban terjednek (16 Hz-től kb. 16–20 kHz-ig), míg az ultrahanghullámok 20 kHz-nél magasabb frekvenciákon haladnak, akár 10 MHz-ig is (Krautkrämer és Krautkrämer, 2013; Rose, 2014).

Általánosan elfogadott, hogy 1 W/cm^2 teljesítmény alatt passzív, míg e felett aktív ultrahangról beszélünk (Friedrich, 2008). Az alacsony intenzitású (passzív) ultrahang olyan kis teljesítményszinten működik, hogy az ultrahanghullámok nem idéznek elő fizikai vagy kémiai változásokat abban az anyagban, amelyen áthaladnak, vagyis általában roncsolásmentes eljárásnak számítanak. Ezt a technikát sikeresen alkalmazzák az élelmiszer-feldolgozási folyamatok nem invazív megfigyelésére. Az alacsony intenzitású ultrahang legelterjedtebb alkalmazási területe az élelmiszeriparban analitikai célú: információt szolgáltat az élelmiszerek fizikai és kémiai tulajdonságairól, például azok összetételéről, szerkezetéről és fizikai állapotáról (Jayasooriya et al., 2004; Knorr et al., 2004). A másik csoport a nagy energiájú (aktív) ultrahang, amely 1 W/cm^2 -nél nagyobb intenzitással működik. Az ilyen tartományba eső ultrahanghullámok fizikai, mechanikai vagy kémiai hatásai képesek megváltoztatni az anyagok tulajdonságait (például fizikai roncsolás, bizonyos kémiai reakciók felgyorsítása) (Jayasooriya et al., 2004). A nagy intenzitású ultrahangot már hosszú ideje használják emulziók létrehozására, sejtek felbontására és aggregált anyagok diszpergálására. Az utóbbi időben több olyan alkalmazási területet is azonosítottak, ahol nagy jövőbeni fejlesztési potenciál rejlik, például a kristályosodási folyamatok módosítása és szabályozása, folyékony élelmiszerek gáztalanítása, enzimek inaktiválása, szárítás és szűrés hatékonyságának növelése, valamint oxidációs reakciók előidézése (Knorr et al., 2004; Zheng és Sun, 2006). Az ultrahang energiájának hasznos alkalmazása abban rejlik, hogy különféle hatásokat vált ki abban a közegben, amelyen keresztülhalad. Az ilyen tartományba eső ultrahanghullámok fizikai, mechanikai vagy kémiai hatásai az anyag tulajdonságainak megváltozását idézhetik elő azáltal, hogy hatalmas nyomás-, nyíró- és hőmérséklet-grádiens generálnak a közegben, amelyen áthaladnak (Dolatowski et al., 2007).

A kavitáció egy olyan fizikai folyamat, amely során buborékok (vagy üregek) képződnek egy folyadék belsejében, amikor az intenzív ultrahangmező által keltett gyors kompressziós- és depressziós hullámoknak van kitéve. A depressziós fázisban a folyadékban számos buborék keletkezik, majd a kompressziós szakaszban az óriási nyomás hatására ezek a buborékok összeomlanak, vagyis implodálnak. A buborékok átmérője mindössze néhány mikrométer, élettartamuk pedig mikroszekundum nagyságrendű. Az UH kémiai hatásai sokfélék, és a reakciókörnyezetben három jól elkülöníthető fázist azonosítottak: a buborék belsejében lévő gázfázist, a folyadék–buborék határfelületet, valamint magát a folyadékfázist. A gázfázisban

pirolízis reakciók játszódnak le, például a víz pirolízise. A buborék–folyadék zónában és a folyadéktömegben különféle szabad gyökök keletkezhetnek, ezek közül a leggyakrabban előforduló az $\text{-OH}\cdot$ hidroxilgyök, amely rendkívül reaktív, könnyen reagál az oldatban található szerves anyagokkal, vagy egy másik $\text{-OH}\cdot$ gyökkel reagálva H_2O_2 -t (hidrogén-peroxidot) képez (Yasui, 2002; Yasui et al., 2011). Bár a kavitációt sok területen kerülendő jelenségként tartják számon, más alkalmazási környezetekben épp a szabályozott kavitációt hasznosítják. Ilyen például a haditechnika, ahol szupergyors torpedók használnak kavitációt, vagy az ultrahangos tisztítóberendezések, amelyek a legapróbb és legérzékenyebb felületeket is képesek megtisztítani (Ikeda et al., 2016).

Az elmúlt években az UH tulajdonságai egyre nagyobb érdeklődést váltottak ki az élelmiszeriparban, mivel a fizikai és kémiai reakciók kiváltása stratégiai előnyt jelenthet a feldolgozás különböző szakaszaiban. Jelenleg az ultrahangot feltörekvő és ígéretes technológiának tekintik az élelmiszer-feldolgozásban, mivel intenzív kavitáció révén tartós mechanikai, kémiai és biokémiai változásokat idéz elő folyadékokban, illetve erős akusztikus mezőket hoz létre gázokban. Az 1990-es évektől kezdve az ultrahang egy technológiai alternatívává vált, amely nagyüzemi alkalmazásra is alkalmassá vált az élelmiszeriparban (Bates és Patist, 2010). Az ultrahangot az élelmiszer-technológiákban különböző mechanikai és/vagy kémiai hatásai miatt alkalmazzák, például homogenizálás, keverés, extrakció, szűrés, kristályosítás, szárítás, fermentáció, gáztalanítás (habképződés csökkentése), részecskeméret-csökkentés, viszkozitás időleges vagy tartós módosítása, sejtnövekedés szabályozása, sejtroncsolás és aggregátumok diszpergálása, mikroorganizmusok és enzimek inaktiválása, valamint berendezések sterilizálása során (Kiani et al., 2011).

A húsok pácolása során már számos kutatás bizonyította az UH pozitív hatását (Friedrich, 2008; Visy, 2024). Visy és munkatársai (2021) pedig megvizsgálták továbbá az aktív UH és a mikrobuborékok együttes hatását húsok nedves pácolása során és rendkívül kedvező eredményeket kaptak.

3.11 A paradicsom minőségváltozásának nyomon követésére alkalmazott főbb módszerek összefoglalása (4. táblázat)

4. táblázat: A paradicsom minőségváltozásának nyomon követésére alkalmazott módszerek összefoglalása

Színmérés koloriméter- rel	Gyors mérés. Nagyon pontos és könnyen hozzáférhető színadatok.	Mérsékelt drága műszer. A helyi (pontszerű) adatgyűjtés a készülék optikai tulajdonságaira korlátozódik. Folyamatos (in-line) használatra nem alkalmas.
Akusztikus keménység mérés	Gyors mérés. Az egész termény állományát globálisan jellemzi.	Csak az állomány éréshez kapcsolódó puhulása mérhető közvetetten. Az állomány változását okozó egyéb tényezők befolyásolhatják a mérés pontosságát. A méréshez csendes, mindenféle rezonanciától mentes környezet szükséges, így rendkívül nagy odafigyelést igényel az in-line használat.
Impakt keménység mérés	Gyors mérés, nem igényel drága berendezéseket. In-line használatra is alkalmas.	Lokális (pontszerű) adatgyűjtés, ami által jelentős lehet szórás.
Klorofill fluoresz- cenciás mérés	A teljes termék jellemzése lehetséges az eszköz típusától függően (globális adatgyűjtés és adatelemzés). A paradicsom érésével kapcsolatban álló klorofilltartalmú zöld pigmentek mennyiségének viszonylag pontos mérése.	Drága klorofill fluoreszcenciás képalkotó műszerek. Egyes kézi vagy laboratóriumi asztali készülékek csak pontszerű régiókban vesznek fel adatokat. A berendezéstől függően hosszú mérés és összetett adatkiértékelés. Nagyon fontos szempont a megfelelő megvilágítás, ami kérdéseket vet fel az in-line használatot illetően, ugyanakkor az iparban már alkalmazzák.
Mágneses rezonancia képalkotó eljárás (MRI)	Az MRI képes megkülönböztetni a különböző szövettípusok közötti élettani változásokat és a paradicsomgyümölcs érése során bekövetkező élettani változásokat. Az egész terméket jellemzi, nem csak pontszerű régiókat.	Magas beruházási ár és üzemeltetési költség. Nehézkes adatkiértékelés.
DA-meter® (Vis-NIR meter)	Gyors. Viszonylag olcsó berendezés. Könnyen kiértékelhető. Szántóföldön/ültetvényen/kertben is használható. A NIR spektroszkópiát már használják in-line, így valószínűleg megvalósítható ez a módszer.	A helyi (pontszerű) adatgyűjtés a készülék optikai tulajdonságaira korlátozódik.
Kép- feldolgozás	Gyors. Elég egy egyszerű, olcsó kamera. Az egész termék színe jellemezhető, ráadásul egyszerre több minta is elemezhető. In-line használat lehetséges, és a szántóföldön/ültetvényen/kertben is használható.	Szakképzett személyzetre és speciális adatelemzésre van szükség, melyre a mesterséges intelligencia egy jó megoldás.

4 ANYAG ÉS MÓDSZER

4.1 Vizsgált paradicsomfajta és jellemzői

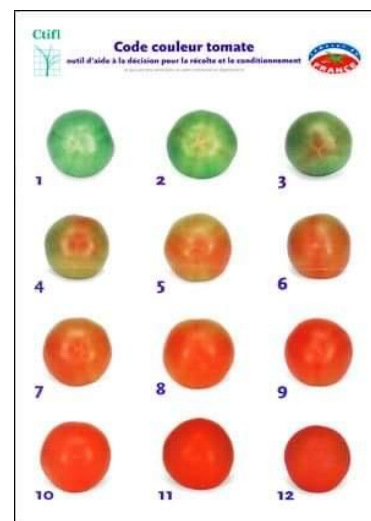
A vizsgálathoz felhasznált Pitenza F₁ (Enza Zaden, Hollandia) paradicsom minták Budapestről, azon belül Soroksárról, Tomoga Péter őstermelőtől származtak. A szüret az adott kísérlethez szükséges érettségi állapotokban történt a kezelés napján, illetve esetenként azt megelőző napon. A Pitenza F₁ egy kiváló minőségű hibrid paradicsomfajta, amelyet elsősorban üvegházi és fóliasátras termesztésre fejlesztettek ki. Erőteljes, jól kiegyensúlyozott növekedési habitussal rendelkezik, folytonnövő és középkorai érésű. Kiemelkedő termőképessége, betegségekkel szembeni ellenállósága, valamint kiváló termésminősége miatt kedvelt a termelők körében.

A Pitenza F₁ termései közepes-nagy méretűek, átlagosan 100-140 gramm súlyúak, gömbölyűek, egyenletesen színeződnek, és intenzív piros színűek. Vastagabb héja elősegíti a hosszabb eltarthatóságot és a jobb szállíthatóságot, ami jelentős előnyt biztosít a frisspiaci értékesítés és az export szempontjából. A húzállománya tömör és lédús, míg ízvilága kiegyensúlyozott, amelyet magas cukor- és savtartalma tesz harmonikussá.

A Pitenza F₁ az úgynevezett Long Shelf Life (LSL) fajták közé tartozik, amelyek hosszabb eltarthatósággal és kiváló szállíthatósági tulajdonságokkal bírnak. Az LSL paradicsomokra jellemző vastagabb héj és feszes húzállomány csökkenti a mechanikai sérülések és a romlás kockázatát a tárolás és szállítás során. Ez a tulajdonság különösen előnyös a piacokon, mivel minimalizálja az élelmiszer-pazarlást, miközben megőrzi az érzékszervi minőséget.

Ezen kívül a Pitenza F₁ kiemelkedően ellenálló számos betegséggel szemben, különösen a fuzáriumos és verticilliumos hervadással, valamint bizonyos vírusos megbetegedésekkel szemben. Ez a rezisztencia lehetővé teszi a biztonságosabb és fenntarthatóbb termesztést, kevesebb növényvédőszer-felhasználás mellett. Rezisztencia HR: ToMV:0-2/Va:0/Vd:0/Fol:0,1.

A vizsgálatokhoz felhasznált, frissen betakarított paradicsomminták a szedést követően előzetes érettségi állapot és alak szerinti válogatáson estek át. Ezt követően a mintákat szín szerint osztályoztam a CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) 1–12-ig terjedő skálája alapján (15. ábra).



15. ábra: A CTIFL 1-12-ig terjedő skálája (forrás: CTIFL, 2025)

4.1.1 Érettségi állapotok az I. kísérlethez (1-MCP kezelés dózisének meghatározása)

A szüret pontos ideje 2021.08.13. Az osztályozás eredményeként a paradicsomokat négy különböző csoportba soroltam be, amelyet az 5. táblázat és a 16. ábra szemléltet.

5. táblázat: Az I. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok

			Jelölés (Kontroll, normál, dupla dózis)
Érettségi állapot	Jellemző szín		
1 zöldérett	Sötétzöld		A, TA, DA
4 érésbe forduló	A bogyó felületének 10-30%-a rózsaszín		B, TB, DB
6 félérett	A bogyó felületének 30-60%-a rózsaszín		C, TC, DC
12 élénk piros	A bogyó felületének 100%-a piros, teljes érettség.		D, TD, DD

Érettségi állapotonként 60 darab mintát vizsgáltam, melyből 20 szem nem kapott semmilyen kezelést (kontroll), 20 szem normál dózisú (~625 ppb), míg 20 szem dupla dózisú (~1250 ppb) 1-MCP kezelésen esett át. Ezt követően 2 héten keresztül követtem nyomon a paradicsomok minőségváltozását. A vizsgált paraméterek a 6. táblázatban láthatók.



16. ábra: Az I. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok (saját forrás)

6. táblázat: Az I. kísérlet során vizsgált paraméterek

Vizsgált paraméter	Alkalmazott berendezés	Mérési napok
Klorofill fluoreszcencia, F_0 , F_m , F_v/F_m	WALZ MONI-PAM	0, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 11, 14
Akusztikus keménység S ($\text{Hz}^2\text{g}^2/3 \times 10^{-6}$)	AWETA AFS Asztali keménységmérő	
DA-index, I_{AD}	Sinteléia DA-méter	
CIELab színjellemzők L^* , a^* , b^*	Konica-Minolta CR-400 tristimulusos kromaméter	

4.1.2 Érettségi állapotok a II. kísérlethez (1-MCP kezelés hatásának vizsgálata)

A szüret pontos ideje 2021.10.06. Az osztályozás eredményeként a paradicsomokat hat különböző csoportba soroltam be, amelyet a 7. táblázat és a 17. ábra szemléltet.

7. táblázat: A II. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok

Érettségi állapot			Jellemző szín	Jelölés (K, kezelt)
1	zöldérett	Sötétzöld		A, SF-A
2	tört színű	Fehéres zöld, a bogyó kevesebb, mint 10%-a rózsaszín		B, SF-B
4	érésbe forduló	A bogyó felületének 10-30%-a rózsaszín		C, SF-C
6	félérett	A bogyó felületének 30-60%-a rózsaszín		D, SF-D
8	halvány piros	A bogyó felületének 60-90%-a piros.		E, SF-E
12	élénk piros	A bogyó felületének 100%-a piros, teljes érettség.		F

Érettségi állapotonként 40 darab mintát vizsgáltam, melyből 20 szem nem kapott semmilyen kezelést (kontroll), 20 szem pedig normál dózisú (~625 ppb) 1-MCP kezelésen esett át. Ezt követően 4 héten keresztül követtem nyomon a paradicsomok minőségváltozását. A vizsgált paraméterek a 8. táblázatban láthatók.



17. ábra: A II. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok (saját forrás)

8. táblázat: A II. kísérlet során vizsgált paraméterek

Vizsgált paraméter	Alkalmazott berendezés	Mérési napok
Klorofill fluoreszcencia, F_0 , F_m , F_v/F_m	PSI OPEN FluorCam	0, 2, 5, 7, 9, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 27, 30
Akusztikus és impakt keménység S ($\text{Hz}^2\text{g}^2/3 \times 10^{-6}$), D (ms^{-2})	AWETA AFS Asztali keménységmérő	
DA-index, I_{AD}	Sinteléia DA-méter	
CIELab színjellemzők L^* , a^* , b^*	Konica-Minolta CR-400 tristimulusos kromaméter	
Légzésintenzitás, ($\text{cm}^3/\text{kg h}$)	Ahlborn FY A600-CO2H, Ahlborn ALMEMO 3290-8	
Etiléntermelés ($\mu\text{l}/\text{kg h}$)	SCS56	0, 2, 5, 7, 9, 12, 14
R_N , G_N , B_N , PQS X, PQS Y	Digitális képfeldolgozás	

4.1.3 Érettségi állapotok a III. kísérlethez (Hidegkár vizsgálata)

A szüret pontos ideje 2022.10.12. Az osztályozás eredményeként a paradicsomokat öt különböző csoportba soroltam be, amelyet a 9. táblázat és a 18. ábra szemléltet.

9. táblázat: A III. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok

	Érettségi állapot	Jellemző szín	Jelölés
2	tört színű	Fehéres zöld, a bogyó kevesebb, mint 10%-a rózsaszín	A
4	érésbe forduló	A bogyó felületének 10-30%-a rózsaszín	B
6	félérett	A bogyó felületének 30-60%-a rózsaszín	C
8	halvány piros	A bogyó felületének 60-90%-a piros.	D
12	élénk piros	A bogyó felületének 100%-a piros, teljes érettség.	E

Érettségi állapotonként 40 darab mintát vizsgáltam, melyből 20 szem nem kapott semmilyen kezelést (kontroll), 20 szem pedig normál dózisu (~625 ppb) SmartFresh™ (SF) 1-MCP kezeléssel esett át. A kontroll és a kezelt csoportból is a minták felét (10 szem) ~2 °C-on, míg a másik felét (10 szem) ~15 °C-on tároltam. Ezt követően 5 héten keresztül követtem nyomon a paradicsomok minőségváltozását. A vizsgált paraméterek a 10. táblázatban láthatók.



18. ábra: A III. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok (saját forrás)

10. táblázat: A III. kísérlet során vizsgált paraméterek

Vizsgált paraméter	Alkalmazott berendezés	Mérési napok
Klorofill fluoreszcencia, F_0 , F_m , F_v/F_m	PSI OPEN FluorCam	0, 2, 6, 9, 13, 16, 21, 23, 27, 30, 34
Akusztikus és impakt keménység S ($\text{Hz}^2 \text{g}^{2/3} \times 10^{-6}$), D (ms^{-2})	AWETA AFS Asztali keménységmérő	
DA-index, I_{AD}	Sinteléia DA-méter	
CIELab színjellemzők L^* , a^* , b^*	Konica-Minolta CR-400 tristimulusos kromaméter	
Légzésintenzitás, ($\text{cm}^3/\text{kg h}$)	Ahlborn FY A600-CO2H, Ahlborn ALMEMO 3290-8	0, 5, 8, 12, 15, 22, 26, 29, 33
Etiléntermelés ($\mu\text{l}/\text{kg h}$)	SCS56	

4.1.4 Érettségi állapotok a IV. kísérlethez (Mikrobuborékos mosás 1-MCP hatóanyaggal)

A szüret pontos ideje 2023.09.21. A IV. kísérlet esetében csak 1-es érettségi állapotú, zöldérett, sötétzöld színű paradicsomokat használtam fel (19. ábra), mivel a korábbi kezelések azt mutatták, hogy jelentős érésgátlás csak ezen érettségi állapot esetében érhető el.

A beérkezett mintából összesen 8 csoportot hoztam létre (Kontroll /K/, Gázos 1-MCP kezelés /GAS/, 5-10-15 percig tartó mikrobuborékos 1-MCP kezelés /5-10-15 MB/, valamint 5-10-15 percig tartó mikrobuborékos 1-MCP kezelés ultrahanggal kiegészítve /5-10-15 UH/), csoportonként 20-20 szemet vizsgáltam. Ezt követően 7 napon keresztül követtem nyomon a paradicsomok minőségváltozását. A vizsgált paraméterek a 11. táblázatban láthatók.



19. ábra: A IV. kísérlethez felhasznált érettségi állapot (saját forrás)

11. táblázat: A IV. kísérlet során vizsgált paraméterek

Vizsgált paraméter	Alkalmazott berendezés	Mérési napok
Klorofill fluoreszcencia, F_0 , F_m , F_v/F_m	PSI OPEN FluorCam	0, 1, 5, 7
Akusztikus és impakt keménység S ($\text{Hz}^2\text{g}^{2/3} \times 10^{-6}$), D (ms^{-2})	AWETA AFS Asztali keménységmérő	
DA-index, I_{AD}	Sinteléia DA-méter	
CIELab színjellemzők L^* , a^* , b^*	Konica-Minolta CR-400 tristimulusos kromaméter	
Légzésintenzitás, ($\text{cm}^3/\text{kg h}$)	Ahlborn FY A600-CO ₂ H, Ahlborn ALMEMO 3290-8	
Etiléntermelés ($\mu\text{l}/\text{kg h}$)	SCS56	

4.1.5 Érettségi állapotok az V. kísérlethez (Mechanikai károsodás vizsgálata)

A szüret pontos ideje 2023.09.21. Az osztályozás eredményeként a paradicsomokat három különböző csoportba soroltam be, amelyet a 12. táblázat és a 20. ábra szemléltet.

12. táblázat: Az V. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok

	Érettségi állapot	Jellemző szín	Jelölés
2	tört színű	Fehéres zöld, a bogyó kevesebb, mint 10%-a rózsaszín	A
8	halvány piros	A bogyó felületének 60-90%-a piros.	B
12	élénk piros	A bogyó felületének 100%-a piros, teljes érettség.	C

Érettségi állapotonként 30 darab mintát vizsgáltam, melyből 10 szem kontroll minta volt és 10-10 szemet 40, illetve 80 cm-ről ejtettem le. Ezt követően 4 napon keresztül követtem nyomon a paradicsomok minőségváltozását. A vizsgált paraméterek a 13. táblázatban láthatók.



20. ábra: Az V. kísérlethez felhasznált érettségi állapotok (saját forrás)

13. táblázat: Az V. kísérlet során vizsgált paraméterek

Vizsgált paraméter	Alkalmazott berendezés	Mérési napok
Klorofill fluoreszcencia, F_0 , F_m , F_v/F_m	PSI OPEN FluorCam	0, 1, 3
Akusztikus és impakt keménység S ($\text{Hz}^2\text{g}^{2/3} \times 10^{-6}$), D (ms^{-2})	AWETA AFS Asztali keménységmérő	
DA-index, I_{AD}	Sinteléia DA-méter	
CIELab színjellemzők L^* , a^* , b^*	Konica-Minolta CR-400 tristimulusos kromaméter	
Légzésintenzitás, ($\text{cm}^3/\text{kg h}$)	Ahlborn FY A600-CO2H, Ahlborn ALMEMO 3290-8	
Etiléntermelés ($\mu\text{l}/\text{kg h}$)	SCS56	

4.1.6 Érettségi állapotok a VI. kísérlethez (Takarásos légzésvizsgálat előkísérlet)

A szüret pontos ideje 2022.08.15. Ebben a kísérletben kizárólag 12-es érettségi állapotú, teljesen piros paradicsomot használtam fel (21. ábra).



21. ábra: A VI. kísérlethez felhasznált érettségi állapot (saját forrás)

4.1.7 Érettségi állapotok a VII. kísérlethez (Takarásos légzésvizsgálat)

A szüret pontos ideje 2024.10.09. Ezen kísérlethez csak 1-es érettségi állapotú, zöldérett, sötétzöld színű paradicsomokat használtam fel (22. ábra). A beérkezett mintából összesen 8 csoportot hoztam létre, melyek a 19. táblázatban láthatóak csoportonként 15-15 szemet vizsgáltam. Ezt követően 7 héten keresztül követtem nyomon a paradicsomok minőségváltozását. A vizsgált paraméterek a 14. táblázatban láthatók.



22. ábra: A VII. kísérlethez felhasznált érettségi állapot (saját forrás)

14. táblázat: A VII. kísérlet során vizsgált paraméterek

Vizsgált paraméter	Alkalmazott berendezés	Mérési napok
Akusztikus és impakt keménység $S \text{ (Hz}^2\text{g}^{2/3} \times 10^{-6})$, $D \text{ (ms}^{-2})$	AWETA AFS Asztali keménységmérő	0, 7, 13, 19, 21, 28, 36, 49
DA-index, I_{AD}	Sinteléia DA-méter	
CIELab színjellemzők L^* , a^* , b^*	Konica-Minolta CR-400 tristimulusos kromaméter	
Légzésintenzitás, $\text{cm}^3/\text{kg h}$	Ahlborn FY A600-CO2H, Ahlborn ALMEMO 3290-8	0, 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 26, 27,
Etiléntermelés $\text{(\mu l/kg h)}$	SCS56	28, 30, 33, 34, 36, 41, 42, 44, 46, 48

4.2 Alkalmazott kezelések

Az 1-MCP kezelések minden esetben a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem (MATE) Élelmiszertudományi Intézetének Árukezelés, Kereskedelem, Ellátási Lánc és Érzékszervi Minősítés Tanszék Postharvest Laboratóriumában történtek és az AgroFresh Inc. által szabadalmaztatott SmartFresh™ néven ismert hatóanyag kijuttatási technológiát alkalmaztam.

4.2.1 I. kísérlet (1-MCP kezelés dózisének meghatározása)

A kezeléshez használt fiziológiai növényfejlődés-szabályozó a Smartfresh™ por volt, amely 0,14% 1-metil-ciklopropént tartalmazott (AgroFresh, Philadelphia, PA, USA). A kívánt 1-MCP-koncentráció eléréséhez a port a gyártó által megadott táblázat szerint vízzel kevertem össze.



23. ábra: Az 1-MCP kezelés dobozban történő kivitelezésének sematikus rajza

A különböző csoportokat papírtálcákon helyeztem el egy légtömören záródó műanyag dobozban ($V = 0,5 \text{ m}^3$). Az 1-MCP koncentrációja a levegőben a kezeléstől függően 625 ppb (normál dózis) és 1250 ppb (dupla dózis) volt. A kezelést 20 °C-on végeztem 24 órán keresztül. A 24 órás expozíciós idő alatt a gáz egyenletes eloszlását egy akkumulátorral működő kis ventilátor biztosította (23. és 24. ábra). A kezelés után a mintákat 20 °C-on tároltam.

4.2.2 II. kísérlet (1-MCP kezelés hatásának vizsgálata)

A kezelés során fiziológiai hatású növényfejlődés-szabályozóként a SmartFresh™ ProTabs tablettázott készítményt alkalmaztam (engedélyszám: 04.2/1181-3/2017), amelynek aktív hatóanyaga 2% 1-metilciklopropén (1-MCP, CAS szám: 3100-04-7). A kezelést a gyártó ajánlásainak megfelelő



24. ábra: Az 1-MCP kezelés dobozban történő kivitelezése (saját forrás)

menyiségű SmartFresh™ ProTabs tablettá hozzáadásával végeztem, amelynek hatására gáz halmazállapotú 1-MCP szabadult fel. A kezelés egyéb körülményei megegyeznek az I. kísérletben leírtakkal, a kezelés hőmérséklete ezesetben 15 °C volt. A kezelés során a dobozon belüli levegő 1-MCP koncentrációja átlagosan 625 ppb volt. A kontrollminták esetében a mintákat azonos körülmények között helyeztem el, de gázfejlesztés nélkül.

A tárolási kísérletet 15 °C-on, egy egyedi hőmérsékletszabályozással ellátott laboratóriumi hűtőszekrényben (TC J600GD Thermotechnika-Crown Cool Kft., Budapest, Magyarország) végeztem. A tárolási idő 14. napját követően a mintákat szobahőmérsékletre (20 °C) helyeztem annak érdekében, hogy megvizsgáljam nem maradt-e el teljesen az utóérés, valamint a kereskedelmi pulton történő tárolást szimuláljam.

4.2.3 III. kísérlet (Hidegkár vizsgálata)

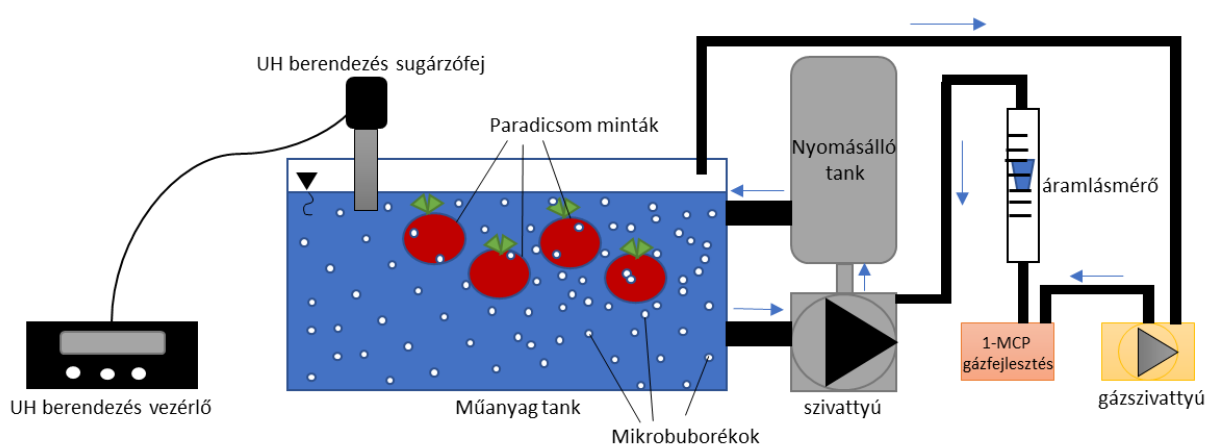
Az alkalmazott fiziológiai növényfejlődés-szabályozó kezelés kivitelezése megegyezik a II. kísérletben leírtakkal. Az alkalmazott kezelések kombinációi a 15. táblázatban láthatóak.

15. táblázat: A III. kísérlet kezelési és tárolási mátrixa

Hőm.	Kezelés	
	Kezeletlen kontroll (K)	1-MCP kezelt (SF)
	2 °C	2 °C
15 °C	15 °C	15 °C

4.2.4 IV. kísérlet (Mikrobuborékos mosás 1-MCP hatóanyaggal)

A tárolóban alkalmazott fiziológiai növényfejlődés-szabályozó kezelés kivitelezése megegyezik a II. kísérletben leírtakkal, azzal a különbséggel, hogy 20 °C-on történt a kezelés. A kontroll kezeletlen mintákat a kezelés idején 20°C-on tároltam elkülönítve. A mikrobuborékos érésgátló kezelés esetében szintén a SmartFresh™ ProTabs tablettázott készítményt alkalmaztam, melyet egy zárt tárolóban oldottam fel, majd a tárolóból vezetem be a gázt a mikrobuborékos berendezésbe, melyet a 25. és 26. ábra szemléltet.



25. ábra: A mikrobuborékos berendezés sematikus ábrája (saját szerkesztés)

A rendszerben az 1-MCP gáz keringtetése zárt módon valósult meg, így a folyadék feletti légtérbe kikerülő 1-MCP gázt visszavezetem a rendszerbe biztosítva ezzel a szükséges koncentrációt. Az alkalmazott kezelések kombinációi a 16. táblázatban láthatóak.

A kezeléshez használt műanyag tank méretei a következők voltak: 700x400x550mm. A vízoszlop magassága 350 mm-nél volt, így a folyadék térfogata megközelítőleg 135 liter volt.

16. táblázat: A IV. kísérlet kezelési mátrixa

Csoportkód	Kezelés típusa	Időtartam	Ultrahang
K	Kezeletlen kontroll	✗	✗
GAS	Tárolóban végzett 1-MCP	24 óra	✗
MB5	Mikrobuborékos 1-MCP	5 perc	✗
MB10	Mikrobuborékos 1-MCP	10 perc	✗
MB15	Mikrobuborékos 1-MCP	15 perc	✗
UH5	Mikrobuborékos 1-MCP + UH	5 perc	✓
UH10	Mikrobuborékos 1-MCP + UH	10 perc	✓
UH15	Mikrobuborékos 1-MCP + UH	15 perc	✓

Az egyes csoportokat 5-10-15 percig áztattam a kezelőkádban, majd ezt követően megtörölgettem a felületüket és papírtálcákra helyeztem őket. A kezelőkádat 20°C-os vízzel töltöttem meg a kezelést megelőzően friss csapvízzel. Az ultrahangos



26. ábra: A mikrobuborékos 1-MCP kezelés kivitelezése (saját forrás)

kezeléssel bővített eljárás során az Active Ultrasound Laboratory ultrahangos berendezés (Ultrasonotech Team, Mosonmagyaróvár, Magyarország) sugárzófejét ($\varnothing=70\text{mm}$) a mosóvízbe helyeztem, nagyjából a kád geometriai középpontjánál. A készülék névleges frekvenciája 20 kHz, maximális teljesítménye pedig 100 W volt. A kezelések során a berendezés 75%-os intenzitással, 72 W teljesítményen és 19 700 Hz tényleges frekvencián működött. A paradicsomok nem rögzített pozícióban kerültek kezelésre, így azok változó távolságra és orientációban helyezkedtek el az ultrahangnyalábhöz képest; a kezelés ezért inkább a vízfürdőben létrejövő szórt ultrahangtér hatásán alapult, nem pedig fókuszált sugár kezelésén.

4.2.5 V. kísérlet (Mechanikai károsodás vizsgálata)

A mechanikai károsodás vizsgálata esetében a minta leejtését szimuláltam 40, illetve 80cm magasról (17. táblázat). Ehhez az egyes minták tömegét lemértem, és ezzel korrigáltam az ejtési magasságot, hogy minden minta



27. ábra: Az ejtészvizsgálat kivitelezése (saját forrás)

esetében nagyjából hasonló erőhatás érte a paradicsombogyókat. Ezt követően a kiszámolt ejtési magasságról egy krétázott felületre ejtettem a mintákat, majd a visszapattanást követően elkaptam őket a további roncsolódás elkerülése érdekében. A krétaporos részt körberajzoltam a paradicsom felületén, így nyomon tudtam követni a sérült rész változásait (27. ábra).

17. táblázat: Az V. kísérlet ejtési mátrixa

Érettségi állapot	Ejtési magasság	Kontroll	Csoportkód
Tört színű (A)	×	10 szem	AK
	40 cm	10 szem	A40
	80 cm	10 szem	A80
Halvány piros (B)	×	10 szem	BK
	40 cm	10 szem	B40
	80 cm	10 szem	B80
Élénk piros (C)	×	10 szem	CK
	40 cm	10 szem	C40
	80 cm	10 szem	C80

4.2.6 VI. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat előkísérlet)

A kísérlet során nem alkalmaztam semmilyen kezelést, csupán a bogyók egyes részeinek légzésintenzitását vizsgáltam meg különböző takarási módok segítségével a 28. ábrán látható és a 18. táblázatban leírt módokon.



28. ábra: Az egyes takarási módok kivitelezése (saját forrás)

18. táblázat: A VI. kísérlet takarási mátrixa

Takarás	Darabszám
Takarás nélküli kontroll kocsánnyal	10
Bogyó takarása (alufólia + Parafilm®), kocsány szabadon	10
Kocsány takarása (Parafilm® + viasz), bogyó szabadon	10
Ízesülés takarása, bogyó szabadon	10
Ízesülés, bogyó szabadon	10

4.2.7 VII. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat)

A tárolóban alkalmazott fiziológiai növényfejlődés-szabályozó kezelés kivitelezése megegyezik a II. kísérletben leírtakkal, azzal a különbséggel, hogy 20 °C-on történt a kezelés. A kontroll mintákat a kezelés ideje alatt azonos körülmények között tároltam, gázfejlesztés nélkül. Ennél a kísérletnél már az 1-MCP kezelést megelőzően elvégeztem a minták bevonatolását viasszal. A bevonatolás hagyományos gyertyaviasszal történt, melyet felmelegítés és kézmelegre történő hűtést követően alkalmaztam, hogy elkerüljem a paradicsom károsodását. A bogyó takarása esetében a kocsányt és ízesülést leszámítva az egész paradicsomot bemártottam a viaszba

ügyelve, hogy ne maradjon fedetlen rész. A kocsány takarása esetében csak a kocsányt és ízesülést mártottam viaszba, míg az ízesülés takarása esetében eltávolítottam a kocsányt és a szabadon maradt ízesülést viaszoltam be (29. ábra). Ezt követően végeztem el az 1-MCP kezelést, majd a mintákat 20 °C-on tároltam és vizsgáltam.



29. ábra: Az egyes takarási módok kivitelezése (balról jobbra: kontroll, ízesülés-viaszolt, kocsányviaszolt, bogyófelület-viaszolt) (saját forrás)

19. táblázat: A VII. kísérlet kezelési és takarási mátrixa

		Kezelés		
Takarás	Kezeletlen kontroll (K)		1-MCP kezelt (G)	
	Takarás nélküli kontroll kocsánnyal	KK	Takarás nélküli kontroll kocsánnyal	GK
	Bogyó takarása, kocsány szabadon	KB	Bogyó takarása, kocsány szabadon	GB
	Kocsány takarása, bogyó szabadon	KKOCS	Kocsány takarása, bogyó szabadon	GKOCS
	Ízesülés takarása, bogyó szabadon	KI	Ízesülés takarása, bogyó szabadon	GI

4.3 Roncsolásmentes vizsgálati módszerek

4.3.1 Színmérés

A paradicsomok felületi színváltozásának nyomon követésére egy hordozható Konica Minolta CR-400 típusú reflexiós, tristimulusos színmérő készüléket (Minolta Europe GmbH, Langenhagen, Németország) használtam (30. ábra). A tristimulusos módszer az additív színkeverés elvén alapul, amely szerint bármely szín előállítható három meghatározott hullámhosszúságú fény – vörös (R), zöld (G) és kék (B) – keverékeként. Az ilyen típusú eszközök az emberi szem színérzékelését modellezzik. A berendezés a CIELab (1974) színtényezőket (L^* - világossági tényező, a^* - zöld-vörös színezet, b^* - kék-sárga színezet)



30. ábra: Színmérés a Minolta CR-400 berendezéssel

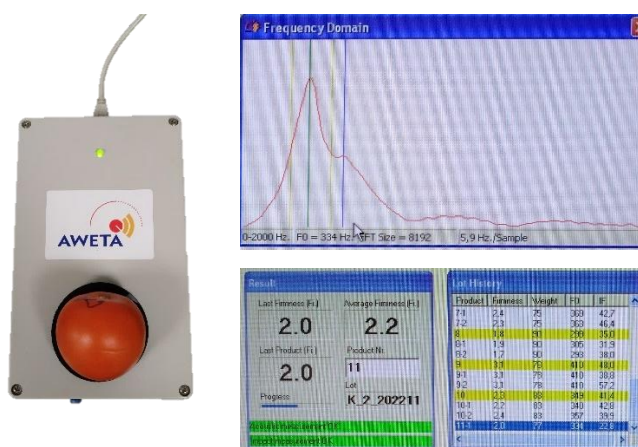
mérte és számította az élénkséget (C^*) és a színezeti szöget (h°). A mérésekhez a műszer 8 mm átmérőjű mérőfejét használtam, amelyet a vizsgálatok megkezdése előtt a gyártó által meghatározott fehér etalonra (No: 15033034; $Y=93,7$, $x=3131$, $y=3191$) kalibráltam. Méréseimhez D65 korrelált színhőmérsékletű beépített fényforrást alkalmaztam, mely nemzetközi szabvány a színmérések esetén (D: daylight, 65: 6500 K). Minden kísérlet esetében, minden mintán két mérési pontot jelöltem ki a paradicsom legnagyobb átmérőjének mentén, a hossz tengelyre merőlegesen,

a termés két szemközti oldalán. Ezen mérési pontokat meg is jelöltem, így minden egyes alkalommal a paradicsomnak ugyanazt a pontját vizsgáltam. A CR-400-ba épített mikroszámítógép kiszámította a vörös (X), zöld (Y) és kék (Z) színösszetevőket, majd az ötféle színínger-rendszer közül a kiválasztott színtér koordinátáit és a színkülönbséget határozta meg. A műszer a számítógéppel, RS-232 soros porton, valamint Minolta Utility szoftveren keresztül kommunikált. A kapott mérési adatok kiértékelését egyedi számítási makrót tartalmazó MS Excel fájl segítségével végeztem.

4.3.2 Akusztikus és impakt állománymérés

Korábbi kutatások során számos roncsolásmentes eljárást próbáltak ki paradicsomon: például gerjesztést követő rezonancia frekvencia elemzése (De Ketelaere és De Baerdemacker, 2001), mágneses rezonancia (Tu et al., 2007), ultrahang (Mizrach, 2007), látható/közeli infravörös spektroszkópia (VIS/NIR) (Shao et al., 2007; Van Dijk et al., 2006). Mivel ezek a technikák nem közvetlenül az állományt mérik, így szükség van referenciaértékekre, amelyeket roncsolásos módszerekkel lehet meghatározni. Ezek eredményeit aztán statisztikai vagy mesterséges intelligencián alapuló modellekbe táplálást követően előrejelzést lehet adni a roncsolásmentes adatok alapján.

A roncsolásmentes mérési vizsgálatok során a minták állományváltozását az Aweta AFS asztali keménységmérő (AWETA AFS Desktop System, DTF V0.0.0.105, AWETA BV., Pijnacker, Hollandia) segítségével követtem nyomon (31. ábra). A műszer alkalmas különböző termények egyidejű, több ponton történő akusztikus (globális) és impakt (felületi) keménységének mérésére.



31. ábra: Aweta AFS asztali keménységmérő (saját forrás)

A mérés megkezdése előtt a berendezésbe épített mérleget kalibráltam a hozzá tartozó súlyokkal. Ezt követően a paradicsomminták a kijelölt mérési pontokkal – a bogyó kocsánybemélyedése, valamint bibepontja mellett – lefelé fordítva kerültek elhelyezésre egy szivacsos alátámasztáson. A készülék először az adott minta tömegét (g) mérte meg, majd alulról egy kis ütőfejjel enyhe ütéssel gerjesztette azt. Az így keletkező hangspektrumot egy beépített mikrofon rögzítette, amelyet a csatlakoztatott számítógép azonnal feldolgozott (FFT – Fast Fourier Transformation). A műszerhez tartozó szoftver segítségével meghatároztam a vizsgált minta

akusztikus keménységtényezőjét, amelyet De Ketelaere és társai (2006) munkája alapján a következő képlettel [3] számítottam ki (S , $\text{Hz}^2\text{g}^{2/3}$):

$$S = f^2 \times m^{2/3} \times 10^{-6} \quad [3]$$

ahol:

S – akusztikus keménységtényező ($\text{Hz}^2\text{g}^{2/3} \times 10^{-6}$);

f – rezonancia frekvencia (Hz);

m – termény tömege (g).

Továbbá, meghatároztam az ütésvizsgálati (impakt) keménységtényezőt (D , ms^{-2}) is Felföldi és Fekete (2000) nyomán az alábbi képlet alapján [4]:

$$D = \frac{1}{\Delta T^2} \quad [4]$$

ahol:

D – impakt keménységtényező (ms^{-2})

ΔT^2 – a szinuszgörbe első hullámának kezdő és maximumpontja közötti időkülönbség

4.3.3 DA-index[®] meghatározása DA-méter[®] műszerrel

A paradicsomok érési folyamata és a tárolás során bekövetkező változások nyomon követésére a Vis/NIR DA-meter[®] FRM01-F típusú műszert (Sintéleia s.r.l., Bologna, Olaszország) használtam (32. ábra). Az érettség meghatározásához a növényi szövet klorofilltartalmát vizsgáltam, amelyet a műszer az abszorbancia tulajdonságai alapján, az [5] egyenlet szerint határozott meg. A mérési pontok megegyeztek a színmérés során vizsgált mérési pontokkal.



Az adatgyűjtés során a berendezés két különböző hullámhosszon mért abszorbanciakülönbséget (I_{AD}) számította ki.

32. ábra: Vis/NIR DA-meter[®] FRM01-F (saját forrás)

Az egyik mérési hullámhossz a klorofill-a abszorpciós csúcsa (670 nm), míg a másik egy referenciahullámhossz (720 nm), amely nem gerjeszti a PSII rendszert, így a háttérspektrum meghatározására szolgál.

A minták minőségváltozását, azaz utóérését és/vagy annak gátlását a klorofilltartalommal összefüggő érettségjelző, azaz a DA-index[®] meghatározásával követtem nyomon. A DA-index[®] egy 0 és 5 közötti érték, 0,01-es pontossággal. Minél magasabb a DA-index[®], annál zöldebb a növényi szövet, és annál nagyobb a fotoszintetikusan aktív klorofilltartalom. Az érés

előrehaladtával a DA-index[®] értéke jelentősen csökken a betakarításkori állapothoz képest (Kumari et al., 2018).

$$\text{DA-index}^{\text{®}} = I_{\text{AD}} = A_{670\text{nm}} - A_{720\text{nm}} \quad [5]$$

ahol:

$A_{670\text{nm}}$ = klorofill-a abszorpciós csúcsa

$A_{720\text{nm}}$ = háttér spektrum abszorbanciája

4.3.4 Klorofill fluoreszcencia meghatározása

4.3.4.1 WALZ MONI-PAM

A tárolás alatti klorofillaktivitás változásait egyrészt egy WinControl-3 (3.12-es verzió, dev-rev. 396) szoftverrel vezérelt Modular Multi Channel Chlorophyll Fluorometer (MONI-PAM) készülékkel (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Németország) követtem nyomon (33. ábra). A klorofill-fluorométer segítségével meghatároztam az F_0 (sötét- vagy minimális fluoreszcenciajel), az F_m (maximális fluoreszcenciajel), valamint az F_v (változó fluoreszcencia, azaz $F_m - F_0$) értékeket. A mérési pontok ezekben is megegyeztek a színmérés során vizsgált mérési pontokkal.



33. ábra: Moni-PAM
(forrás: Heinz Walz, 2025)

4.3.4.2 PSI Open FluorCam

A tárolás során bekövetkező fotoszintetikus klorofillaktivitás csökkenést továbbá Open FluorCam műszerrel (© PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o., Brno, Csehország) követtem nyomon.

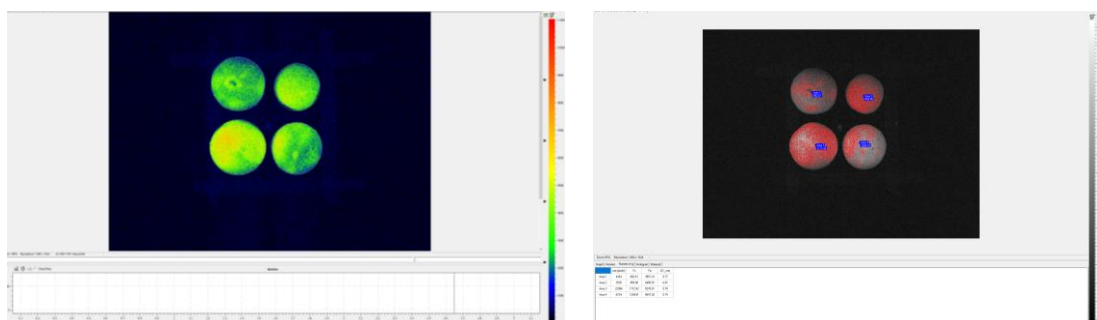
A készülék moduláris felépítésű, egy CCD kamerából, négy rögzített LED panelből egy nagy teljesítményű számítógépből és a szoftvercsomagból áll (34. ábra). A mérőrendszerben alkalmazott LED-panelek és a telített villanásokat biztosító fényforrás pozíciója, valamint a hozzá tartozó kamera elhelyezkedése szabadon állítható különböző szögek és távolságok mentén. Ez lehetőséget ad arra, hogy a vizsgálni kívánt minták képalkotási beállításait az adott mérési célokhoz igazítsák. A paradicsommintákon két mérési pontot határoztam meg, mivel az utóérés a termés felületén nem egyenletesen ment végbe. Az egyik mérőpont a bogyó bibepontja közelében helyezkedett el, míg a másikat a kocsányt körülvevő bemélyedésnél jelöltem ki, így lehetőség nyílt a kocsány klorofilltartalmának csökkenését is nyomon követni.

Egy-egy felvétel során négy minta került a kamera alá. A műszer három fő paramétert rögzített: az F_m értéket, az F_0 értéket, valamint az F_v értéket. Ezen paraméterek alapján meghatároztam a fotoszintetikus hatékonyságot is, az F_v/F_m arány kiszámításával, amely a minta fényelnyelési és energiahasznosítási képességét jelzi.



34. ábra: Open FluorCam klorofill fluoreszcenciás mérőberendezés (saját forrás)

A mérési adatokat a FluorCam7 (ver. 1.2.5.18) szoftverrel (© PSI – Photon Systems Instruments, spol. s r.o., Brno, Csehország) rögzítettem (35. ábra). A vizsgálatokat megelőzően a paradicsommintákat 10 percig sötétben tartottam, hogy sötétadaptációval biztosítsam a pontos és konzisztens mérési feltételeket. A felvételek készítése szintén árnyékos, homogén megvilágítású környezetben történt a külső fényhatások minimalizálása érdekében.

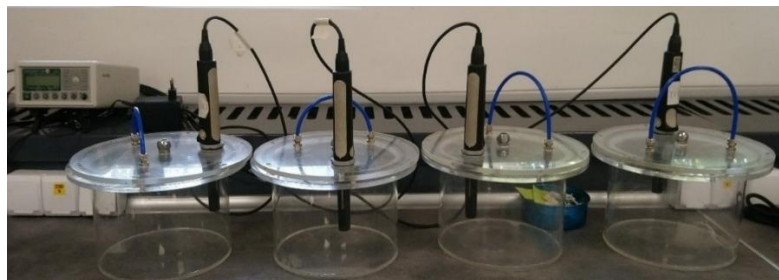


35. ábra: A klorofill fluoreszcenciás mérések kiértékelése a FluorCam szoftverrel (saját forrás)

4.3.5 Légzésintenzitás mérés

A kertészeti termények betakarítást követő élettevékenységei közül a legmeghatározóbb a légzés, mely során oxigénből és cukorból bonyolult reakciók sorozatát követően víz, szén-dioxid, energia (ATP) és hő keletkezik. Ezen reakciókra dinamikus egyensúly jellemző, tehát a vegyületek felhasználásának és képződésének üteme azonos. Mindezek alapján a keletkezett CO_2 mennyiségének mérése alkalmas a termény légzésintenzitásának jellemzésére. Klimatérikus gyümölcsök esetében a légzésintenzitás az érés előrehaladtával változik, ezáltal viszonylag jól nyomon követhető vele az érés folyamata. A MATE-ÉTTI Árukezelés, Kereskedelem, Ellátási Lánc és Érzékszervi Minősítés Tanszék Postharvest Laboratóriumában megtalálható egyedi építésű, zárt rendszerű légzésintenzitásmérő berendezés 4 darab zárható 4250 cm^3 térfogatú plexi mérőedényből, 4 darab infravörös Ahlborn FY A600- CO_2H szenzorból (Ahlborn Mess-und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen Németország) és egy Ahlborn ALMEMO3290-8 (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen Németország) digitális adatgyűjtőből állt, mely

kilenc elektromosan szigetelt mérőbemenettel rendelkeznek (36. ábra). Az ismert és feljegyzett tömegű paradicsom mintákat 1 óra időtartamra helyeztem el a zárható mérőedényekbe.



36. ábra: A légzésintenzitás mérésére alkalmazott berendezés és mérőkör (saját forrás)

A paradicsomok feletti szabad lég térbe bevezetett infravörös (IR) szenzor működése az abszorbancián alapul. Az IR lámpa fénycsugárakat irányít egy levegőmintával töltött csőön keresztül. A cső másik végén egy optikai szűrő, valamint egy IR fényszűrő található. A csőben található CO₂ elnyeli a fény egy adott hullámhosszát, míg a többit átengedi, a cső végén található optikai szűrő a CO₂ abszorpciós hullámhosszán kívül minden más hullámhosszt elnyel, így végül az IR detektor érzékeli a fennmaradó adott hullámhosszú fény mennyiségét. A berendezés ezután kiszámolja a kisugárzott és a detektált mennyiség közötti különbséget, melyből meghatározható a CO₂ mennyisége. A berendezés ezt a számítást másodpercenként elvégzi és ezt az időbeli változást ábrázolva a görbe meredekségének segítségével meg lehet határozni a légzésintenzitást az alábbi képlet alapján [6]:

$$Li = \frac{V_{sz} \cdot \Delta CO_{2(t_2-t_1)} \cdot 10^{-6}}{m \cdot (t_2 - t_1)} \quad [6]$$

ahol:

Li = légzésintenzitás [ml CO₂/(kg·h)]

V_{sz} = mintatartó edény szabad térfogata [ml]

ΔCO_{2(t2-t1)} = CO₂ koncentráció változás [ppm]

m = a termék tömege [kg]

t₁ és t₂ = mérési időpont [óra]

A mérés robusztussága, jó reprodukálhatósága, időigényessége, valamint az egy méréshez felhasznált nagy mintaelemszám miatt a legtöbb esetben az ismétlésszámom 1 volt.

4.3.6 Etiléntermelés meghatározása

Az etiléntermelésben bekövetkező változásokat egy SCS-56 kézi etilénanalizátorral (Storage Control Systems Ltd., Paddock, Egyesült Királyság) határoztam meg (37. ábra) a hermetikusan zárt műanyag tartályban adott ideig tartott minták mért etiléntermelése alapján. A mérést a következőképpen végeztem: egy kilogramm paradicsomot egy (4,25 literes) műanyag dobozba helyeztem, majd a dobozt lezártam. 1 óra elteltével megmértem a gyümölcsök etiléntermelését ppm-ben: a műszer szívó oldalához csatlakoztatott vezetékkel behelyeztem a tároló edény fedelén erre a célra kialakított nyílásba. Az eredményeket az 1 óra alatt a gyümölcs kilogrammonként termelt etilénben ($\mu\text{l etilén} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) kifejezett mikroliterben fejeztem ki.

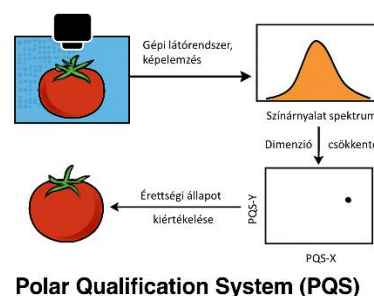


37. ábra: SCS-56 kézi etilénanalizátor (saját forrás)

4.4 Digitális képfeldolgozás

A PQS (Polar Qualification System, azaz Polár Minősítő Rendszer) egy gépi látáson alapuló képfeldolgozási módszer, amelynek célja a termények felületének színeloszlása alapján történő objektív, nem roncsolásos minősítése. A rendszer működése azon az elven alapul, hogy a szín, különösen a színárnyalat (hue), megbízható indikátora a termény érettségi állapotának, így a színjellemzők kvantitatív értékelése pontos képet adhat a gyümölcs élettani fejlettségéről és minőségi állapotáról. (38. ábra).

A vizsgálatok során színes digitális felvételeket készítettem 3×8 bit/képpont felbontással, amelyeket JPEG (Joint Photographic Experts Group) formátumban mentettem el. A minták előkészítését követően egyszerre tizenöt darabot helyeztem el a kamera látóterébe, a lencsétől számított 50 cm távolságra. A megvilágítást laboratóriumi környezetben, mennyezetre szerelt, kereskedelmi



Polar Qualification System (PQS)

38. ábra: Polár Minősítő Rendszer (saját szerkesztés)

forgalomban kapható LED panelvilágítással oldottam meg, 3000 K színhőmérséklettel. A felvételekhez fehér háttérrel alkalmaztam, amely nemcsak a háttér funkcióját töltötte be, hanem színreferenciaként is szolgált. A képeket minden esetben úgy normalizáltam, hogy a háttér színe azonos fehérséget mutasson, ezzel biztosítva a megvilágítás esetleges színeltéréseinek korrigálását.

A képek alapján módosított eljárással kiszámítottam a színárnyalat-spektrumot (Nguyen et al., 2021, 2020): a telítettség értékét 0–100%-os skálára vetítettem. A spektrum nem egyszerű

színhisztogramként került meghatározásra, mivel az egyes színárnyalat-szögekhez tartozó telítettség értékeket összegeztem, így a színek telítettségük szerint súlyozottan jelentek meg. Az így kapott spektrumon a domináns színek csúcsokként rajzolódtak ki, amelyek elhelyezkedése és alakja az érés előrehaladtával változhat. Az elemzés során az alacsony telítettségű, szürkeárnyaltos háttérreszeket és a felületi tükröződések nem vettem figyelembe, mivel ezek szaturációja 0, így automatikusan kiszűrésre kerültek.

A kapott színárnyalat-spektrumokat a Polár Minősítő Rendszer (PQS) felületmódszer (Kaffka és Gyarmati, 1998) segítségével tömörítettem. Ez az eljárás a spektrumot poláris adathalmazzá alakította, majd kiszámítottam a grafikon tömegközéppontját. Feltételezésem szerint a színváltozások által okozott spektrális eltérések elmozdulást idéznek elő a tömegközéppont helyzetében.

A képek alapján továbbá kiszámítottam a vörös, zöld és kék színt komponensek átlagértékeit, valamint ezek normalizált formáit is. A normalizálással kiküszöböltem a fényintenzitásbeli eltéréseket, így a kapott értékek kizárólag a színösszetétel változását tükrözték. A normalizált színösszetevőket a következő egyenletek [7] alapján határoztam meg:

$$R_N = \frac{R}{R+G+B}, G_N = \frac{G}{R+G+B}, B_N = \frac{B}{R+G+B} \quad [7]$$

ahol R, G és B a vörös, zöld és kék színt komponensek felületi átlagintenzitását, míg R_N , G_N és B_N ezek normalizált értékeit jelentik. A nagy telítettségű képpontokat releváns régióként (ROI) egyszerű küszöbérték-alapú módszerrel szegmentáltam. A küszöbértéket a telítettség histogram alapján határoztam meg.

A PQS különösen alkalmas nagymintaszámú vizsgálatok során, ahol a hagyományos színmérési módszerek (pl. kézi színmérés, CIELAB rendszer) nem biztosítanak kellően részletes és komplex képet a termény felületi színváltozásairól. A PQS tehát egy hatékony, képfeldolgozásra épülő minőségértékelési módszer, amely különösen ígéretes eszköz lehet friss termékek (mint például paradicsom) tárolás alatti minőségének nyomon követésében.

4.5 Alkalmazott statisztikai módszerek

Az adatokat Microsoft® Excel® (2401 verzió) segítségével gyűjtöttem, előfeldolgoztam és grafikonokon ábrázoltam. Az eredményeket átlagértékekkel ábrázoltam, a sávok a 95%-os konfidencia intervallumot (CI) jelzik. A statisztikai elemzést SPSS (29.0.1.0 verzió, Armonk, NY, USA, 2022) szoftverrel végeztem. A szignifikáns hatások kimutatására kéttényezős varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaztam. A kezelések és az érettségi állapot főhatásai mellett az interakciós hatásokat is bevontam a modellekbe. A varianciák homogenitását Levene-tesztel vizsgáltam. Az ANOVA-teszt után a homogén varianciájú paramétereket Tukey HSD post hoc

teszttel, míg az inhomogén varianciájú paramétereket a nem paraméteres Games–Howell teszttel elemeztem tovább. A szignifikáns különbségeket $p < 0,05$ szinten határoztam meg.

A digitális képfeldolgozás validálása során a mért paraméterek közötti kapcsolatot Pearson- és Spearman-féle rangkorrelációval értékeltük, tekintettel a pigmentkoncentráció várható nemlineáris viselkedésére. Az adatokat átlag $\pm$ szórás formátumban ábrázoltam.

A képeket a II. kísérlet esetében a Scilab (6.1.1 verzió, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Franciaország) és az Image Processing and Computer Vision Toolbox (IPCV 4.1.2) segítségével dolgoztam fel.

4.6 Sigmoid görbe illesztése a színváltozási adatokra

A paradicsom érési folyamán bekövetkező színváltozás (a^* szintényező) dinamikájának modellezésére nemlineáris regressziót alkalmaztam egy logisztikus sigmoid függvény illesztésével. A görbeillesztés és az adatfeldolgozás Python 3.13.5 (Python Software Foundation, Beaverton, USA) programozási nyelven történt, a következő nyílt forráskódú tudományos könyvtárak felhasználásával:

- NumPy (Numerical Python)
- SciPy (Scientific Python)
- Matplotlib és
- Pandas.

A görbeillesztéshez olyan függvényt használtam, amely a nemlineáris legkisebb négyzetek módszerével illeszti a logisztikus sigmoid függvényt a mért adatokra, optimalizálva a paramétereket (L , k , x_0 , B) a legjobb illeszkedés elérése érdekében. Az adatok előkészítésére, a kapott paraméterek és az illesztett görbe pontjainak generálására, valamint a grafikonok elkészítésére a fent említett könyvtárak funkcióit alkalmaztam.

5 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

5.1 I. kísérlet (1-MCP kezelés dózisának meghatározása)

Az I. kísérlet során megvizsgáltam, hogy a SmartFresh™ (1-MCP) érésszabályozó szer gyártói ajánlásában szereplő 625 ppb-s dózis közel kétszeresére emelése kedvező hatással van-e a tárolás során mért minőségi paraméterekre. A vizsgálatba négy különböző érettségi állapotú paradicsomcsoportot (A, B, C, D) vontam be, melyeken belül három kezelési variánst alkalmaztam: kezeletlen kontroll (x), a gyártói ajánlás szerinti teljes dózis (Tx), valamint a dupla dózisú kezelés (Dx). A tárolás alatt a klorofillfluoreszcencia (F_0 , F_m , F_v), az akusztikus keménység (S), a színparaméterek (L^* , a^* , b^* , C^* , hue), valamint a DA-index® változását kísértem figyelemmel.

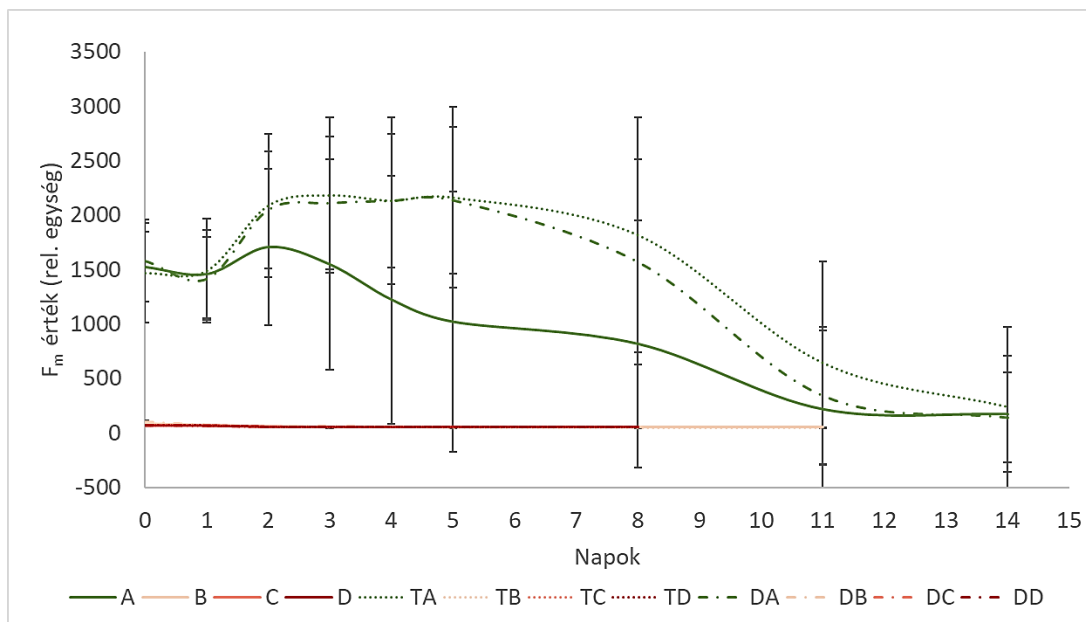
5.1.1 Klorofill fluoreszcencia

A mérések során kapott F_0 , F_m és F_v értékek görbéi nagyon hasonló lefutást mutattak, ezért ezek egyenkénti részletes bemutatásától eltekintettem. A klorofillfluoreszcencia kibocsátása a fotoszintézissel verseng az elnyelt fényenergia felhasználásáért: minél hatékonyabb a fotoszintézis, annál kevesebb energia jut fluoreszcenciára, és fordítva. Egy egészséges, sötétbe szoktatott növénynél a fotoszintézis kapacitása maximális, így a klorofill fluoreszcencia értéke alacsony (ez az F_0). Ha viszont egy erős fényimpulzussal ideiglenesen blokkoljuk az elektrontranszportot, akkor a fotoszintézis leáll, és a fluoreszcencia eléri a maximumát (F_m) (Govindjee, 2004).

A zöld pigment, a klorofill lebomlásával a klorofill fluoreszcencia csökkenése várható a különböző kertészeti termények esetében. Ezzel szemben a paradicsomok 'A' érettségi stádiumában (zöldérett állapot) a második napon nőtt az F_m érték (39. ábra). A paradicsomok érési folyamatának sajátossága, hogy a bogyók színe a zöldesfehértől sötétebb zöld árnyalatokba mehet át, mielőtt a vörös színeződés megindulna, amely magyarázhatja a klorofillfluoreszcencia átmeneti emelkedését. Azonban a színmérési eredmények, különösen az a^* értékek (42. ábra), ezt nem támasztották alá egyértelműen.

Ezzel párhuzamosan az akusztikus keménységtényező (S) értékeinek intenzív csökkenését is megfigyeltem az 'A' érettségi csoportban a második napra, amit enyhe növekedés követett (40. ábra). Mivel a témában kevés konkrét irodalmi adat áll rendelkezésre, azt feltételezem, hogy ezek a zöld paradicsomok (A, TA, DA) a klimaktérikus érési szakaszba léptek, amit általában hirtelen légzésintenzitásbeli emelkedés, majd fokozatos csökkenés jellemez (Horváth-Mezőfi et al., 2022). Ez a változás több más élettani folyamatot is befolyásolhat: a fluoreszcencia kezdeti növekedését, majd csökkenését, valamint az állomány gyors puhulását, amit később egy mérsékelt változás

követ. Ez magyarázattal szolgálna arra is, hogy miért csak a zöldérett csoportnál jelent meg ez a mintázat: a pirosodó bogyók esetében a klimaktérikus csúcs valószínűleg már lezajlott, így esetükben inkább egy egyenletesen csökkenő légzési intenzitás volt megfigyelhető (Horváth-Mezőfi et al., 2022).



39. ábra: A maximális fluoreszcencia (F_m) értékek alakulása az I. kísérlet során (Négy különböző érettségi állapot (A, B, C, D), három 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (x), teljes dózis (Tx), dupla dózis (Dx))

Az F_m értékek alakulása alapján a vizsgálat első nyolc napjában még jól elkülöníthetők voltak egymástól a zöld pigmentet tartalmazó, korai érettségi stádiumban lévő minták, valamint az előrehaladottabb érésű csoportok, ami összhangban állt a várakozásokkal (39. ábra). A nyolcadik napot követően azonban ezek a különbségek fokozatosan elmosódtak, továbbá a kontrollcsoport (A) valamint az 1-MCP-vel kezelt minták (TA, DA) között sem voltak már szignifikáns eltérések. Érdekes megfigyelés, hogy a teljes (TA) és kétszeres dózisú (DA) kezelésben részesült zöld paradicsomok klorofillfluoreszcencia-paraméterei sem különböztek szignifikánsan egymástól. Ugyanakkor az jól látható volt, hogy az 1-MCP-kezelés hatással volt a zöldérett stádiumban lévő termésekre: a TA és DA csoportok elkülönültek a kezeletlen kontrolltól (A), ami a kezelés érési folyamatra gyakorolt befolyását jelzi.

A 20. táblázat szemlélteti a 8. napi adatok esetében elvégzett statisztikai elemzés eredményeit. Ez is alátámasztja azt a megállapítást, miszerint a zöldérett csoportok elkülönülnek a többi csoporttól, továbbá, hogy a kezelés a zöldérett (A) csoporton belül szignifikáns hatással volt a paradicsomokra, ugyanakkor a teljes (TA) és dupla (DA) dózis között nincs statisztikailag kimutatható különbség.

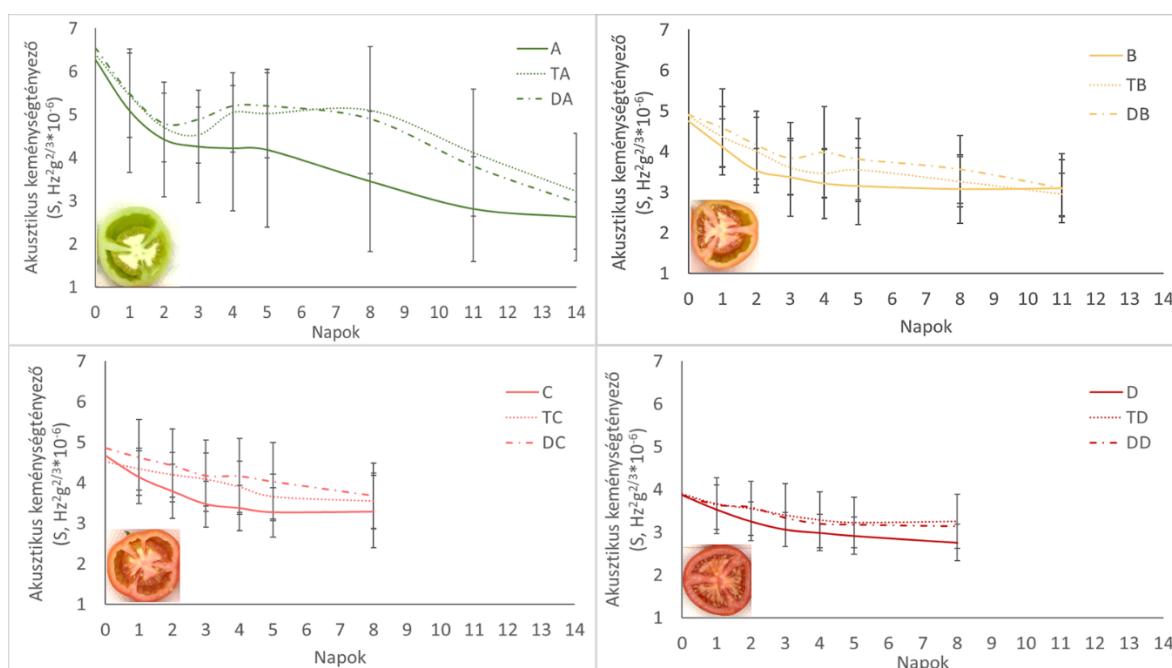
20. táblázat: A klorofill fluoreszcenciás mérések során kapott F_m értékek statisztikai elemzésének eredményei (kéttenyezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a kísérlet 8. napján.

Érettségi állapot	Kezelés		
	K (kontroll)	T (teljes)	D (kétszeres)
A	816,86 ± 1135,55 ^{Aa}	1862,33 ± 1054,49 ^{Ba}	1569,08 ± 944,78 ^{Ba}
B	50,93 ± 0,704 ^{Ab}	50,33 ± 0,577 ^{Ab}	50,2 ± 0,447 ^{Ab}
C	51,57 ± 1,718 ^{Ab}	60 ± 0,1 ^{Ab}	55,5 ± 6,36 ^{Ab}
D	51,50 ± 1,08 ^{Ab}	51,67 ± 0,516 ^{Ab}	50,75 ± 0,957 ^{Ab}

A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak az egyes érettségi állapotokon belül, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak az egyes kezeléseken belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.1.2 Akusztikus keménység

Az akusztikus keménység alakulása több szempontból is hasonló mintázatot mutatott, mint az F_m értékek: a zöldérett csoportok (A, TA, DA) jól elkülönültek a többi érettségi állapotú mintától (40. ábra). Ebben az esetben is intenzív változást figyeltem meg a második napig, azonban itt a tendencia csökkenő irányú volt. Ezt követően egy minimális emelkedés, majd stagnálás következett, végül – ahogy az várható is volt – fokozatos, állandó csökkenés volt megfigyelhető.

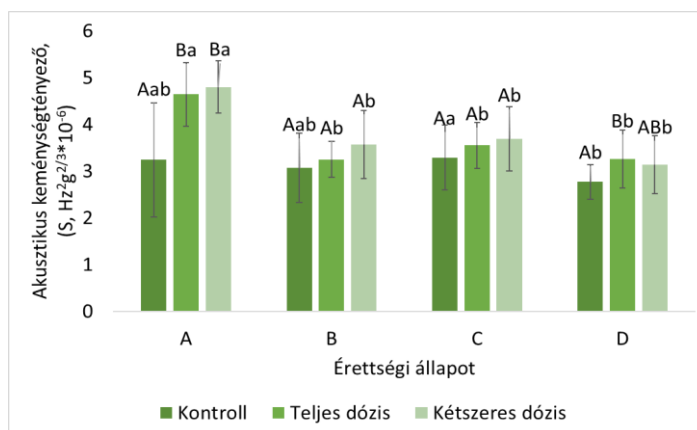


40. ábra: Az akusztikus keménység (S) értékek alakulása az I. kísérlet során (Négy különböző érettségi állapot (A, B, C, D), három I-MCP kezelési variáns: kezeletlen (x), teljes dózis (Tx), dupla dózis (Dx))

A másik három érettségi csoport esetében ezzel szemben már a kezdetektől egyenletesen csökkenő trend volt tapasztalható. Ezek az eredmények is alátámasztják azt a korábban

megfogalmazott feltételezésemet, hogy a zöld paradicsomok esetében a klimaktérikus szakaszba lépés jelentős változásokat idéz elő.

Az akusztikus keménység (S) eredmények statisztikai elemzése alapján (41. ábra) megállapítható, hogy az 1-MCP kezelés szignifikáns hatással volt a zöldérett paradicsomok (TA, DA) keménységére, ugyanakkor a kétszeres dózis (DA) alkalmazása nem eredményezett állománybeli javulást. A többi érettségi állapoton belül ezzel szemben nem okozott szignifikáns változást a kezelés alkalmazása.

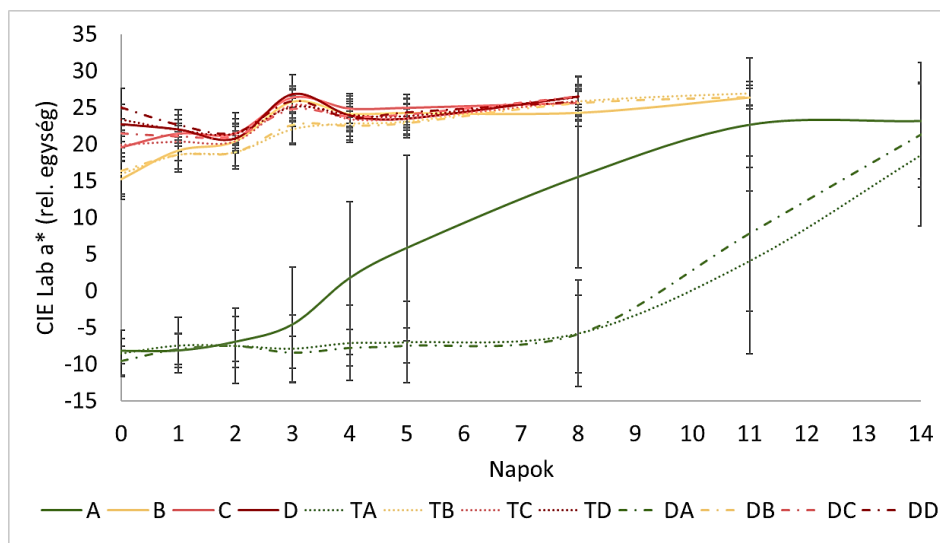


41. ábra: Az akusztikus keménység értékek (S) statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a kísérlet 8. napján. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. Az egyes csoportokat nem-parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze. Az interakciók miatt a kezelések összehasonlítása érettségi állapotonként, míg az érettségi állapotok összehasonlítása kezelésenként történt.

5.1.3 Szín

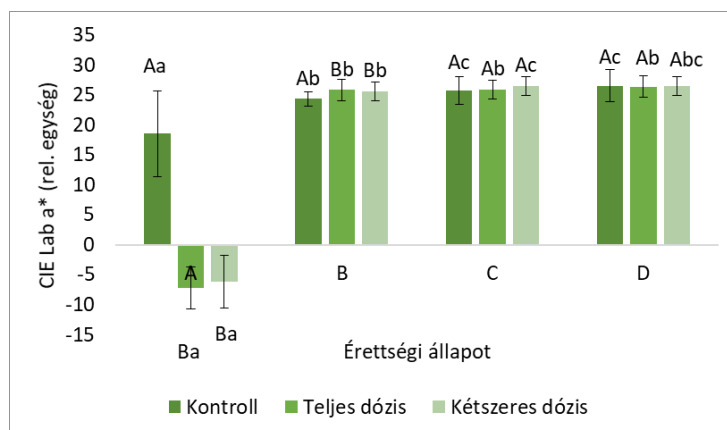
A mért színparaméterek közül a paradicsom színének változását legjobban a vörös–zöld színfaktor, az a^* érték írta le, mivel az érés során a paradicsom színe zöldről vörösre változik (Helyes et al., 2006). Az egyéb színtényezők közlésétől jelen dolgozatban eltekintettem, mert nem szolgálnak releváns információval. A másik két mérési módszerrel ellentétben a színmérés az első két nap során nem mutatott ki látványos változást. Ez nem meglepő, hiszen a klimaktérikus hatásra bekövetkező színváltozás egyfajta késleltetéssel jelentkezik, mivel a pigmentek lebomlása és új pigmentek képződése időigényes biokémiai folyamat (42. ábra).

Az a^* értékek alapján egyértelműen látszik, hogy a zöldérett csoportok (A, TA, DA) egészen a tárolás végéig jól elkülönültek a többi, előrehaladottabb érettségi stádiumban lévő csoporttól. Emellett az 1-MCP-vel kezelt minták (TA, DA) is jól megkülönböztethetők voltak a kezeletlen kontrollcsoporttól (A), különösen a negyedik naptól kezdődően. Az 1-MCP kezelés hatékonyságát az is alátámasztja, hogy míg az A csoportban már a második naptól megindult a színeződés, a TA és DA csoportoknál ez csak a nyolcadik naptól volt megfigyelhető.



42. ábra: A CIELab vörös-zöld szinténysző (a*) értékeinek alakulása az I. kísérlet során (Négy különböző érettségi állapot (A, B, C, D), három I-MCP kezelési variáns: kezeletlen (x), teljes dózis (Tx), dupla dózis (Dx))

Fontos megjegyezni, hogy a teljes (TA) és kétszeres (DA) dózisú kezelések között itt sem volt szignifikáns különbség. A többi érettségi csoport esetében viszont nem voltak kimutathatóan eltérő színváltozások a kezelések hatására, melyet a 8. napon elvégzett statisztikai elemzés is alátámaszt (43. ábra).

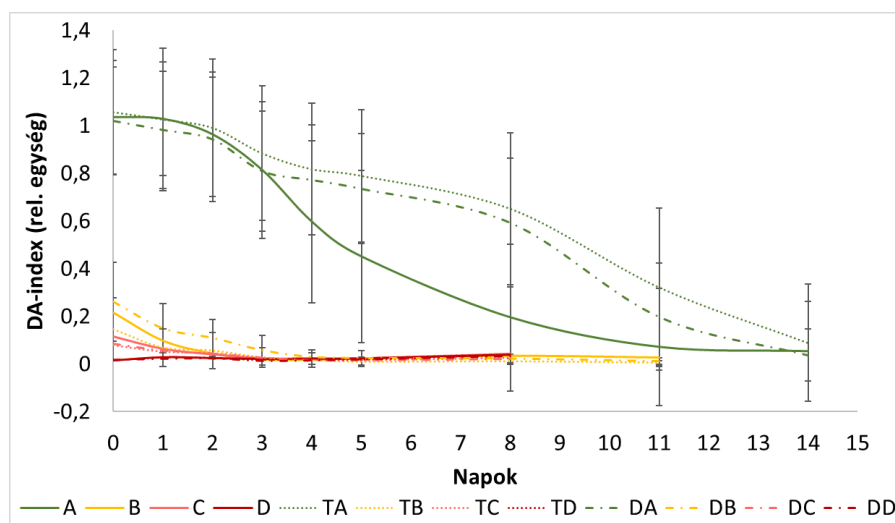


43. ábra: Az a* értékek statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a kísérlet 8. napján. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. Az egyes csoportokat nem-parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze. Az interakciók miatt a kezelések összehasonlítása érettségi állapotonként, míg az érettségi állapotok összehasonlítása kezelésenként történt.

5.1.4 DA-index

A DA-index® a szövet klorofilltartalmával mutat összefüggést, azonban eltérő elven működik, mint a klorofillfluoreszcencia-alapú mérési módszer. A DA-mérő a klorofill molekulák fényelnyelési (abszorbancia) tulajdonságait vizsgálja, míg a PSI Open FluorCam mérőrendszer a

fotoszintetikus apparátus által elnyelt fény hasznosítását, illetve visszasugárzását méri. Ennek következtében a két módszer eredménye nem feltétlenül esik egybe Előfordulhat, hogy bár a szövetben elegendő klorofill van jelen, a fotoszintetikus működés sérült, így a fluoreszcenciajel eltérő lesz. Mivel a klorofill fluoreszcenciás eljárás a fotoszintetikus rendszer működéséről részletesebb képet ad, ez a módszer pontosabbnak tekinthető a növény élettani állapotának megítélésében. A fent leírtak alapján nem meglepő, hogy a DA-méterrel kapott adatok inkább a színmérés adataival mutatnak hasonló lefutást, csak fordított a tendencia (44. ábra). A zöldérett csoportok jól elkülönülnek a többi érettségi állapottól, továbbá a 4. naptól kezdve a kezelt csoportok (TA, DA) is eltávolodnak a kontroll csoporttól (A).



44. ábra: A DA-index® értékeinek alakulása az I. kísérlet során (Négy különböző érettségi állapot (A, B, C, D), három 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (x), teljes dózis (Tx), dupla dózis (Dx))

Ugyanakkor ebben az esetben is az látható, hogy a teljes (T) és a dupla (D) dózissal kezelt csoportok között nincs szignifikáns különbség, melyet a 21. táblázat is alátámaszt.

21. táblázat: A DA-index® értékek statisztikai elemzésének eredményei (kétféle ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a kísérlet 8. napján.

Érettségi állapot	Kezelés		
	K (kontroll)	T (teljes)	D (kétszeres)
A	0,195 ± 0,308 ^{Aa}	0,652 ± 0,319 ^{Ba}	0,593 ± 0,270 ^{Ba}
B	0,035 ± 0,019 ^{Ab}	0,011 ± 0,012 ^{Ab}	0,023 ± 0,019 ^{Ab}
C	0,043 ± 0,023 ^{Ab}	0,026 ± 0,018 ^{Ab}	0,02 ± 0,016 ^{Ab}
D	0,039 ± 0,020 ^{Ab}	0,039 ± 0,019 ^{Ab}	0,034 ± 0,020 ^{Ab}

A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.1.5 Az I. kísérlet eredményeinek összegzése

Az I. kísérlet eredményei azt mutatták, hogy az 1-MCP kezelés leginkább a zöldérett paradicsomok esetében hatékony, míg a későbbi érettségi stádiumokban a hatása mérséklődik. A

színváltozás, a DA-index, valamint az etiléntermelés és a légzésintenzitás vizsgálata igazolta az érésfolyamat lassulását. Ugyanakkor a dupla dózis alkalmazása már nem járt további pozitív eredménnyel, így a kezelés hatékonysága nem javítható a dózis emelésével, ezért a további kísérleteimben már csak a normál (625 ppb) dózist alkalmaztam. Összességében az 1-MCP kezelés megfelelő alkalmazása hatékony eszköz lehet a paradicsom eltarthatóságának növelésére, különösen a korai érettségi állapotokban. A kísérlet során készített fényképes dokumentációt az M2. melléklet tartalmazza.

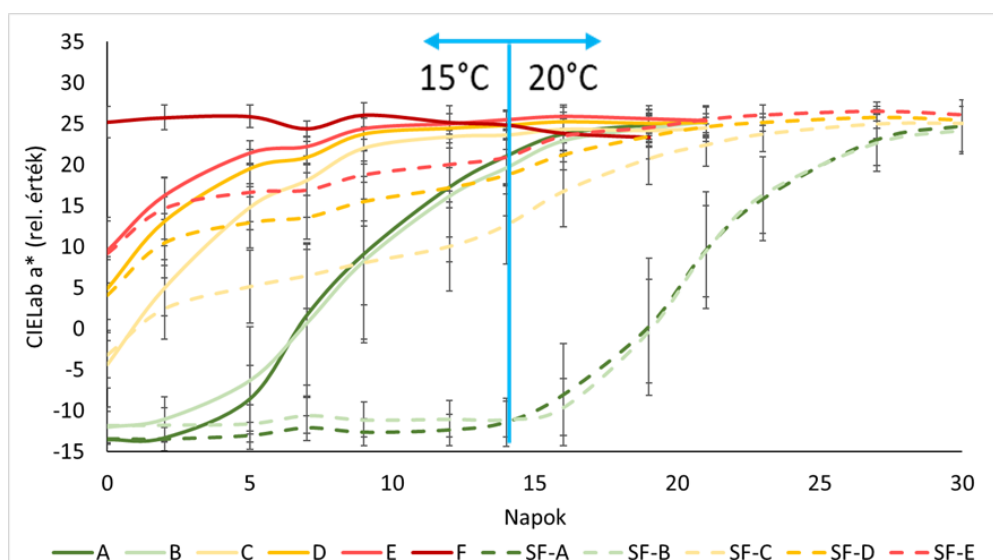
5.2 II. kísérlet (1-MCP kezelés hatásának vizsgálata)

A II. kísérlet célja az érésgátló 1-MCP kezelés hatékonyságának vizsgálata volt különböző érettségi állapotú paradicsomokon annak meghatározására, hogy mely stádiumban alkalmazva a legeredményesebb a kezelés. Hat érettségi stádiumot különítettem el (A–F), melyek közül az első öt csoportot két részre osztottam: az egyik felük 625 ppb koncentrációjú érésszabályzó kezelést kapott (SF-A–SF-E), továbbá a teljesen érett F csoport kezeletlen kontrollként szolgált, mivel ebben az állapotban az érés szabályozása már nem releváns. A mintákat 15 °C-on tároltam két hétig, majd 20 °C-ra helyeztem át őket (szobahőmérsékletű szimulált pultontartás), hogy megfigyeljem, képesek-e utóérésre a kezelt zöldebb stádiumú csoportok (SF-A és SF-B). A vizsgálat során továbbá értékeltem több roncsolásmentes mérési módszer alkalmazhatóságát az érési folyamat nyomon követésére, különös hangsúlyt fektetve a gépi látáson alapuló Polár Minősítő Rendszer (PQS) használhatóságának elemzésére, tekintettel arra, hogy e témában jelenleg nem áll rendelkezésre releváns szakirodalom az online adatbázisokban.

5.2.1 Optimális érettségi állapot meghatározása

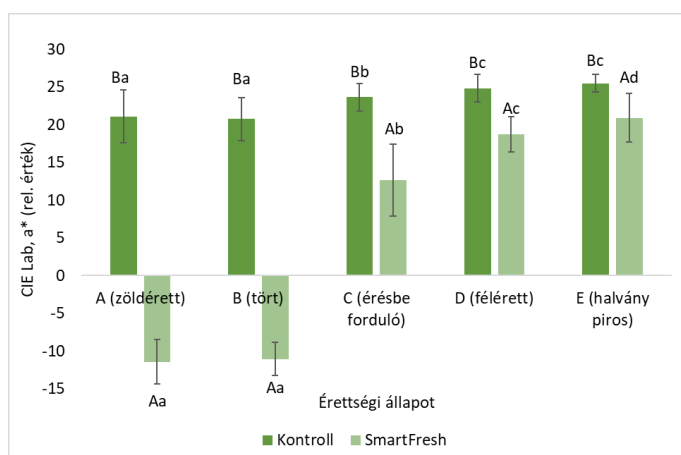
5.2.1.1 Szín

Ezen kísérlet során meghatároztam az L^* , a^* és b^* színparamétereket is, azonban az L^* világossági tényező és a b^* (kék–sárga) színtkoordináta nem szolgáltatott releváns információt a paradicsom színváltozásáról, ezért ezek részletes eredményeit jelen dolgozatban nem közlöm. Mivel a paradicsom felületi színe az érés során zöldből vörösbe tolódik, az a^* vörös–zöld színparaméter bizonyult a leginformatívabbnak, amely szoros összefüggést mutat a klorofilltartalom csökkenésével és a likopin felhalmozódásával. Ez a pigmentátalakulás az etilénfüggő érési folyamat egyik kulcslépése, így az a^* érték változása közvetlen indikátorként értelmezhető az érettségi állapot meghatározásában.



45. ábra: A CIELab vörös-zöld szintényező (a^*) értékeinek alakulása a II. kísérlet során (Hat érettségi állapot (A, B, C, D, E, F), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-F), kezelt (SF-A – SF-E))

A mérés kezdetén kapott a^* értékek jól elkülönítették egymástól az egyes érettségi állapotokat, azonban ez a különbség a tárolás során fokozatosan csökkent, mivel a minták színe közeledett a teljesen érett referencia (F) csoport színéhez. Az 1-MCP kezelés hatása már a második naptól érzékelhető volt, de a kezelt és kezeletlen minták közötti különbség csak a tárolás első hetének végére vált statisztikailag szignifikánssá (45. ábra). A legnagyobb hatás az A (zöldérett) és B (tört színű) érettségi csoportokban mutatkozott: ezekben a csoportokban a kezelt minták színe a 15 °C-on, két hétig tartó tárolás során szinte változatlan maradt, ami a klorofill-lebomlás és a likopinszintézis gátlására utal. A kezelés a C, D és E érettségi fokozatokban is mérsékelte a színeződést, azonban ezek a paradicsomok a tárolás során tovább értek, bár lassabb ütemben, mint a kontroll minták.

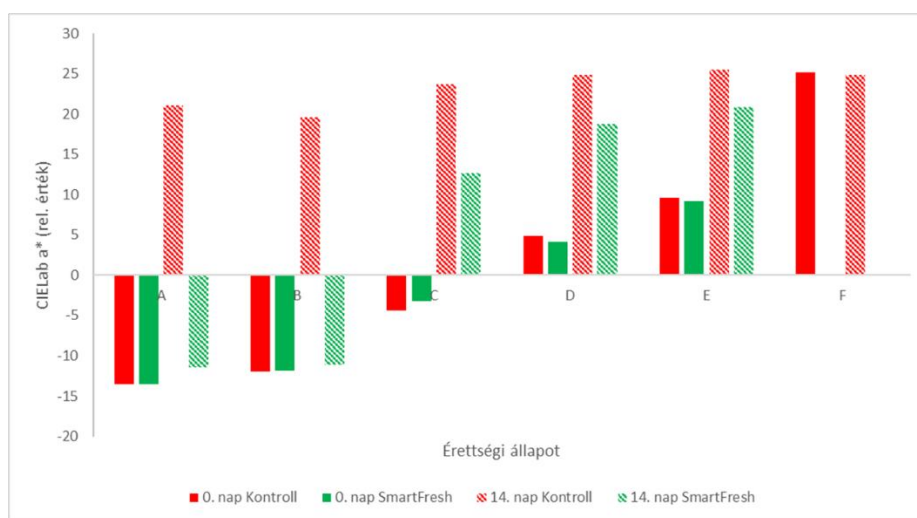


46. ábra: Az a^* eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a hűtve tárolási kísérlet végén (14. nap). A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. Az egyes csoportokat nem-parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

A statisztikai elemzés igazolta, hogy mind a kezelés, mind az érettségi állapot szignifikánsan befolyásolta a minták vörös–zöld színparaméterének változását (46. ábra). A kezelés minden érettségi csoportban érdemi hatást gyakorolt a színre. A kontrollcsoportok esetében az A és B (korai érettségi állapot) csoportok hasonló viselkedést mutattak, ahogy a D és E (előrehaladott) csoportok is, ugyanakkor ezek eltértek a köztes, úgynevezett érésbe forduló érettségi fokozatot képviselő C csoporttól. Az 1-MCP kezelt minták közül az SF-A és SF-B csoportok nem különböztek szignifikánsan egymástól, viszont a SF-C, SF-D és SF-E csoportok mindegyike szignifikáns eltérést mutatott a többi csoporthoz képest.

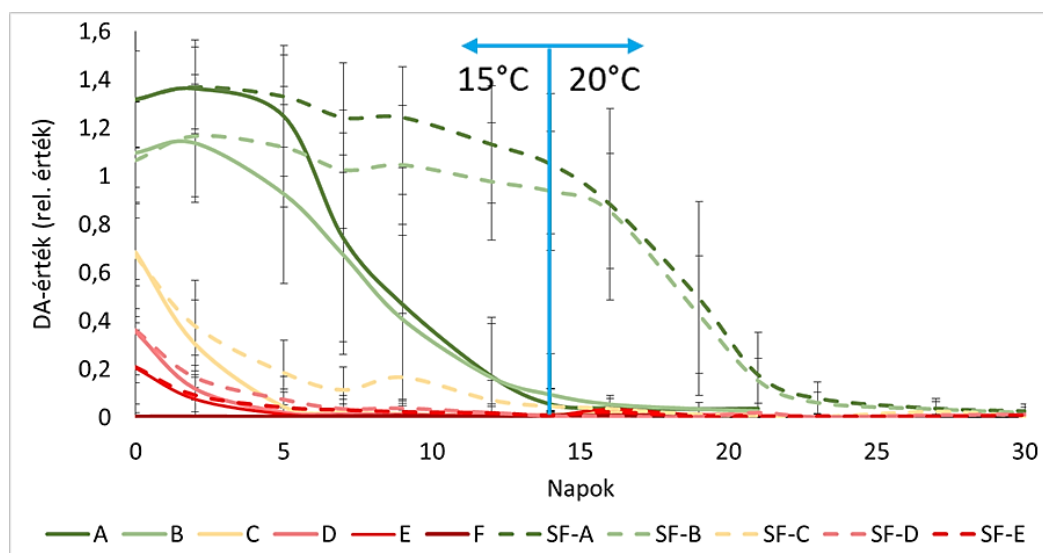
A 14. napig a SF-A és SF-B csoportok színében szemmel látható változást nem érzékeltem. Emiatt felmerült a gyanú, hogy esetleg olyan sokkhatás érte a paradicsomokat, ami miatt elmaradt az utóérésük, így úgy döntöttem, hogy szobahőmérsékletre helyezem a mintákat. A 45. ábra alapján egyértelműen látható, hogy ettől a naptól kezdődően a színeződés folyamata jelentősen felgyorsult a két említett csoport esetében. A SF-C, SF-D és SF-E csoportoknál szintén megfigyelhető a görbe meredekségének mérsékelt növekedése, azonban a változás mértéke lényegesen kisebb.

Az érettségi stádiumokat tekintve már a 45. ábrán is jól látható, hogy melyek azok az érettségi állapotok, amelyek esetében a leghatékonyabb a kezelés, ám ennek egyértelműbb szemléltetésére a 47. ábra szolgál. Az ábrán az egyszínű oszlopok a kiindulási a^* értékeket mutatják, míg az azonos színű, csíkozott oszlopok a 14. napi a^* értékeket. Mindezek alapján egyértelmű tehát, hogy míg az A és B érettségi állapotokon belül jelentősen nagyobb volt a kontroll csoport értékeinek változása, addig a C, D és E csoportokban ez a változás jóval kisebb. A 47. ábra tehát egyértelműen alátámasztja a feltevésemet, miszerint a klimaktérium előtt álló (A, B) csoportok esetében messzemenően jobb eredményeket lehet elérni az érésatlás tekintetében.



47. ábra: Az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés hatékonysága az egyes érettségi stádiumok (A-F) esetében

5.2.1.2 DA-index



48. ábra: A DA-index® értékeinek alakulása a II. kísérlet során (Hat érettségi állapot (A, B, C, D, E, F), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-F), kezelt (SF-A – SF-E))

A DA-index® kezdeti értékei 1,3 (teljesen éretlen) és 0,003 (teljesen érett) között mozogtak, míg a kísérlet végére minden mért érték 0,05 alá csökkent (48. ábra). Az érettségi állapotok a vizsgálat kezdetén jól elkülönültek egymástól, különösen az A és B érettségi fokozatok esetében, ahol az 1-MCP kezelés hatása a tárolás előrehaladtával egyre jelentősebben megmutatkozott – körülbelül az 5. naptól kezdődően. A C (érésbe forduló) csoportban is érzékelhető volt némi különbség a kezelt és kezeletlen minták között, és ez statisztikailag is szignifikánsnak bizonyult. A D és E csoportokban pedig a kezelés gyakorlatilag nem járt érdemi eredménnyel, mivel ezekben az esetekben a minták DA-index® értéke a 7. naptól kezdődően szinte nullára csökkent, függetlenül attól, hogy kaptak-e kezelést vagy sem.

Ezek az eredmények tovább erősítik a korábban tett megállapítást, miszerint a zöldérett (A) és tört színű (B) stádiumban betakarított paradicsomok esetében bizonyult a leghatékonyabbnak a kezelés. E csoportok esetében a klorofilltartalom csökkenése – és így az érési folyamat előrehaladása – minimális maradt a kéthetes hűtve tárolási idő végére. Nagyjából hasonló lefutás figyelhető meg, mint a színmérési eredményeinél, csak ellenkező irányban. A szobahőmérsékletre helyezve ez esetben is intenzív változás, csökkenés, azaz intenzív utóérés-utószíneződés figyelhető meg.

A statisztikai elemzés (22. táblázat) is alátámasztja, hogy a kezelés csak az A, B és C érettségi fokozatok esetében volt szignifikáns. Az érettségi állapot szerinti bontásban megfigyelhető, hogy a kezeletlen minták közül az A és B csoport szignifikánsan különbözött a C, D és E csoportoktól, míg ez utóbbi három között nem volt szignifikáns eltérés. Az 1-MCP kezeléssel ellátott minták

esetén az A és B csoportok nem különböztek egymástól, ahogyan a D és E sem, viszont a C csoport (érésbe forduló) ebben az esetben is elkülönült a többitől.

22. táblázat: A DA-index® eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a hűtve tárolási kísérlet végén (14. nap).

Érettségi állapot	Kezelés	
	Kontroll	1-MCP (SmartFresh™)
A (zöldérett)	0.055 ± 0.065 ^{Ba}	1.05 ± 0.29 ^{Ac}
B (tört)	0.094 ± 0.169 ^{Ba}	0.939 ± 0.246 ^{Ac}
C (érésbe forduló)	0.01 ± 0.019 ^{Bb}	0.047 ± 0.07 ^{Ab}
D (félérett)	0.006 ± 0.011 ^{Ab}	0.005 ± 0.011 ^{Aa}
E (halvány piros)	0.007 ± 0.011 ^{Ab}	0.007 ± 0.017 ^{Aa}

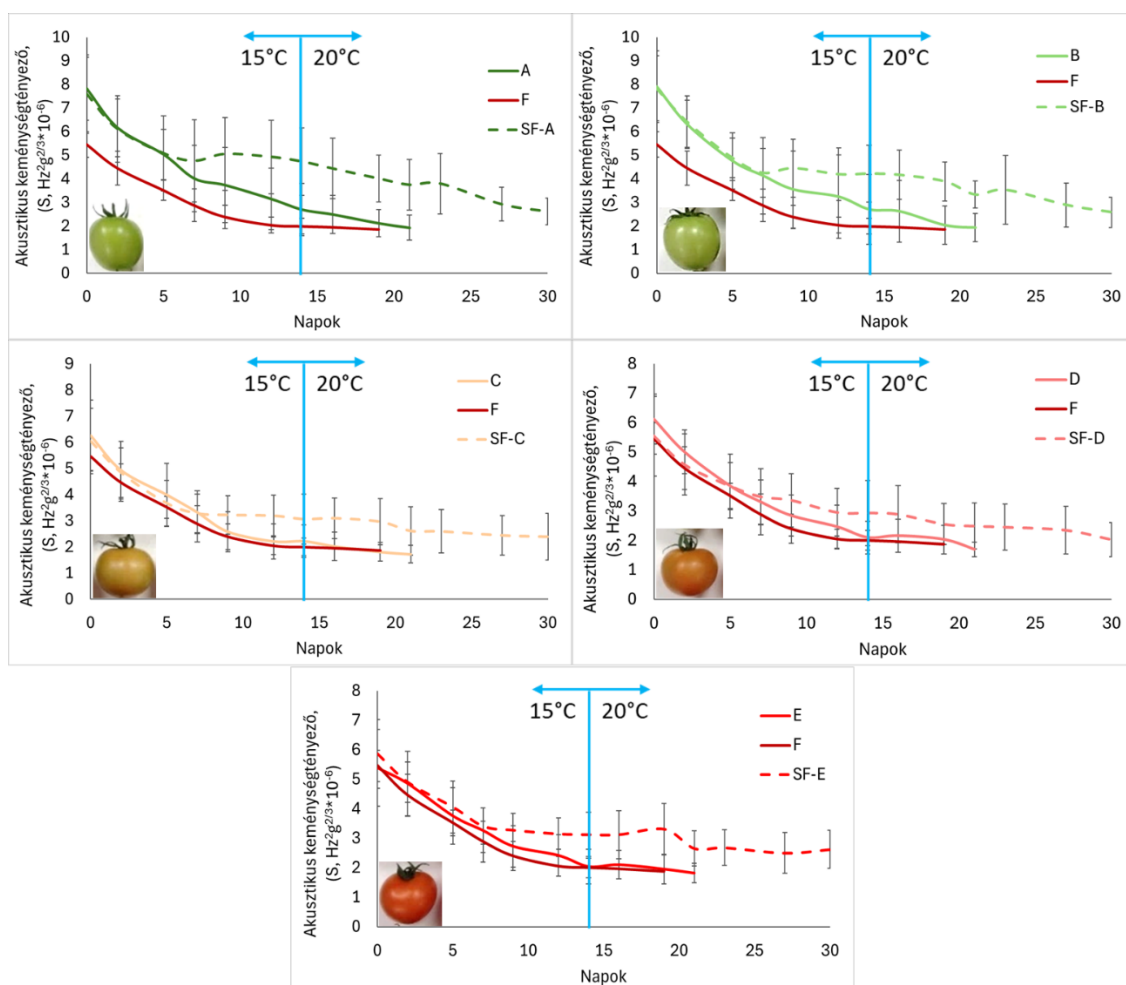
A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak az egyes érettségi állapotokon belül, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak a kezeléseken belül. Az egyes csoportokat nem-parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.2.1.3 Akusztikus és impakt keménység

Az akusztikus és impakt (ütésvizsgálati) keménységmérés különböző fizikai elvek alapján működik, így eltérő típusú információt szolgáltatnak a termény szöveti állapotáról, azaz az állományáról, keménységéről. Az akusztikus módszer elsősorban a sejtszerkezet rugalmasságából származó rezonanciaválasz alapján határozza meg a termék „stiffness” értékét, ezért általában alkalmasabb a belső szerkezeti változások (pl. érés, utóérés, szöveti degradáció) követésére. Ezzel szemben az impakt módszer egy fizikai ütközésre adott deformációs választ értékel egy adott ponton, így pontosabban tükrözi a termék ütésállóságát, nyomódási érzékenységét, vagyis a mechanikai sérülésekre való hajlamot.

Az akusztikus keménységtényező (S) nem mutatott olyan egyértelmű különbségeket az egyes érettségi csoportok között, mint például a színparaméterek közül az a* érték. A mérés kezdetén az S értékek 5 és 8 Hz²·g^{2/3}·10⁻⁶ között szóródtak. Az érés előrehaladtával ezek az értékek folyamatosan csökkentek, és a tárolás végére a kezeletlen minták értékei 3 Hz²·g^{2/3}·10⁻⁶ alá estek. Az 1-MCP kezeléssel átesett minták esetében ugyan szintén csökkenés volt megfigyelhető, de az átlagos értékek magasabbak maradtak: 2,94 és 4,2 Hz²·g^{2/3}·10⁻⁶ között alakultak.

Körülbelül a hetedik naptól vált egyértelművé a különbség a kontroll és a kezelt minták között, és ez a különbség a tárolási idő előrehaladtával enyhén fokozódott. Ezek az eredmények is alátámasztják azt a megállapítást, hogy az 1-MCP kezelés leginkább a zöldérett (A) és tört színű (B) csoportokban bizonyult hatékonynak – ezekben a csoportokban volt a legnagyobb eltérés a kezelt és kezeletlen minták között a vizsgálat végére (49. ábra).



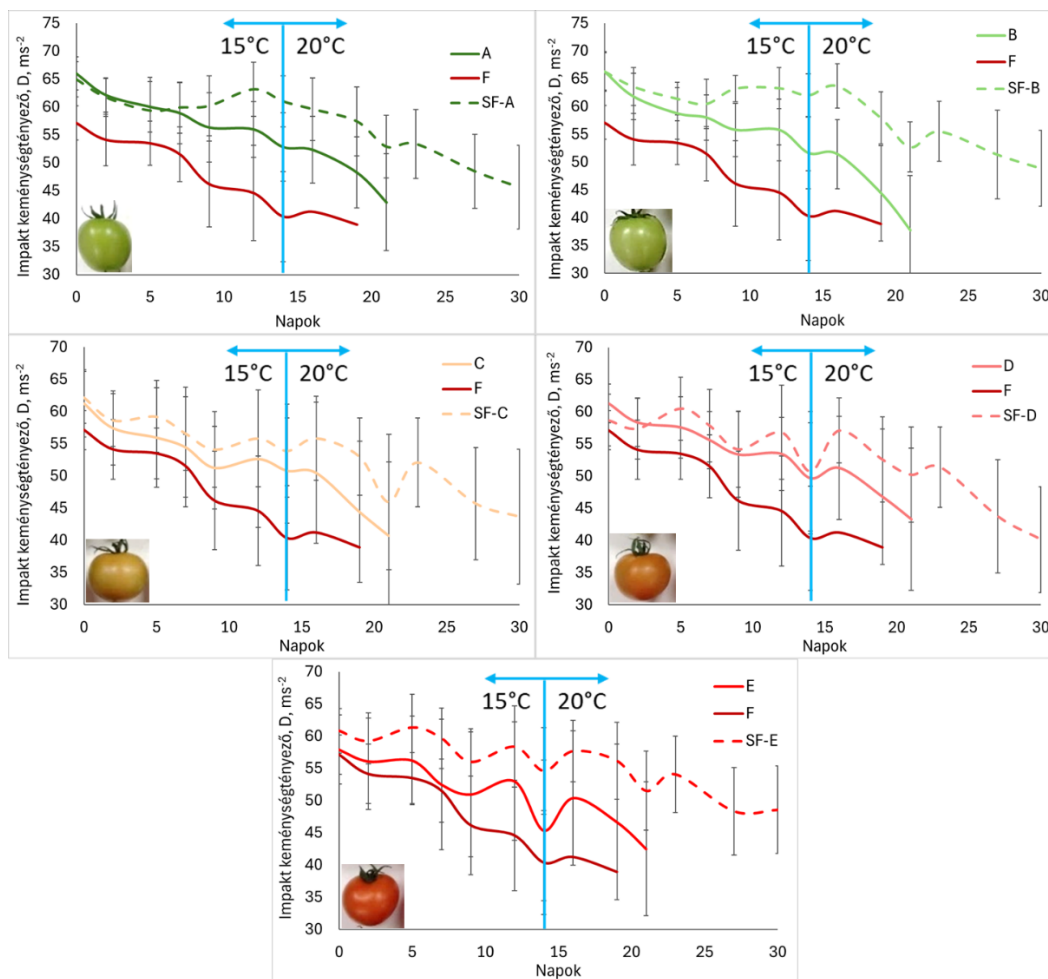
49. ábra: Az akusztikus keménységtényező (S) alakulása a II. kísérlet során (Hat érettségi állapot (A, B, C, D, E, F), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-F), kezelt (SF-A – SF-E))

A 49. ábrán bemutatott tendenciákat a statisztikai elemzés eredményei is megerősítik (23. táblázat). A kezelés minden érettségi stádiumban szignifikáns hatást gyakorolt a keménységre. Érdekes módon a kezeletlen minták között nem volt szignifikáns különbség az egyes érettségi fokozatok között, míg a kezelt csoporton belül a SF-A és SF-B, valamint a SF-C, SF-D és SF-E érettségi fokozatok alkottak elkülönülő csoportokat.

23. táblázat: Az akusztikus keménység eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a hűtve tárolási kísérlet végén (14. nap).

Érettségi állapot	Kezelés	
	Kontroll	1-MCP (SmartFresh™)
A (zöldérett)	2.37 ± 0.64^{Ba}	4.2 ± 0.87^{Ab}
B (tört)	2.29 ± 0.62^{Ba}	3.95 ± 0.83^{Ab}
C (érésbe forduló)	2.23 ± 0.63^{Ba}	3.07 ± 0.95^{Aa}
D (félérett)	2.1 ± 0.56^{Ba}	2.94 ± 1.1^{Aa}
E (halvány piros)	2.04 ± 0.59^{Ba}	3.13 ± 0.75^{Aa}

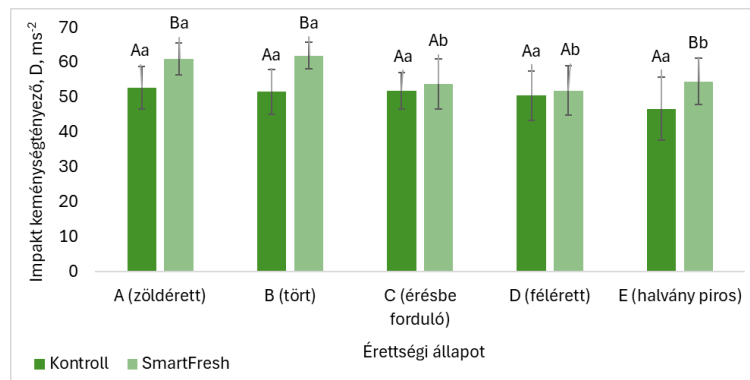
A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak az egyes érettségi állapotokon belül, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak a kezeléseken belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.



50. ábra: Az impakt keménységtényező (D) alakulása a II. kísérlet során (Hat érettségi állapot (A, B, C, D, E, F), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-F), kezelt (SF-A – SF-E))

Az impakt keménységmérés eredményei az 50. ábrán láthatóak. Míg az akusztikus keménységmérés esetében a C, D és E csoportok gyakorlatilag nem különülnek el a teljesen érett F csoporttól, addig az impakt keménységtényező és annak változása jobban tükrözi ezen érettségi állapotok közötti különbségeket. Ez esetben is látható az 1-MCP kezelés hatása a görbék lefutásán, továbbá az is látszik, hogy az A és B állapotok esetében bizonyult a leghatékonyabbnak a kezelés. Ugyanakkor, mivel ez a módszer gyakorlatilag csak egy adott pontban jellemzi a terményt, így rendkívül nagy szórással is párosul, valamint a görbék lefutása sokszor nagy ingadozást mutat.

A hűtött tárolás végére a statisztikai elemzés alapján (51. ábra) az A, B és E csoportok esetében volt szignifikáns a kezelés hatása, ellentétben az akusztikus keménységtényező eredményein elvégzett elemzéssel, ahol minden csoportban szignifikáns hatást sikerült kimutatni. Az érettségi állapotok tekintetében ugyanazt az eredményt kaptam, mint az akusztikus keménység esetében: a kontroll csoporton belül nem különültek el az érettségi állapotok, míg a kezelt csoportok esetében a SF-A és SF-B csoport különbözik a SF-C, SF-D és SF-E csoportoktól.

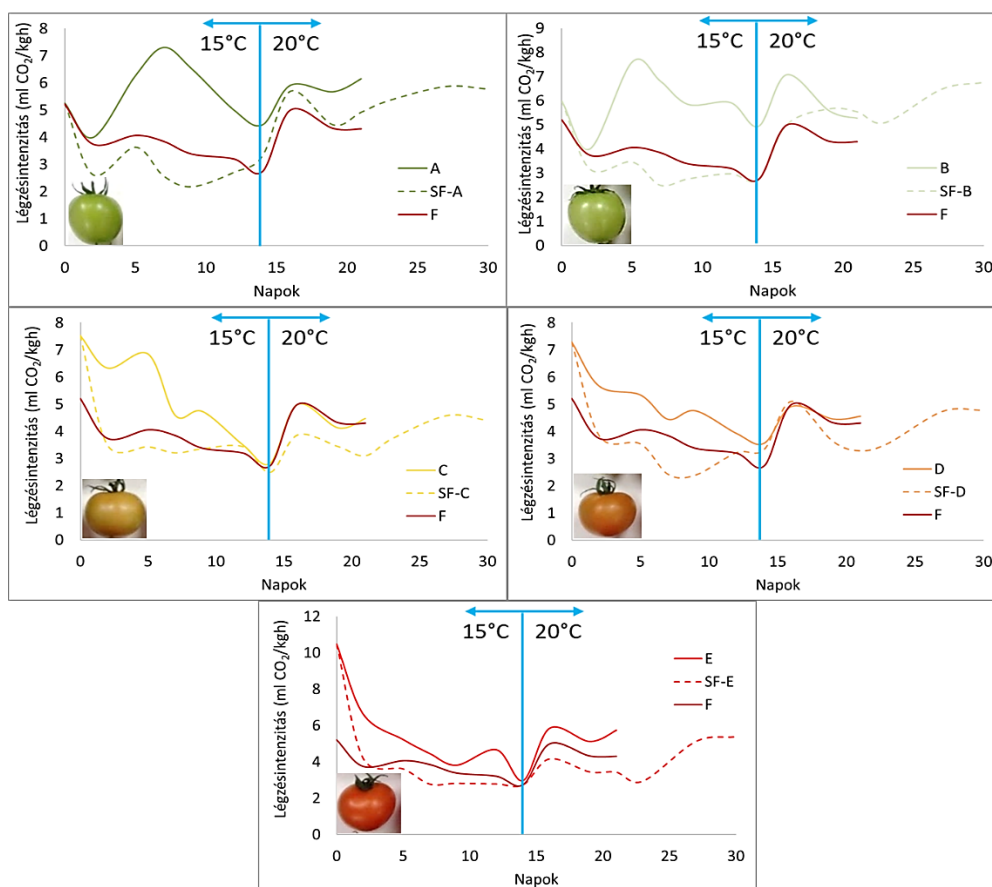


51. ábra: Az Impact keménység eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kétféle ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a hűtve tárolási kísérlet végén (14. nap). A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak az egyes érettségi állapotokon belül, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak a kezeléseken belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.2.1.4 Légzésintenzitás

A légzésintenzitás mérése önmagában is értékes információkkal szolgál a klimaktérikus légzési jeleget mutató kertészeti termények, így a paradicsom érési folyamatairól. E termények esetében az érés kezdetét megelőzően egy légzésminimum figyelhető meg, amelyet gyors emelkedés követ, majd eléri a klimaktérikus csúcsot. Ezzel párhuzamosan az etiléntermelés is fokozódik, bár annak mértéke fajtánként eltérő lehet. A légzésmérés azonban időigényes eljárás: egyetlen mérési ciklus körülbelül egy órát vesz igénybe. A nagy mintaszám és a módszer robusztussága miatt a mérések mintacsoportonként egyben történtek, azaz lehetőség szerint minden csoport összes paradicsomát egyszerre mértem. Ezáltal a mérések ismételhetősége biztosított volt, ugyanakkor statisztikai elemzésre és szórásérték számítására nem nyílt lehetőség.

Ennek ellenére az eredmények jól tükrözték az elvárt érési mintázatot. Az A és B érettségi stádiumokban egyértelműen kirajzolódott a kezeletlen minták klimaktériuma (légzésintenzitás-növekedés) (52. ábra), míg az 1-MCP kezelés ezeknél a stádiumoknál jelentős mértékben csökkentette a légzésintenzitást, és ellaposította a klimaktérikus görbét, gyakorlatilag gátolva az érési csúcs kialakulását. Ez összhangban állt a megfigyelt színeződési elmaradással. A C, D és E érettségi csoportok esetében is érzékelhető volt a kezelés hatása, bár a légzéscsökkenés mértéke kisebb volt. E három csoport esetében a minták már túljutottak a klimaktérikus csúcson, a légzésintenzitásuk folyamatos csökkenést mutatott, felfutó szakasz nélkül.



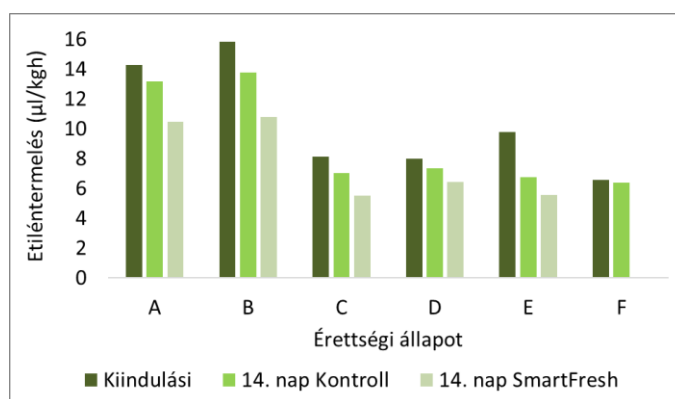
52. ábra: A légzésintenzitás alakulása a II. kísérlet során (Hat érettségi állapot (A, B, C, D, E, F), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-F), kezelt (SF-A – SF-E))

Továbbá, minden csoportnál megfigyelhető volt a légzésintenzitás hirtelen emelkedése a szobahőmérsékletre történő áthelyezést követően, amely megfelel az elvárt fiziológiai reakciónak, hiszen a hőmérséklet növekedésével a sejtszintű anyagcsere-folyamatok is felgyorsulnak. Érdekes megfigyelés, hogy minél erőteljesebb volt a 1-MCP kezelés által kiváltott légzéscsökkenés, annál jelentősebb volt az azt követő visszaugrás mértéke a melegebb tárolási környezet hatására.

Összességében ez esetben is elmondható, hogy a kezelés az A és B csoportok esetében bizonyult a leghatékonyabbnak. Egyrészt mert itt értem el a legnagyobb légzésintenzitásbeli csökkenést a kezeléssel, másrészt mert sikerült a klimaktérikus csúcs kialakulását meggátolni.

5.2.1.5 Etiléntermelés

Az etiléntermelés vizsgálata, hasonlóan a légzésintenzitás méréséhez, időigényes eljárás, ezért ebben az esetben is mintacsoportonként összevont méréseket végeztem. A paradicsom közepes etiléntermelőnek számít, 20 °C-on jellemzően 1–10 $\mu\text{L/kg h}$ értékekkel, amit az általam kapott eredmények is alátámasztanak. A 10 $\mu\text{L/kg h}$ értéket kizárólag az A és B érettségi stádiumú kezeletlen csoportok haladták meg, ami nagy valószínűséggel a klimaktériumhoz köthető etilénképződés felfutásával magyarázható, és összhangban van a légzésintenzitás mérésnél megfigyelt klimaktérikus csúccsal.

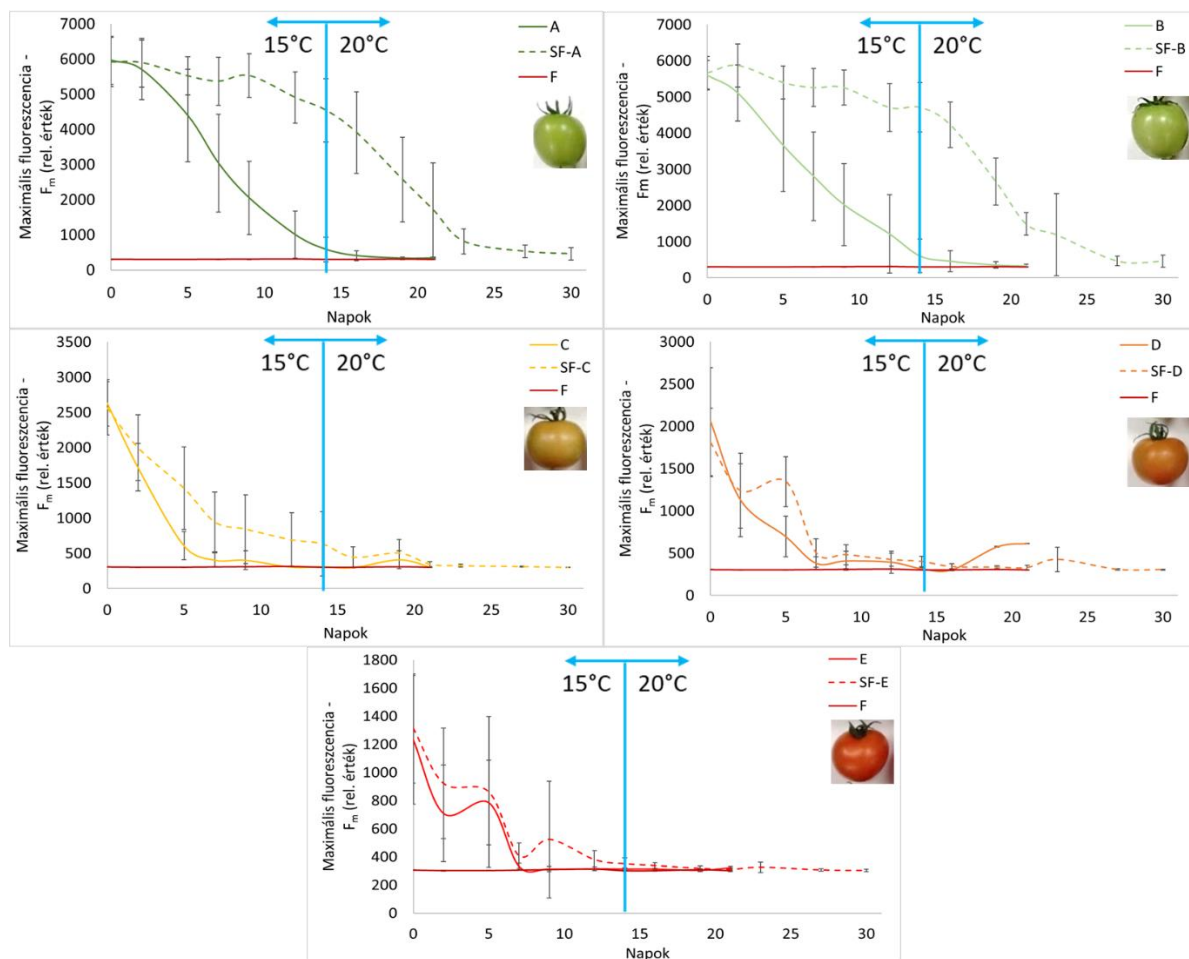


53. ábra: Az etiléntermelés alakulása a 0. és 14. napon a II. kísérlet során

Az 53. ábrán látható, hogy az abszolút kontroll, F csoport kiindulási és 14. napi etiléntermelése a legalacsonyabb és a 2 hét alatt gyakorlatilag nem változik, 6 µL/kg h körül alakul. A többi érettségi csoport esetében csökkenő tendencia figyelhető meg. Minden csoport etiléntermelése lecsökkent a 14 nap alatt, továbbá az is jól látszik, hogy minél előrehaladottabb érettségi stádiumról beszélünk, annál közelebb állnak a kontroll csoportok értékei az F csoport értékeihez. Az 1-MCP kezelés minden érettségi stádiumban mérsékelte az etiléntermelést, azonban a hatás mértéke az A és B csoportban volt a legkifejezettebb, ahol a kezelés gyakorlatilag gátolta a klimaktérium kialakulását. A C, D és E csoportokban is mérhető volt csökkenés, bár kisebb mértékben, míg ezeknél az érettségi állapotoknál a kezelt minták etiléntermelése több esetben az F, azaz a teljesen érett kontrollcsoport értéke alá esett. Az eredmények megerősítik, hogy az 1-MCP kezelés különösen a korai érettségi szakaszokban hatékony az érésgátlásban, feltehetően azért, hogy az 1-MCP kompetitíven kötődik az etilén receptorokhoz, így késlelteti az etilén által kiváltott élettani folyamatokat.

5.2.1.6 Klorofill fluoreszcencia

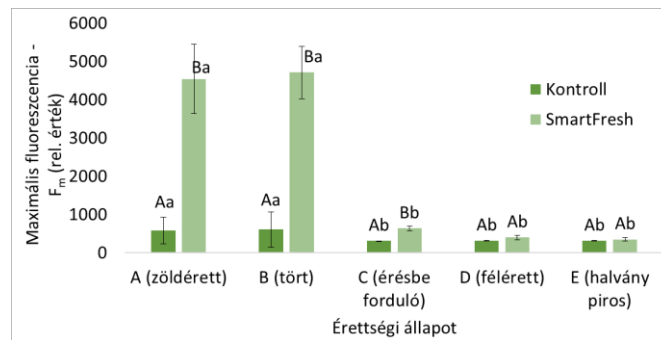
A klorofill fluoreszcenciás mérések lefutása (54. ábra) nagyfokú hasonlóságot mutatott a DA-mérővel nyert eredményekkel. Ez alátámasztja a két módszer párhuzamos alkalmazhatóságát és a mérési eredmények megbízhatóságát. A maximális fluoreszcencia (F_m) értékek a fotoszintetikus apparátus állapotát tükrözik, így a változásuk közvetlen információt nyújt a klorofill lebomlás és a fotoszintetikus aktivitás csökkenésének mértékéről. Az eredmények egyértelműen jelezték, hogy az A és B érettségi stádiumban lévő paradicsomok esetében az 1-MCP kezelés hatására az F_m érték gyakorlatilag változatlan maradt, ami a klorofill lebontás gátlására és a színeződés késleltetésére utal. A C csoportban a kezelés hatása már mérsékeltebb volt, míg a D és E csoportokban az első naptól kezdve nem volt kimutatható különbség a kezelt és a kontroll minták között. Ez arra enged következtetni, hogy a fejlettebb érettségi stádiumban lévő gyümölcsökben a klorofill lebontás folyamata a tárolás megkezdésére már előrehaladott. Így az 1-MCP kezelés ebben a fázisban nem képes érdemi változást elérni.



54. ábra: A klorofill fluoreszcencia (F_m) alakulása a II. kísérlet során (Hat érettségi állapot (A, B, C, D, E, F), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-F), kezelt (SF-A – SF-E))

A szobahőmérsékletre történő áthelyezést (szimulált bolti értékesítés) követően az A és B csoportban a maximális fluoreszcencia (F_m) intenzívebb csökkenést mutatott. Ez az érési folyamatok felgyorsulásával magyarázható, mivel a magasabb hőmérséklet fokozza az anyagcsere-folyamatok sebességét és a pigmentátalakulás ütemét. Az előrehaladottabb érettségi állapotú csoportok (D, E) már a 20 °C-ra helyezést megelőzően elérték az F, abszolút kontrollcsoport értékét, amely körülbelül 300-as F_m szintet jelentett.

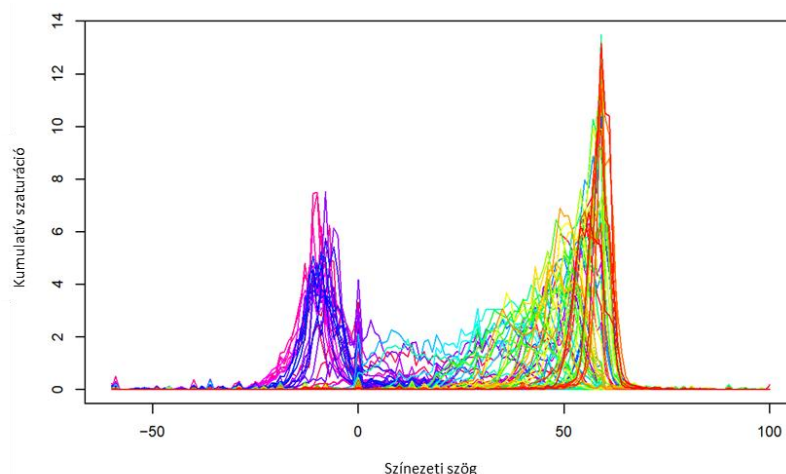
A hűtőtárolás végén elvégzett ANOVA vizsgálat (55. ábra) megerősítette a vizuális megfigyeléseket: a kezelés szignifikáns hatással volt az A, B és C csoportokra, és mind a kezelt, mint a kontroll csoport esetében szignifikánsan elkülönültek egymástól az A, B, valamint a C, D, E érettségi állapotok. Ez az eredmény közel megegyezik a DA-index[®] értékeinél kapott statisztikai mintázattal, ahol a SF-C csoport különbözött az összes többitől. Összességében a klorofillfluoreszcenciás mérés eredményei egyértelműen alátámasztják azt a feltevést, hogy az 1-MCP kezelés a klimaktérium előtt álló paradicsomok esetében a leghatékonyabb, mivel ebben a fejlődési szakaszban képes a fotoszintetikus rendszer működésének és a pigmentle bomlásnak a lelassítására.



55. ábra: A maximális fluoreszcencia (F_m) eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a hűtve tárolási kísérlet végén (14. nap). A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak az egyes érettségi állapotokon belül, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak a kezeléseken belül. Az egyes csoportokat nem-parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.2.2 A Polár Minősítő Rendszer (PQS) alkalmazhatóságának vizsgálata paradicsom érettségi állapotának meghatározására

A PQS alkalmazhatóságát kizárólag a kísérlet első 14 napjának adataival vizsgáltam meg, mivel ebben a 2 hétben azonos volt a tárolási hőmérséklet. A mintákhoz tartozó színárnyalat-spektrumokat az 56. ábra szemlélteti. A spektrumok csúcsai alapján jól látható, hogy a minták túlnyomó része sárgászöld ($\sim 60^\circ$ szögtartomány) és vörös ($\sim 0^\circ$ szögtartomány) színtartományokba esett. A tárolás során mind a csúcsok helye, mind az intenzitásuk változott, ami megfelel az előzetes várakozásoknak.



56. ábra: A kísérletben szereplő összes paradicsomminta színárnyalat spektruma. A különböző színű vonalak különböző mérésekhez tartoznak.

A színváltozást a statisztikai elemzés is alátámasztotta. A kéttényezős varianciaanalízis eredményeit a 24. táblázat tartalmazza. Az ANOVA F-értékei azt mutatták, hogy a normalizált színösszetevők érzékenyebben reagáltak a változásokra, mint az abszolút értékek – különösen a normalizált zöld komponens esetében volt ez szembetűnő. A PQS-X jellemzően a kezelések (pl. érésszabályozás) által kiváltott színváltozásokra volt érzékenyebb, míg a PQS-Y érték elsősorban az időben előrehaladó érési folyamatokkal korrelál.

A főhatások mellett szignifikáns interakciót is találtam a minta csoport és az 1-MCP kezelés között a normalizált vörös és zöld komponenseknél. Emellett az 1-MCP kezelés és a tárolási idő kölcsönhatása is megmutatkozott, többek között a zöld, a normalizált vörös, a normalizált zöld, illetve a PQS Y koordináta esetében.

Ezek az eredmények egyértelműen arra utalnak, hogy a paradicsom felületi színe számottevően változott a vizsgálat során, azonban a különböző érettségi stádiumban lévő csoportok eltérően reagáltak a kezelésre. Emellett az is jól látszott, hogy a kezelt és nem kezelt minták viselkedése a tárolás során eltérő mintázatot mutatott.

24. táblázat: A csoport, az 1-MCP-kezelés és a tárolási idő hatása a színjellemzőkre a kéttényezős ANOVA F-értékei alapján.

Paraméter	Főhatás			Interakció		
	Csoport (C)	Kezelés (K)	Idő (I)	C × K	C × I	K × I
Vörös	3.64 **	0.52	6.39 *	1.59	0.44	0.03
Zöld	20.69 **	25.34 **	14.07 **	1.53	0.13	11.11 **
Kék	4.22 **	2.45	2.07	0.82	0.08	1.28
Norm. vörös	78.26 **	50.22 **	126.78 **	4.87 **	0.87	34.54 **
Norm. zöld	159.66 **	149.83 **	212.68 **	6.97 **	1.43	78.54 **
Norm. kék	6.28 **	0.18	22.17 **	1.42	0.40	1.18
PQS X	1.86	10.18 **	2.49	0.80	0.33	0.11
PQS Y	11.15 **	7.11 *	18.18 **	1.06	0.08	8.70 **

A szignifikáns F-értékeket ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ jelöli.

Az egyes mért paraméterek közötti (Pearson-féle) korrelációs elemzés alapján a zöld és a normalizált zöld értékek között erős és szignifikáns kapcsolat volt kimutatható. A legerősebb korrelációt a normalizált vörös és a normalizált zöld komponensek között találtam ($r = -0,986$; $p < 0,01$), ami egyértelműen mutatja, hogy ezek a változók egymás inverz viselkedését tükrözik. Ezek az értékek szintén szignifikáns kapcsolatot mutattak a PQS Y koordinátával is ($|r| > 0,7$). A PQS koordináták és a referencia színparaméterek közötti összefüggések alapján elmondható, hogy a tömegközéppont elhelyezkedése szintén jól tükrözte a színváltozást (25. táblázat).

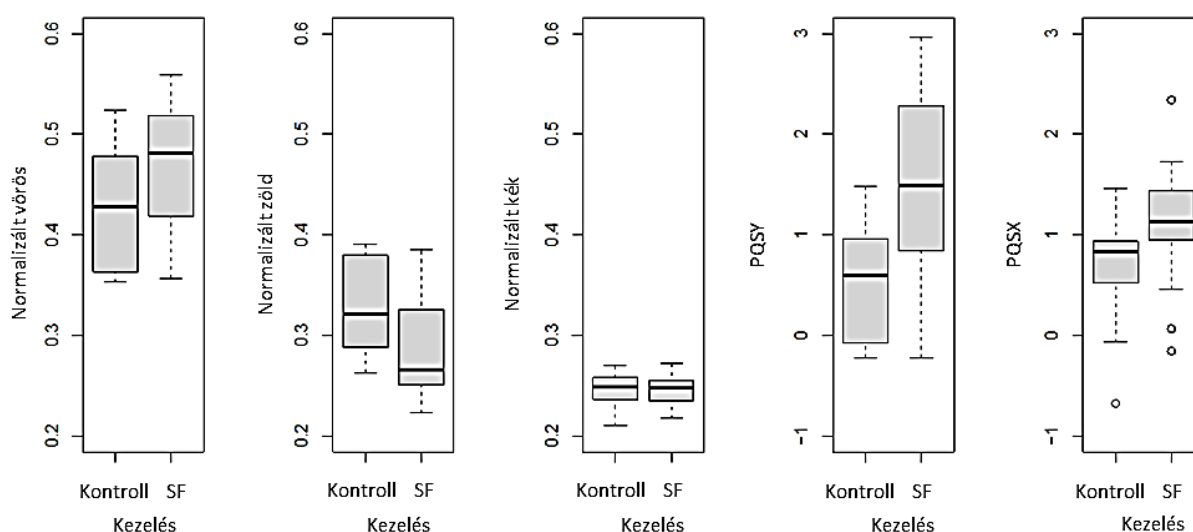
25. táblázat: A mért paraméterek korrelációs mátrixa (Pearson-féle korreláció).

	Zöld	Kék	Norm. V	Norm. Z	Norm. K	PQS X	PQS Y
Vörös	0.124	0.449 **	0.336 **	-0.347 **	0.209	0.147	0.238 *
Zöld		0.883 **	-0.874 **	0.866 **	0.681 **	-0.275 *	-0.643 **
Kék			-0.615 **	0.560 **	0.662 **	-0.118	-0.394 **
Norm. vörös				-0.986 **	0.792 **	0.344 **	0.724 **
Norm. zöld					0.681 **	-0.355 **	-0.746 **
Norm. kék						-0.219	-0.458 **
PQS X							0.192

A szignifikáns F-értékeket ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ jelöli.

A normalizált színkomponensek és a PQS koordináták összevetéséből az is látszott, hogy az 1-MCP kezelés hasonló irányú változásokat idézett elő (57. ábra). A normalizált kék komponens nem mutatott érdemi változást a kezelések hatására. A többi normalizált színparaméter viszont arra utalt, hogy az 1-MCP-vel kezelt paradicsomok zöldőbbek, és kevésbé vörösek maradtak, mint a kezeletlen kontrollminták.

A tömegközéppontok elmozdulása is hasonló tendenciát mutatott: a kezelt és kezeletlen minták színegyensúlyi helyzete eltért egymástól, és ez az eltérés a tárolás ideje alatt fokozódott. Egyes színparaméterek esetében megfigyelt nagyobb szórás elsősorban a mintaérési csoport és a tárolási idő szignifikáns hatásának tudható be.



57. ábra: Az 1-MCP kezelés hatása a normalizált színparaméterekre és PQS koordinátákra

Számos korábbi kutatás igazolta már a kolorimetriás mérések alkalmasságát a paradicsom érési folyamatának nyomon követésére (Horváth-Mezőfi et al., 2022; López Camelo and Gómez, 2004). Ennek a vizsgálatnak az egyik célja az volt, hogy megítéljem, mennyire alkalmazható a digitális képfeldolgozásnak ez a típusa a paradicsom utóérésének monitorozására. Ennek érdekében korrelációs vizsgálat során összevettem a színmérővel (a^*), a DA-meterrel (DA-index), az akusztikus keménységmérővel (S), valamint a képfeldolgozással nyert paraméterek (normalizált vörös, normalizált zöld, PQS koordináták) adatait.

A természetes biológiai folyamatok gyakran telítési görbével írhatók le. A DA-index® esetében, amely szoros összefüggésben áll a klorofilltartalommal, egy aszimptotikus görbét figyeltem meg: ahogyan az érés előrehaladtával a klorofilltartalom csökken, úgy a DA-index® értéke is csökken. Mivel azonban a klorofilltartalom sem csökkenhet nullánál kisebb értékre, a DA-index® sem lehet negatív. Így az érés előrehaladtával ezek az értékek a nullához konvergálnak.

A DA-index® nemlineáris viselkedése miatt logaritmikus transzformációt alkalmaztam a színparaméterekkel való összefüggésének bemutatásához. A referenciaértékek, vagyis a DA-index® és az akusztikus keménység viszonyát az M3 melléklet szemlélteti.

A korrelációs vizsgálat eredményei (26. táblázat) azt mutatták, hogy minden vizsgált paraméter esetében szignifikáns összefüggés volt kimutatható ($p < 0,01$). Bár a PQS-X és más paraméterek közötti korreláció nem volt kiemelkedően erős, a PQS-Y és a többi paraméter között – különösen az a^* színparaméterrel – nagyon erős kapcsolatot találtam ($r = 0,958$; $p < 0,01$). A normalizált színparaméterek, valamint az a^* érték szintén szoros korrelációt mutattak más vizsgált változókkal. Az akusztikus keménységtényező (S) esetében a legerősebb kapcsolat a PQS-Y paraméterrel volt ($r = -0,805$), míg a többi paraméterrel már gyengébb összefüggést mutatott.

A referenciaértékek (DA-index® és keménység) közötti kapcsolatot meghaladó korrelációs értékek azt jelzik, hogy a gépi látás alapú színanalízis valóban ígéretes lehetőséget kínál az utóérés monitorozására, és potenciálisan alternatívát vagy kiegészítő módszert kínálhat a hagyományos mérésekkel szemben.

26. táblázat: A mért paraméterek korrelációs mátrixa (Spearman-féle korreláció).

	DA-Index	CIE Lab, a^*	Norm. vörös	Norm. zöld	PQS X	PQS Y
S (akuszt. kem.)	0.762	-0.782	-0.783	0.787	-0.555	-0.805
DA-index		-0.967	-0.911	0.929	-0.640	-0.904
CIE Lab, a^*			0.935	-0.962	0.692	0.958
Norm. vörös				-0.969	0.644	0.911
Norm. zöld					-0.693	-0.948
PQS X						0.706

5.2.3 A II. kísérlet eredményeinek összegzése

A CIE a^* érték alapján megállapítható, hogy az 1-MCP éréslassító kezelés a zöldérett (A) és tört színű (B) stádiumban lévő paradicsomok esetében volt a leghatékonyabb. Ennek háttérében az áll, hogy ezeknél a mintáknál az etiléntermelés még nem érte el a klimaktérikus csúcsot, amely az érési folyamat fő kiváltója, gyorsítva a színváltozást és a szövetek puhulását (Schouten et al., 2007). A klimaktérikus csúcsához közelítve az etiléntermelés exponenciálisan növekszik, és ennek megfelelően az érés üteme is felgyorsul (Lelièvre et al., 1997). Azoknál a paradicsomoknál, amelyeket még a klimaktérikus csúcs előtt kezelnek, a légzésintenzitás nem emelkedik olyan mértékben, ezáltal az érés üteme is lassul (Génard and Gouble, 2005). A kezelés a későbbi érettségi stádiumban lévő minták esetében is kifejtette hatását, bár kisebb mértékben, és leginkább az első egy hét tárolás után vált szignifikánssá. Összességében elmondható, hogy az 1-MCP kezelés minden érettségi csoport esetében hatékonynak bizonyult, bár eltérő mértékben.

A tárolás hetedik napjától kezdődően minden esetben szignifikáns különbség volt megfigyelhető a kontroll- és az 1-MCP kezelt mintacsoportok között. Ez alapján megállapítható, hogy a kezelés alkalmazása különösen akkor előnyös, ha a tárolási idő meghaladja a hét napot. Ennek jelentősége kiemelendő, mivel korábbi kutatások szerint a paradicsom jellemzően a hetedik tárolási nap környékén kezd romlani, illetve válik a fogyasztók számára kedvezőtlennek (Gormley and Egan, 1978; Raffo et al., 2018). A kísérlet során készített fényképes dokumentációt az M4. melléklet tartalmazza.

Számos korábbi tanulmány támasztja alá a kolorimetria alkalmasságát a paradicsom érésének nyomon követésére (Horváth-Mezőfi et al., 2022; López Camelo and Gómez, 2004). A képfeldolgozós vizsgálatok alapján a PQS módszer alkalmasnak bizonyult a paradicsom érettségi állapotának objektív meghatározására, mivel az érési fokot legjobban tükröző vörös–zöld színparaméter (a^*) szoros összefüggést mutatott mind a normalizált színparaméterekkel, mind pedig a PQS koordinátákkal. Ez a kapcsolat módszertani szempontból jelentős előrelépést jelent, hiszen lehetőséget teremt arra, hogy a paradicsom – vagy akár más klimaktérikus gyümölcsök – érettségi állapota a jövőben egyszerű kamerás, vagy alacsony költségű képfeldolgozó eszközök segítségével is pontosan meghatározható legyen, színmérő készülék nélkül. A digitális képfeldolgozással nyert színparaméterek és a reflektancia-mérésen alapuló a^* , valamint DA-index® értékek közötti kapcsolat lineáris regresszióval vagy természetes folyamatokra jellemző telítődési görbékkel írható le. Eredményeim arra utalnak, hogy a színmérésen alapuló vörös–zöld színparaméter (a^*) és a DA-index® megbízhatóan becsülhető a képfeldolgozás során meghatározott színjellemzőkből. Mindezek alapján a digitális képelemzés gyors és költséghatékony módszerként alkalmazható a paradicsom érésének nyomon követésére és objektív értékelésére.

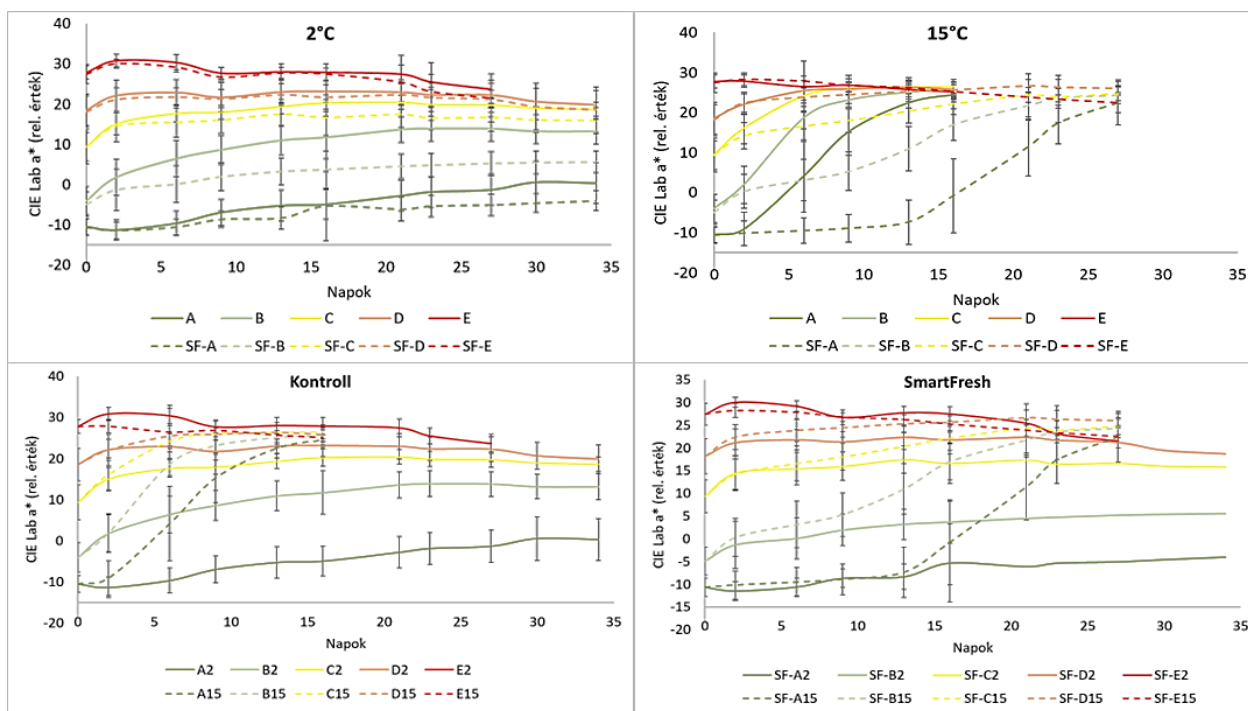
5.3 III. kísérlet (Hidegkárosodás vizsgálata)

A III. kísérlet célja annak vizsgálata volt, hogy a különböző érettségi állapotú paradicsomok miként reagálnak az 1-MCP alapú érésgátló kezelésre 15 °C-on, illetve 2 °C-on történő tárolás során. Emellett arra is kerestem a választ, hogy a paradicsom – mint hidegérzékeny termés – hogyan viseli a 2 °C-os tárolást, és ezek a hidegkárosodásra utaló reakciók kimutathatók-e különböző mérésekkel, különös figyelmet fordítva a klorofill-fluoreszcenciás módszerre. A kísérletben öt eltérő érettségi állapotú csoportot vizsgáltam, amelyeket a szokásos protokoll szerint 625 ppb koncentrációjú 1-MCP-vel kezeltem, majd 2 °C-on és 15 °C-on tároltam.

5.3.1 Szín

A színmérés esetében ennél a kísérletnél is csak az a^* értékeket fogom közölni, mivel a többi eredmény nem szolgáltat releváns információval. Az 58. ábra hőmérsékletek szerinti csoportosítását

tekintve (felső két diagram) jól látható, hogy 2 °C-on az 1-MCP kezelés nem eredményezett jelentős előnyt: bár a B és C érettségi csoportban szignifikáns különbség mutatkozott a kezelt és kontroll minták között (59. ábra), a hatás mértéke mérsékelt maradt. Ez feltehetően azzal magyarázható, hogy a hideg önmagában is lassítja az anyagcsere-folyamatokat, gátolva a klorofill lebomlását és a likopin bioszintézisét, így az 1-MCP kiegészítő érésgátló hatása kevésbé érvényesült. Ezzel szemben a 15 °C-on tárolt minták esetében a kezelések közötti különbség sokkal kifejezettebb volt, és a 16. napi eredmények alapján az A, B és C érettségi stádiumban szignifikánsnak bizonyult.

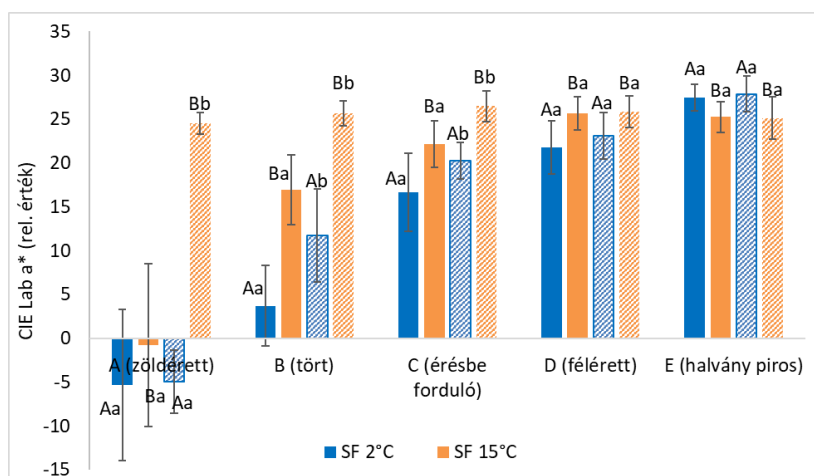


58. ábra: Az a^* értékek alakulása a III. kísérlet során hőmérséklet szerinti csoportosításban (felül), illetve kezelés szerinti csoportosításban (alul) (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-E), kezelt (SF-x), két hőfok: 2°C (x2), 15°C (x15))

Az 58. ábra kezelésekre szerinti bontásában (alsó két diagram) látható, hogy a kontroll minták esetében a 2 °C-os tárolás jelentős előnnyel járt, mivel a 15 °C-on tárolt minták a 16. npra teljesen bepirosodtak, míg a 2 °C-on tároltak színe gyakorlatilag alig változott a 34 napos tárolás végéig. A 16. napi statisztikai elemzés minden érettségi csoportban szignifikáns különbséget mutatott a két hőmérsékleti szint között. Az 1-MCP kezelt minták esetében a tárolás első két hetében a különbség nem volt ennyire éles, azonban a 16. npra itt is minden csoportban szignifikánssá vált.

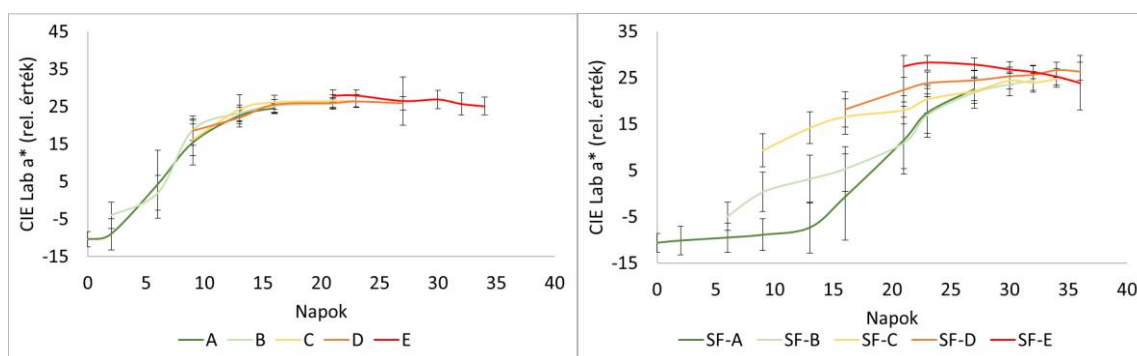
A 15 °C-on tárolt minták viselkedése jól összevethető a II. kísérletben tapasztaltakkal, és arra enged következtetni, hogy ha ott a 14. napon nem helyeztem 20 °C-ra a mintákat, az A és B csoport érése nagy valószínűséggel magától is 1–2 napon belül megindult volna. A jelen kísérletben ugyanis az 1-MCP kezelt A és B csoport 15 °C-on a 13. nap után kezdett intenzívebben színeződni.

Összességében a színmérési eredményei megerősítik, hogy a hideg lassítja ugyan az érési folyamatokat, de a hatás hosszú távon a hidegkárosodás kockázatával járhat, míg mérsékelt hőmérsékleten az érésgátló kezelés időben korlátozott, viszont hatékony eszköz a színeződés késleltetésére, különösen a klimaktérium előtti stádiumban.



59. ábra: A CIELab a* eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kétfélemezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet 16. napján. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a hőmérsékletek összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapotban és kezelésein belül, míg a kisbetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapotban és hőmérsékleten belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

A II. és III. kísérlet 15 °C-on végbemenő színeződési adatait vizsgálva azt tapasztaltam, hogy az érési folyamat lefutása rendkívül hasonló mintázatot mutatott, ami arra utal, hogy egy matematikai modell felállításával előre jelezhető lenne a színeződés dinamikája az érés során. A modell illesztését megelőzően ellenőriztem, hogy az egyes érettségi állapotú paradicsomcsoportok görbéi valóban azonos alakú lefutást követnek-e. Ennek érdekében az adatokat időben eltolva ábrázoltam. Így láthatóvá vált, hogy a kontrollminták esetében a görbék jól fedik egymást, míg a SmartFresh™ (1-MCP) kezelt mintáknál a lefutás üteme eltérő volt (60. ábra). Ez megerősítette a feltételezést, miszerint a kezelés hatékonysága érettségi stádiumonként változik, hiszen az eltérő hatás eltérő lefutást eredményez.



60. ábra: A 15°C-on tárolt kontroll csoportok (balra) és a SmartFresh™ (1-MCP) kezelt csoportok (jobbra) színeződésének lefutása időben eltolva a III. kísérlet során (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E))

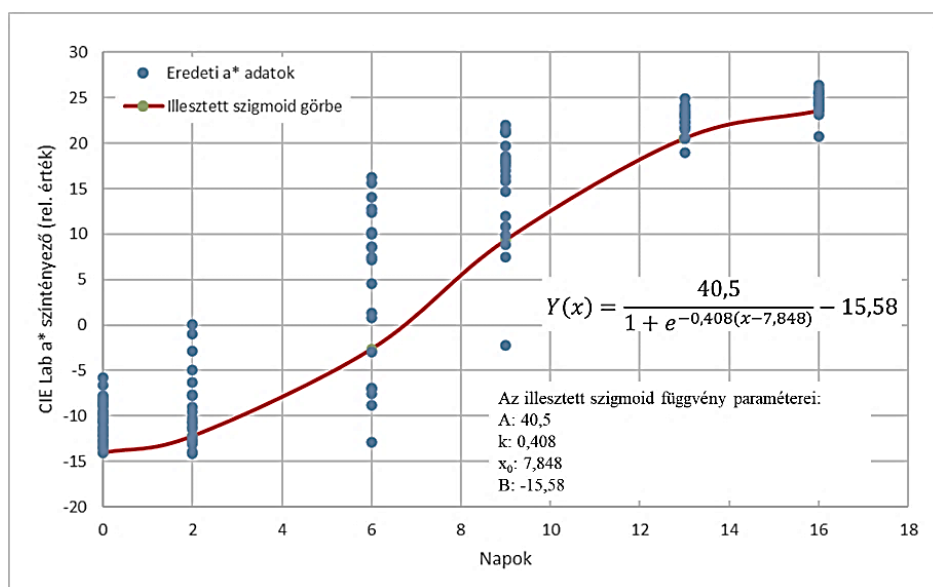
Az időbeli eltolást követően tehát megbizonyosodtam róla, hogy a paradicsom színeződése valóban egy nagyjából azonos lefutást követ 15°C-on, és a lefutás alakja alapján a szigmoid görbére esett a választásom, melynek általános egyenlete alább látható [8].

$$Y(x) = \frac{A}{1 + e^{-k(x-x_0)}} + B \quad [8]$$

Ahol:

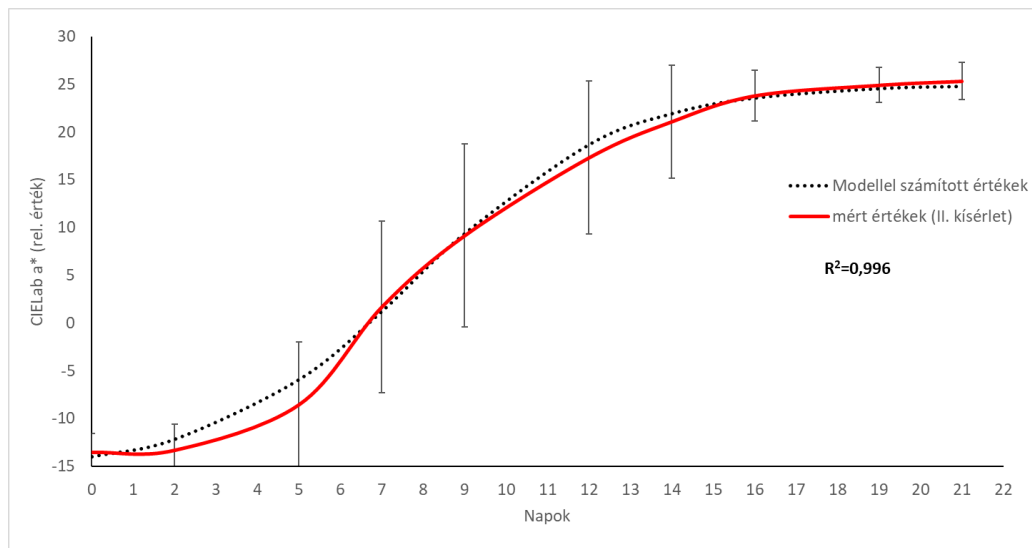
$Y(x)$: a becsült kimeneti érték az x bemeneti értékre
 A : a görbe maximális amplitúdója vagy felső aszimptotája
 k : a görbe meredeksége az inflexiós pontban.
 x_0 : az x értéke az inflexiós pontnál
 B : az alsó aszimptóta vagy az alsó plató

Mindezek alapján elvégeztem a modell illesztést, melyet a 61. ábra szemléltet.



61. ábra: A 15°C-on tárolt kontroll minták a^* eredményeire illesztett szigmoid görbe

A modell validációja kulcsfontosságú lépés annak érdekében, hogy megbizonyosodjunk a felállított matematikai leírás megbízhatóságáról és általánosíthatóságáról. Egy jól illeszkedő modell önmagában még nem garantálja, hogy más körülmények vagy eltérő adatforrások esetében is megfelelő előrejelzést nyújt. A validáció során a modellt független, a modellépítés során fel nem használt adatokkal teszteljük, így objektív képet kaphatunk annak prediktív képességéről. Jelen munkában a 15 °C-on végzett színeződési modell érvényességét a II. kísérletből származó, különálló mérési adatsor felhasználásával vizsgáltam (62. ábra). A két adatsor összevetésével ellenőriztem, hogy a modell képes-e a másik kísérletben tapasztalt színváltozási lefutást is megfelelő pontossággal leírni és a modell illeszkedése rendkívül jónak bizonyult, az R^2 értéke 0,996. Ez a megközelítés biztosítja, hogy a modell nem csupán az adott kísérlet sajátosságaira optimalizált, hanem szélesebb körben is alkalmazható az érésmenet előrejelzésére.



62. ábra: A 15°C-on tárolt kontroll minták a^* eredményeire illesztett szigmoid modell validációja

Az általam kapott szigmoid görbe rendkívül hasznosnak bizonyul a paradicsom érési folyamatának modellezésében, és számos későbbi felhasználási lehetőséget rejt magában. Ez a modell lehetővé teszi, hogy precízen számszerűsítsuk, összehasonlítsuk és előrejelezzük az érési fázisokat. Ez értékes adatokkal szolgál mind a kutatás, mind a gyakorlati alkalmazások számára. A szigmoid görbe segítségével előre lehet jelezni, hogy egy adott időpontban (napban) milyen a^* szintényező érték várható. Ez kritikus fontosságú a termésbecslés és a betakarítás tervezése szempontjából. A görbe paraméterei emellett lehetővé teszik a kulcsfontosságú érési fázisok objektív azonosítását:

- Kezdeti fázis (alsó plató): A B paraméter az a^* érték, amikor még nincs jelentős színváltozás. Ez a fázis a színfejlődés előtti állapotot jellemzi.
- Gyors színváltozási fázis: Az x_0 paraméter az inflexiós pontot jelöli, ahol a színváltozás a leggyorsabb ütemben történik. A k paraméter a meredekséget mutatja ebben a fázisban, jelezve a színeképződés intenzitását. Ez a szakasz a színfejlődés szempontjából kulcsfontosságú.
- Teljes érettség fázisa (felső plató): Az A+B érték a teljesen érett paradicsom a^* szintényezőjét jelzi, amikor a színváltozás már lelassult vagy megállt. Ez a fázis a maximális színfejlődés állapotát reprezentálja.

A modell gyakorlati alkalmazhatósága kiemelkedő: pontosan számszerűsíti és előrejelzi a színeződés ütemét, így támogatja a betakarítás optimális időzítését, a minőségmegőrzést és a logisztikai tervezést. A paraméterek összehasonlítása alkalmas a különböző fajták, termesztési körülmények vagy kezelési módok (pl. hőmérséklet, érégátlás) hatásának értékelésére. A szigmoid görbe adaptív jelleggel beépíthető automatizált látórendszerekbe vagy mobilalkalmazásokba, amelyek valós időben becsülhetik meg az érettségi fokot. Ez lehetőséget

teremt nemcsak kutatási célokra, hanem ipari és kereskedelmi felhasználásra is, például a piaci kínálat időzítésének optimalizálására.

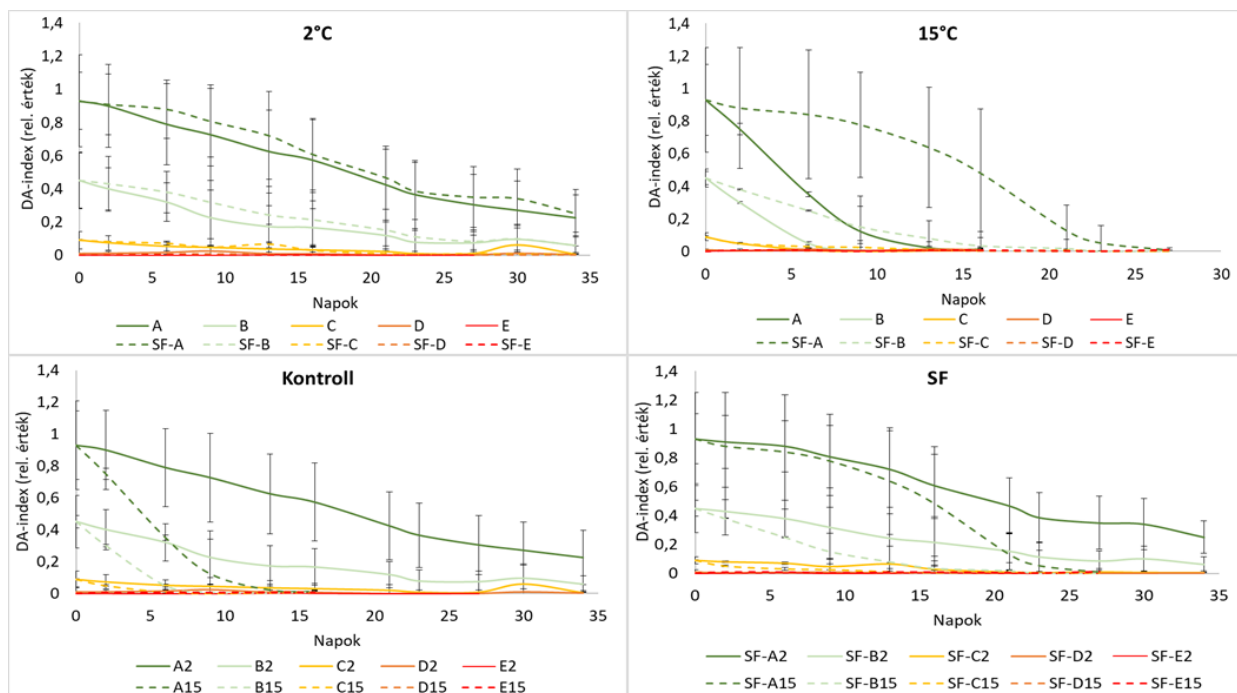
A modell illesztésének pontossága nagymértékben függ a mérési gyakoriságtól és a mintaszám nagyságától, ezért a jövőbeli fejlesztések során e tényezők optimalizálása tovább növelheti az előrejelzés megbízhatóságát. A görbe meredekségi paraméterének (k) biológiai értelmezése – például a pigmentképződés sebességével vagy az éréshez kapcsolódó enzimatis aktivitással való összefüggése – pedig mélyebb betekintést nyújthat az érési kinetika alapfolyamataiba. Így a kifejlesztett modell nemcsak egy hatékony előrejelző eszköz, hanem a paradicsom érési mechanizmusainak jobb megértését is elősegíti.

5.3.2 DA-index

A DA-index® értékeinél hasonló mintázat figyelhető meg (63. ábra), mint a színmérés esetében, azzal a különbséggel, hogy az alacsony hőmérsékleten, 2 °C-on tárolt paradicsomminták esetében a DA-index® értékei folyamatos csökkenést mutattak, miközben a színmérésből származó a^* értékek gyakorlatilag stagnáltak. Ez arra utal, hogy a klorofilltartalom mérhetően csökkent, azonban a piros szín kialakulásáért felelős karotinoidok (elsősorban a likopin) szintézise ebben a hőmérsékleti tartományban erősen gátolt vagy lelassult. A DA-index® mérése a klorofill abszorbanciáján alapul, ezért a pigmentle bomlás korai jeleit is képes detektálni, míg a CIE a^* paraméter változása csak a karotinoid-felhalmozódás megindulásával jelenik meg. Szakirodalmi adatok szerint hidegérzékeny terményeknél – így a paradicsomnál is – az alacsony hőmérséklet megzavarhatja a normál érési folyamatokat: a klorofilldegradáció bizonyos mértékben folytatódhat, de a karotinoidszintézis enzimatis folyamatai (például a fitoén- és likopin-szintáz aktivitása) jelentősen visszaesnek (Sharom et al., 1994; Yadeghari et al., 2008). Ennek következtében a DA-index® és az a^* értékek eltérő dinamikát mutathatnak, ami különösen jól megfigyelhető a 2 °C-on tárolt minták esetében.

Ennél a mérésnél is megfigyelhető, hogy 2 °C-os tárolás mellett nincs szignifikáns hatása az érésgátló kezelésnek, míg a 15 °C-on tárolt minták esetében az A és B csoportnál látható volt a különbség a kontroll és az 1-MCP kezelt csoportok között, ám a 16. napra ez a különbség már csak az A csoport esetében maradt szignifikáns.

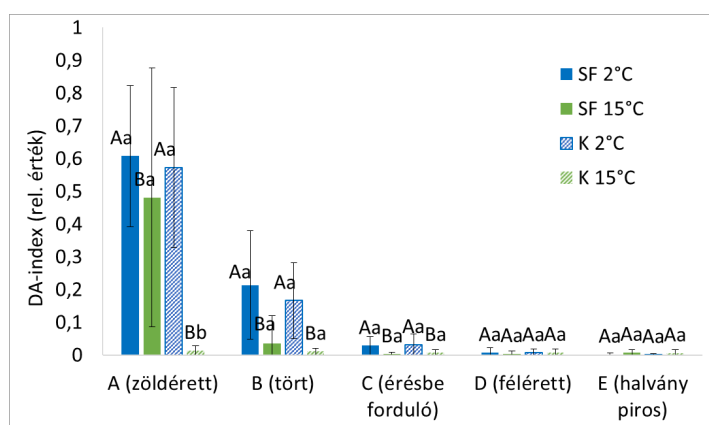
A kezelések szerinti csoportosítást nézve az látható, hogy a kontroll csoport esetében a 2 °C-os tárolás jelentős előnnyel járt az A és B csoport esetében, és a görbe lefutásában, a csökkenést leszámítva nem mutatkoztak egyéb más változások, amelyek hidegkárosodásra utalnának.



63. ábra: A DA-index® alakulása a III. kísérlet során hőmérséklet szerinti csoportosításban (felül), illetve kezelés szerinti csoportosításban (alul) (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-E), kezelt (SF-x), két hőfok: 2°C (x2), 15°C (x15))

Az 1-MCP kezelt csoportnál szintén jobb eredményeket mutatott a 2 °C-os tárolás az A és B csoportban, és itt sem volt egyéb, kifejezettebb jel. A hidegkárosodásra egyedül abból következtethetünk, hogy a DA-index® értékek nem voltak összhangban a színmérési eredményeivel, ahogy ez például a 15°C tárolás esetében megfigyelhető, tehát pigmentációs problémára lehet következtetni.

A 16. napi eredményekre elvégzett statisztikai elemzés a 64. ábrán látható. Ezen eredmények alapján elmondható, hogy a hőmérséklet hatása az A, B és C csoport esetében mindkét kezelés esetében szignifikáns volt, a kezelés hatása pedig csak az A érettségi állapot 15°C-on tárolt mintái esetében volt szignifikáns.



64. ábra: A DA-index® adatok statisztikai elemzésének eredményei (kéttenyezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet 16. napján. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a hőmérsékletek összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és kezelésen belül, míg a kisbetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és hőmérsékleten belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

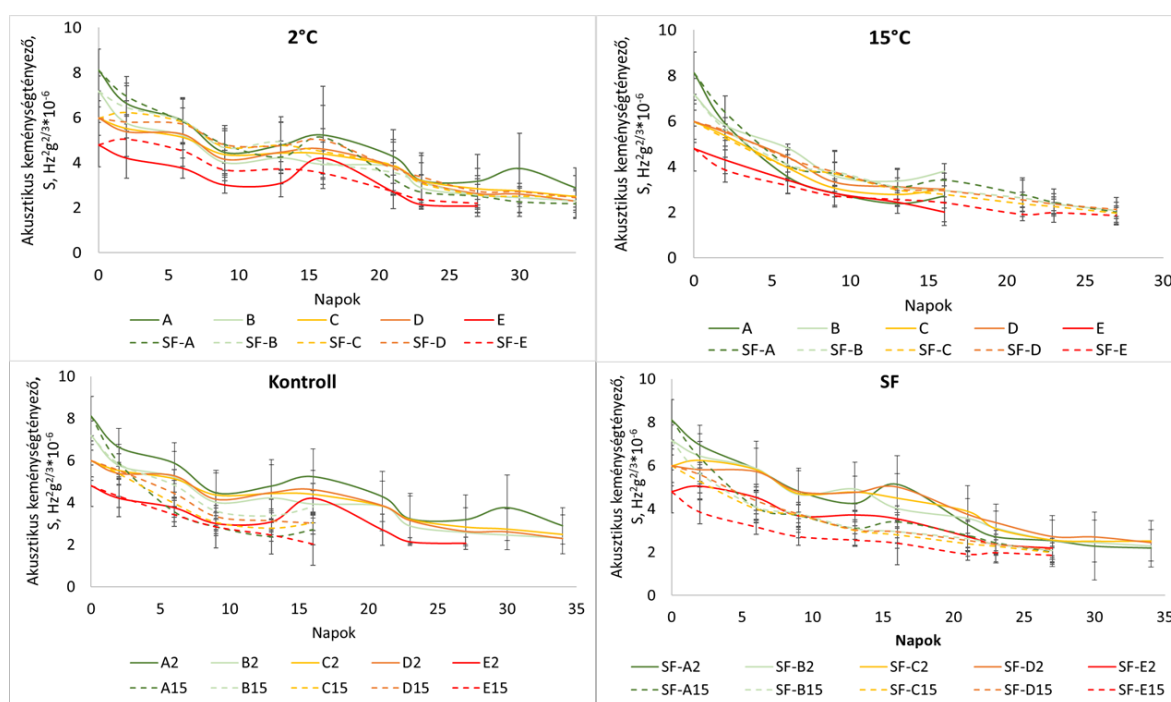
5.3.3 Akusztikus és impakt keménység

Az akusztikus keménységmérés eredményeit a 66. ábra szemlélteti. A felső diagramokon jól látszik, hogy a kezelés nem volt jelentős hatással egyik hőmérsékleten sem, amit a statisztikai elemzés eredménye is alátámaszt (67. ábra). Ez ellentétben áll a II. kísérletben megfigyeltékkel, ahol a 15°C-os tárolás során megmutatkozott az 1-MCP kezelés eredménye az akusztikus keménységtényezőben, ugyanakkor ez a különbség nem volt látványos, de szignifikáns volt. Ugyanakkor a 2°C-os görbék lefutásában a 16. napon megfigyelhető egy kiugrás, mely a 15°C-os görbéknél nem



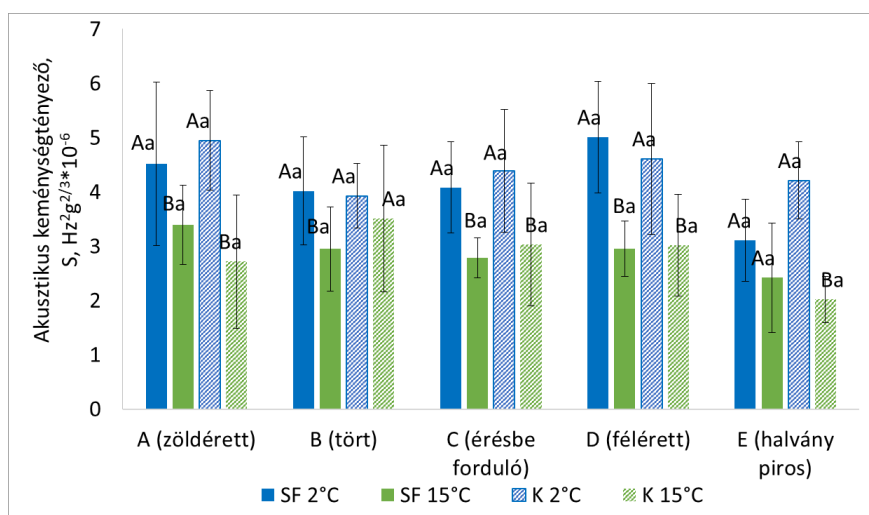
65. ábra: A 2°C-on tárolt paradicsomok felületén a 16. napon megjelenő apró besüppedt foltok

olyan kifejezett. A jelenségre nem találtam tudományos magyarázatot a szakirodalomban, így erre további vizsgálatok szükségesek, ugyanakkor feltehetően valamilyen hidegkárosodáshoz köthető folyamat okozhatja, ugyanis a 16. napon jelentek meg először a 2°C-on tárolt paradicsomok felületén a 65. ábrán látható apró kis foltok.



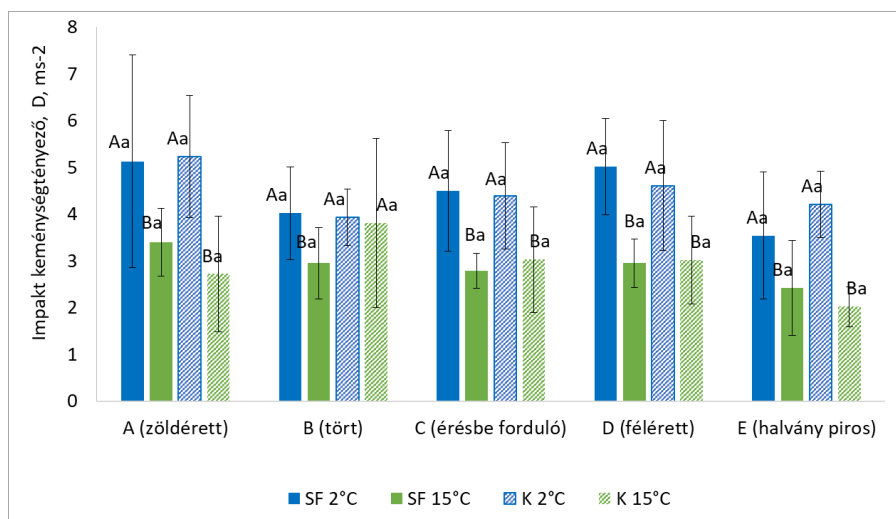
66. ábra: Az akusztikus keménységtényező (S) alakulása a III. kísérlet során hőmérséklet szerinti csoportosításban (felül), illetve kezelés szerinti csoportosításban (alul) (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (A-E), kezelt (SF-x), két hőfok: 2°C (x2), 15°C (x15))

A 16. napi statisztikai elemzés alapján tehát a kezelés sehol nem volt szignifikáns hatással, míg a hőmérséklet hatása minden esetben szignifikáns volt, kivéve B kontroll csoportját, valamint az E SF csoportját.



67. ábra: Az akusztikus keménység eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttenyezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet 16. napján. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a hőmérsékletek összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és kezelésen belül, míg a kisbetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és hőmérsékleten belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

Az impakt keménység értékek lefutása a kísérlet során nem mutatott jelentős eltérést az akusztikus keménység értékek lefutásától, így ezek közlésétől a dolgozatban eltekintek. A 16. napi eredményekre elvégzett statisztikai elemzést a 68. ábra szemlélteti. Ezen esetben is látszik, hogy a hőmérséklet minden csoport esetében szignifikáns hatással volt, kivéve az E kontroll csoportját, míg a kezelés sehol nem volt szignifikáns hatással.

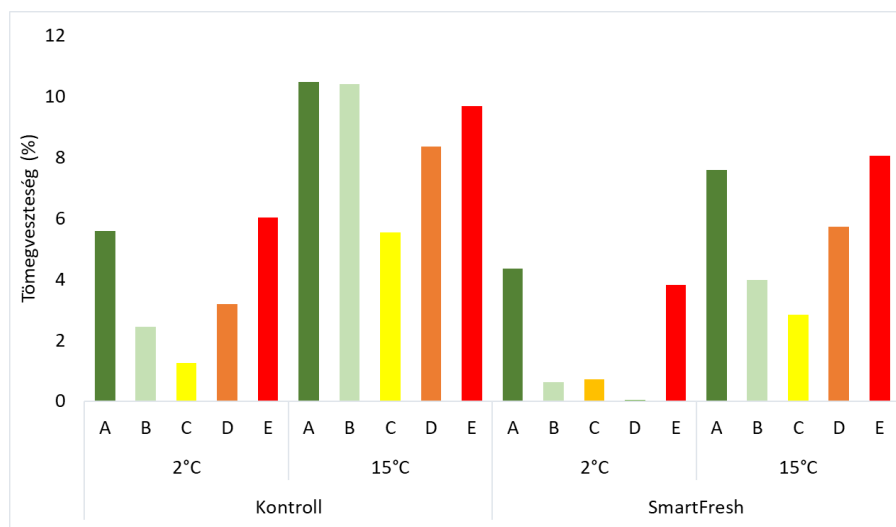


68. ábra: Az impakt keménység eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttenyezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet 16. napján. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a hőmérsékletek összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és kezelésen belül, míg a kisbetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és hőmérsékleten belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.3.4 Tömegveszteség

A %-os tömegveszteség értékeket tekintve (69. ábra) az látható, hogy a legalacsonyabb értékekkel a 2 °C-on tárolt 1-MCP kezelt minták rendelkeznek, ezt követik a 2 °C-os kontroll minták, majd a 15 °C-on tárolt 1-MCP kezelt minták, míg jelentős különbséggel a legmagasabb értékek a 15 °C-os kontroll minták esetében figyelhetők meg, ami megfelel az elvártnak. Összességében tehát elmondható, hogy a 2 °C-on történő tárolás ezen adatok alapján jobban lelassítja az anyagcsere-folyamatokat, mint az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés. Ez összhangban áll a jól ismert élettani jelenséggel, hogy az alacsonyabb hőmérséklet csökkenti a respiráció és a transzspiráció sebességét, ezáltal mérsékelve a vízvesztésüket.

Mindemellett fontos megjegyezni, hogy a hőmérséklet- és kezelés-hatás között interakció is megfigyelhető: bár az 1-MCP kezelés önmagában nem csökkentette olyan mértékben a tömegvesztést, mint a hőmérséklet-csökkentés, a két tényező együttesen adta a legalacsonyabb veszteségi értékeket. Az 1-MCP kezelés hatása elsősorban az érési folyamatok lassításán keresztül érvényesül, míg az alacsony hőmérséklet a vízvesztés fizikai folyamatait is jelentősen mérsékli. A tömegvesztés mérséklése kulcsfontosságú a piaci minőség és az eltarthatóság szempontjából, így a két módszer kombinációja ígéretes stratégiát jelenthetne a frissparadicsom-ellátási láncban.

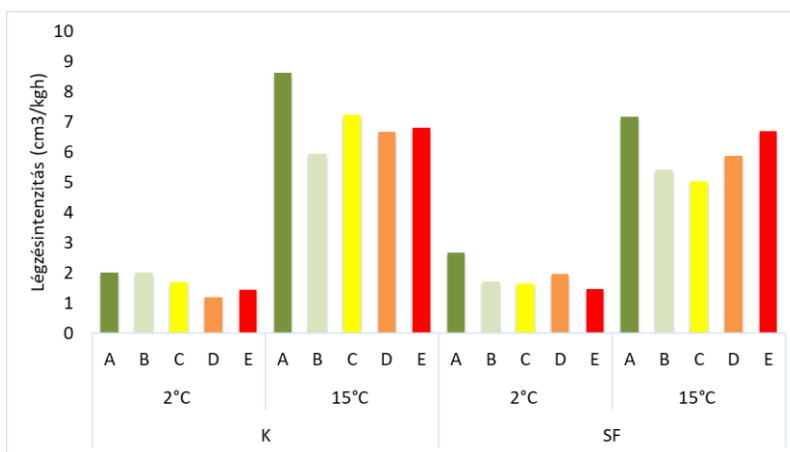


69. ábra: A tömegvesztés alakulása a tárolás 16. napján (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E))

5.3.5 Légzésintenzitás

A 70. ábra 16. napi adatai alapján jól kirajzolódik, hogy a légzésintenzitás tekintetében a legmagasabb értékeket a 15 °C-on tárolt kontroll minták mutatták, amelyeket a 15 °C-on

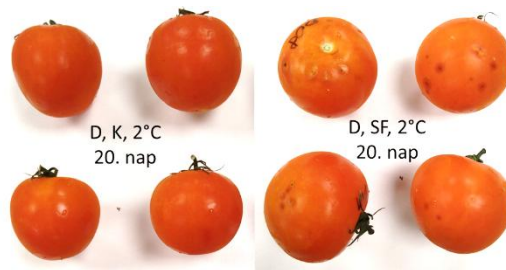
1-MCP-vel kezelt minták következtek. Ezzel szemben a 2 °C-on tárolt minták esetében a kezelt és a kezeletlen csoportok között csupán minimális különbség volt tapasztalható, ami arra utal, hogy ezen az alacsony hőmérsékleten a kezelés és a hőmérséklet hatása a légzésintenzitás



70. ábra: A légzésintenzitás alakulása a tárolás 16. napján (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E))

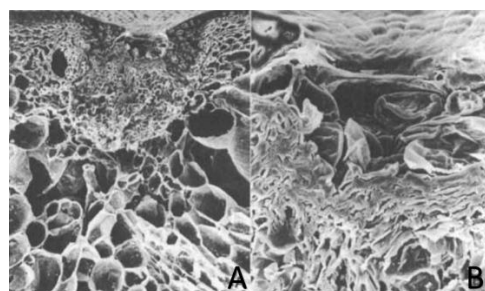
csökkentésében nem adódik össze. Ez a jelenség a görbék lefutásán (74. ábra) is jól megfigyelhető.

Érdekes ugyanakkor, hogy a 2 °C-on tárolt SmartFresh™ kezelt csoportokban – különösen a B, C, D és E érettségi fokozatok esetében – a 20. nap környékén egy átmeneti légzésintenzitás-kiugrás jelent meg, amely a 15 °C-on tárolt mintákban nem volt megfigyelhető.



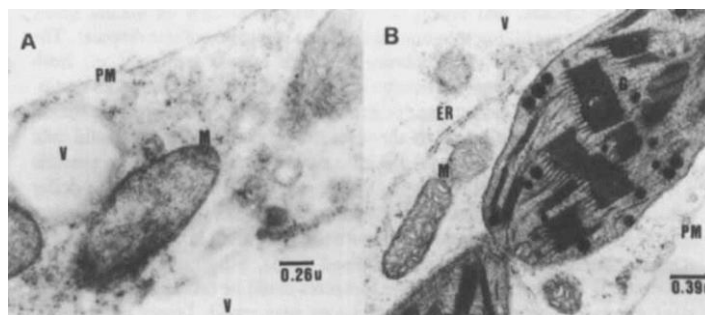
71. ábra: A hidegkár megjelenése a 2°C-on tárolt, kontroll és SF kezelt D érettségi állapot esetében a 20. napon

Feltételezhető, hogy a klimaktérikus, hidegérzékeny gyümölcsökben – így a paradicsomban – a hidegstressz hatására bekövetkező sejtkárosodás és membránpermeabilitás-növekedés okozhatja (Jackman et al., 1988). A hideg okozta strukturális változások a sejtfalakban és membránokban (72.-73. ábra) átmeneti légzésfokozódáshoz vezethetnek, amely összefüggésbe hozható a 2 °C-on tárolt mintákon megjelenő, barnás apró foltokkal is. A minták fényképes dokumentálása során arra lettem figyelmes, hogy az 1-MCP-vel kezelt, 2°C-on tárolt minták esetében a barnás apró foltok hamarabb és kifejezettebben jelentek meg, melyet a 71. ábra szemléltet. E foltok a polifenol-oxidáz enzim fokozott aktivitására, illetve oxidatív stressz jelenlétére utalhatnak.



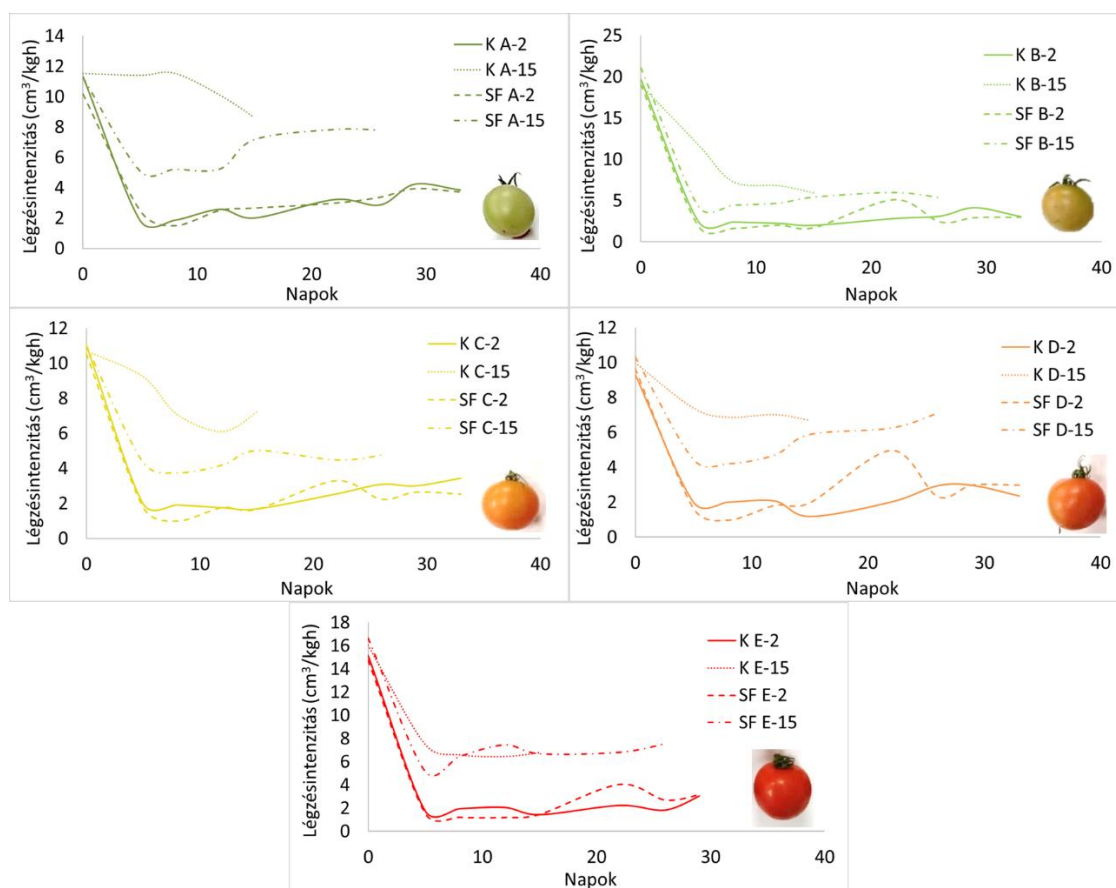
72. ábra: Paradicsom hidegkárosodás által okozott bemélyedésének keresztmetszete, általános morfológia (A) az epidermisz közelében összeesett nagy parenchimasejtek (160× nagyítás); (B) a bemélyedés területének nagyobb nagyítású képe (830× nagyítás). Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek. (forrás: Jackman et al., 1988)

A besüppedt, barnás foltosodás jellemző hidegkár a vékonyabb/puhább bőrszövettel rendelkező termények esetében, mint például a paradicsom, amely esetében pásztázó elektronmikroszkópos felvételt is készítettek a foltokról (72.-73. ábra) (Jackman et al., 1988).



73. ábra: Transzmissziós elektronmikroszkópos felvételek hidegkárosodott paradicsomgyümölcsről (A) 14 napig hűtött, zöldérett paradicsom perikarpsejtjei, melyeknél a citoplazma integritásának elvesztése figyelhető meg. A mitokondriumok (M) krisztái nem láthatók. A mitokondriális (M) és vakuoláris (V) membránok degradálódtak. A plazmamembrán (PM) kontrasztja megmaradt ($\times 38\,600$ nagyítás).

(B) Nem hűtött, zöldérett paradicsom perikarpsejtjei, jól definiált sejtes ultrastruktúrával. Az endoplazmatikus retikulum (ER), a mitokondriális (M) és a vakuoláris (V) membránok nagy kontrasztot mutatnak. A mitokondriumok krisztái jól láthatók, a kloroplasztisz gránumai (G) felismerhetők, a plastoglobulusok (sötét zárványok a kloroplasztiszban) erősen festődtek és épek. A plazmamembrán (PM) élesen kirajzolódik ($\times 25\,900$ nagyítás). (forrás: Jackman et al., 1988)



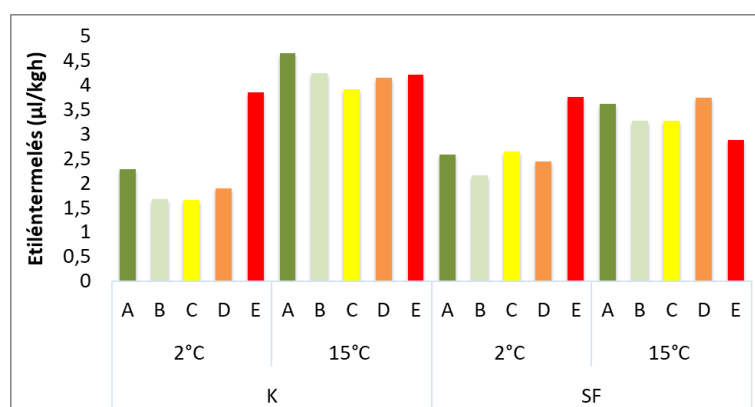
74. ábra: A légzésintenzitás alakulása a III. kísérlet során érettségi állapot szerinti csoportosításban (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (Kx), kezelt (SF-x), két hőfok: 2°C (x2), 15°C (x15))

Feltételezhető, hogy az 1-MCP kezelés a sejtfal- és membránstabilitásra gyakorolt közvetett hatása révén módosítja a hidegkárosodás élettani lefolyását, ezáltal a jelenség a kezelt mintákban kifejezettebben mutatkozhat. A pontos ok-okozati összefüggések feltárásához további vizsgálatok szükségesek.

5.3.6 Etiléntermelés

Az etiléntermelés tekintetében az látható a 16. napi adatok alapján (75.ábra), hogy a 15°C-on tárolt csoportok etiléntermelése volt a legmagasabb, közülük is a kontroll csoporté, ez megfelel az elvártnak. Azonban a 2°C-on tárolt csoportok esetében fordított tendencia figyelhető meg, az 1-MCP kezelt csoportok etiléntermelése valamivel magasabbnak mondható, mint a kontroll csoporté. Ez nagy valószínűséggel kapcsolatba hozható a stressz-etilén termeléssel. Korábbi kutatások is azt mutatják, hogy a hidegkárosodás növekedést okozhat az etiléntermelésben, ugyanakkor az még nem tisztázott, hogy ez a növekedés a károsodás következménye, vagy egy reakció, amellyel a termés mérsékelni próbálja a hidegkár mértékét (Morgan and Drew, 1997).

A 2 °C-on tárolt 1-MCP-vel kezelt minták enyhén magasabb etiléntermelése arra utalhat, hogy a kezelés módosítja a hidegstresszre adott élettani választ. Valószínű, hogy az 1-MCP befolyásolja az etilénérzékelést és -jelátvitelt, így a hideg okozta sejtkárosodásra adott hormonális reakció eltér a kontroll mintákétól. Elképzelhető, hogy a kezelés gátolja a normál éréshez kapcsolódó etilénképzést, ugyanakkor a hidegstressz kiváltotta jelátviteli utak részben áthidalják ezt a gátlást, ami a kontrollnál magasabb értékekhez vezethet. A hidegkárosodás ismerten hat a membránok fluiditására, a sejtszerkezet integritására és a stresszhormonok – köztük az etilén – dinamikájára, ami komplex, még nem teljesen feltárt kölcsönhatásokat eredményez a tárolási hőmérséklet és a kezelés között.



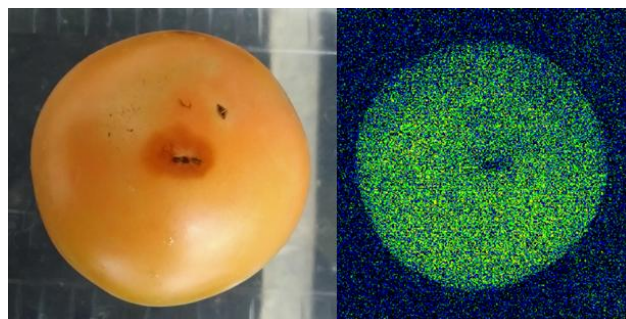
75. ábra: Az etiléntermelés alakulása a tárolás 16. napján (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E))

5.3.7 Klorofill fluoreszcencia

A klorofill fluoreszcenciás mérésektől azt reméltem, hogy még a tünetek megjelenése előtt ki tudom mutatni a hidegkárosodást, mivel a fotoszintézis a thylakoid membránban megy végbe, és

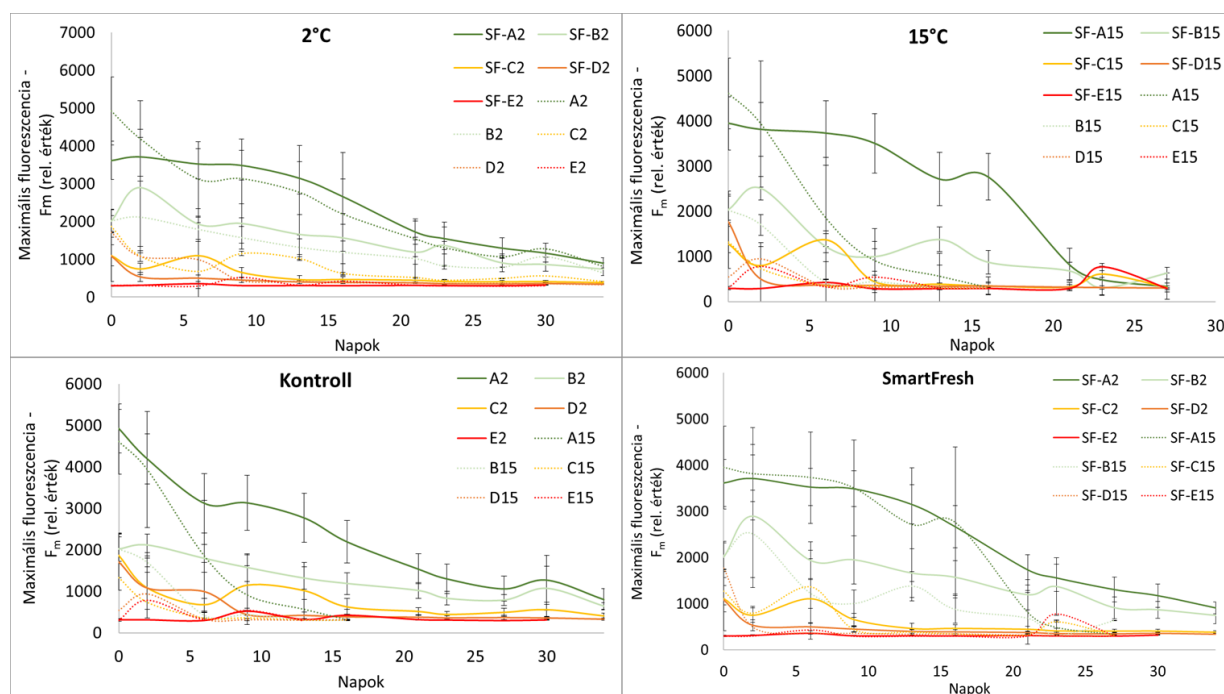
úgy véltem, hogy a membránban bekövetkező károsodások hatással lesznek a fotoszintetikus rendszer épségére, ezáltal a klorofill fluoreszcenciára is. Mindezek ellenére a görbék lefutásában nem véltem felfedezni semmilyen rendellenes dolgot (77. ábra). A 15°C-os minták esetében a kezelés a 16. napi adatok alapján szignifikánsnak bizonyult az A és a C érettségi stádiumokban,

míg a 2°C-os minták esetében az A, B és C stádiumokban. Ha kezelések szerinti bontásban vizsgáljuk a görbéket, akkor az látható, hogy a kontroll csoporton belül jelentős különbség van a két hőmérséklet között, amit a statisztikai elemzés (78. ábra) is alátámaszt, míg az 1-MCP kezelt csoportok esetében kisebb különbség figyelhető meg, ám a B, C és D csoportok



76. ábra: Egy hidegkárosodott paradicsom megbarnult foljának fényképe (balra) és klorofill fluoreszcenciás képe (jobbra)

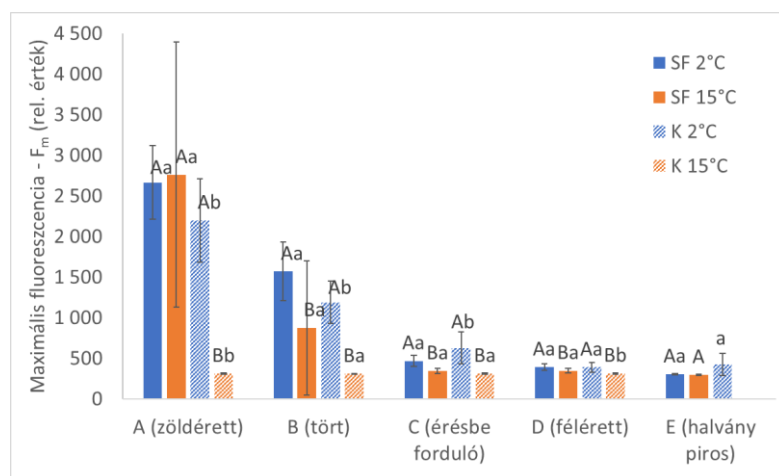
esetében még szignifikáns. A 76. ábra szemlélteti, hogy mi látszódik a klorofill fluoreszcenciás mérés képén egy olyan paradicsom esetében, amelyen már megjelent a megbarnult, besüppedt folt. Látható, hogy minimálisan látszik a klorofill fluoreszcenciás képen a folt közepe, ebben a pontban nincs fluoreszcencia, ám a folt udvara, mely csak barnult, az nem vehető ki rendesen a fluoreszcenciás képen, a folt megjelenése előtt pedig nem volt detektálható a károsodás.



77. ábra: A maximális fluoreszcencia (F_m) alakulása a III. kísérlet során hőmérséklet szerinti csoportosításban (felül), illetve kezelés szerinti csoportosításban (alul) (Öt érettségi állapot (A, B, C, D, E), két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (Ax-Ex), kezelt (SF-x), két hőfok: 2°C (x2), 15°C (x15))

Bár a klorofill-fluoreszcencia mérés érzékeny módszer a fotoszintetikus apparátus állapotának nyomon követésére, a jelen kísérletben a hidegkárosodás előrejelzésére nem bizonyult kellően hatékonynak. Ez arra utal, hogy a hideg által okozott elsődleges sejtkárosodás – legalábbis a paradicsom esetében – nem feltétlenül a fotoszintetikus rendszerben kezdődik, vagy a változások nem érik el azt a mértéket, amely mérhető módon befolyásolná a fluoreszcencia paramétereit a vizsgált időtartamon belül. A jelenség hátterében az állhat, hogy a hidegkárosodás kezdetben inkább a membránok lipidösszetételét, fluiditását és a sejtfal integritását érinti, míg a PSII működése hosszabb ideig megőrizheti stabilitását. Továbbá a fotoszintetikus szerkezet sérülése csak akkor válik kimutathatóvá, amikor már látható tünetek is megjelennek, ahogy azt a fluoreszcenciás kép minimális kontrasztja is mutatta a barnult foltok esetében.

Mindez alátámasztja azt a feltételezést, hogy a klorofill-fluoreszcencia mérése önmagában nem elegendő a hidegkárosodás korai detektálására paradicsomban, és célszerű lenne más, érzékenyebb biokémiai vagy szöveti vizsgálatokkal (pl. membránpermeabilitás, lipidperoxidációs szint, elektrolitkiáramlás mérése) kombinálni a módszert, hogy a kezdeti, még visszafordítható károsodások is észlelhetők legyenek.



78. ábra: A maximális klorofill fluoreszcencia eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttenyezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet 16. napján. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a hőmérsékletek összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és kezeléson belül, míg a kisbetűk a kezelések összehasonlítására szolgálnak adott érettségi állapoton és hőmérsékleten belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.3.8 A III. kísérlet eredményeinek összegzése

A kapott eredmények szintén alátámasztják az I. és II. kísérlet eredményeit, az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés hatékonyan lassította a paradicsomok érésmenetét 15°C-on, főleg a klimaktérium előtti érettségi csoportok esetében. Ezek mellett még az látszik, hogy a 2°C-os tárolás esetében nem adódik össze a hűtés és az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés hatása, nem jár plusz előnnyel a kezelés alkalmazása. Nagyjából hasonló eredményeket kaptam a kontroll 2°C-os

és a kezelt 2°C-os csoportok esetében, így ezen eredmények alapján akár a hűtve tárolás is elegendő lehetne, hogy lassítsuk a paradicsom élettani folyamatait és érésmenetét. Ugyanakkor a 16-20. nap környékén a légzésintenzitásban, az etiléntermelésben, valamint az akusztikus keménységértékekben is észlelhető volt olyan változás, mely a hidegkárosodásra utalhat. A légzésintenzitás megugrott a 20. nap környékén a 2°C-on tárolt csoportok esetében, amely az esetleges sejtfal- és membránkárosodások következménye lehet a szakirodalmak alapján. Emellett a 2 °C-on tárolt csoportoknál stressz-etilén termelődésre utaló jelek voltak tapasztalhatók. Az akusztikus keménységtényező értékei a 16. nap környékén átmeneti növekedést mutattak a 2°C-os mintáknál, mely időszak egybeesik az apró, barnás foltok megjelenésével a paradicsomok felületén, így nagy valószínűséggel ez is a hidegkárhoz köthető folyamat. Összességében azt a következtetést tudom levonni a kapott eredmények, valamint a fényképes dokumentáció alapján, hogy bár a 2°C-os tárolás ígéretesnek tűnhet, ugyanakkor sajnos hidegkárosodáshoz vezet, mely annál kifejezettebb, minél korábbi érettségi stádiumban van a paradicsom. Ez a hidegkárosodás nagyjából 2 hét után jelentkezik, így egy 10°C alatti rövidtávú tárolás alternatívaként szolgálhat, amennyiben a szüret és a feldolgozás nincs összhangban. Az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés 2°C-on nem lassítja tovább az érésmenetet, sőt, a megfigyelés alapján a kezelt csoportokon hamarabb és intenzívebben jelentkezték a hidegkár jelei, így semmiképpen nem tanácsos az intenzívebb hűtést egyszerre alkalmazni a SmartFresh™ kezeléssel. A klorofill-fluoreszcencia eredményei ugyanakkor nem igazolták a kezdeti várakozásokat, mivel a hidegkárosodás előrejelzésére nem mutattak egyértelmű összefüggést, így erre irányulóan további kutatások szükségesek. Ugyanakkor a 15 °C-on tárolt kontroll minták színadataira illesztett szigmoid modell ígéretesnek bizonyult a paradicsom érésmenetének becslésére, bár annak pontossága növeléséhez további, szélesebb körű mérési sorozatok elvégzése indokolt. A hidegkárosodás tüneteit dokumentáló fényképek az M5 és M6 mellékletekben találhatóak.

5.4 IV. kísérlet (Mikrobuborékos mosás 1-MCP hatóanyaggal)

A IV. kísérlet célja az volt, hogy meghatározzam az 1-MCP-s mikrobuborékos mosás hatékonyságát és összevegyem azt a tárolóban végzett érésgátló kezelés hatékonyságával. A vizsgálat során a korábbi eredményekre alapozva csak zöldérett érettségi stádiumú paradicsomot használtam fel és a kezeléseket tekintve 8 csoportot hoztam létre:

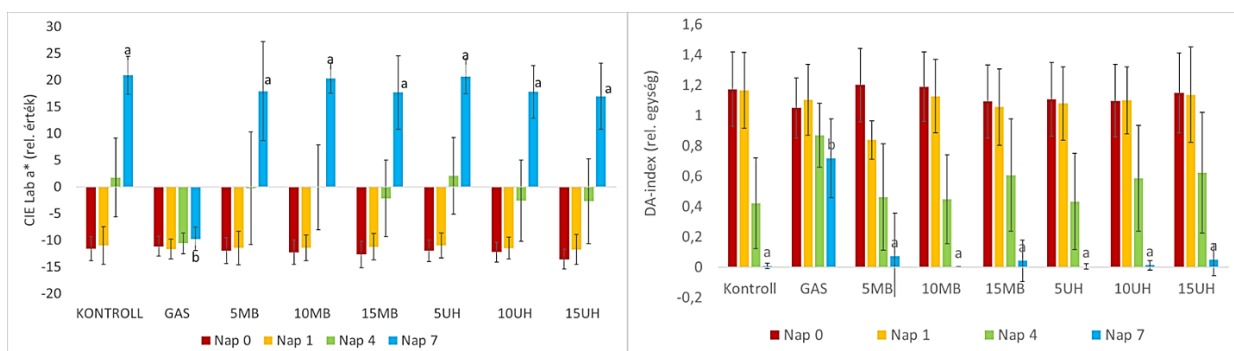
- kontroll: nem kapott semmilyen kezelést
- GAS: tárolóban végzett hagyományos 1-MCP kezelés, 625ppb konc. mellett, 20°C-on
- 5MB: 5 perces MB-os 1-MCP kezelés 20°C-on
- 10MB: 10 perces MB-os 1-MCP kezelés 20°C-on
- 15MB: 15 perces MB-os 1-MCP kezelés 20°C-on
- 5UH: 5 perces MB-os 1-MCP kezelés ultrahanggal kiegészítve (72W, 19,7 kHz, 20°C)

- 10UH: 10 perces MB-os 1-MCP kezelés ultrahanggal kiegészítve (72W, 19,7 kHz, 20°C)
- 15UH: 15 perces MB-os 1-MCP kezelés ultrahanggal kiegészítve (72W, 19,7 kHz, 20°C)

Az UH csoportok esetében a mikrobuborékos kezelést aktív ultrahanggal egészítettem ki, hogy megvizsgáljam, hogyan reagál a rendszer az UH-ra, ugyanis korábbi tanulmányokban más területen (pl. sertéskaraj nedves pácolás mikrobuborékkal és ultrahanggal kiegészítve) a mikrobuborékos áztatás hatékonyságát sikerült növelni.

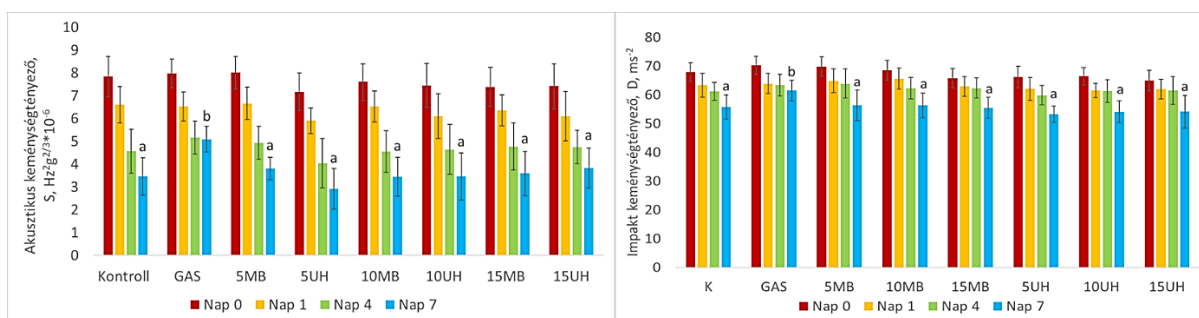
5.4.1 Szín és DA-index

A színmérés eredményeit tekintve az látható (79. ábra), hogy a kontroll és a mikrobuborékos csoportok nem különböznek egymástól szignifikánsan a 7 napos tárolás végén, egyedül a hagyományos 1-MCP kezelést kapott GAS csoport különbözött a többitől, ez esetben volt egyedül hatékonynak mondható a kezelés. A DA-index® esetében hasonló tendenciát figyelhetünk meg, az értékek nem különböznek egymástól szignifikánsan, kivéve a GAS csoportot.



79. ábra: Az a^* értékek (balra) és a DA-index® értékek (jobbra) alakulása a IV. kísérlet során. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze (Négy 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (kontroll), hagyományos (GAS), mikrobuborékos (MB), ultrahanggal kiegészített mikrobuborékos (UH); három behatási idő: 5-10-15 perc)

5.4.2 Akusztikus és impakt keménység

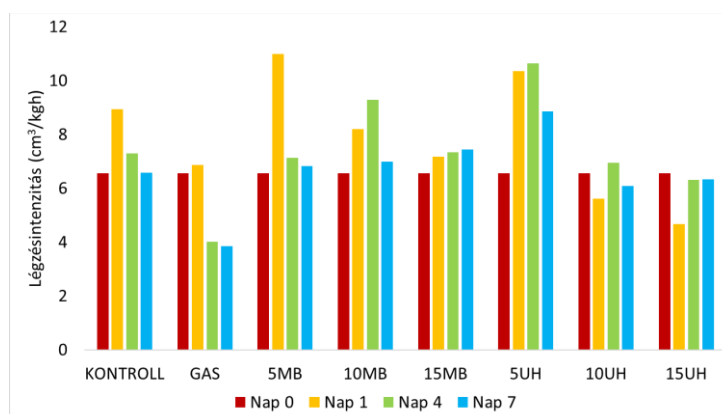


80. ábra: Az akusztikus keménységtényező értékeinek (balra) és az impakt keménységtényező értékeinek (jobbra) alakulása a IV. kísérlet során. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. Az egyes csoportokat nem-parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze. (Négy 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (kontroll), hagyományos (GAS), mikrobuborékos (MB), ultrahanggal kiegészített mikrobuborékos (UH); három behatási idő: 5-10-15 perc)

Az akusztikus és impakt keménység értékeit tekintve (80. ábra) hasonló következtetéseket lehet levonni, melyet a statisztikai elemzés is alátámaszt: egyedül a hagyományos érésgátló kezelés volt hatással a paradicsomok keménységére, a többi kezelés és a kontroll csoport között nincs szignifikáns különbség.

5.4.3 Légzésintenzitás

A légzésintenzitás eredményei (81. ábra) szintén alátámasztják a korábbi megállapítást, miszerint a hagyományos kezelés bizonyult igazán hatékonynak, ám ebben az esetben több dolgot is megfigyelhetünk még ezen kívül. Az 1. napon mért értékek jellemzően megugrottak a kiindulási értékekhez képest, még a hagyományos kezelés esetében is. Ugyanakkor az 5-10-15 perces mikrobuborékos kezelések esetében rendre egyre mérsékeltebb volt ez a kiugrás, sőt az ultrahanggal kombinált 10 és 15 perces mikrobuborékos kezelés esetében a kiindulási érték alá csökkent a légzésintenzitás. Ám sajnos ez a csökkenő tendencia nem maradt meg a MB-os csoportoknál, a 4. napon jellemzően emelkedtek az értékek, ám a 10UH és 15UH csoportok esetében viszonylag alacsonyak maradtak a többi csoporthoz képest, leszámítva a GAS csoportot.



81. ábra: A légzésintenzitás alakulása a IV. kísérlet során. (Négy 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (kontroll), hagyományos (GAS), mikrobuborékos (MB), ultrahanggal kiegészített mikrobuborékos (UH); három behatási idő: 5-10-15 perc)

Ezek az eredmények arra engednek következtetni, hogy egyes MB-os kezeléseknek volt némi hatása, ám nagy valószínűséggel a paradicsomok nem kaptak elegendő 1-MCP hatóanyagot egy tartós érésgátláshoz. Minden bizonnyal azért a légzésintenzitás esetében lehet felfedezni ezt a hatást, mert a légzés azonnal reagál a kezelésre, míg a pigmentlebonlás és -képződés, valamint az állomány változása időigényes folyamatok, késleltetve reagálnak, ám egy nem megfelelő hatóanyag-kitettség esetén, ahol később úgy mond „magukhoz térnek” a paradicsomok és visszaáll a légzésintenzitás, nagy valószínűséggel nem tudtak végbemenni ezek a hosszadalmas folyamatok.

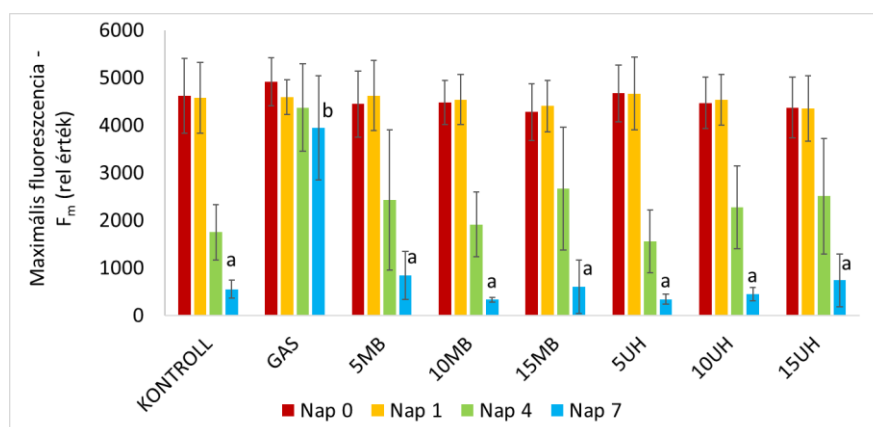
Továbbá érdemes megjegyezni, hogy az ultrahanggal kiegészített MB-os kezelések esetében tapasztalt kezdeti légzésintenzitás-csökkenés valószínűleg az ultrahang által kiváltott membránpermeabilitás-növekedéssel és mikrokavitációs hatással hozható összefüggésbe, ami

elősegíthette a hatóanyag gyorsabb bejutását a sejtekbe. Ugyanakkor a kezelés időtartamának és intenzitásának optimalizálása nélkül ez a kezdeti előny nem bizonyult tartósnak.

5.4.4 Klorofill fluoreszcencia

A klorofill fluoreszcenciás mérések szintén nem mutatnak különbséget a mikrobuborékos csoportok és a kontroll csoport között, ezen mérés szerint is csak a hagyományos 1-MCP kezelés volt hatékony (82. ábra). Ez arra utal, hogy a mikrobuborékos kezelések – még ultrahanggal kombinálva is – feltehetően nem biztosítottak elegendő hatóanyag-bejutást a sejtekbe ahhoz, hogy kimutatható változást idézzenek elő a fotoszintetikus rendszer működésében. A klorofill fluoreszcencia paraméterei a fotoszintetikus apparátus, különösen a PSII reakciócentrum integritásának és hatékonyságának érzékeny indikátorai, így a mérés eredményei arra engednek következtetni, hogy a mikrobuborékos kezelések nem befolyásolták érdemben a fotoszintetikus elektrontranszportot vagy a membránszerkezet stabilitását.

Ez a megállapítás összhangban van a szín- és keménységmérés, valamint a légzésintenzitás eredményeivel, amelyek szintén arra utalnak, hogy a mikrobuborékos kezelések hatékonysága elmaradt a hagyományos 1-MCP kezeléstől.



82. ábra: A maximális fluoreszcencia (F_m) alakulása a IV. kísérlet során. (Négy 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (kontroll), hagyományos (GAS), mikrobuborékos (MB), ultrahanggal kiegészített mikrobuborékos (UH); három behatási idő: 5-10-15 perc)

A kapott eredmények arra utalnak, hogy a mikrobuborékos és az ultrahanggal kombinált mikrobuborékos kezelések ebben a kísérleti beállításban nem biztosítottak elegendő hatékonyságot az érésgátlás szempontjából. Ennek hátterében több tényező is állhat: a kezelés időtartama, vagy a hatóanyag koncentrációja nem volt elegendő a megfelelő érésgátlás eléréséhez.

Gyakorlati szempontból ezek az eredmények arra hívják fel a figyelmet, hogy bár a mikrobuborékos és ultrahangos technológiák ígéretesek lehetnek az 1-MCP gyors és célzott alkalmazására, a jelen kísérletben alkalmazott kezelési idők és körülmények mellett nem tudták felvenni a versenyt a hagyományos, kontrollált légtérben végzett kezelés hatékonyságával. A

technológia optimalizálása – például hosszabb expozíciós idő, nagyobb 1-MCP koncentráció vagy eltérő ultrahang-frekvencia alkalmazása – szükséges lehet ahhoz, hogy a módszer gyakorlati alternatívát jelentsen a piacon elterjedt tárolóban történő kezeléshez képest.

5.4.5 A IV. kísérlet eredményeinek összegzése

Az eredmények egyértelműen azt mutatták, hogy a színmérés, DA-index, keménységmérés és klorofill-fluoreszcencia paraméterei alapján csak a hagyományos kezelés bizonyult igazán hatékonynak, míg a mikrobuborékos kezelések nem hoztak szignifikáns különbséget a kontrollhoz képest. A légzésintenzitás vizsgálata ugyanakkor jelzett némi pozitív hatást: főként az ultrahanggal kiegészített, hosszabb idejű kezelések esetében kisebb kezdeti légzésintenzitás-értékek mutatkoztak, de ez a hatás nem volt tartós. Ez arra utal, hogy a mikrobuborékos kezelés során a paradicsomok feltehetően nem kaptak elegendő 1-MCP hatóanyagot ahhoz, hogy hosszú távon lassítsák az érési folyamatokat. Bár más gyümölcsök esetében korábban már sikerrel alkalmazták, a paradicsomnál az általam használt körülmények között a mikrobuborékos kezelés önmagában nem bizonyult valódi alternatívának a hagyományos eljárással szemben. Ugyanakkor a légzésintenzitásban megfigyelt rövid távú hatások arra utalnak, hogy a technológia pontosabb kidolgozása és további optimalizálása – például a dózis, az expozíciós idő vagy az ultrahang-intenzitás finomhangolása – mellett további potenciál rejlik benne.

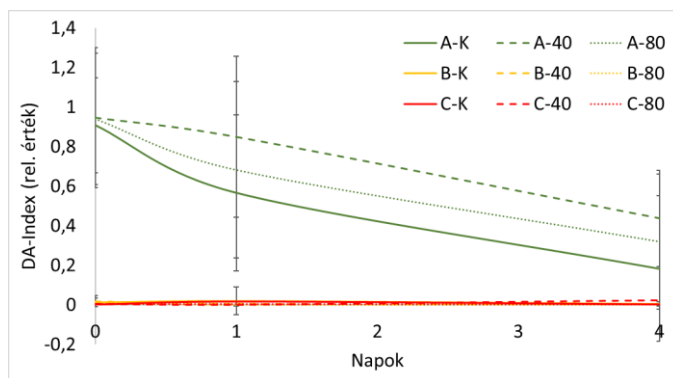
5.5 V. kísérlet (Mechanikai károsodás vizsgálata)

Az V. kísérlet célja az volt, hogy feltárjam, miként reagálnak a paradicsomok egy szimulált mechanikai behatásra, amely a betakarítás, szállítás vagy bolti árukezelés során gyakran előfordulhat. Ennek érdekében kétféle ejtési magasságot alkalmaztam: 80 cm-t, amely egy átlagos pult magasságából történő leesést hivatott modellezni, valamint ennek felét, 40 cm-t, a kisebb mértékű ütődések szimulálására. A kísérletben három különböző érettségi állapotot vizsgáltam (A – tört színű, B – halvány piros, C – élénk piros), és minden stádiumon belül három kezelési csoportot alakítottam ki: kontroll (ejtés nélkül), 40 cm-ről ejtett és 80 cm-ről ejtett. A mintákat egységesen 20 °C-on tároltam, és a változásokat négy napon keresztül követtem nyomon.

A négy napos megfigyelési periódust azért választottam, mert korábbi tapasztalatok és szakirodalmi adatok alapján a mechanikai sérülések hatása – különösen a belső szövetkárosodás és a gyorsított érés vagy romlás – jellemzően néhány napon belül válik kimutathatóvá, egyes vizsgálatok szerint már 24 órával a behatást követően (Al-Dairi et al., 2024; Lee et al., 2007; Pathare et al., 2023). Ezen időintervallum elegendő ahhoz, hogy a sérülés következményei mérhető formában megjelenjenek, ugyanakkor elkerülhető, hogy a teljes utóérés elfedje a mechanikai behatás specifikus hatásait.

5.5.1 DA-index

A DA-index® esetében csak az A érettségi stádiumú paradicsomokat tudtam érdemben vizsgálni, mivel a másik két csoport nem tartalmazott kellő mennyiségű klorofillt. A 83. ábrán az A csoport esetében folyamatos csökkenő tendencia figyelhető meg, mely érdekes módon a kontroll csoport esetében a legjelentősebb, ezt követi a 80-as, majd a 40-es csoport. Ez nem igazán felelt meg



83. ábra: A DA-index® alakulása az V. kísérlet során. (3 érettségi állapot: A, B, C; 3 ejtési magasság: 0 (K), 40, 80)

az elvártaknak, mivel arra számítottam, hogy az ejtett csoportok esetében lesz jelentősebb a csökkenés. Bár konkrét választ nem találtam erre a szakirodalomban, elképzelhető, hogy az ütődés stresszválaszt vált ki, amely rövid távon bizonyos élettani folyamatokat – például pigmentle bomlást – mérsékelhet, így a klorofilltartalom csökkenése nem feltétlenül gyorsabb, hanem akár lassabb is lehet, mint a sérülésmentes gyümölcsökben.

Ezt alátámasztja a 26. táblázat is, melyben a statisztikai elemzés eredménye látható. Eszerint a kontroll csoport szignifikánsan különbözik a 40 cm-ről ejtett csoporttól, míg a 80 cm-ről ejtett csoport nem különbözik egyiktől sem. Külön vizsgáltam az ejtett szemek ütődött és ép oldalát is, melyre szintén végeztem statisztikai elemzést. Az ütődött és ép oldalak esetében a kéttényezős varianciaanalízis alapján nincs szignifikáns különbség a két oldal között ($F(1;36)=1,083$; $p=0,305$). Ez arra utal, hogy a klorofill lebomlás a teljes gyümölcsre kiterjedően, szisztémás módon zajlott, nem csupán lokálisan a sérülés helyén.

26. táblázat: Az DA-index mérések statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet végén.

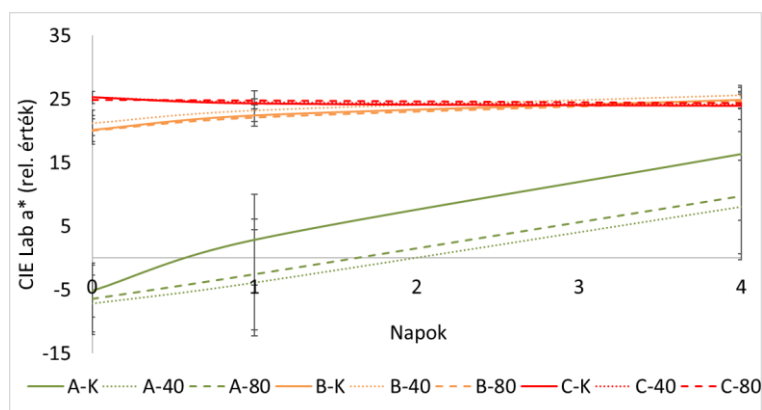
Érettségi állapot	Ejtési magasság		
	Kontroll	40 cm	80 cm
A	$0,143 \pm 0,132^{Aa}$	$0,436 \pm 0,368^{Ba}$	$0,319 \pm 0,364^{ABa}$
B	$0,0032 \pm 0,0107^{Ab}$	$0,0004 \pm 0,0018^{Ab}$	$0,0027 \pm 0,0048^{Ab}$
C	$0,002 \pm 0,005^{Ab}$	$0,0228 \pm 0,0601^{Ab}$	$0,0005 \pm 0,0019^{Ab}$

A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

5.5.2 Szín

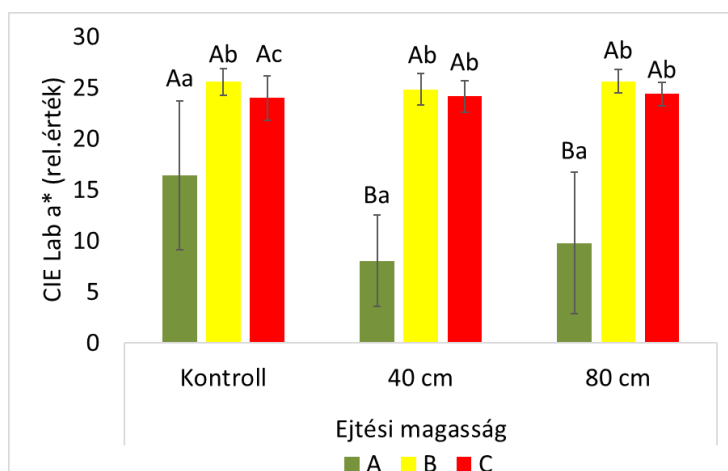
Pathare és munkatársai (2023) arra jutottak a paradicsom ejtész vizsgálata során, hogy az ejtett paradicsomok keménysége, valamint likopin- és karotintartalma csökkent, ugyanakkor az a*

értékei jelentős növekedést mutattak az ejtést követően. Ez sajnos ellentétes az én megfigyeléseimmel, miszerint az A érettségi stádiumon belül a kontroll csoport színváltozása volt a legintenzívebb, ezt követte a 80 cm-ről, majd a 40 cm-ről ejtett csoport (84. ábra). Ugyanakkor ez az eredmény összefüggésben van a DA-index® eredményekkel és alátámasztja azt a feltételezést, miszerint az ejtés megzavarhatta a paradicsom normál érési folyamatait, továbbá a korábban említett szakirodalomban csak teljesen érett paradicsomokat vizsgáltak, ami szintén magyarázatot adhat arra, miért nem egyezett az általam kapott eredményekkel.



84. ábra: Az a^* értékek alakulása az V. kísérlet során (3 érettségi állapot: A, B, C; 3 ejtési magasság: 0 (K), 40, 80)

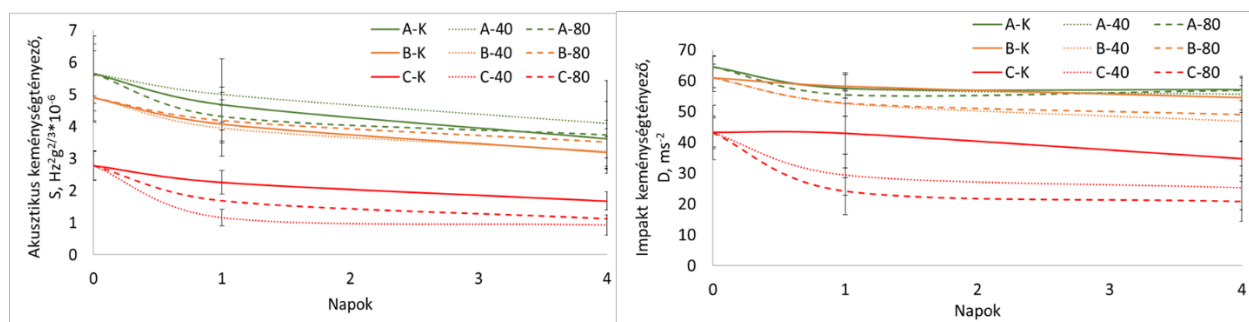
A 85. ábrán látható statisztikai elemzés szerint a kontroll csoport szignifikánsan különbözött a 40-es és 80-as csoportoktól, ám utóbbi kettő nem különbözött egymástól. Az ütdött és ép oldalak esetében a kéttényezős varianciaanalízis alapján nincs szignifikáns különbség a két oldal között ($F(1;36)=0,032$; $p=0,859$).



85. ábra: Az a^* eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet végén. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. Az egyes csoportokat nem-parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

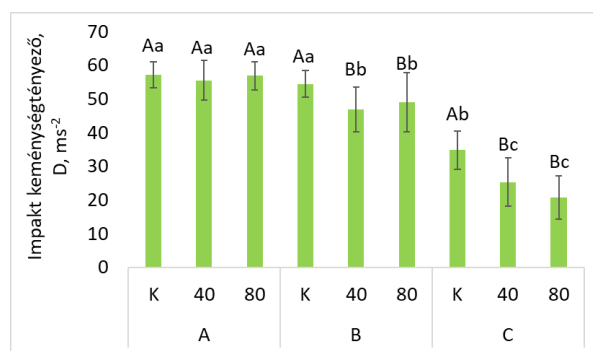
5.5.3 Akusztikus és impakt keménység

Az akusztikus és impakt keménység vizsgálata során a C érettségi stádium különült el leginkább az A és B stádiumoktól (86. ábra). Az akusztikus keménység esetében a kéttényezős varianciaanalízis alapján nem mutatkozott szignifikáns különbség az ejtési magasságok között ($F(2;81) = 0,285$; $p = 0,753$). Ez arra utal, hogy ez a módszer kevésbé érzékeny a lokális sérülések detektálására. Ezzel szemben az impakt keménységmérésnél a B és C érettségi stádiumokon belül szignifikáns eltérés volt a kontroll és az ejtett minták között, azonban az ejtési magasság itt sem okozott szignifikáns különbséget (87. ábra).



86. ábra: Az akusztikus keménység (S) értékek (balra) és az impakt keménység (D) értékek (jobbra) alakulása az V. kísérlet során. (3 érettségi állapot: A, B, C; 3 ejtési magasság: 0 (K), 40, 80)

Ez az eredmény nagy valószínűséggel összefügg az állomány puhaságával: minél érettebb a paradicsom, annál lágyabb a szövetszerkezete, és így annál sérülékenyebb a mechanikai behatásokkal szemben. Ez a tendencia jól kirajzolódik, hiszen a C érettségi stádiumú csoportnál volt a legnagyobb különbség a kontroll és ejtett minták között, a B érettségi állapot esetében mérsékeltebb volt az eltérés, míg az A stádiumban nem mutatkozott szignifikáns különbség. Az akusztikus keménységmérés valószínűleg azért nem mutatott különbségeket, mert ez a módszer a teljes termés mechanikai tulajdonságait globális szinten jellemzi, míg az impakt keménység inkább lokálisan, egy adott ponton mér. Az ejtés következménye feltehetően nem befolyásolta érdemben a gyümölcs teljes állományát, viszont lokálisan — az ütközés helyén — kimutatható változást okozott. A mechanikai ütdés hatására bekövetkező szövetkárosodás általában nem okoz azonnal az egész gyümölcsre kiterjedő

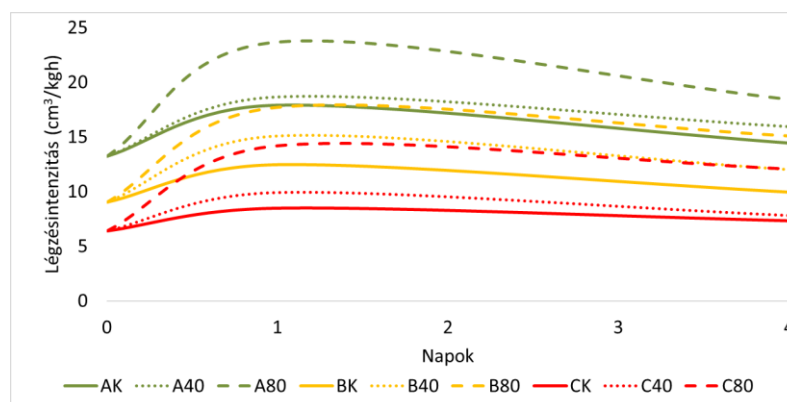


87. ábra: Az Impakt keménység (D) eredmények statisztikai elemzésének eredményei (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal a tárolási kísérlet végén. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

mechanikai károsodást, mivel a sejtszinten meginduló romlási folyamat először lokálisan (az érintett területeken) jelentkezik. Amint Van Linden és De Baerdemaeker (2005) rámutatott, a fizikai ütdés által kiváltott sejtek sérülése — majd az azt követő enzimatis leomlás — csak később terjed ki egyéb struktúrákra, így az impakt keménységmérés, amely lokálisan érzékeny, érzéklni tudja a behatást, míg az akusztikus keménység, globálisabb jellegénél fogva, nem mutat azonnali eltérést.

5.5.4 Légzésintenzitás

A légzésintenzitás eredményeit vizsgálva az látható, hogy a kontroll és a 40 cm-ről ejtett csoportok nem különülnek el egymástól jelentősen, ugyanakkor a 80 cm-ről ejtett minta légzésintenzitása a tárolás során sokkal jobban megnőtt (88. ábra). Ez a megnövekedett légzésintenzitás nagy valószínűséggel az ütdés okozta stresszre adott fiziológiai válasz, amely a vártnak megfelelő eredmény. A jelenség hátterében nemcsak a mechanikai sérülés közvetlen hatása, hanem az általa kiváltott biokémiai folyamatok is állhatnak. Az ütdés sejtfa- és membránsérülést okoz, amely egyrészt fokozza a sejtlegzés intenzitását a javító mechanizmusok energiaigénye miatt, másrészt növeli az etiléntermelést (Scherrer-Montero et al., 2011).

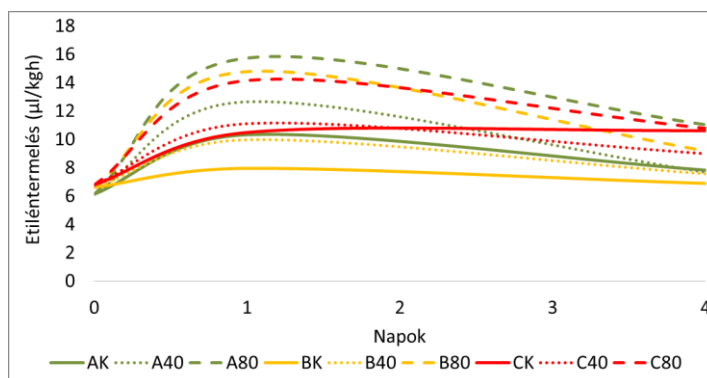


88. ábra: A légzésintenzitás alakulása az V. kísérlet során (3 érettségi állapot: A, B, C; 3 ejtési magasság: 0 (K), 40, 80)

5.5.5 Etiléntermelés

Az etiléntermelés alakulását vizsgálva a tárolás során hasonló tendencia volt megfigyelhető, mint a légzésintenzitás esetében: a 80 cm-ről ejtett minták etiléntermelése növekedett meg legnagyobb mértékben, ezt követték a 40 cm-es minták, majd a kontroll csoport (89. ábra). A legjelentősebb emelkedés a B érettségi stádiumon belül volt tapasztalható. Ez a jelenség összhangban áll a mechanikai sérülésekre adott ún. „wound-induced ethylene” válasszal, melynek során az ütdés következtében a sejtfa- és membránok sérülése fokozza az 1-aminociklopropán-1-karbonsav (ACC) szintézisét, ami az etilén közvetlen prekursora. Az etilénszint emelkedése ezt követően felgyorsíthatja a klimakterikus érés folyamatát, különösen a kevésbé érett, még aktív anyagcserével rendelkező terményeknél. Ez magyarázza a B érettségi állapotban tapasztalt kiugró

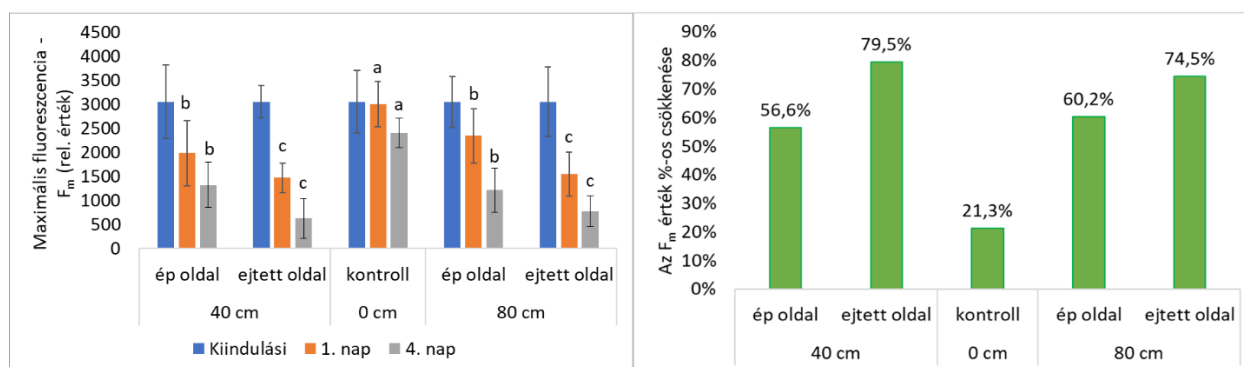
értékeket. Korábbi vizsgálatok is megerősítették ezt az összefüggést: Kende és Boller (1981), valamint Yu és Yang (1980) beszámolnak arról, hogy mechanikai sérülés hatására a sérült sejtekből felszabaduló jelek aktiválják az etilén-bioszintézis enzimeit.



89. ábra: Az etiléntermelés alakulása az V. kísérlet során (3 érettségi állapot: A, B, C; 3 ejtési magasság: 0 (K), 40, 80)

5.5.6 Klorofill fluoreszcencia

A klorofill fluoreszcenciás mérések esetében az 90. ábra szemlélteti legjobban a maximális fluoreszcencia alakulását az A érettségi állapot paradicsomjai esetében (a B és C érettségi állapotok esetében a kevés klorofill molekula miatt a mérés nem szolgáltat releváns információval). A kapott adatokat korrekcióval eltoltam, hogy a kiindulási értékek azonos szintre kerüljenek, mivel így jobban összehasonlítható a változás, ami most számomra relevánsabb a valós értékeknél. A bal oldali diagramon jól látható, hogy a kontroll csoport F_m értéke csökkent a legkevésbé, a 4. napon 21,3%-kal. Az ejtett paradicsomok ép oldalának fluoreszcenciája is csökkent, nagyjából 55-60%-kal a 4. napra, ám az ejtési magasságok között nem volt szignifikáns különbség. A vártak megfelelően az ejtett oldal F_m értéke mutatta a legnagyobb csökkenést, mely a 4. napon már 75-80% körül mozgott, ez jelentős csökkenés. Ami rendkívül ígéretesnek mondható, hogy már az 1. napon látszódott ez a tendencia.



90. ábra: A maximális fluoreszcencia alakulása az A érettségi állapotú csoportban az ép és sérült oldalak esetében (balra), valamint a %-os csökkenésének értéke a kiindulási F_m értékhez viszonyítva a 4. napon (jobbra) az V. kísérlet során. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek az egyes mérési napokon belül. Az egyes csoportokat Tukey post hoc teszt segítségével hasonlítottam össze.

A klorofill fluoreszcencia mérés eredményei megerősítik, hogy a módszer alkalmas lehet a mechanikai sérülések okozta fiziológiai változások korai detektálására, még a vizuális tünetek megjelenése előtt. A mért F_m értékek csökkenése az ejtett minták sérült oldalán arra utal, hogy az ütdés a fotoszintetikus apparátus – elsősorban a PSII reakcióközpontok – működésében is zavarokat okozott, ami feltehetően a sejtszerkezet lokális roncsolódásával, a membránok integritásának sérülésével és a kloroplasztiszok károsodásával áll összefüggésben.

Korábbi vizsgálatok is rámutattak, hogy a mechanikai stressz a PSII aktivitás csökkenését idézi elő, ami a maximális fluoreszcencia értékek jelentős mérséklődésében nyilvánul meg. Ez a jelenség az ún. fotokémiai hatásfok romlásával és a nem-fotokémiai kioltás növekedésével is összefügghet (Yan et al., 2024).

Eredményeim alapján megállapítható, hogy a klorofill fluoreszcencia mérése – különösen az F_m érték változásának követése – alkalmas módszer lehet az enyhébb, vizuálisan nehezen észlelhető mechanikai sérülések korai, objektív kimutatására. Ez a tulajdonsága a technológiát alkalmassá teszi a frisspiaci minőség-ellenőrzésben történő gyakorlati alkalmazásra is, például válogató- és csomagolóüzemekben.

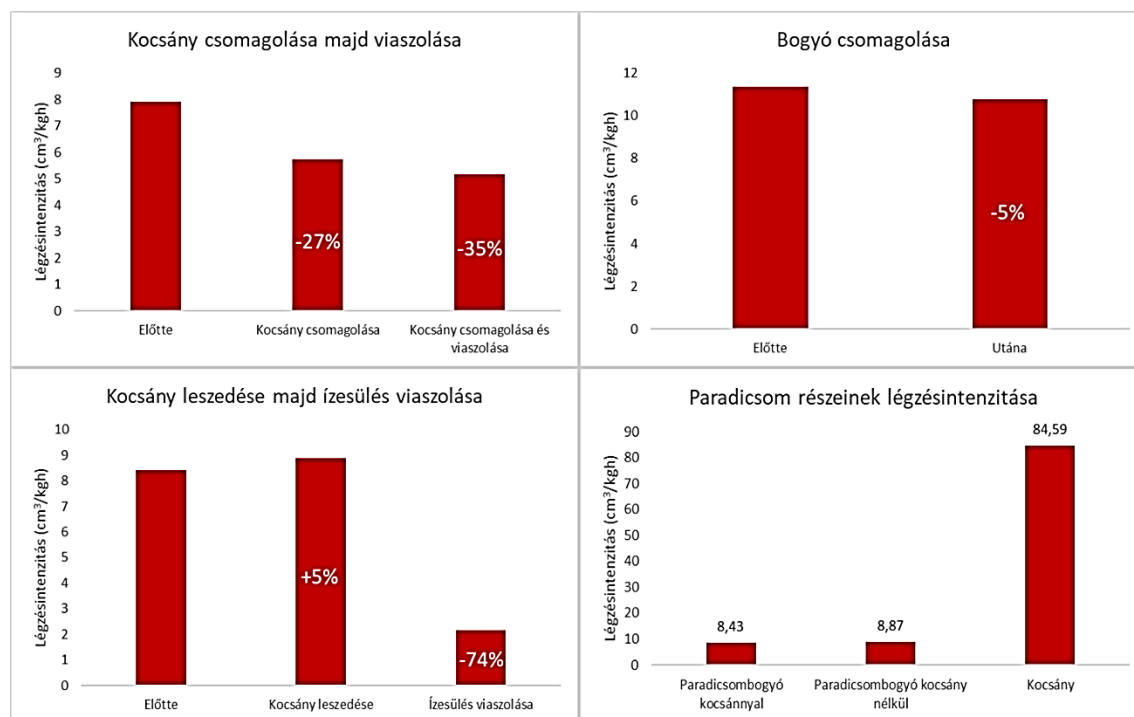
5.5.7 Az V. kísérlet eredményeinek összegzése

Az ejtővizsgálat során minden mérési módszer szignifikáns különbséget mutatott a kontroll és az ejtett minták között. Ugyanakkor a színmérés, a DA-mérés és az impakt keménységmérés csak magát az ejtett és kontroll csoportokat tudta elkülöníteni. Az ejtési magasság egyáltalán nem volt elkülöníthető ezen mérések esetében, ahogy az ejtett, valamint az ép oldalt sem lehetett megkülönböztetni. Ez lehet, hogy arra utal, hogy ezen tulajdonságok változása inkább globálisan jelent meg. Azonban a légzésintenzitásban, az etiléntermelésben, valamint a klorofill fluoreszcenciában megmutatkoztak a különbségek a különböző ejtési magasságok között. Mind az etiléntermelés, mind a légzésintenzitás jelentősen megugrott a sérült paradicsomok esetében. Ez a változás nem volt arányos az ejtési magassággal, de a csoportok között szignifikáns volt a különbség. A legígéretebbnek az mondható, hogy már az első napon látszott ez a változás. A klorofill fluoreszcenciás mérések esetében az F_m értékekben szintén látszott már első nap a különbség, mely tovább nőtt a 4. napra. Az ejtett paradicsomok ép oldalának értékei nagyjából 55-60%-kal csökkentek, míg a sérült oldal esetében az F_m értékek 75-80%-os csökkenést mutattak a kiindulási értékekhez képest, ugyanakkor az ejtési magasságok között nem volt szignifikáns különbség.

5.6 VI. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat előkísérlet)

Egy korábbi tanulmány során Segado és munkatársai (2016) arra jutottak, hogy a paradicsombogyó epidermiszén nem találhatóak gázcserenyílások (sztómák), így a gázcsere elsősorban a kocsány környékén és esetleg a lenticellákon keresztül történhet. Ez a megállapítás jelentőséggel bír a paradicsom éréséhez és utóérése közben zajló élettani folyamatok megértésében, hiszen a légzés során felvett oxigén mennyisége közvetlen hatással van a légzésintenzitásra, valamint az anyagcsere sebességére.

Annak érdekében, hogy erről saját vizsgálatommal is meggyőződjek, a VI. kísérlet során az volt a célom, hogy megvizsgáljam, mi történik, ha a teljesen érett paradicsom különböző részeit légmentesen letakarom, ezzel elzárva az adott részt az oxigéntől, és így akadályozva a lokális gázcserét. A kísérlet során külön figyelmet fordítottam arra, hogy a takarás anyaga ne engedje át az oxigént, így biztosítva a tényleges fizikai gát létrejöttét. A vizsgálat során kizárólag a paradicsomok légzésintenzitását mértem, mégpedig közvetlenül a takarást követően. Ez a módszer lehetőséget adott annak ellenőrzésére, hogy a paradicsom különböző felszíni régiói milyen mértékben járulnak hozzá a gázcseréhez, és igazolható-e a Segado és munkatársai (2016) által közölt eredmény a gyakorlatban is.



91. ábra: A légzésintenzitás alakulása a különböző takarások előtt és után a VI. kísérlet során

A 91. ábrán látható a paradicsom egyes részeinek takarását követő légzésintenzitás. A kocsány csomagolását és viaszolását követően mindössze 35%-kal csökkent a légzésintenzitás, ezzel szemben a kocsány leszedését követően 5%-kal nőtt, ami nagy valószínűséggel a seblégzésnek

tudható be. Ez a jelenség jól ismert a friss zöldségek és gyümölcsök esetében. A mechanikai sérülés következtében az anyagcsere-aktivitás átmenetileg fokozódik a sebfelület gyógyulása és a védekező mechanizmusok aktiválása érdekében (Saltveit, 1997).

Amikor az ízesülést (a kocsány csatlakozási felületét) leviaszoltam, a légzésintenzitás drámaian, 74%-kal csökkent, ami arra utal, hogy a gázcsere legjelentősebb része ezen a felületen keresztül történik. A legmeglepőbb eredmény az volt, hogy a bogyó teljes csomagolását követően mindössze 5%-kal csökkent a légzésintenzitás, ami megerősíti a feltételezést, miszerint a paradicsomhéj epidermiszén nincs vagy csak elenyésző számú gázcsere nyílás (Segado et al., 2016).

A kísérlet kiterjesztéseként megvizsgáltam a paradicsomról leszedett kocsányok légzésintenzitását is, és az eredmény még az előzőnél is meglepőbb volt: míg a paradicsombogyó légzésintenzitása egy kilogrammra vetítve $8,5\text{--}9\text{ cm}^3\text{ CO}_2/\text{kg}\cdot\text{h}$, addig a kocsány önmagában körülbelül $85\text{ cm}^3\text{ CO}_2/\text{kg}\cdot\text{h}$ értéket mutatott. Ez az arány rávilágít arra, hogy a kocsány rendkívül aktív metabolikus szövet, amely jelentős szerepet játszik a gázcsereben.

A kapott eredmények így erőteljesen alátámasztják Segado és munkatársai (2016) megállapításait, miszerint a paradicsom epidermiszén nincsenek sztómák, és a gázcsere döntően a kocsányhoz kapcsolódó szöveteken keresztül zajlik. Ez a felismerés a tárolástechnológia és a frisspiaci minőségmegőrzés szempontjából is jelentős, hiszen a kocsány állapota és kezelése közvetlen hatással lehet a termés légzésintenzitására, ezáltal az eltarthatóságára is.

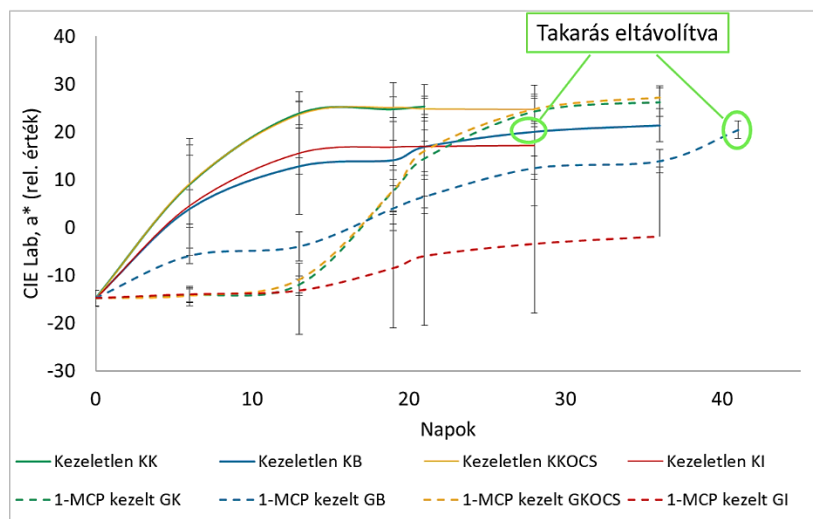
5.7 VII. kísérlet (Takarásos légzésvizsgálat)

A VII. kísérlet során az volt a célom, hogy megvizsgáljam a különböző módú takarások és a SmartFresh™ 1-MCP kezelés hatását zöldérett paradicsomokon. A kísérlet során kizárólag 1 érettségi állapotot vizsgáltam (zöldérett), és négyféle takarási módot: kontroll, takaratlan (xK); bogyó takarása (xB); kocsány takarása (xKOCS) és kocsány eltávolítása, majd ízesülés takarása (xI). Minden csoportból volt kezeletlen kontroll (Kx), valamint 1-MCP kezelt (Gx). A kezelést a takarást követően végeztem el, hogy esetlegesen képet kaphassak arról, a paradicsom mely részén találhatóak az etilén-receptorok. A tárolás 20°C -on történt.

5.7.1 Szín

A színmérés eredményei alapján (92. ábra) az érésgátlás sikeres volt minden csoport esetében. A GI csoport esetében alig történt változás az a^* értékekben. A GKOCs és GK csoportok színe a tárolás 13. napjáig nem változott, ezután elkezdett nőni az érték, a két csoport között nem volt különbség. A GB csoport konkrét színértékeit a 41. napig nem érdemes figyelembe venni, mivel a viasszal történő bevonást követően csak a viaszrétegen keresztül tudtam vizsgálni a színüket, amelynek enyhe fehérés-narancssárgás színe volt, elfedve a tényleges színt, így ezesetben célszerű

a DA-index® adatokat figyelembe venni. A takarás eltávolítását követően a színérték a GKOCS és GK értékeihez közelít, ám nem éri el azt. A kezeletlen csoportok esetében szintén a KI és KB csoportok viselkedtek a legjobban. A bogyó-takart KB csoport esetében szintén csak a takarás eltávolítását követően célszerű a szint figyelembe venni, ami a 28. napon történt.



92. ábra: Az a^* értékek alakulása a VII. kísérlet során (Négy különböző takarás: takaratlan (xK), bogyó (xB), kocsány (xKOCS), ízesülés (xI); két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (Kx), kezelt (Gx))

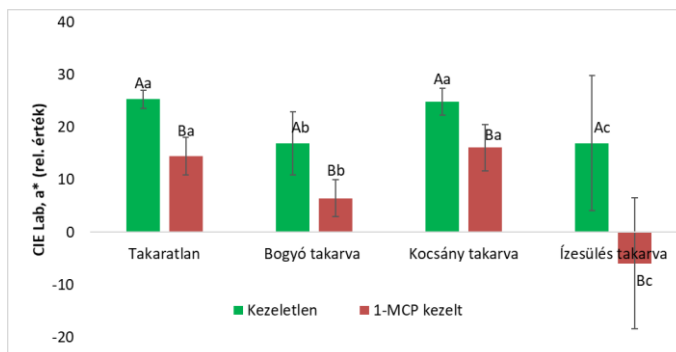
A 21. napon elvégzett statisztikai elemzés azt mutatja (94. ábra), hogy minden takarás esetében szignifikáns hatása volt a kezelésnek. A kezeletlen csoporton belül a takarás nélküli, valamint a kocsány-takart paradicsomok színe között nem volt szignifikáns különbség, a legmagasabb értékeket ezek produkálták. Őket követték a bogyó-takart paradicsomok, majd az ízesülés takart paradicsomok szignifikáns különbséggel. Az 1-MCP kezelt csoportok esetében a legnagyobb értékeket szintén a takarás nélküli, valamint a kocsány-takart paradicsomok produkálták, ezt követték a bogyó-takart paradicsomok szignifikáns különbséggel, majd jelentős különbséggel az ízesülés takart paradicsomok. Megfigyelhető, hogy a tárolás előrehaladtával egyre nagyobb a szórás a KI és GI csoportok esetében. Ennek oka feltételezésem szerint, hogy az ízesülés takarása nem volt tökéletes, a vízvesztésből adódó fonnyadás miatt előfordult, hogy a viasz elvált a felülettől, amit igyekeztem pótolni, ám ezesetben előfordulhatott, hogy az érés megindult és az újabb viaszolás már nem



93. ábra: A GI (fent) és KI (lent) csoportok színeződése a 21. napon

tudta olyan mértékben lassítani a folyamatot, mint azon paradicsomok esetében, ahol meg sem tudott indulni az érési folyamat. Ezt a fényképes dokumentáció is alátámasztja, melyen látszik, hogy egyes paradicsomok teljesen zöldek maradtak, míg mások beérették (93. ábra). Az eredmények alapján világosan látszik, hogy az etilénreceptorok nem az ízesülés

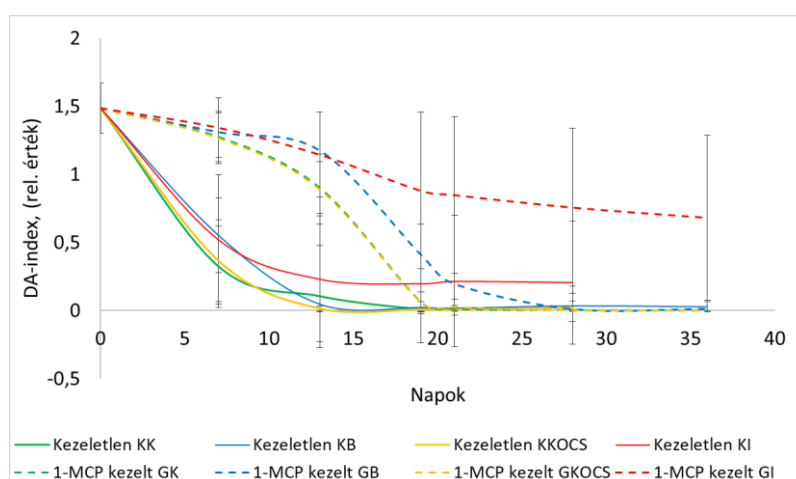
(kocsánycsatlakozás) területén koncentrálnak, hanem sokkal inkább a bőrszövetben (epidermisz). Ezt korábbi kutatások is alátámasztják: az etilén receptorok főként a sejtmembránon (konkrétan az endoplazmatikus retikulumhoz kapcsolódó membránrendszeren) lokalizálódnak, és jellemzően nem az ízesülés területén csoportosulnak (Mata et al., 2018; Zhong, 2007).



94. ábra: Az a^* értékek statisztikai elemzésének eredményei a 21. napon (kéttényezős ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk a takarási módok összehasonlítására szolgálnak. A szignifikáns interakció miatt az egyes csoportokat szintenként hasonlítottam össze nem parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével.

5.7.2 DA-index

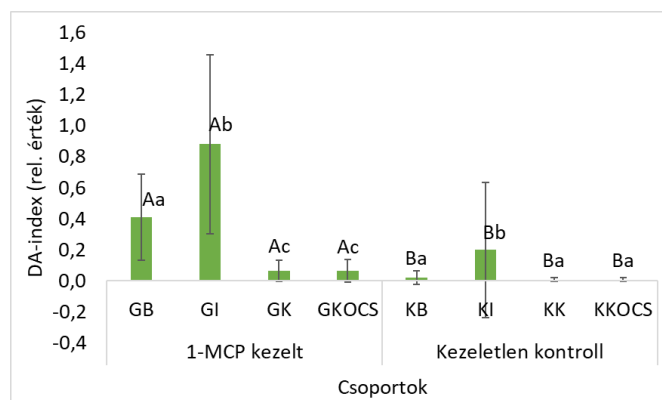
A DA-mérés eredményei alapján (95. ábra) az érésgátlás minden csoportban eredményes volt, azaz szignifikáns különbség volt kimutatható a statisztikai elemzés során (96. ábra). A kezelt csoportok között a legjobbnak az ízesülés-viaszolt paradicsomok bizonyultak, esetükben még 35 nap után is minimális volt a DA-index® érték csökkenése, ezt követte a bogyó-takart csoport. Bár ez csak kismértékben bizonyult jobbnak a másik két csoportnál, a különbség mégis szignifikánsnak adódott. A GK és GKOCs csoportok között nem volt eltérés.



95. ábra: A DA-index® alakulása a VII. kísérlet során (Négy különböző takarás: takaratlan (xK), bogyó (xB), kocsány (xKOCS), ízesülés (xI); két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (Kx), kezelt (Gx))

A kontroll csoportok esetében egyedül a KI, ízesülés-takart csoport különbözött a többitől: ezen csoport DA-index® értékei nagyjából a 13. napig csökkenő tendenciát mutattak, majd a 28.

napig stagnáltak. Ugyanakkor a szórás rendkívül nagy volt, ami ezesetben azt is mutatja, hogy a paradicsomok ebben a csoportban heterogén módon reagáltak a takarásra – egyes termékek teljesen zöldek maradtak, míg mások beértek.

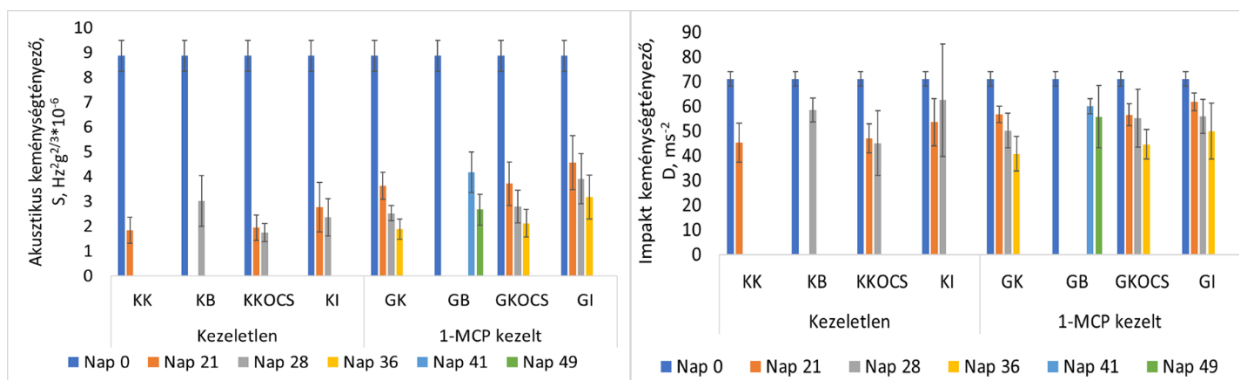


96. ábra: A DA-index® értékek statisztikai elemzésének eredményei a 21. napon (kétfélekező ANOVA) az átlagokkal és varianciákkal. A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek. A nagybetűk a kezelések összehasonlítására, míg a kisbetűk az érettségi állapotok összehasonlítására szolgálnak. A szignifikáns interakció miatt az egyes csoportokat szintenként hasonlítottam össze nem parametrikus Games-Howell post hoc teszt segítségével.

5.7.3 Akusztikus és impakt keménység

Az akusztikus és impakt keménységmérés során nem volt olyan nap, amely során egyszerre az összes csoportot mértem volna (a bogyó takarása miatt azokat a csoportokat csak a viasz eltávolítása után tudtam lemérni), így statisztikai elemzést ezen mérés esetében nem tudtam végezni.

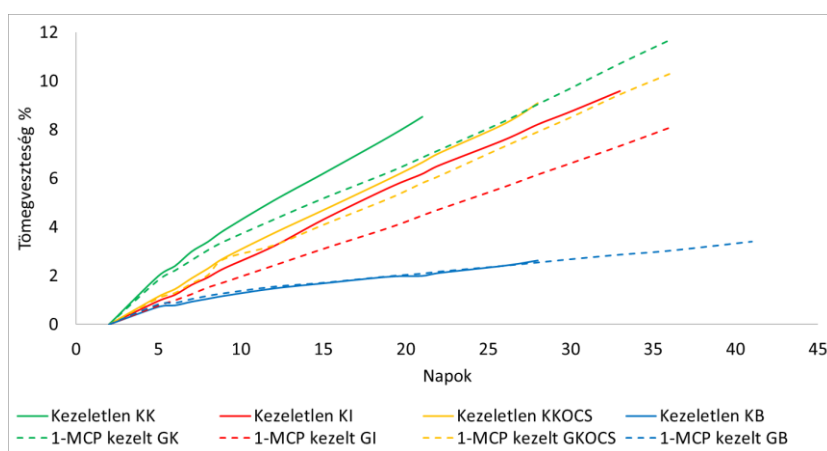
Az adatokból az látszik, hogy a legjobb eredményekkel mind az akusztikus, mind az impakt keménységmérés esetén a bogyó takart minták rendelkeztek (97. ábra). Ez nagy valószínűséggel annak tudható be, hogy ezeknek a paradicsomoknak volt a legkisebb a vízvesztesége. A paradicsombogyó esetében a transzspiráció nem elsősorban a sztómákon keresztül történik, mivel az epidermisz sztómamentes (Shi et al., 2013; Wang et al., 2022). Ehelyett a vízveszteség döntően a kutikulán keresztül történik. Ez a kutikuláris transzspiráció, amely bár kis intenzitású, de folyamatos, és idővel jelentős fontossággal bír a termés minősége szempontjából (Vogg et al., 2004). Emellett egy újabb, célzott kutatás kimutatta, hogy a transzspiráció fő útvonala paradicsombogyón valóban trichomák (szőrök) által létrehozott kutikuláris pórusokon keresztül történik. Ezek a szőrzethez kapcsolódó pórusok lehetőséget teremtenek a víz diffúziójára, így a termés nedvességvesztésének jelentős részét ezen keresztül kell értelmeznünk (Fich et al., 2020). Ezek alapján a vízveszteséget leginkább a bogyó takarása tudta minimalizálni, mely látszik is az adatokon. Ezt követték az ízesülés-takart paradicsomok értékei mind a kezeletlen, mind a SF kezelt csoportok esetében. Ez arra enged következtetni, hogy a sztómákon keresztül is folyik transzspiráció, ám a kis felület miatt ez kevésbé jelentős.



97. ábra: Az akusztikus keménységtényező (S) alakulása (balra) és az impact keménységtényező (D) alakulása (jobbra) a VII. kísérlet során (Négy különböző takarás: takaratlan (xK), bogyó (xB), kocsány (xKOCS), ízesülés (xI); két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (Kx), kezelt (Gx))

5.7.4 Tömegveszteség

Az előzőekben tett megállapításokat alátámasztja a 98. ábra, melyen a tömegveszteségek alakulása látható. A legkisebb tömegvesztesége egységesen a GB és KB csoportoknak volt, ezt követte a GI, majd a KI és a GKOCS csoportok. Ez a sorrend összhangban van azzal a feltételezéssel, hogy a



98. ábra: A %-os tömegveszteség alakulása a VII. kísérlet során (Négy különböző takarás: takaratlan (xK), bogyó (xB), kocsány (xKOCS), ízesülés (xI); két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (Kx), kezelt (Gx))

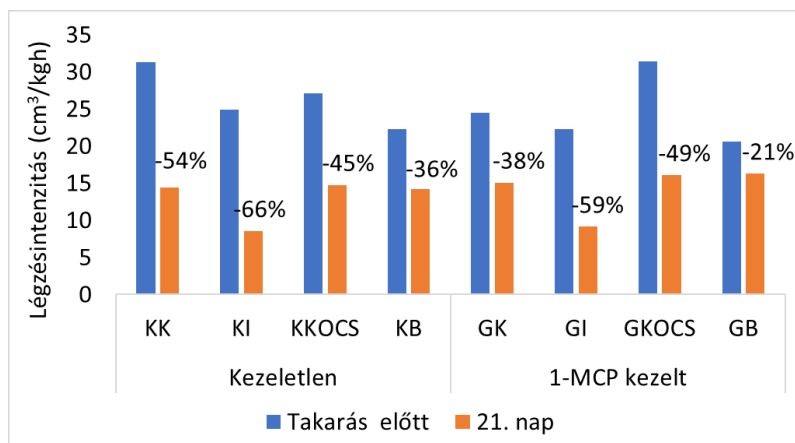
bogyó, illetve az ízesülés letakarása jelentősen korlátozza a transzspirációt, ezáltal csökkenti a vízveszteséget és a fonnyadás mértékét. Különösen a bogyó-takart csoportok esetében mutatkozott meg ez a hatás, ami arra utal, hogy a paradicsom epidermisze és kutikulája, valamint a hozzájuk kapcsolódó pórusok (trichomák) kulcsszerepet játszanak a vízvesztés szabályozásában.

5.7.5 Légzésintenzitás

A légzésintenzitás tekintetében az látható, hogy a KI és GI csoportok légzésintenzitása csökkent a legjobban, 66, illetve 59%-kal. Ezt követte a KK, a GKOCS és a KKOCS csoport 55 és 45 % közötti értékekkel. A legkisebb légzésintenzitás-csökkenést a KB és GB csoportoknál mértem. Ezek az eredmények párhuzamba állíthatóak a VI. kísérletben kapott eredményekkel. Jól látható tehát itt is, hogy a légzésintenzitást több, mint felére csökkentette az ízesülés lezárása, míg a kocsány leviaszolása hasonló hatással bír, csak nehezebb a precíz kivitelezése, így nem tökéletes a zárás. Az, hogy a bogyó-takart csoportok esetében csökkent a legkevesbé a légzésintenzitás

(kevésbé, mint a takaratlan, kontroll csoportok esetében) szintén alátámasztja azt a megállapítást, hogy a paradicsom elsősorban nem a bogyó felületén végzi a gázcserét. Ugyanakkor az, hogy

kevésbé csökkent ezen csoportok légzésintenzitása, mint a kontroll csoportoké, arra enged következtetni, hogy a takarás olyan folyamatokat idézett elő, ami a légzésintenzitást fokozta (99. ábra).



Az etiléntermelésben nem volt kimutatható tendencia, ez nagy valószínűséggel annak tudható be, hogy az etilénmérő érzékenysége nem megfelelő, így a bekövetkező változásokat elfedte a műszer pontatlansága.

99. ábra: A légzésintenzitás alakulása a VII. kísérlet során, a %-os értékek a csökkenés mértékét mutatják (Négy különböző takarás: takaratlan (xK), bogyó (xB), kocsány (xKOCS), ízesülés (xI); két 1-MCP kezelési variáns: kezeletlen (Kx), kezelt (Gx))

5.7.6 A VII. kísérlet eredményeinek összegzése

A kapott eredmények alátámasztják a VI. kísérlet eredményeit, valamint a korábbi kutatásokat, miszerint a paradicsom bőrszövetén nem találhatóak gázcsere-nyílások. A legjobb eredményeket az ízesülés takart paradicsomok esetében kaptam, ezen csoportok esetében volt a legnagyobb a légzésintenzitás-csökkenés és ezek a minták maradtak a legtovább zöldek. A légzésintenzitás esetében a kocsány-takart csoportok is jól teljesítettek. Az elv itt is ugyanaz volt, de a kocsány takarása kissé nehézkes, könnyebben elválik a viasz, így a többi mérés esetében ezek a csoportok nem teljesítettek jobban, mint a takaratlan csoportok. A bogyó-takart csoportok viszont szintén figyelmet igényelnek. A tömegveszteség ezen csoportok esetében volt a legkisebb, ami arra enged következtetni, hogy bár a bőrszövetén nem találhatóak sztómák, ugyanakkor a paradicsom az epidermiszen, valamint az azon található pórusokon keresztül jelentős transzspirációt folytat. Ezzel hozható kapcsolatba az is, hogy ezek a csoportok produkálták a legjobb eredményt az akusztikus és impakt keménységmérés során is. Több mérés esetében is a kezeletlen KB és KI csoportok hasonló eredményeket hoztak, miközben az 1-MCP kezelt GB csoport eredményei elmaradtak a GI csoport eredményeihez képest. Ebből arra következtettek, hogy a paradicsom etilénreceptorai a bőrszövetén találhatóak, így a bogyó-takart csoport esetében nem volt megfelelő az érésgátlás.

6 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Eredményeim azt mutatják, hogy a paradicsom érését és minőségét számos tényező együttesen befolyásolja: a hőmérséklet, az 1-metilciklopropénes (SmartFresh™) kezelés, a mechanikai és hidegkárosodás, valamint a légzés és az etiléntermelés változásai egyaránt fontos szerepet játszanak. Az I. kísérlet eredményei alapján megállapítható, hogy a 625 ppb koncentráció elegendőnek bizonyult az érés hatékony gátlásához. Ez igazolja, hogy megfelelő dózis alkalmazásával az érési folyamat szignifikánsan késleltethető, különösen a klimaktérium előtti érettségi stádiumokban. A II. kísérlet eredményei tovább finomították a képet, rávilágítva arra, hogy az érettségi állapot megválasztása kulcsfontosságú, igazán eredményes érésgátlást csak a klimaktérium előtt álló paradicsomok esetében tudunk elérni, továbbá hogy a Polár Minősítő Rendszer (PQS) és a digitális képfeldolgozás megbízhatóan alkalmazható az érettségi stádiumok objektív meghatározására.

A hidegkár vizsgálata (III. kísérlet) rávilágított arra, hogy a 2 °C-on történő tárolás bár lassítja az anyagcsere-folyamatokat, egyértelmű hidegkárosodáshoz vezet, különösen a korábbi érettségi stádiumokban, ám a hidegkár mértékét jelentősen befolyásolja a hőmérséklet, valamint a hatásidő is. Ez a folyamat sejtfal- és membránkárosodással, stressz-etilén termeléssel és jellegzetes felszíni tünetek megjelenésével jár. Az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés 2 °C-on nem bizonyult hatékonynak, sőt, bizonyos jelek szerint még gyorsította is a hidegkárosodás kialakulását, ezért e két technológia kombinált alkalmazása nem javasolt. A 15 °C-on tárolt minták esetében viszont az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés szignifikánsan lassította az érési folyamatot, amit mind a légzésintenzitás, mind az etiléntermelés és a keménységmérés értékeinek változása alátámasztott.

A IV. kísérletben vizsgált mikrobuborékos 1-MCP kezelés sajnos nem hozott átütő eredményeket, a hagyományos gázos kezelés hatékonyságát nem sikerült elérni. Bár bizonyos kezelések átmenetileg mérsékeltek a légzésintenzitást, hosszú távon nem biztosítottak tartós érésgátlást. Az ultrahanggal kombinált mikrobuborékos kezelések ígéretesnek tűntek, hiszen kezdetben hatékonyabban csökkentették a légzésintenzitást, de a hatás nem maradt fenn. Ez alapján kijelenthető, hogy a technológia továbbfejlesztése és optimalizálása szükséges ahhoz, hogy versenyképes alternatívát jelenthessen a hagyományos 1-MCP kezelés mellett.

Az V. kísérlet (mechanikai károsodás vizsgálata) igazolta, hogy az ütdések hatása az érésre és minőségre egyértelmű, különösen az érettebb stádiumokban. A légzésintenzitás és etiléntermelés megnövekedése a stresszre adott válaszként jelentkezett, amit korábbi szakirodalmi adatok is megerősítenek. Az impakt keménységmérés módszere érzékenyebbnek bizonyult a lokális sérülések detektálására, mint az akusztikus keménység, ami a módszerek különböző érzékenységeire, valamint a globális (akusztikus) és pontszerű (impakt) mérés közti különbségekre

utal. A klorofill-fluoreszcencia vizsgálatok ígéretesnek mutatkoztak a sérülések korai kimutatásában, így e módszer további fejlesztése jelentős gyakorlati haszonnal járhat.

A VI. és VII. kísérletek során a légzés intenzitásának takarásos vizsgálata rávilágított arra, hogy a paradicsombogyó epidermiszén gyakorlatilag nincs sztóma, azaz légcsere nyílás, így a gázcsere elsősorban a kocsányon és annak a bogyóhoz történő ízesülésén keresztül zajlik. Ez magyarázza, hogy az ízesülés viaszolása vagy takarása drámai mértékben csökkentette a légzésintenzitást, míg a bogyó felületének takarása alig gyakorolt hatást. Eredményeim összhangban állnak a szakirodalmi adatokkal, és új bizonyítékot szolgáltatnak a paradicsom gázcsere-felületeinek meghatározásához. Az ízesülés viaszolása kombinálva az 1-MCP (SmartFresh™) kezeléssel a leghatékonyabbnak bizonyult az érésgátlásban, ami új lehetőségeket nyithat a postharvest technológiák fejlesztésében.

Összességében megállapítható, hogy:

- Az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés hatékonyan alkalmazható paradicsomon, de az alkalmazás hatása érettségfüggő.
- A 2 °C-os hűtött körülmények közötti tárolás egyértelműen hidegkárosodáshoz vezet, különösen a korai érettségi állapotú paradicsomok esetében, melyet az 1-MCP kezelés tovább súlyosbít.
- A mikrobuborékos technológia jelenlegi formájában nem helyettesíti a hagyományos 1-MCP kezelést, de fejlesztési potenciállal rendelkezik.
- A paradicsom esetében a gázcsere fő helye a kocsány és az ízesülés területe, míg transpirációja főleg a bogyón zajlik, ami új lehetőséget adhat célzott postharvest beavatkozásokra.

Javaslatok:

- Az 1-MCP (SmartFresh™) kezelést célszerű hűtött körülmények között, 10-15 °C-on, klimaktérium előtti stádiumban alkalmazni a leghatékonyabb érésgátlás érdekében.
- A 10 °C alatti tárolást hosszú távon kerülni kell, főleg éretlenebb paradicsomok esetében, mivel hidegkárosodást okozhat. Ugyanakkor szűk feldolgozóipari keresztmetszet esetében kompromisszumos megoldást jelenthet, hiszen a hidegkár jelei 2°C-on csak nagyjából 2 hét tárolás után mutatkoztak, mely magasabb hőmérsékleten akár hosszabb időtartam is lehet. A későbbiekben célszerű további hőmérsékleteket is vizsgálni a 2-10°C közötti tartományban a hidegkárosodás küszöbértékének meghatározása céljából, hiszen elképzelhető, hogy találunk olyan hőmérsékletet, melyen a hidegkár még nem jelentkezik, viszont érezhetően lassulnak az anyagcserefolyamatok. Érdekes lenne a paradicsom lipidfrakciójának fázisváltozási hőmérsékletét megvizsgálni differenciális pásztázó kalorimetria segítségével.

- A mikrobuborékos technológia esetében további kutatás szükséges az optimális 1-MCP adagolás, kezelési idő és ultrahang-paraméterek meghatározására.
- A klorofill fluoreszcenciás mérések esetében jelentős potenciált látok a korai sérülésdetektálás kapcsán. A műszer alkalmas lehet a paradicsomfeldolgozás során alkalmazott manipulációs berendezések roncsoló hatásainak, vagy a különböző csomagolási módok megfelelőségének vizsgálatára.
- A paradicsom ízesülésének célzott oxigén-átnemeresztő lezárása kombinálva az 1-MCP kezeléssel a jövőben hatékony és gazdaságos érésgátló technológiává válhat, amely a frisspiaci paradicsom eltarthatóságát jelentősen növelheti.
- A PQS módszer jó alternatíva lehet a későbbiekben a hagyományos érésvizsgálati módszerek kiváltására, mivel sokkal egyszerűbb, olcsóbb és esetenként gyorsabb technológia.

7 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Megállapítottam, hogy a 24 órás 1-metilciklopropénes (SmartFresh™) kezelés 625 ppb koncentrációban hatékonyan növelte a paradicsomok tárolhatóságát 15 °C-on, minden vizsgált érettségi állapotban, a 14 napos tárolási időszak során. Teljes érésgátlás volt megfigyelhető a klimaktérium előtti stádiumban lévő paradicsomoknál (CTIFL 1–2), míg az érésbe fordult minták esetében (CTIFL 3–9) a kezelés részleges érésgátló hatást fejtett ki. A teljesen érett (CTIFL 10–12) paradicsomoknál ugyanakkor elsősorban a romlási folyamatok lassulása volt jellemző.
2. A Polár Minősítő Rendszer (PQS) alkalmazásával igazoltam, hogy a digitális képfeldolgozással nyert színparaméterek erős korrelációt mutatnak a hagyományos színmérési módszerekkel (a^* érték; $r=0,958$), és a klorofill tartalommal összefüggő DA-index® értékkel ($r=0,904$), így a rendszer alkalmas a paradicsom érettségi állapotának objektív meghatározására.
3. Megállapítottam, hogy az F_m értékek csökkenése már a 40 cm magasságból ejtett paradicsomok esetében – mind az ép, mind a sérült oldalon – az ejtést követő első napon kimutatható volt. Ez alapján a klorofill-fluoreszcenciás mérések alkalmasnak bizonyulnak a mechanikai sérülések korai detektálására paradicsom esetében.
4. Megállapítottam, hogy a 2°C-on tárolt paradicsom esetében a 24 órás 1-metilciklopropénes (SmartFresh™) kezelés 625ppb koncentrációban növelte a hidegkárosodás tüneteinek előfordulását és súlyosságát a 2°C-on tárolt kontroll csoporthoz képest.
5. Megállapítottam, hogy a paradicsom fő gázcserefelülete a kocsány és az ízesülés területe, mivel ezen részek lezárása a légzésintenzitás több mint felére csökkenését eredményezte, míg a bogyó felszínének takarása érdemi hatással nem bírt.
6. Igazoltam, hogy a paradicsomok 15 °C-on, 14 napon át zajló színeződése leírható szigmoid modellel, amely lehetővé teszi az a^* szintényező adott időpontra (napra) vonatkozó előrejelzését. Ez a megközelítés kritikus jelentőségű a termésbecslés és a betakarítás időzítésének tervezése szempontjából.

8 ÖSSZEFOGLALÁS

A paradicsom (*Solanum lycopersicum* L.) az egyik legfontosabb zöldségnövény világszerte, amely frisspiaci és ipari feldolgozásra egyaránt jelentős mennyiségben kerül forgalomba. Klimaktérikus terményként utóérése és rövid eltarthatósága komoly kihívást jelent a termelők, kereskedők és fogyasztók számára. Az utóérés szabályozása, a minőségmegőrzés, valamint a hideg- és mechanikai károsodások minimalizálása napjainkban kulcsfontosságú kutatási terület. A modern postharvest technológiák közül az 1-metil-ciklopropén (1-MCP, kereskedelmi nevén SmartFresh™) alkalmazása az egyik leghatékonyabb módszer az érésgátlásra, azonban a kezelések optimalizálása, valamint alternatív bejuttatási módok kidolgozása még további vizsgálatokat igényel.

Doktori kutatásom célja az volt, hogy átfogó képet nyújtsak az 1-MCP kezelés alkalmazhatóságáról, a tárolási hőmérséklet és a mechanikai stressz hatásairól, valamint a paradicsom gázcseréjének sajátosságairól. Ennek érdekében több kísérletet végeztem különböző érettségi stádiumú paradicsomokon, különböző kezelési módszerek mellett. A vizsgálatok során a hagyományos tárolótéri 1-MCP (SmartFresh™) kezelést hasonlítottam össze alternatív bejuttatási módszerekkel, mint a mikrobuborékos és ultrahangos kezelések. Emellett elemeztem a hidegkárosodás élettani és vizuális jeleit, a mechanikai behatások következményeit, valamint a paradicsombogyó különböző részeinek gázcserében betöltött szerepét. A vizsgálatokhoz többféle roncsolásmentes módszert alkalmaztam, így színmérést reflektométerrel és PQS rendszerrel, digitális képfeldolgozást, DA-index® meghatározást, légzésintenzitás- és etilénméréseket, akusztikus és impakt keménységvizsgálatokat, valamint klorofill-fluoreszcencia méréseket. Az élettani folyamatok pontosabb megértéséhez tömegvesztiséget is mértem, illetve fényképes dokumentációval követtem nyomon a vizuális változásokat.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az 1-MCP kezelés hatékonysága nagymértékben függ a paradicsom érettségi állapotától. A klimaktérium előtti zöldérett és átmeneti stádiumban volt a leghatékonyabb, míg az előrehaladottabb érettségi állapotban a kezelés hatása csökkent. A PQS rendszer és a digitális képfeldolgozás alkalmazása igazolta, hogy ezen módszerek pontosan és megbízhatóan képesek jellemezni az érési folyamatot, és akár alternatívát is nyújthatnak a hagyományos színmérési technológiákkal szemben. A hidegkárosodás vizsgálata során bebizonyosodott, hogy bár a 2 °C-on történő tárolás rövid távon lassítja az érésfolyamatokat, hosszabb távon (16–20 nap után) jelentős minőségi problémákat okoz. A légzésintenzitás és etiléntermelés növekedése, az akusztikus keménység változása és a barna foltok megjelenése egyértelműen a hidegkárosodás jeleként értékelhetők. Az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés és az alacsony hőmérséklet kombinálása nem hozott előnyt, sőt a hidegkárosodás tünetei hamarabb és

erőteljesebben jelentkeztek. Ez arra utal, hogy az 1-MCP (SmartFresh™) kezelés és a túl alacsony hőmérséklet együttes alkalmazása kifejezetten kerülendő. A klorofill fluoreszcencia mérések a vártnál kevésbé bizonyultak hasznosnak a hidegkárosodás korai előrejelzésére, így ezen a téren további kutatások szükségesek, ugyanakkor a színméreken alapuló szigmoid modell ígéretes módszernek tűnik az érési folyamatok nyomon követésére. A mikrobuborékos és ultrahangos kezelések vizsgálata azt mutatta, hogy bár bizonyos mértékben befolyásolják a légzésintenzitást, nem eredményeznek tartós érésgátlást. Ez arra utal, hogy az alkalmazott kezelési idők és koncentrációk mellett a paradicsom nem kapott elegendő mennyiségű hatóanyagot ahhoz, hogy a teljes érési folyamatot befolyásolja. Ugyanakkor a kísérletek rámutattak arra, hogy ezen alternatív módszerekben van potenciál, azonban további fejlesztést és optimalizálást igényelnek, mielőtt a gyakorlatban is alkalmazhatók lennének. Az ejtővizsgálat eredményei alapján a kontroll és az ejtett minták minden mérési módszerrel jól elkülöníthetők voltak, ugyanakkor a színmérés, a DA-index® és az akusztikus keménység nem tudta megkülönböztetni az ejtési magasságokat vagy az ép és sérült oldalt, ami arra utal, hogy ezek a változások inkább lokálisan jelentkeztek. Ezzel szemben a légzésintenzitás, az etiléntermelés és a klorofill fluoreszcencia érzékenyen jelezte a sérülés mértékét: mind a légzés, mind az etiléntermelés szignifikánsan és az ejtési magassággal arányosan nőtt, már az első napon kimutathatóan. A klorofill fluoreszcenciában szintén már az első nap jelentős eltérések látszottak, a sérült oldalon az Fm értékek 75–80%-kal, míg az ép oldalon 55–60%-kal csökkentek. Ez azt mutatja, hogy ez a módszer különösen ígéretes lehet a mechanikai sérülések korai detektálására. A takarásos légzésvizsgálatok új, eddig kevésbé vizsgált területet érintettek. A kísérletek igazolták, hogy a paradicsom légzésintenzitása döntően a kocsány és az ízesülés felületéhez köthető, míg a bogyó epidermisze minimális gázcserére képes. Ez az eredmény magyarázatot ad arra is, hogy a bogyó takarása miért nem befolyásolta számottevően a légzésintenzitást, míg a kocsány vagy az ízesülés lezárása jelentős csökkenést eredményezett. Ezzel összhangban a kocsány légzésintenzitása nagyságrendekkel magasabb volt, mint magáé a bogyóé, amely megerősíti a kocsány központi szerepét a paradicsom élettani folyamataiban.

Összességében elmondható, hogy a kutatás hozzájárult a paradicsom utóérési folyamatait befolyásoló tényezők mélyebb megértéséhez. Az eredmények gyakorlati szempontból is jelentősek, mivel rávilágítanak az 1-MCP kezelés optimális alkalmazási körülményeire, a hűtve tárolás korlátaira, a mechanikai károsodások következményeire, valamint a paradicsom gázcseréjének sajátosságaira. Az új eredmények és módszertani tapasztalatok hozzájárulnak ahhoz, hogy a jövőben hatékonyabb postharvest technológiák kerüljenek kidolgozásra a paradicsom és más klimaktérikus gyümölcsök eltarthatóságának növelése érdekében.

SUMMARY

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most important vegetable crops worldwide, widely produced for both fresh market and industrial processing. As a climacteric fruit, its postharvest ripening and short shelf life pose significant challenges for producers, traders, and consumers alike. The regulation of postharvest ripening, the preservation of quality, and the reduction of chilling and mechanical injuries have therefore become key areas of current research. Among modern postharvest technologies, the application of 1-methylcyclopropene (1-MCP, commercially known as SmartFresh) is one of the most effective methods for delaying ripening; however, the optimization of treatments and the development of alternative methods still require further investigation.

The aim of my doctoral research was to provide a comprehensive overview of the applicability of 1-MCP (SmartFresh™) treatment, the effects of storage temperature and mechanical stress, and the specific characteristics of respiration in tomato fruit. To this end, I conducted several experiments on tomatoes at different ripening stages, applying various treatment methods. In my studies, I compared conventional in-storage 1-MCP (SmartFresh™) treatment with alternative methods, such as microbubble and ultrasonic applications. In addition, I analyzed the physiological and visual symptoms of chilling injury, the consequences of mechanical impacts, and the role of different fruit parts in respiration. A wide range of non-destructive measurement techniques were used, including color measurement with a reflectometer and PQS system, digital image analysis, DA-index® determination, respiration rate and ethylene measurements, acoustic and impact firmness testing, as well as chlorophyll fluorescence analysis. To better understand the physiological processes, I also measured weight loss and used photographic documentation to monitor visual changes.

The results demonstrated that the efficacy of 1-MCP treatment strongly depends on the ripening stage of the tomato. The treatment proved to be most effective in the pre-climacteric green and transitional stages, while its impact decreased at more advanced ripening stages. The use of the PQS system and digital image analysis confirmed that these methods can accurately and reliably characterize the ripening process, potentially offering an alternative to conventional color measurement techniques. In the study of chilling injury, it was found that although storage at 2 °C slowed ripening in the short term, it caused significant quality deterioration after 16–20 days. The increase in respiration rate and ethylene production, changes in acoustic firmness, and the appearance of brown spots were all clear indicators of chilling injury. The combination of SmartFresh™ treatment and low temperature provided no benefits; in fact, chilling symptoms appeared earlier and more severely. This indicates that the simultaneous application of 1-MCP

(SmartFresh™) and excessively low temperatures should be avoided. Chlorophyll fluorescence measurements were less effective than expected for the early detection of chilling injury, suggesting the need for further studies in this area; however, the sigmoidal model based on color measurement appears to be a promising tool for monitoring the ripening process.

The investigation of microbubble and ultrasonic treatments revealed that although these methods affected respiration intensity to some extent, they did not result in sustained ripening inhibition. This suggests that under the applied treatment durations and concentrations, the tomatoes did not receive a sufficient amount of active compound to significantly influence the entire ripening process. Nevertheless, these experiments highlighted the potential of such alternative application methods, which require further development and optimization before practical implementation.

The drop-impact experiments showed that control and dropped samples could be clearly distinguished using all measurement techniques; however, color measurement, DA-index, and acoustic firmness were not sensitive enough to differentiate between drop heights or between intact and damaged sides, indicating that the observed changes were localized. In contrast, respiration rate, ethylene production, and chlorophyll fluorescence responded sensitively to the degree of damage: both respiration and ethylene production increased significantly and proportionally to drop height, and changes were detectable as early as the first day. Chlorophyll fluorescence also showed marked differences on day one, with F_m values decreasing by 75–80% on the damaged side and 55–60% on the intact side, suggesting that this method is particularly promising for early detection of mechanical injuries.

The covered respiration tests explored a relatively unstudied aspect of tomato physiology. The experiments confirmed that the respiration activity of tomatoes is mainly associated with the peduncle and stem scar regions, while the fruit epidermis exhibits minimal gas exchange capacity. This finding explains why covering the fruit surface did not significantly affect respiration intensity, whereas sealing the peduncle or stem scar caused a substantial reduction. Accordingly, the respiration intensity of the peduncle was orders of magnitude higher than that of the fruit itself, reinforcing its central role in the physiological processes of tomatoes.

Overall, this research contributes to a deeper understanding of the factors influencing postharvest ripening in tomatoes. The findings have practical relevance, as they highlight the optimal conditions for 1-MCP application, the limitations of cold storage, the consequences of mechanical damage, and the specific characteristics of tomato gas exchange. The newly obtained results and methodological insights may support the development of more efficient postharvest technologies in the future, aimed at extending the shelf life of tomatoes and other climacteric fruits.

9 MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

- Aan, D., Wiratni, W., Tontowi, A., Indarto, I., Iriawan, A.G., 2015. The Implementation of a Developed Microbubble Generator on the Aerobic Wastewater Treatment. *Int. J. Technol.* 6, 924. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i6.1696>
- Abdelhamid, M.A., Sudnik, Y., Alshinayyin, H.J., Shaaban, F., 2021. Non-destructive method for monitoring tomato ripening based on chlorophyll fluorescence induction. *J. Agric. Eng.* 52. <https://doi.org/10.4081/jae.2020.1098>
- Afisna, L.P., Juwana, W.E., Indarto, I., Deendarlianto, D., Nugroho, F.M., 2017. Performance of Porous-Venturi Microbubble Generator for Aeration Process. *J. Energy Mech. Mater. Manuf. Eng.* 2, 73–80. <https://doi.org/10.22219/jemmmme.v2i2.5054>
- Agarwal, A., Ng, W.J., Liu, Y., 2011. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere* 84, 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Agati, G., Traversi, M.L., Cerovic, Z.G., 2008. Chlorophyll fluorescence imaging for the noninvasive assessment of anthocyanins in whole grape (*Vitis vinifera* L.) bunches. *Photochem. Photobiol.* 84, 1431–1434. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2008.00424.x>
- Alba, R., Payton, P., Fei, Z., McQuinn, R., Debbie, P., Martin, G.B., Tanksley, S.D., Giovannoni, J.J., 2005. Transcriptome and selected metabolite analyses reveal multiple points of ethylene control during tomato fruit development. *Plant Cell* 17, 2954–2965. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.036053>
- Al-Dairi, M., Pathare, P., Al-Yahyai, R., 2024. Bruise Damage Susceptibility of Tomato. pp. 173–186. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7096-4_9
- Alexander, L., Grierson, D., 2002. Ethylene biosynthesis and action in tomato: A model for climateric fruit ripening. *J. Exp. Bot.* 53, 2039–55. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf072>
- Allaga, J., 2014. Növényélettan, in: Növénytan-Növényélettan. Kaposvári Egyetem – Pannon Egyetem – Szegedi Gabonakutató Nonprofit Kft.
- Allende, A., Desmet, M., Vanstreels, E., Verlinden, B.E., Nicolaï, B.M., 2004. Micromechanical and geometrical properties of tomato skin related to differences in puncture injury susceptibility. *Postharvest Biol. Technol.* 34, 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.05.007>
- Andrews, J., 1995. The climacteric respiration rise in attached and detached tomato fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 6, 287–292. [https://doi.org/10.1016/0925-5214\(95\)00013-V](https://doi.org/10.1016/0925-5214(95)00013-V)
- Arah, I., Kumah, E.K., Anku, E.K., Amaglo, H., 2015. An Overview of Post-Harvest Losses in Tomato Production in Africa: Causes and Possible Prevention Strategies. *J. Biol. Agric. Healthc.* 5, 78–88.
- Arazuri, S., Jarén, C., Arana, J.I., Pérez De Ciriza, J.J., 2007. Influence of mechanical harvest on the physical properties of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *J. Food Eng.* 80, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.008>
- Arias, E., López-Buesa, P., Oria, R., 2009. Extension of fresh-cut “Blanquilla” pear (*Pyrus communis* L.) shelf-life by 1-MCP treatment after harvest. *Postharvest Biol. Technol.* 54, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.04.009>
- Arief, M.A.A., Kim, H., Kurniawan, H., Nugroho, A.P., Kim, T., Cho, B.-K., 2023. Chlorophyll Fluorescence Imaging for Early Detection of Drought and Heat Stress in Strawberry Plants. *Plants* 12, 1387. <https://doi.org/10.3390/plants12061387>
- Asrey, R., Sasikala, C., Singh, D., 2012. Combinational impact of *Debaryomyces hansenii* bioagent and 1-methylecyclopropen (1-MCP) on shelf-life and quality attributes of Kinnow mandarin. *HortFlora Res. Spectr.* 1, 103–109.

- Assar, E.A., Vidalle, M.C., Chopra, M., Hafizi, S., 2016. Lycopene acts through inhibition of I κ B kinase to suppress NF- κ B signaling in human prostate and breast cancer cells. *Tumor Biol.* 37, 9375–9385. <https://doi.org/10.1007/s13277-016-4798-3>
- Atanda, S., Pessu, P.O., Agoda, S., Isong, I.U., Ikotun, I., 2011. The concepts and problems of post-harvest food losses in perishable crops. *Afr. J. Food Sci.* 5, 603–613.
- Azuma, T., Otomo, K., Kunitou, M., Shimizu, M., Hosomaru, K., Mikata, S., Mino, Y., Hayashi, T., 2019. Removal of pharmaceuticals in water by introduction of ozonated microbubbles. *Sep. Purif. Technol.* 212, 483–489. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.059>
- Baker, N.R., 2008. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- Baldwin, E., Scott, J., Shewmaker, C., Schuch, W., 2000. Flavor Trivia and Tomato Aroma: Biochemistry and Possible Mechanisms for Control of Important Aroma Components. *HortScience* 35, 1013–1022. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.6.1013>
- Barbagallo, R.P., Oxborough, K., Pallett, K.E., Baker, N.R., 2003. Rapid, Noninvasive Screening for Perturbations of Metabolism and Plant Growth Using Chlorophyll Fluorescence Imaging. *Plant Physiol.* 132, 485–493. <https://doi.org/10.1104/pp.102.018093>
- Barrett, D.M., Beaulieu, John C., and Shewfelt, R., 2010. Color, Flavor, Texture, and Nutritional Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables: Desirable Levels, Instrumental and Sensory Measurement, and the Effects of Processing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 50, 369–389. <https://doi.org/10.1080/10408391003626322>
- Barry, C., Giovannoni, J.J., 2006. Ripening in the tomato Green-ripe mutant is inhibited by ectopic expression of a protein that disrupts ethylene signaling. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103, 7923–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602319103>
- Barry, C.S., Giovannoni, J.J., 2007. Ethylene and Fruit Ripening. *J. Plant Growth Regul.* 26, 143–159. <https://doi.org/10.1007/s00344-007-9002-y>
- Barsan, C., Sanchez-Bel, P., Rombaldi, C., Egea, I., Rossignol, M., Kuntz, M., Zouine, M., Latché, A., Bouzayen, M., Pech, J.-C., 2010. Characteristics of the tomato chromoplast revealed by proteomic analysis. *J. Exp. Bot.* 61, 2413–31. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq070>
- Baswal, A.K., Dhaliwal, H.S., Singh, Z., Mahajan, B.V.C., Gill, K.S., 2020. Postharvest application of methyl jasmonate, 1-methylcyclopropene and salicylic acid extends the cold storage life and maintain the quality of ‘Kinnow’ mandarin (*Citrus nobilis* L. X *C. deliciosa* L.) fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 161, 111064. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111064>
- Baswal, A.K., Ramezani, A., 2021. 1-methylcyclopropene potentials in maintaining the postharvest quality of fruits, vegetables, and ornamentals: A review. *J. Food Process. Preserv.* 45, e15129. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15129>
- Bates, D., Patist, A., 2010. Industrial applications of high power ultrasonics in the food, beverage and wine industry, in: Doona, C.J., Kustin, K., Feecherry, F.E. (Eds.), *Case Studies in Novel Food Processing Technologies*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, pp. 119–138. <https://doi.org/10.1533/9780857090713.2.119>
- Batu, A., 2004. Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes. *J. Food Eng.* 61, 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00141-9)
- Batu, A., 1995. Controlled and modified atmosphere storage of tomatoes (PhD Dissertation). Cranfield University, United Kingdom.
- Bayçu, G., Moustaka, J., Gevrek, N., Moustakas, M., 2018. Chlorophyll Fluorescence Imaging Analysis for Elucidating the Mechanism of Photosystem II Acclimation to Cadmium Exposure in the Hyperaccumulating Plant *Noccaea caerulescens*. *Materials* 11, 2580. <https://doi.org/10.3390/ma11122580>
- Bellincontro, A., Fardelli, A., Santis, D.D., Botondi, R., Mencarelli, F., 2006. Postharvest ethylene and 1-MCP treatments both affect phenols, anthocyanins, and aromatic quality of Aleatico

- grapes and wine. *Aust. J. Grape Wine Res.* 12, 141–149. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2006.tb00054.x>
- Beno-Moualem, D., Gusev, L., Dvir, O., Pesis, E., Meir, S., Lichter, A., 2004. The effects of ethylene, methyl jasmonate and 1-MCP on abscission of cherry tomatoes from the bunch and expression of endo-1,4- β -glucanases. *Plant Sci.* 167, 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.016>
- Bergougnoux, V., 2014. The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnol. Adv.* 32, 170–189. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.11.003>
- Bertin, N., 2005. Analysis of the Tomato Fruit Growth Response to Temperature and Plant Fruit Load in Relation to Cell Division, Cell Expansion and DNA Endoreduplication. *Ann. Bot.* 95, 439–447. <https://doi.org/10.1093/aob/mci042>
- Biale, J.B., Young, R.E., 1981. Respiration and ripening in fruit – retrospect and prospect., in: *Recent Advances in the Biochemistry of Fruit and Vegetables*. Academic, New York, NY, pp. 1–39.
- Blankenship, S.M., Dole, J.M., 2003. 1-Methylcyclopropene: a review. *Postharvest Biol. Technol.* 28, 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00246-6)
- Boross, M., 1956. A nagybudapesti és pestkörnyéki paradicsomkultúra gazdasági és néprajzi vizsgálata. *Néprajzi Ért.* XXXVIII., 129–160.
- Bourne, M.C., 2002. *Food Texture and Viscosity*, 2. ed. Academic Press, New York, USA.
- Brandt, S., 2007. A termesztési körülmények és fajta hatása a paradicsom beltartalmi értékeire (Doktori értekezés). Szent István Egyetem, Gödöllő.
- Bresson, J., Vasseur, F., Dauzat, M., Koch, G., Granier, C., Vile, D., 2015. Quantifying spatial heterogeneity of chlorophyll fluorescence during plant growth and in response to water stress. *Plant Methods* 11, 23. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0067-5>
- Brodribb, T.J., Skelton, R.P., McAdam, S.A.M., Bienaimé, D., Lucani, C.J., Marmottant, P., 2016. Visual quantification of embolism reveals leaf vulnerability to hydraulic failure. *New Phytol.* 209, 1403–1409. <https://doi.org/10.1111/nph.13846>
- Buschmann, C., Langsdorf, G., Lichtenthaler, H., 2009. Fluorescence: The blue, green, red and far-red fluorescence signatures of plant tissues, their multicolour fluorescence imaging and application for agrofood assessment, in: Zude, M. (Ed.), *Optical Monitoring of Fresh and Processed Agricultural Crops—Basics and Applications for a Better Understanding of Non-Destructive Sensing*. Taylor&Francis Group, CRC Press, Boca Raton, pp. 272–319.
- Butcaru, A.C., 2021. POST-HARVEST MONITORING OF PEAR FRUIT QUALITY PARAMETERS USING DA-METER. *Ann. Univ. Craiova Ser. Biol. Hortic. Food Prod. Process. Technol. Environ. Eng.* 26, 21–26. <https://doi.org/10.52846/bhfe.26.2021.03>
- Butcaru, A.C., Matache, R., Mihai, C.A., Asănică, A.C., Hoza, D., Stănică, F., 2021. CORRELATIONS BETWEEN FRUIT QUALITY PARAMETERS AND DA-METER INDEX IN SEVERAL APPLE CULTIVARS. *Ann. Univ. Craiova Ser. Biol. Hortic. Food Prod. Process. Technol. Environ. Eng.* 26, 27–32. <https://doi.org/10.52846/bhfe.26.2021.04>
- Butler, W.L., 1978. Energy Distribution in the Photochemical Apparatus of Photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Biol.* 29, 345–378. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.29.060178.002021>
- Calegario, F.F., Cosso, R.G., Almeida, F.V., Vercesi, A.E., Jardim, W.F., 2001. Determination of the respiration rate of tomato fruit using flow analysis. *Postharvest Biol. Technol.* 22, 249–256. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00096-5)
- Cantwell, M., 2010. Optimum procedures for ripening tomatoes. *Fruit Ripening Ethyl. Manag. Postharvest Hortic. Ser.* 9 106–116.
- Centeno, D., Osorio, S., Nunes-Nesi, A., Carneiro, R., Araújo, W., Steinhauser, M.-C., Michalska, J., Rohrmann, J., Geigenberger, P., Oliver, S., Stitt, M., Carrari, F., Rose, J., Fernie, A., 2011. Malate Plays a Crucial Role in Starch Metabolism, Ripening, and Soluble Solid Content of Tomato Fruit and Affects Postharvest Softening. *Plant Cell* 23, 162–84. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.072231>

- Chaerle, L., Lenk, S., Hagenbeek, D., Buschmann, C., Van Der Straeten, D., 2007. Multicolor fluorescence imaging for early detection of the hypersensitive reaction to tobacco mosaic virus. *J. Plant Physiol.* 164, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.01.011>
- Cheeke, J.D.N., Cheeke, J.D.N., 2010. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420042139>
- Chen, M., Blankenship, R.E., 2011. Expanding the solar spectrum used by photosynthesis. *Trends Plant Sci.* 16, 427–431. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.03.011>
- Chen, T., Qin, G., Tian, S., 2020. Regulatory network of fruit ripening: current understanding and future challenges. *New Phytol.* 228, 1219–1226. <https://doi.org/10.1111/nph.16822>
- Choi, H.-S., Jung, S.-K., 2014. Effect of Treatment Time of 1-MCP on Ripening of ‘Fuji’ Apples Stored at Low and Room Temperature for a Long Period. *J. Food Nutr. Res.* 2, 617–620. <https://doi.org/10.12691/jfnr-2-9-14>
- Ciscato, M., Sowinska, M., VEN, M., Heisel, F., Deckers, T., Bonany, J., Valcke, R., 2008. Fluorescence imaging as a diagnostic tool to detect physiological disorders during storage of apples. *Acta Hortic.* 553. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.553.119>
- Collins, E., Bowyer, C., Tsouza, A., Chopra, M., 2022. Tomatoes: An Extensive Review of the Associated Health Impacts of Tomatoes and Factors That Can Affect Their Cultivation. *Biology* 11, 239. <https://doi.org/10.3390/biology11020239>
- Costa, G., Noferini, M., Fiori, G., 2007. Method and apparatus for determining quality of fruit and vegetable products. WO2007017732A2.
- Costamagna, F., Giordani, L., Costa, G., Noferini, M., 2013. USE OF AD INDEX TO DEFINE HARVEST TIME AND CHARACTERIZE RIPENING VARIABILITY AT HARVEST IN “GALA” APPLE. *Acta Hortic.* 117–123. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.998.12>
- Croce, R., 2012. Chlorophyll-Binding Proteins of Higher Plants and Cyanobacteria, in: Eaton-Rye, J.J., Tripathy, B.C., Sharkey, T.D. (Eds.), *Photosynthesis: Plastid Biology, Energy Conversion and Carbon Assimilation*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 127–149. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1579-0_6
- Croce, R., Zucchelli, G., Garlaschi, F.M., Bassi, R., Jennings, R.C., 1996. Excited State Equilibration in the Photosystem I–Light-Harvesting I Complex: P700 Is Almost Isoenergetic with Its Antenna. *Biochemistry* 35, 8572–8579. <https://doi.org/10.1021/bi960214m>
- Csikós, G., 2012. Fluoreszcens módszerek, in: László, L. (Ed.), *Szövevény és Sejtbiológiai Vizsgálómódszerek*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.
- CTIFL, 2025. CODE COULEUR TOMATE A PLAT (Affichette) [WWW Document]. URL <https://www.ctifl.fr/code-couleur-tomate-a-plat-affichette> (accessed 5.19.25).
- Dauny, P.T., Joyce, D.C., 2002. 1-MCP Improves Storability of “Queen Cox” and “Bramley” Apple Fruit. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.7.1082>
- De Ketelaere, B., De Baerdemaeker, J., 2001. Tomato firmness estimation using vibration measurements. *Math. Comput. Simul.* 56, 385–394. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(01\)00309-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(01)00309-3)
- De Ketelaere, B., Howarth, M.S., Crezee, L., Lammertyn, J., Viaene, K., Bulens, I., De Baerdemaeker, J., 2006. Postharvest firmness changes as measured by acoustic and low-mass impact devices: a comparison of techniques. *Postharvest Biol. Technol.* 41, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.04.008>
- Dolatowski, Z.J., Stadnik, J., Stasiak, D., 2007. APPLICATIONS OF ULTRASOUND IN FOOD TECHNOLOGY.
- Dou, H., Jones, S., and Ritenour, M., 2005. Influence of 1-MCP application and concentration on post-harvest peel disorders and incidence of decay in citrus fruit. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 80, 786–792. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11512015>

- Elfving, D.C., Drake, S.R., Reed, A.N., Visser, D.B., 2007. Preharvest Applications of Sprayable 1-methylcyclopropene in the Orchard for Management of Apple Harvest and Postharvest Condition. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1192>
- El-Ramady, H.R., Domokos-Szabolcsy, É., Abdalla, N.A., Taha, H.S., Fári, M., 2015. Postharvest Management of Fruits and Vegetables Storage, in: Lichtfouse, E. (Ed.), Sustainable Agriculture Reviews: Volume 15. Springer International Publishing, Cham, pp. 65–152. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09132-7_2
- Ergun, M., Sargent, S.A., Huber, D.J., 2006. Postharvest Quality of Grape Tomatoes Treated with 1-Methylcyclopropene at Advanced Ripeness Stages. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.1.183>
- Escribano, S., Sugimoto, N., Macnish, A.J., Biasi, W.V., Mitcham, E.J., 2017. Efficacy of liquid 1-methylcyclopropene to delay ripening of ‘Bartlett’ pears. *Postharvest Biol. Technol.* 126, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.11.007>
- FAO, 2025. FAOSTAT, Statistics of crops and livestock products [WWW Document]. URL <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed 3.20.25).
- Feder, A., Jensen, S., Wang, A., Courtney, L., Middleton, L., Van Eck, J., Liu, Y., Giovannoni, J.J., 2020. Tomato fruit as a model for tissue-specific gene silencing in crop plants. *Hortic. Res.* 7, 142. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-00363-4>
- Felföldi, J., Fekete, A., 2000. Firmness assessment by impact method. ASAE Annula International Meeting, Milwaukee, Poster No. 006072, 1-7 p.
- Fich, E.A., Fisher, J., Zamir, D., Rose, J.K.C., 2020. Transpiration from Tomato Fruit Occurs Primarily via Trichome-Associated Transcuticular Polar Pores. *Plant Physiol.* 184, 1840–1852. <https://doi.org/10.1104/pp.20.01105>
- Flores, F., El-Yahyaoui, F., Billerbeck, G., Romojaro, F., Latché, A., Bouzayen, M., Pech, J.-C., Ambid, C., 2002. Role of ethylene in the biosynthetic pathway of aliphatic ester aroma volatiles in Charentais Cantaloupe melons. *J. Exp. Bot.* 53, 201–6. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.367.201>
- Franck, F., Juneau, P., Popovic, R., 2002. Resolution of the Photosystem I and Photosystem II contributions to chlorophyll fluorescence of intact leaves at room temperature. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Bioenerg.* 1556, 239–246. [https://doi.org/10.1016/S0005-2728\(02\)00366-3](https://doi.org/10.1016/S0005-2728(02)00366-3)
- Fraser, P.D., Truesdale, M.R., Bird, C.R., Schuch, W., Bramley, P., 1994. Carotenoid Biosynthesis during Tomato Fruit Development (Evidence for Tissue-Specific Gene Expression). *Plant Physiol.* 105, 405–413. <https://doi.org/10.1104/pp.105.1.405>
- Freschi, L., Corpas, F., Palma, J., 2023. Fruit Physiology through Signaling Processes: Latest Advances and Future Challenges. *Int. J. Mol. Sci.* 24, 976. <https://doi.org/10.3390/ijms24020976>
- Friedrich, L., 2008. Ultrahang alkalmazása hűszérmények minőségében és gyártástechnológiájában (Doktori értekezés). Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest.
- Gago, C.M.L., Guerreiro, A.C., Miguel, G., Panagopoulos, T., Sánchez, C., Antunes, M.D.C., 2015. Effect of harvest date and 1-MCP (SmartFresh™) treatment on ‘Golden Delicious’ apple cold storage physiological disorders. *Postharvest Biol. Technol.* 110, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.018>
- Génard, M., Gouble, B., 2005. ETHY. A Theory of Fruit Climacteric Ethylene Emission. *Plant Physiol.* 139, 531–545. <https://doi.org/10.1104/pp.105.063339>
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Merzlyak, M.N., 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58, 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Goff, S., Klee, H., 2006. Plant Volatile Compounds: Sensory Cues for Health and Nutritional Value? *Science* 311, 815–9. <https://doi.org/10.1126/science.1112614>

- Gormley, R., Egan, S., 1978. Firmness and colour of the fruit of some tomato cultivars from various sources during storage. *J. Sci. Food Agric.* 29, 534–538. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740290607>
- Govindjee, G., 2004. Chlorophyll a Fluorescence: A Bit of Basics and History, in: Papageorgiou, G., Govindjee, G. (Eds.), *Chlorophyll A Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*. Springer, Dordrecht.
- Guichard, S., Bertin, N., Leonardi, C., Gary, C., 2001. Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2001131> 21. <https://doi.org/10.1051/agro:2001131>
- Guillén, F., Castillo, S., Zapata, P., Martínez-Romero, D., Serrano, M., Valero, D., 2007. Efficacy of 1-MCP treatment in tomato fruit: 1. Duration and concentration of 1-MCP treatment to gain an effective delay of postharvest ripening. *Postharvest Biol. Technol.* 43, 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.07.004>
- Guillén, F., Castillo, S., Zapata, P., Martínez-Romero, D., Valero, D., Serrano, M., 2006. Efficacy of 1-MCP treatment in tomato fruit: 2. Effect of cultivar and ripening stage at harvest. *Postharvest Biol. Technol.* 42, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.07.005>
- Hanotu, J.O., Bandulasena, H., Zimmerman, W.B., 2017. Aerator design for microbubble generation. *Chem. Eng. Res. Des.* 123, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.034>
- Hatami, M., Kalantari, S., Delshad, M., 2013. Responses of different maturity stages of tomato fruit to different storage conditions. *Acta Hortic.* 1012, 857–864. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1012.116>
- Heinz Walz, 2025. Monitoring-PAM [WWW Document]. URL <https://www.lombardemarozzini.com/it/prodotti/monitoring-pam-fluorometer-long-term-monitoring-photosynthesis.html> (accessed 5.20.25).
- Helyes, L., 1999. A paradicsom és termesztése, 2. ed. SYCA Szakkönyvszolgálat, Budapest.
- Helyes, L., Dimény, J., Pék, Z., Lugasi, A., 2006. Effect of maturity stage on content, color and quality of tomato (*Lycopersicon lycopersicum* (L.) Karsten) fruit. *Int. J. Hortic. Sci.* 12, 41–44. <https://doi.org/10.31421/IJHS/12/1/621>
- Hitka, G., Zsom, T., Nguyen, L., Balla, C., 2014. Effect of 1-methylcyclopropene on ‘Bosc Kobak’ pears. <https://doi.org/10.1556/aalim.43.2014.suppl.11>
- Ho, L.C., Sjut, V., Hoad, G.V., 1982. The effect of assimilate supply on fruit growth and hormone levels in tomato plants. *Plant Growth Regul.* 1, 155–171. <https://doi.org/10.1007/BF00036995>
- Hoeberichts, F., Plas, L., Woltering, E., 2002. Ethylene perception is required for the expression of tomato ripening-related genes and associated physiological changes even at advanced stages of ripening. *Postharvest Biol. Technol.* 26, 125–133. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00012-1)
- Hoffmann, A.M., Noga, G., Hunsche, M., 2015. Fluorescence indices for monitoring the ripening of tomatoes in pre- and postharvest phases. *Sci. Hortic.* 191, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.05.001>
- Horváth-Mezőfi, Zs., Szabó, G., Göb, M., Bátor, E., Hitka, G., Zsom, T., 2022. Effect of 1-MCP treatment on tomato postharvest physiological behavior.
- Hu, B., Lai, B., Wang, D., Li, J., Chen, L., Qin, Yaqi, Wang, H., Qin, Yonghua, Hu, G., Zhao, J., 2019. Three LcABFs are Involved in the Regulation of Chlorophyll Degradation and Anthocyanin Biosynthesis During Fruit Ripening in *Litchi chinensis*. *Plant Cell Physiol.* 60, 448–461. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcy219>
- Hu, Z., Tang, C., He, Z., Lin, J., Ni, Y., 2017. 1-Methylcyclopropene (MCP)-Containing Cellulose Paper Packaging for Fresh Fruit and Vegetable Preservation: A Review. *BioResources* 12, 2234–2248. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.2234-2248>

- Huang, S., Gong, B., Wei, F., Ma, H., 2017. Pre-harvest 1-methylcyclopropene application affects post-harvest physiology and storage life of the cut rose cv. Carola. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 58, 144–151. <https://doi.org/10.1007/s13580-017-0081-9>
- Hurr, B., Huber, D., Lee, J., 2005. Differential Responses in Color Changes and Softening of 'Florida 47' Tomato Fruit Treated at Green and Advanced Ripening Stages with the Ethylene Antagonist 1-Methylcyclopropene. *HortTechnology* 15. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.15.3.0617>
- Huybrechts, C., Valcke, R., 2007. Comparing the physiological changes in apples and pears during shelf-life measured by fluorescence imaging. *Acta Hortic.* 682. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.2>
- Iijima, Y., Fujiwara, Y., Tokita, T., Ikeda, T., Nohara, T., Aoki, K., Shibata, D., 2009. Involvement of Ethylene in the Accumulation of Esculeoside A during Fruit Ripening of Tomato (*Solanum lycopersicum*). *J. Agric. Food Chem.* 57, 3247–52. <https://doi.org/10.1021/jf8037902>
- Iijima, Y., Nakamura, Y., Ogata, Y., Tanaka, K., Sakurai, N., Suda, K., Suzuki, T., Suzuki, H., Okazaki, K., Kitayama, M., Kanaya, S., Aoki, K., Shibata, D., 2008. Metabolite annotations based on the integration of mass spectral information. *Plant J. Cell Mol. Biol.* 54, 949–962. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03434.x>
- Ikeda, T., Yoshizawa, S., Koizumi, N., Mitsuishi, M., Matsumoto, Y., 2016. Focused Ultrasound and Lithotripsy, in: Escoffre, J.-M., Bouakaz, A. (Eds.), *Therapeutic Ultrasound*. Springer International Publishing, Cham, pp. 113–129. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22536-4_7
- International Organization for Standardization, 2017. ISO 20480-1:2017 Fine bubble technology — General principles for usage and measurement of fine bubbles [WWW Document]. ISO. URL <https://www.iso.org/standard/68187.html> (accessed 4.15.25).
- IPNI, 1768. *Lycopersicon esculentum* [WWW Document]. Int. Plant Names Index. URL https://www.ipni.org/n/146898-2?utm_source=chatgpt.com (accessed 4.25.25).
- IPNI, 1753. *Solanum lycopersicum* [WWW Document]. Int. Plant Names Index. URL <https://www.ipni.org/n/316947-2> (accessed 4.25.25).
- Jackman, R. I., Yada, R. y., Marangoni, A., Parkin, K. I., Stanley, D. w., 1988. Chilling Injury. a Review of Quality Aspects. *J. Food Qual.* 11, 253–278. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.1988.tb00887.x>
- Jayanty, S., Canoles, M., Beaudry, R., 2004. Concentration Dependence of 'Redchief Delicious' Apple Fruit Softening and Chlorophyll Fluorescence to Repeated Doses of 1-Methylcyclopropene. *J. Am. Soc. Hortic. Sci. Am. Soc. Hortic. Sci.* 129. <https://doi.org/10.21273/JASHS.129.5.0760>
- Jayasooriya, S., Bhandari, B., Torley, P., D'Arcy, B., 2004. Effect of High Power Ultrasound Waves on Properties of Meat: A Review. *Int. J. Food Prop.* 7. <https://doi.org/10.1081/JFP-120030039>
- Jiang, B., Lü, Y., Liu, S., Yan, H., 2024. Research Advances in the Regulation of Plant Hormones in Citrus Fruit Maturation. *Acta Hortic. Sin.* 51, 2928–2944. <https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2024-0204>
- Jin, C., Zha, T., Bourque, C.P.-A., Jia, X., Tian, Y., Liu, P., Li, X., Liu, X., Guo, X., Xu, M., Kang, X., Guo, Z., Wang, N., 2022. Temporal heterogeneity in photosystem II photochemistry in *Artemisia ordosica* under a fluctuating desert environment. *Front. Plant Sci.* 13, 1057943. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1057943>
- Juwana, W.E., Widyatama, A., Wiratni, Indarto, Deendarlianto, 2018. An evaluation of the horizontal injection microbubble generator. *AIP Conf. Proc.* 2021, 030018. <https://doi.org/10.1063/1.5062742>
- Jyoti, K.K., Pandit, A.B., 2004. Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochem. Eng. J.* 18, 9–19. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(03\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(03)00116-5)

- Kader, A.A., 2002. *Postharvest Technology of Horticultural Crops*, 3. ed. University of California Agriculture and Natural Resources, Richmond, CA.
- Kaffka, K.J., Gyarmati, L.S., 1998. Investigating the Polar Qualification System. *J. Infrared Spectrosc.* 6, 191–200. <https://doi.org/10.1255/jnirs.193>
- Kamaroddin, M.F., Rahaman, A., Gilmour, D.J., Zimmerman, W.B., 2020. Optimization and cost estimation of microalgal lipid extraction using ozone-rich microbubbles for biodiesel production. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 23, 101462. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101462>
- Kautsky, H., Appel, W., Amann, 1960. Chlorophyllfluoreszenz und kohlenassimilation. *Biochem. Z.* 277–292.
- Kautsky, H., Hirsch, A., 1931. Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation. *Naturwissenschaften* 19, 964–964. <https://doi.org/10.1007/BF01516164>
- Kende, H., Boller, T., 1981. Wound ethylene and 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase in ripening tomato fruit. *Planta* 151, 476–481. <https://doi.org/10.1007/BF00386542>
- Khairi, A., Falah, M., Suyantohadi, A., Takahashi, N., Nishina, H., 2015. Effect of Storage Temperatures on Color of Tomato Fruit (*Solanum Lycopersicum* Mill.) Cultivated under Moderate Water Stress Treatment. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 3. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.035>
- Khan, N.A., Ferrante, A., Khan, M.I.R., Poor, P., 2023. Editorial: Ethylene: a key regulatory molecule in plants, Volume II. *Front. Plant Sci.* 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1222462>
- Kiani, H., Zhang, Z., Delgado, A., Sun, D.-W., 2011. Ultrasound assisted nucleation of some liquid and solid model foods during freezing. *Food Res. Int.* 44, 2915–2921. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.051>
- Kim, D.S., Lee, D., Choi, J., Kim, S., Lim, J.-H., 2019. Prediction of carotenoid content in tomato fruit using a fluorescence screening method. *Postharvest Biol. Technol.* 156. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.05.018>
- Kimura, S., Sinha, N., 2008. Tomato (*Solanum lycopersicum*): A Model Fruit-Bearing Crop. *Cold Spring Harb. Protoc.* 2008, pdb.emo105. <https://doi.org/10.1101/pdb.emo105>
- Klee, H.J., Giovannoni, J.J., 2011. Genetics and Control of Tomato Fruit Ripening and Quality Attributes. *Annu. Rev. Genet.* 45, 41–59. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-110410-132507>
- Klee, H.J., Hayford, M.B., Kretzmer, K.A., Barry, G.F., Kishore, G.M., 1991. Control of ethylene synthesis by expression of a bacterial enzyme in transgenic tomato plants. *Plant Cell* 3, 1187–1193. <https://doi.org/10.1105/tpc.3.11.1187>
- Kluge, R.A., Jacomino, A.P., 2002. Shelf life of peaches treated with 1-methylcyclopropene. *Sci. Agric.* 59, 69–72. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000100010>
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D.-U., 2004. Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends Food Sci. Technol.* 15, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.001>
- Kosson, R., 2003. Chlorophyll fluorescence and chilling injury of green pepper as affected by storage conditions. *Acta Hortic.* 628, 379–385. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.628.47>
- Kou, X., Wu, M., 2018. Characterization of Climacteric and Non-Climacteric Fruit Ripening, in: Guo, Y. (Ed.), *Plant Senescence, Methods in Molecular Biology*. Springer New York, New York, NY, pp. 89–102. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7672-0_7
- Krause, G.H., Weis, E., 1991. Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. *Annu. Rev. Plant Biol.* 42, 313–349. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.001525>
- Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., 2013. *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer Science & Business Media.
- KSH, 2025. Fontosabb zöldségfélék termés mennyisége Magyarországon [WWW Document]. URL https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0016.html (accessed 3.20.25).

- Kukuzaki, M., Fujimoto, K., Kai, S., Ohe, K., Oshima, T., Baba, Y., 2010. Ozone mass transfer in an ozone–water contacting process with Shirasu porous glass (SPG) membranes—A comparative study of hydrophilic and hydrophobic membranes. *Sep. Purif. Technol.* 72, 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.03.004>
- Kumar, R., Khurana, A., Sharma, A.K., 2014. Role of plant hormones and their interplay in development and ripening of fleshy fruits. *J. Exp. Bot.* 65, 4561–4575. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru277>
- Kumari, P., Ahmad, M., Mir, H., 2018. Non-destructive quality evaluation by sensing maturity and ripening of fruits and vegetables 84–89.
- Kume, A., Akitsu, T., Nasahara, K.N., 2018. Why is chlorophyll b only used in light-harvesting systems? *J. Plant Res.* 131, 961–972. <https://doi.org/10.1007/s10265-018-1052-7>
- Langan, P., Bernád, V., Walsh, J., Henchy, J., Khodaeiaminjan, M., Mangina, E., Negrao, S., 2022. Phenotyping for waterlogging tolerance in crops: current trends and future prospects. *J. Exp. Bot.* 73. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac243>
- Lee, E., Sargent, S.A., Huber, D.J., 2007. Physiological Changes in Roma-type Tomato Induced by Mechanical Stress at Several Ripeness Stages. *HortScience* 42, 1237–1242. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1237>
- Lelièvre, J.-M., Latchè, A., Jones, B., Bouzayen, M., Pech, J.-C., 1997. Ethylene and fruit ripening. *Physiol. Plant.* 101, 727–739. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb01057.x>
- Li, F., Zhang, Xinyue, Wang, J., Jiang, Y., Zhang, Xinhua, Li, X., 2022. Preharvest application of 1-methylcyclopropene and Ethephon altered cuticular wax biosynthesis and fruit quality of apples at harvest and during cold storage. *Hortic. Plant J.* 8, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.11.008>
- Li, L., Kaplunov, T., Zutahy, Y., Daus, A., Porat, R., Lichter, A., 2015. The effects of 1-methylcyclopropane and ethylene on postharvest rachis browning in table grapes. *Postharvest Biol. Technol.* 107, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.04.001>
- Lichter, A., Guzev, L., Dvir, O., Farber, I., Danshin, A., Pressman, E., Ganz, S., Beno-Moualem, D., 2006. Seasonal changes in the abscission site in bunch tomatoes and differential response to 1-methylcyclopropene. *Postharvest Biol. Technol.* 40, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.12.002>
- Liedl, B.E., Labate, J.A., Stommel, J.R., Slade, A., Kole, C., 2013. *Genetics, Genomics, and Breeding of Tomato*. CRC Press.
- Liguori, G., Weksler, A., Zutahi, Y., Lurie, S., Kosto, I., 2004. Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of melting flesh peaches and nectarines. *Postharvest Biol. Technol.* 31, 263–268. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.09.007>
- Linné, C. von, 1753. *Species plantarum*. Impensis Laurentii Salvii, Holmiae. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.669>
- Liu, C., Chen, X.-X., Zhang, J., Zhou, H.-Z., Zhang, L., Guo, Y.-K., 2018. Advanced treatment of bio-treated coal chemical wastewater by a novel combination of microbubble catalytic ozonation and biological process. *Sep. Purif. Technol.* 197, 295–301. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.01.005>
- Liu, C., Tanaka, H., Zhang, J., Zhang, L., Yang, J., Huang, X., Kubota, N., 2013. Successful application of Shirasu porous glass (SPG) membrane system for microbubble aeration in a biofilm reactor treating synthetic wastewater. *Sep. Purif. Technol.* 103, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.10.023>
- Liu, M., Pirrello, J., Chervin, C., Roustan, J.-P., Bouzayen, M., 2015. Ethylene Control of Fruit Ripening: Revisiting the Complex Network of Transcriptional Regulation. *Plant Physiol.* 169, 2380–2390. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01361>
- Liu, T., Zhang, H., Jiang, G., Wu, F., Qian, Z., Qu, H., Jiang, Y., 2010. Effect of 1-Methylcyclopropene Released from 3-Chloro-2-methylpropene and Lithium Diisopropylamide on Quality of Harvested Mango Fruit. *Asian J. Agric. Res.* 4, 212–219. <https://doi.org/10.3923/ajar.2010.212.219>

- López Camelo, A.F., Gómez, P.A., 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Hortic. Bras.* 22, 534–537. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362004000300006>
- Maharaj, R., Arul, J., Nadeau, P., 1999. Effect of photochemical treatment in the preservation of fresh tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Capello) by delaying senescence. *Postharvest Biol. Technol.* 15, 13–23. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00064-7)
- Majid, A.I., Nugroho, F.M., Juwana, W.E., Budhijanto, W., Deendarlianto, Indarto, 2018. On the performance of venturi-porous pipe microbubble generator with inlet angle of 20° and outlet angle of 12°. *AIP Conf. Proc.* 2001, 050009. <https://doi.org/10.1063/1.5050000>
- Malambane, G., Nonaka, S., Shiba, H., Ezura, H., Tsujimoto, H., Akashi, K., 2018. Comparative effects of ethylene inhibitors on *Agrobacterium* -mediated transformation of drought-tolerant wild watermelon. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 82, 1–9. <https://doi.org/10.1080/09168451.2018.1431516>
- Manganaris, G.A., Crisosto, C.H., Bremer, V., Holcroft, D., 2008. Novel 1-methylcyclopropene immersion formulation extends shelf life of advanced maturity ‘Joanna Red’ plums (*Prunus salicina* Lindell). *Postharvest Biol. Technol.* 47, 429–433. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.07.006>
- Manigo, B., Limbaga, C., 2019. Effect of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Postharvest Application on Quality of “Lakatan” Banana Fruit 2319–1473.
- Mata, C.I., Fabre, B., Parsons, H.T., Hertog, M.L.A.T.M., Van Raemdonck, G., Baggerman, G., Van de Poel, B., Lilley, K.S., Nicolai, B.M., 2018. Ethylene Receptors, CTRs and EIN2 Target Protein Identification and Quantification Through Parallel Reaction Monitoring During Tomato Fruit Ripening. *Front. Plant Sci.* 9, 1626. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01626>
- Maul, F., Sargent, S., Balaban, M., Baldwin, E., Huber, D., Sims, C., 1998. Aroma Volatile Profiles from Ripe Tomatoes are Influenced by Physiological Maturity at Harvest: An Application for Electronic Nose Technology. *J. Am. Soc. Hortic. Sci. Am. Soc. Hortic. Sci.* 123. <https://doi.org/10.21273/JASHS.123.6.1094>
- Maxwell, K., Johnson, G.N., 2000. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51, 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
- McAlister, E.D., Myers, J., 1940. The time course of photosynthesis and fluorescence observed simultaneously.
- Meir, S., Rubin, L., Zauberman, G., Fuchs, Y., 1992. Changes in fluorescent lipid peroxidation products of room-ripened and vine-ripened tomato fruits in relation to other ripening parameters. *Postharvest Biol. Technol.* 2, 125–135. [https://doi.org/10.1016/0925-5214\(92\)90015-H](https://doi.org/10.1016/0925-5214(92)90015-H)
- Miller, P., 1768. The gardeners dictionary, 8th ed. London. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.541>
- Minas, I.S., Crisosto, G.M., Holcroft, D., Vasilakakis, M., Crisosto, C.H., 2013. Postharvest handling of plums (*Prunus salicina* Lindl.) at 10°C to save energy and preserve fruit quality using an innovative application system of 1-MCP. *Postharvest Biol. Technol.* 76, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.08.013>
- Minorsky, P., 2020. On the Inside: Non-Stomatal Water Loss by Tomato Fruits [WWW Document]. *Plantae*. URL <https://plantae.org/on-the-inside-non-stomatal-water-loss-by-tomato-fruits/> (accessed 4.8.25).
- Mintz-Oron, S., Mandel, T., Rogachev, I., Feldberg, L., Lotan, O., Yativ, M., Wang, Z., Jetter, R., Venger, I., Adato, A., Aharoni, A., 2008. Gene Expression and Metabolism in Tomato Fruit Surface Tissues. *Plant Physiol.* 147, 823–851. <https://doi.org/10.1104/pp.108.116004>
- Mir, N., Canoles, M., Beaudry, R., Baldwin, E., Mehla, C., 2004. Inhibiting Tomato Ripening with 1-Methylcyclopropene. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 129. <https://doi.org/10.21273/JASHS.129.1.0112>
- Mir, N.A., Beaudry, R.M., 2001. USE OF 1-MCP TO REDUCE THE REQUIREMENT FOR REFRIGERATION IN THE STORAGE OF APPLE FRUIT. *Acta Hortic.* 577–580. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.553.136>

- Mir, N.A., Curell, E., Khan, N., Whitaker, M., Beaudry, R.M., 2001. Harvest Maturity, Storage Temperature, and 1-MCP Application Frequency Alter Firmness Retention and Chlorophyll Fluorescence of 'Redchief Delicious' Apples. <https://doi.org/10.21273/JASHS.126.5.618>
- Mizrach, A., 2007. Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biol. Technol.* 46, 271–274. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.05.012>
- Morgan, P.W., Drew, M.C., 1997. Ethylene and plant responses to stress. *Physiol. Plant.* 100, 620–630. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb03068.x>
- Moustaka, J., Meyling, N.V., Hauser, T.P., 2022. Root-Associated Entomopathogenic Fungi Modulate Their Host Plant's Photosystem II Photochemistry and Response to Herbivorous Insects. *Molecules* 27, 207. <https://doi.org/10.3390/molecules27010207>
- Moustaka, J., Moustakas, M., 2023. Early-Stage Detection of Biotic and Abiotic Stress on Plants by Chlorophyll Fluorescence Imaging Analysis. *Biosensors* 13, 796. <https://doi.org/10.3390/bios13080796>
- Moustakas, M., Bayçu, G., Sperdouli, I., Eroğlu, H., Eleftheriou, E.P., 2020. Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Enhances Photosynthesis in the Medicinal Herb *Salvia fruticosa* by Improving Photosystem II Photochemistry. *Plants* 9, 962. <https://doi.org/10.3390/plants9080962>
- Moustakas, M., Calatayud, A., Guidi, L., 2021. Editorial: Chlorophyll Fluorescence Imaging Analysis in Biotic and Abiotic Stress. *Front. Plant Sci.* 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.658500>
- Moustakas, M., Guidi, L., Calatayud, A., 2022a. Editorial: Chlorophyll fluorescence analysis in biotic and abiotic stress, volume II. *Front. Plant Sci.* 13, 1066865. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1066865>
- Moustakas, M., Moustaka, J., Sperdouli, I., 2022b. Hormesis in photosystem II: a mechanistic understanding. *Curr. Opin. Toxicol.* 29, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.003>
- Moustakas, M., Sperdouli, I., Moustaka, J., 2022c. Early Drought Stress Warning in Plants: Color Pictures of Photosystem II Photochemistry. *Climate* 10, 179. <https://doi.org/10.3390/cli10110179>
- Murchie, E.H., Lawson, T., 2013. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *J. Exp. Bot.* 64, 3983–3998. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert208>
- Nakatsuka, A., Murachi, S., Okunishi, H., Shiomi, S., Nakano, R., Kubo, Y., Inaba, A., 1999. Differential Expression and Internal Feedback Regulation of 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate Synthase, 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate Oxidase, and Ethylene Receptor Genes in Tomato Fruit during Development and Ripening. *Plant Physiol.* 118, 1295–305.
- Nedbal, L., Soukupová, J., Whitmarsh, J., Trtílek, M., 2001. Postharvest Imaging of Chlorophyll Fluorescence from Lemons Can Be Used to Predict Fruit Quality. *Photosynthetica* 38, 571–579. <https://doi.org/10.1023/A:1012413524395>
- Nguyen, L.L.P., Baranyai, L., Nagy, D., Mahajan, P.V., Zsom-Muha, V., Zsom, T., 2021. Color analysis of horticultural produces using hue spectra fingerprinting. *MethodsX* 8, 101594. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101594>
- Nguyen, L.L.P., Visy, A., Baranyai, L., Friedrich, L., Mahajan, P.V., 2020. Application of hue spectra fingerprinting during cold storage and shelf-life of packaged sweet cherry. *J. Food Meas. Charact.* 14, 2689–2702. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00515-z>
- Nguyen, L.P.L., 2017. Extending the storability of melon (PhD Dissertation). Szent István Egyetem, Budapest.
- Nguyen, L.P.L., Hitka, G., Zsom, T., Kókai, Z., 2016. Application of 1-MCP on apricots at different temperatures and days after harvest. <https://doi.org/10.1556/066.2016.45.4.11>

- Niyogi, K.K., 2000. Safety valves for photosynthesis. *Curr. Opin. Plant Biol.* 3, 455–460. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(00\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(00)00113-8)
- Niyogi, K.K., Wolosiuk, R.A., Malkin, R., 2015. Photosynthesis, in: Buchanan, B.B., Gruissem, W., Jones, R.L. (Eds.), *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, NJ, USA.
- Obenland, D., Neipp, P., 2005. Chlorophyll Fluorescence Imaging Allows Early Detection and Localization of Lemon Rind Injury following Hot Water Treatment. *HortScience* 40. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.6.1821>
- Oeller, P., Lu, M.-W., Taylor, L., Pike, D., Theologis, A., 1991. Reversible Inhibition of Tomato Fruit Senescence by Antisense RNA. *Science* 254, 437–9. <https://doi.org/10.1126/science.1925603>
- Oláh, V., Hepp, A., Irfan, M., Mészáros, I., 2021. Chlorophyll Fluorescence Imaging-Based Duckweed Phenotyping to Assess Acute Phytotoxic Effects. *Plants* 10, 2763. <https://doi.org/10.3390/plants10122763>
- Opiyo, A., Ying, T., 2005. The effects of 1-methylcyclopropene treatment on the shelf life and quality of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* var. *Cerasiforme*) fruit. *Int. J. Food Sci. Technol.* 40, 665–673. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00977.x>
- Orhewere, A., Ajayi, O., Ajayi, A., 2019. Advances in the development of a tomato postharvest storage system: towards eradicating postharvest losses. *J. Phys. Conf. Ser.* 1378, 022064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022064>
- Parmar, R., Majumder, S.K., 2013. Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification—A state-of-the-art report. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 64, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.12.002>
- Pathare, P.B., AL-Dairi, M., Al Mahdouri, A., 2023. Influence of drop test impact on the physiochemical attributes of tomatoes. *Arab Gulf J. Sci. Res.* 42, 646–659. <https://doi.org/10.1108/AGJSR-10-2022-0213>
- Paull, R.E., 1990. Chilling injury of crops of tropical and subtropical origin, in: Wang, C.Y. (Ed.), *Chilling Injury of Horticultural Crops*. CRC-Press, Boca Raton, Florida, pp. 17–36.
- Pech, J.C., Bouzayen, M., Latché, A., Sanmartin, M., Aggelis, A., Kanellis, A.K., 2002. Physiological, biochemical and molecular aspects of ethylene biosynthesis and action., in: *Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables*. CRC Press.
- Peralta, I.E., Spooner, D., 2006. History, Origin and Early Cultivation of Tomato (*Solanaceae*), in: *Genetic Improvement of Solanaceous Crops Volume 2: Tomato*. pp. 1–24. <https://doi.org/10.1201/b10744-2>
- Peralta, I.E., Spooner, D.M., 2001. Granule-bound starch synthase (GBSSI) gene phylogeny of wild tomatoes (*Solanum* L. section *Lycopersicon* [Mill.] Wettst. subsection *Lycopersicon*). *Am. J. Bot.* 88, 1888–1902. <https://doi.org/10.2307/3558365>
- Pfündel, E., 1998. Estimating the contribution of Photosystem I to total leaf chlorophyll fluorescence. *Photosynth. Res.* 56, 185–195. <https://doi.org/10.1023/A:1006032804606>
- Pompodakis, N.E., Terry, L.A., Joyce, D.C., Lydakis, D.E., Papadimitriou, M.D., 2005. Effect of seasonal variation and storage temperature on leaf chlorophyll fluorescence and vase life of cut roses. *Postharvest Biol. Technol.* 36, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.11.003>
- Ponce-Valadez, M., Escalona-Buendía, H., Villa-Hernández, J., Díaz de León-Sánchez, F., Rivera-Cabrera, F., Alia Tejacal, I., Pérez-Flores, L., 2015. Effect of refrigerated storage (12.5°C) on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit flavor: A biochemical and sensory analysis. *Postharvest Biol. Technol.* 111, 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.010>
- Pongprasert, N., Srilaong, V., 2014. A novel technique using 1-MCP microbubbles for delaying postharvest ripening of banana fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 95, 42–45. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.04.003>

- Pozo, L., Yuan, R., Kostenyuk, I., Alf  rez, F., Zhong, G.Y., Burns, J.K., 2004. Differential Effects of 1-Methylcyclopropene on Citrus Leaf and Mature Fruit Abscission. <https://doi.org/10.21273/JASHS.129.4.0473>
- Radzevi  ius, A., Viskelis, P., Karklelien  , R., Vi  kelis, J., Bobinas, C., Dambrauskien  , E., Sakalauskien  , S., 2012. Tomato Ripeness Influence on Fruit Quality. *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 6, 653–656.
- Raffo, A., Baiamonte, I., Nardo, N., Nicoli, S., Moneta, E., Peparaio, M., Sinesio, F., Paoletti, F., 2018. Impact of early harvesting and two cold storage technologies on eating quality of red ripe tomatoes. *Eur. Food Res. Technol.* 244. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2996-x>
- Ramaswamy, H.S., 2015. *Post-harvest Technologies of Fruits & Vegetables*. DEStech Publications, Inc, Lancaster, Pennsylvania, USA.
- Reid, M.S., Staby, G.L., 2008. A Brief History of 1-Methylcyclopropene. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.1.83>
- Rick, C.M., Uhlig, J.W., Jones, A.D., 1994. High alpha-tomatine content in ripe fruit of Andean *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*: developmental and genetic aspects. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 91, 12877–12881. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.26.12877>
- Rizzolo, A., Grassi, M., Vanoli, M., 2014. 1-Methylcyclopropene application, storage temperature and atmosphere modulate sensory quality changes in shelf-life of ‘Abb   F  tel’ pears. *Postharvest Biol. Technol.* 92, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.01.010>
- Ronga, D., Pentangelo, A., Parisi, M., 2020. Optimizing N Fertilization to Improve Yield, Technological and Nutritional Quality of Tomato Grown in High Fertility Soil Conditions. *Plants* 9, 575. <https://doi.org/10.3390/plants9050575>
- Rose, J.L., 2014. *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. Cambridge University Press.
- Rottmann, W.H., Peter, G.F., Oeller, P.W., Keller, J.A., Shen, N.F., Nagy, B.P., Taylor, L.P., Campbell, A.D., Theologis, A., 1991. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate synthase in tomato is encoded by a multigene family whose transcription is induced during fruit and floral senescence. *J. Mol. Biol.* 222, 937–961. [https://doi.org/10.1016/0022-2836\(91\)90587-V](https://doi.org/10.1016/0022-2836(91)90587-V)
- Rubatzky, V.E., Yamaguchi, M., 1997. *World Vegetables*. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6015-9>
- Rupasinghe, H.P.V., Murr, D., Paliyath, G., Skog, L., 2000. Inhibitory effect of 1-MCP on ripening and superficial scald development in ‘McIntosh’ and ‘Delicious’ apples. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 271–276. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511236>
- Sack, L., Holbrook, N., 2006. Leaf Hydraulics. *Annu. Rev. Plant Biol.* 57, 361–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144141>
- Sadatom, M., Kawahara, A., Kano, K., Ohtomo, A., 2005. Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 29, 615–623. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.08.006>
- Sadatom, M., Kawahara, A., Matsuura, H., Shikatani, S., 2012. Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 41, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.002>
- Saini, R.K., Rengasamy, K.R.R., Mahomoodally, F.M., Keum, Y.-S., 2020. Protective effects of lycopene in cancer, cardiovascular, and neurodegenerative diseases: An update on epidemiological and mechanistic perspectives. *Pharmacol. Res.* 155, 104730. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.104730>
- Saito, Y., 2009. Monitoring raw material by Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy in the production., in: Zude, M. (Ed.), *Optical Monitoring of Fresh and Processed Agricultural Crops—Basics and Applications for a Better Understanding of Non-Destructive Sensing*. Taylor&Francis Group, CRC Press, Boca Raton.
- Saltveit, M.E., 1999. Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 15, 279–292. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00091-X)

- Saltveit, M.E., 1997. Physical and physiological changes in minimally processed fruits and vegetables, in: Tomás-Barberán, F.A., Robins, R.J. (Eds.), *Phytochemistry of Fruit and Vegetables: Proceedings Of The Phytochemical Society Of Europe*. Oxford University Press, p. 0. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198577904.003.0010>
- Sanjayanti, A., Ahmad, D.N., Adawiyah, K., Putri, N.L., Putri, B.V.R., 2024. Analysis of Stem Anatomical Structure in Tomato (*Solanum lycopersicum*). *J. Biol. Sci. Educ.* 6, 17–22. <https://doi.org/10.31327/jbse.v6i1.2203>
- Sardabi, F., Mohtadinia, J., Shavakhi, F., Jafari, A.A., 2014. The Effects of 1-Methylcyclopropen (1-MCP) and Potassium Permanganate Coated Zeolite Nanoparticles on Shelf life Extension and Quality Loss of Golden Delicious Apples. *J. Food Process. Preserv.* 38. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12197>
- Scherrer-Montero, C.R., dos Santos, L.C., Andreazza, C.S., Getz, B.M., Bender, R.J., 2011. Mechanical Damages Increase Respiratory Rates of Citrus Fruit. *Int. J. Fruit Sci.* 11, 256–263.
- Schlüter, O., Foerster, J., Geyer, M., Knorr, D., Herppich, W., 2008. Characterization of High-Hydrostatic-Pressure Effects on Fresh Produce Using Chlorophyll Fluorescence Image Analysis. *Food Bioprocess Technol.* 2, 291–299. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0143-1>
- Schouten, R.E., Huijben, T.P.M., Tijssens, L.M.M., van Kooten, O., 2007. Modelling quality attributes of truss tomatoes: Linking colour and firmness maturity. *Postharvest Biol. Technol.* 45, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.03.011>
- Segado, P., Domínguez, Eva, and Heredia, A., 2016. Cutinisation of tomato fruit epidermis: Structural and morphological details. *Plant Signal. Behav.* 11, e1168558. <https://doi.org/10.1080/15592324.2016.1168558>
- Seymour, G.B., Taylor, J.E., Tucker, G.A., 2012. *Biochemistry of Fruit Ripening*. Springer Science & Business Media.
- Shao, Y., He, Y., Gómez, A.H., Pereir, A.G., Qiu, Z., Zhang, Y., 2007. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato ‘Heatwave’ (*Lycopersicum esculentum*) quality characteristics. *J. Food Eng.* 81, 672–678. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.12.026>
- Sharom, M., Willemot, C., Thompson, J.E., 1994. Chilling Injury Induces Lipid Phase Changes in Membranes of Tomato Fruit. *Plant Physiol.* 105, 305–308. <https://doi.org/10.1104/pp.105.1.305>
- Shi, J.X., Adato, A., Alkan, N., He, Y., Lashbrooke, J., Matas, A.J., Meir, S., Malitsky, S., Isaacson, T., Prusky, D., Leshkowitz, D., Schreiber, L., Granell, A.R., Widemann, E., Grausem, B., Pinot, F., Rose, J.K.C., Rogachev, I., Rothan, C., Aharoni, A., 2013. The tomato SISHINE3 transcription factor regulates fruit cuticle formation and epidermal patterning. *New Phytol.* 197, 468–480. <https://doi.org/10.1111/nph.12032>
- Shi, Y., Song, B., Liang, Q., Su, D., Lu, W., Liu, Y., Li, Z., 2023. Molecular regulatory events of flower and fruit abscission in horticultural plants. *Hortic. Plant J.* 9, 867–883. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2023.03.008>
- Simkin, A.J., Kapoor, L., Doss, C.G.P., Hofmann, T.A., Lawson, T., Ramamoorthy, S., 2022. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynth. Res.* 152, 23–42. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00892-6>
- Singh, S.P., Singh, Z., 2012. Postharvest oxidative behaviour of 1-methylcyclopropene treated Japanese plums (*Prunus salicina* Lindell) during storage under controlled and modified atmospheres. *Postharvest Biol. Technol.* 74, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.06.012>
- Sirisomboon, P., Tanaka, M., Kojima, T., 2012. Evaluation of tomato textural mechanical properties. *J. Food Eng.* 111, 618–624. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.007>

- Sisler, E., Serek, M., Dupille, E., 1996. Comparison of cyclopropene, 1-methylcyclopropene, and 3,3-dimethylcyclopropene as ethylene antagonists in plants. *Plant Growth Regul.* 18, 169–174. <https://doi.org/10.1007/BF00024378>
- Sisler, E.C., Blankenship, S.M., 1996. Method of counteracting an ethylene response in plants. US5518988A.
- Sisler, E.C., Blankenship, S.M., 1993. Effect of diazocyclopentadiene on tomato ripening. *Plant Growth Regul.* 12, 155–160. <https://doi.org/10.1007/BF00144597>
- Sisler, E.C., Serek, M., 2003. Compounds Interacting with the Ethylene Receptor in Plants. *Plant Biol.* 5, 473–480. <https://doi.org/10.1055/s-2003-44782>
- Sisler, E.C., Serek, M., 1997. Inhibitors of ethylene responses in plants at the receptor level: Recent developments. *Physiol. Plant.* 100, 577–582. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb03063.x>
- Somos, A., 1959. A paradicsom. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Song, Z., Qin, J., Yao, Y., Lai, X., Zheng, W., Chen, W., Zhu, X., Li, X., 2020. A transcriptomic analysis unravels key factors in the regulation of stay-green disorder in peel of banana fruit (Fenjiao) caused by treatment with 1-MCP. *Postharvest Biol. Technol.* 168, 111290. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111290>
- Sowinska, M., Deckers, T., Eckert, C., Heisel, F., Valcke, R.L., Miehe, J.-A., 1998. Evaluation of nitrogen fertilization effect on apple-tree leaves and fruit by fluorescence imaging, in: *Advances in Laser Remote Sensing for Terrestrial and Hydrographic Applications*. Presented at the Advances in Laser Remote Sensing for Terrestrial and Hydrographic Applications, SPIE, pp. 100–110. <https://doi.org/10.1117/12.312615>
- Sperdouli, I., Andreadis, S., Adamakis, I.-D., Moustaka, J., Koutsogeorgiou, E., Moustakas, M., 2022. Reactive Oxygen Species Initiate Defence Responses of Potato Photosystem II to Sap-Sucking Insect Feeding. *Insects* 13, 409. <https://doi.org/10.3390/insects13050409>
- Sperdouli, I., Moustaka, J., Ouzounidou, G., Moustakas, M., 2021. Leaf Age-Dependent Photosystem II Photochemistry and Oxidative Stress Responses to Drought Stress in *Arabidopsis thaliana* Are Modulated by Flavonoid Accumulation. *Molecules* 26, 4157. <https://doi.org/10.3390/molecules26144157>
- Stamelou, M.-L., Sperdouli, I., Pyrri, I., Adamakis, I.-D.S., Moustakas, M., 2021. Hormetic Responses of Photosystem II in Tomato to *Botrytis cinerea*. *Plants* 10, 521. <https://doi.org/10.3390/plants10030521>
- Steele, N.M., McCann, M.C., Roberts, K., 1997. Pectin Modification in Cell Walls of Ripening Tomatoes Occurs in Distinct Domains. *Plant Physiol.* 114, 373–381. <https://doi.org/10.1104/pp.114.1.373>
- Stikić, R., Jovanović, Z., Vucelić-Radović, B., Savić, S., 2015. Tomato: a model species for fruit growth and development studies. *Bot. Serbica* 39, 95–102. https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_agrospace_3695
- Sumikura, M., Hidaka, M., Murakami, H., Nobutomo, Y., Murakami, T., 2007. Ozone micro-bubble disinfection method for wastewater reuse system. *Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res.* 56, 53–61. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.556>
- Sun, Q., He, Z., Ye, J., Wei, R., Yin, Y., Chai, L., Xie, Z., Xu, Q., Xu, J., Guo, W., Cheng, Y., Deng, X., 2024. Storage with Climacteric Fruits Improves Color and Quality of Citrus Fruit. *Acta Hort.* 51, 601–615. <https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2022-1203>
- Sun, Y., Wang, F., Guan, X., Chi, H., Yao, Y., 2023. ABA and Ethylene Enhance the Expression VIMyBA1 and VIMyBA2 and Promote Pigmentation in the Berry Skin via Their Interaction. *Acta Hort.* 50, 2323–2336. <https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2022-0919>
- Tadesse, T., Ibrahim, A.M., Abtew, W.G., 2015. Degradation and Formation of Fruit Color in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Response to Storage Temperature. *Am. J. Food Technol.* 10, 147–157. <https://doi.org/10.3923/ajft.2015.147.157>

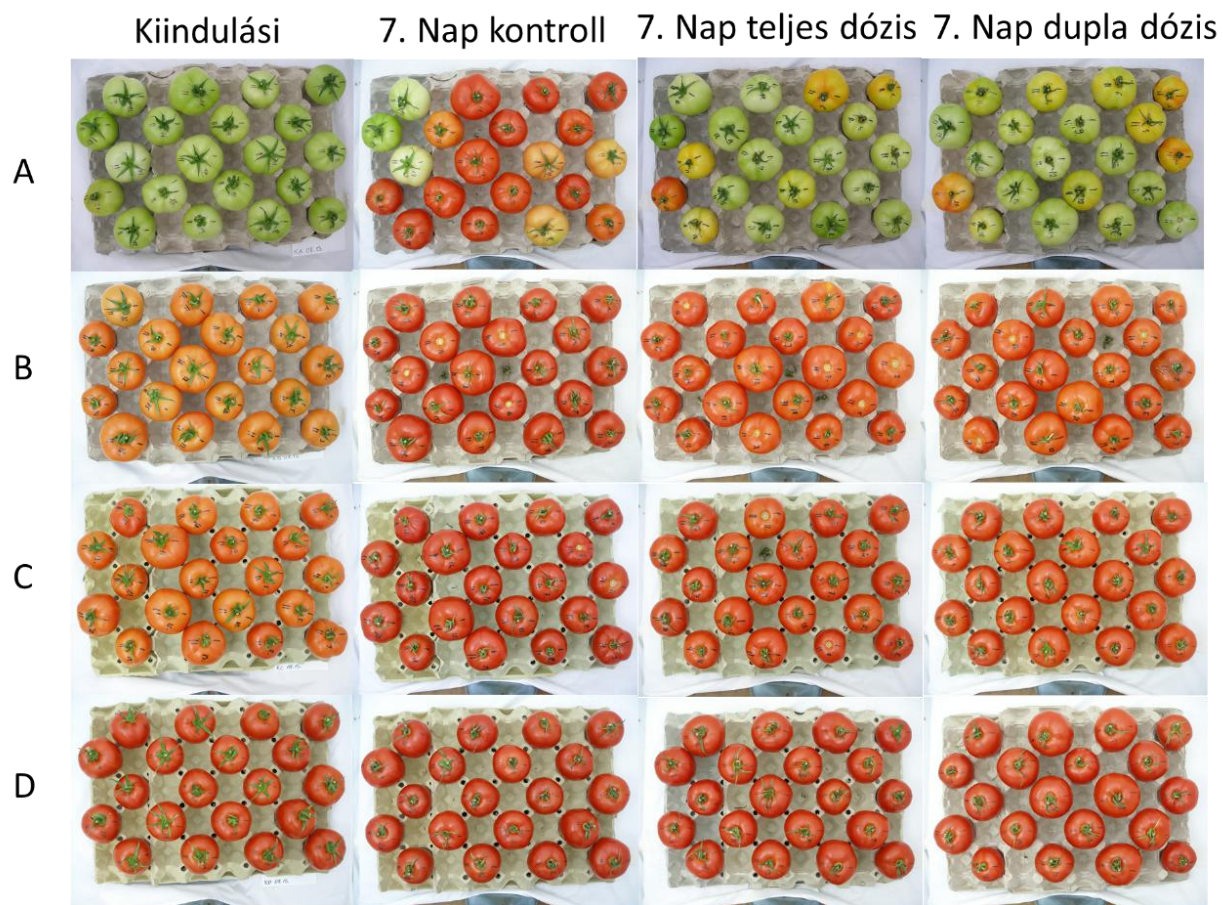
- Takahashi, M., 2005. ζ Potential of Microbubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas–Water Interface. *J. Phys. Chem. B* 109, 21858–21864. <https://doi.org/10.1021/jp0445270>
- Takahashi, M., Chiba, K., Li, P., 2007. Free-Radical Generation from Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus. *J. Phys. Chem. B* 111, 1343–1347. <https://doi.org/10.1021/jp0669254>
- Tan, S., 2006. Farmnote 145: Storage conditions for fresh fruit and vegetables.
- Tatsuki, M., Hayama, H., Nakamura, Y., 2009. Apple ethylene receptor protein concentrations are affected by ethylene, and differ in cultivars that have different storage life. *Planta* 230, 407–417. <https://doi.org/10.1007/s00425-009-0953-z>
- Tavallali, V., Moghadam, M., 2015. Postharvest application of AVG and 1-MCP enhance quality of ‘Kinnow’ mandarin during cold storage.
- Temesgen, T., Bui, T.T., Han, M., Kim, T., Park, H., 2017. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review. *Adv. Colloid Interface Sci.* 246, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.011>
- Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., Kobayashi, D., 2011. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chem. Eng. Sci.* 66, 3172–3179. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.02.043>
- Theologis, A., 1992. One rotten apple spoils the whole bushel: The role of ethylene in fruit ripening. *Cell* 70, 181–184. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(92\)90093-R](https://doi.org/10.1016/0092-8674(92)90093-R)
- Torres Quezada, E., Gandini Taveras, R.J., 2023. Basic Tomato (*Lycopersicon esculentum*) Physiology and Morphology. *Va. Coop. Ext. SPES-508NP*.
- Tsuge, H. (Ed.), 2014. *Micro- and Nanobubbles: Fundamentals and Applications*. Jenny Stanford Publishing, New York. <https://doi.org/10.1201/b17278>
- Tu, S.S., Choi, Y.J., McCarthy, M.J., McCarthy, K.L., 2007. Tomato quality evaluation by peak force and NMR spin–spin relaxation time. *Postharvest Biol. Technol.* 44, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.11.011>
- Ullah, S., Singh, Z., Khan, A.S., Khan, S.A.K.U., Razzaq, K., Payne, A.D., 2016. Postharvest application of 1-MCP and ethylene influences fruit softening and quality of ‘Arctic Pride’ nectarine at ambient conditions. *Aust. J. Crop Sci.* 10, 1257–1265. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.09.p7648>
- Urbano Bron, I., Vasconcelos Ribeiro, R., Azzolini, M., Pedro Jacomino, A., Caruso Machado, E., 2004. Chlorophyll fluorescence as a tool to evaluate the ripening of ‘Golden’ papaya fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 33, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.02.004>
- USDA, 2019. Tomatoes, red, ripe, raw, year round average. URL <https://fdc.nal.usda.gov/food-details/170457/nutrients> (accessed 3.19.25).
- USEPA, 2002. United States Environmental Protection Agency, Federal Register (796-4800), 67, 48796–48800.
- Van Dijk, C., Boeriu, C., Peter, F., Stolle-Smits, T., Tijskens, L.M.M., 2006. The firmness of stored tomatoes (cv. Tradiro). 1. Kinetic and near infrared models to describe firmness and moisture loss. *J. Food Eng.* 77, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.029>
- Van Linden, V., De Baerdemaeker, J., 2005. THE PHENOMENON OF TOMATO BRUISING: WHERE BIOMECHANICS AND BIOCHEMISTRY MEET. *Acta Hortic.* 925–932. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.120>
- van Loon, L.C., Geraats, B.P.J., Linthorst, H.J.M., 2006. Ethylene as a modulator of disease resistance in plants. *Trends Plant Sci.* 11, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.02.005>
- Villalobos-Acuña, M.G., Biasi, W.V., Flores, S., Jiang, C.-Z., Reid, M.S., Willits, N.H., Mitcham, E.J., 2011. Effect of maturity and cold storage on ethylene biosynthesis and ripening in

- ‘Bartlett’ pears treated after harvest with 1-MCP. *Postharvest Biol. Technol.* 59, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.08.001>
- Visy, A., 2024. Aktiv ultrahang alkalmazása hússok pácólási technológiájában (Doktori értekezés). Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Budapest.
- Visy, A., Jónás, G., Szakos, D., Horváth-Mezőfi, Z., Hidas, K.I., Barkó, A., Friedrich, L., 2021. Evaluation of ultrasound and microbubbles effect on pork meat during brining process. *Ultrason. Sonochem.* 75, 105589. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105589>
- Vogg, G., Fischer, S., Leide, J., Emmanuel, E., Jetter, R., Levy, A.A., Riederer, M., 2004. Tomato fruit cuticular waxes and their effects on transpiration barrier properties: functional characterization of a mutant deficient in a very-long-chain fatty acid beta-ketoacyl-CoA synthase. *J. Exp. Bot.* 55, 1401–1410. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh149>
- Wang, D., Yeats, T.H., Uluisik, S., Rose, J.K.C., Seymour, G.B., 2018. Fruit Softening: Revisiting the Role of Pectin. *Trends Plant Sci.* 23, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.01.006>
- Wang, L., Luo, Z., Li, J., Yang, M., Yan, J., Lu, H., Li, D., Chen, C., Aghdam, M.S., Wu, B., Li, L., 2019. Morphological and quality characterization of grape berry and rachis in response to postharvest 1-methylcyclopropene and elevated oxygen and carbon dioxide atmospheres. *Postharvest Biol. Technol.* 153, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.04.001>
- Wang, Y., He, Y., Zhang, M., Li, J., Xu, X., Shi, X., Meng, L., 2022. Slltpg3, a non-specific lipid transfer protein, acts on the cuticle synthetic pathway to delay water loss and softening of tomato fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 188, 111899. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111899>
- Wareham, P.D., Persaud, K.C., 1999. On-line analysis of sample atmospheres using membrane inlet mass spectrometry as a method of monitoring vegetable respiration rate. *Anal. Chim. Acta* 394, 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00266-4](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00266-4)
- Watkins, C.B., 2016. Pre- and postharvest inhibition of ethylene production and action by 1-MCP and the quality of apples and other horticultural products. *Acta Hortic.* 1–10. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1120.1>
- Watkins, C.B., 2008. Overview of 1-Methylcyclopropene Trials and Uses for Edible Horticultural Crops. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.1.86>
- Watkins, C.B., Nock, J.F., Whitaker, B.D., 2000. Responses of early, mid and late season apple cultivars to postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) under air and controlled atmosphere storage conditions. *Postharvest Biol. Technol.* 19, 17–32. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00070-3)
- Wills, R., Ku, V., 2002. Use of 1-MCP to extend the time to ripen of green tomatoes and postharvest life of ripe tomatoes. *Postharvest Biol. Technol.* 26, 85–90. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00201-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00201-0)
- Wills, R.B.H., Golding, J., 2016. *Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit and Vegetables*. 6th Edition. CAB International, Oxfordshire, United Kingdom.
- Win, T.O., Srilaong, V., Heyes, J., Kyu, K.L., Kanlayanarat, S., 2006. Effects of different concentrations of 1-MCP on the yellowing of West Indian lime (*Citrus aurantifolia*, Swingle) fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 42, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.05.005>
- World Population Review, 2025. Vegetable Consumption by Country. URL <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/vegetable-consumption-by-country> (accessed 3.19.25).
- Wu, C., Li, P., Xia, S., Wang, S., Wang, Y., Hu, J., Liu, Z., Yu, S., 2019. The role of interface in microbubble ozonation of aromatic compounds. *Chemosphere* 220, 1067–1074. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.174>

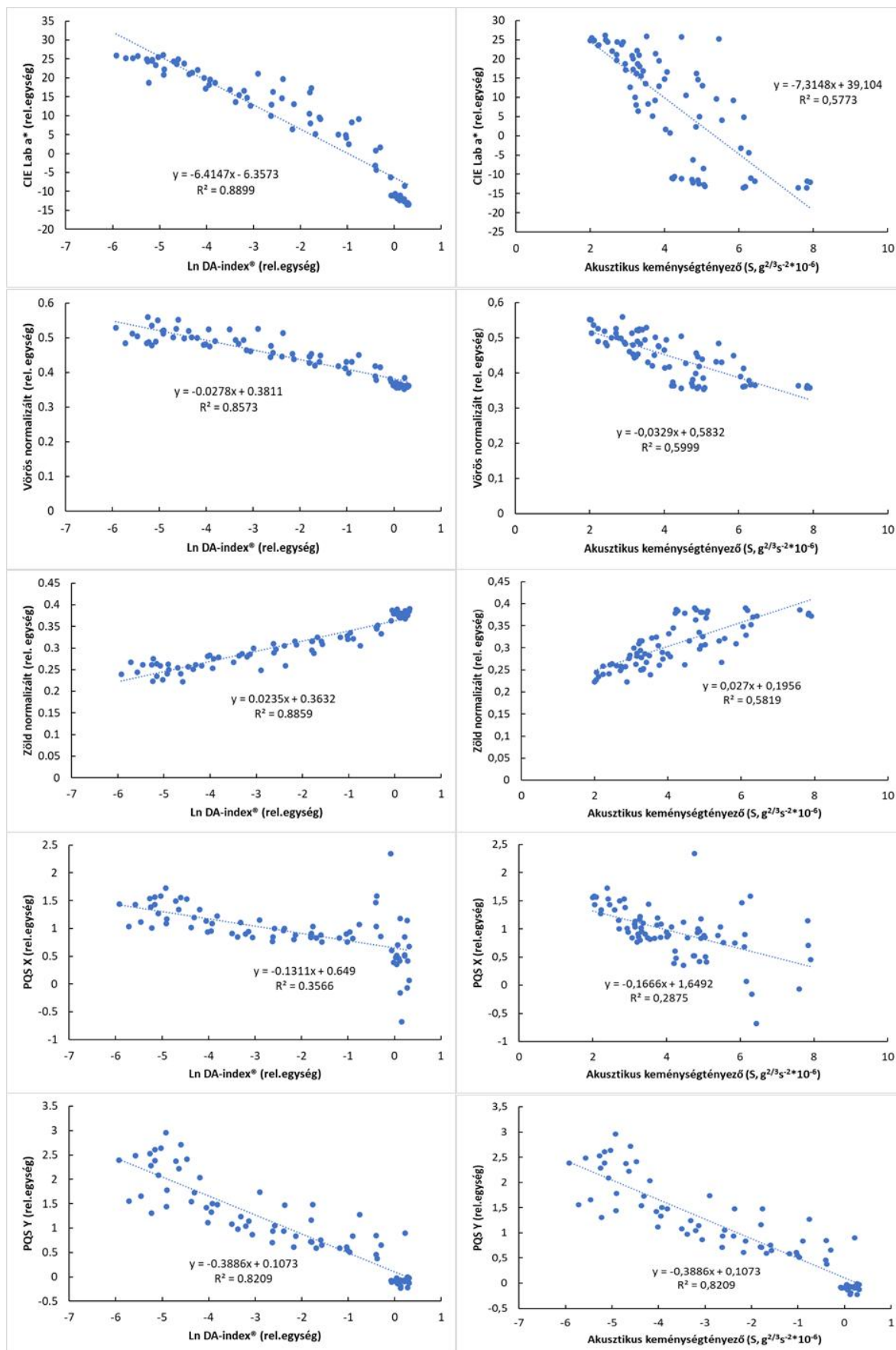
- Xu, F., Liu, Y., Xu, J., Fu, L., 2019. Influence of 1-methylcyclopropene (1-MCP) combined with salicylic acid (SA) treatment on the postharvest physiology and quality of bananas. *J. Food Process. Preserv.* 43, e13880. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13880>
- Yadeghari, L., Reza, H., Jirair, C., 2008. The Influence of Cold Acclimation on Proline, Malondialdehyde (MDA), Total Protein and Pigments Contents in Soybean (*Glycine max*) Seedlings. *Res. J. Biol. Sci.*
- Yan, H., Fu, K., Li, J., Li, M., Li, S., Dai, Z., Jin, X., 2024. Photosynthesis, Chlorophyll Fluorescence, and Hormone Regulation in Tomato Exposed to Mechanical Wounding. *Plants* 13, 2594. <https://doi.org/10.3390/plants13182594>
- Yang, C., Jiang, X., Ma, L., Xiong, W., Zhang, S., Zhang, J., Zhang, L., 2021. Carotenoid composition and antioxidant activities of Chinese orange-colored tomato cultivars and the effects of thermal processing on the bioactive components. *J. Food Sci.* 86, 1751–1765. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15682>
- Yasui, K., 2002. Influence of ultrasonic frequency on multibubble sonoluminescence. *J. Acoust. Soc. Am.* 112, 1405–1413. <https://doi.org/10.1121/1.1502898>
- Yasui, K., Towata, A., Tuziuti, T., Kozuka, T., Kato, K., 2011. Effect of static pressure on acoustic energy radiated by cavitation bubbles in viscous liquids under ultrasound. *J. Acoust. Soc. Am.* 130, 3233–3242. <https://doi.org/10.1121/1.3626130>
- Yokotani, N., Nakano, R., Imanishi, S., Nagata, M., Inaba, A., Kubo, Y., 2009. Ripening-associated ethylene biosynthesis in tomato fruit is autocatalytically and developmentally regulated. *J. Exp. Bot.* 60, 3433–3442. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp185>
- Yu, Y.-B., Yang, S.F., 1980. Biosynthesis of Wound Ethylene 1. *Plant Physiol.* 66, 281–285. <https://doi.org/10.1104/pp.66.2.281>
- Yuan, R., Carbaugh, D., 2007. Effects of NAA, AVG, and 1-MCP on Ethylene Biosynthesis, Preharvest Fruit Drop, Fruit Maturity, and Quality of ‘Golden Supreme’ and ‘Golden Delicious’ Apples. *HortScience* 42, 101–105. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.1.101>
- Zhang, C., Zhou, L., Xiao, Q., Bai, X., Wu, B., Wu, N., Zhao, Y., Wang, J., Feng, L., 2022. End-to-End Fusion of Hyperspectral and Chlorophyll Fluorescence Imaging to Identify Rice Stresses. *Plant Phenomics* 2022, 9851096. <https://doi.org/10.34133/2022/9851096>
- Zhang, J., Huang, G.-Q., Liu, C., Zhang, R.-N., Chen, X.-X., Zhang, L., 2018. Synergistic effect of microbubbles and activated carbon on the ozonation treatment of synthetic dyeing wastewater. *Sep. Purif. Technol.* 201, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.003>
- Zheng, L., Sun, D.-W., 2006. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes—a review. *Trends Food Sci. Technol.* 17, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.010>
- Zheng, T., Hu, Y., Zhang, X., Li, W., Fang, Y., Zhang, K., Chen, K., 2023. Advances in the Regulation of Anthocyanin Biosynthesis by Hormone Signaling in Fruit Trees. *Acta Hortic. Sin.* 50, 2516–2536. <https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2022-1038>
- Zhong, S., 2007. Protein localization and interactions in the tomato ethylene signalling pathway (Doktori értekezés). University of Nottingham.
- Zhong, Y., He, J., Luo, F., Gui, J., Sun, J., Li, L., 2024. The cellular and molecular processes of lenticel development during tree stem growth. *Plant J. Cell Mol. Biol.* 120, 699–711. <https://doi.org/10.1111/tpj.17015>
- Zhu, H., Zhu, B., Fu, D., Xie, Y., Hao, Y., Luo, Y., 2005. Role of Ethylene in the Biosynthetic Pathways of Aroma Volatiles in Ripening Fruit. *Russ. J. Plant Physiol.* 52, 691–695. <https://doi.org/10.1007/s11183-005-0103-9>
- Zhu, X., Song, Z., Li, Q., Li, J., Chen, W., Li, X., 2020. Physiological and transcriptomic analysis reveals the roles of 1-MCP in the ripening and fruit aroma quality of banana fruit (Fenjiao). *Food Res. Int.* 130, 108968. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108968>
- Zimmerman, W.B., Tesar, V., Butler, S., Bandulasena, H.C.H., 2008. Microbubble Generation. *Recent Pat. Eng.* 2, 1–8. <https://doi.org/10.2174/187221208783478598>

Zsom, T., 2007. Az étkezési paprika minőségváltozása a szedés utáni időszak alatt (Doktori értekezés). Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest.

M2 Az I. kísérlet során készített fényképes dokumentáció



M3. A logaritmikus DA-index® és a felületi színparaméterek közötti kapcsolat (balra), valamint az akusztikus keménységtényező (S) és a felületi színparaméterek közötti kapcsolat (jobbra).



M4. A II. kísérlet 14. napján készített fényképes dokumentáció

SmartFresh

Kontroll

A



B



C



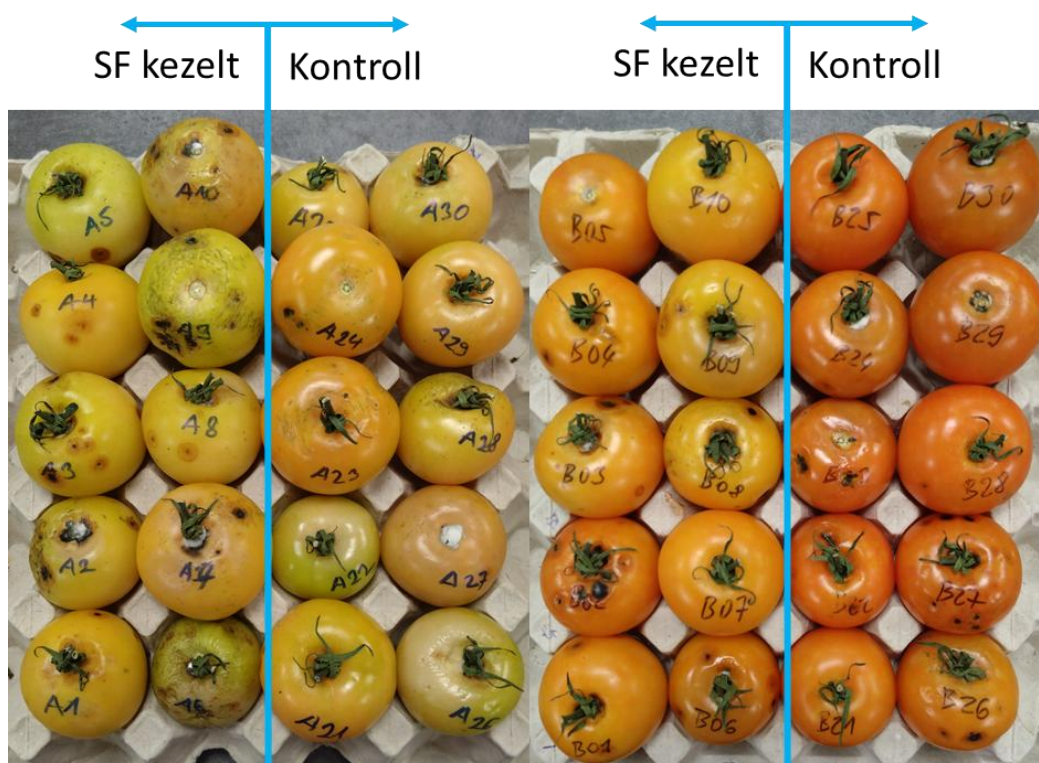
D



E

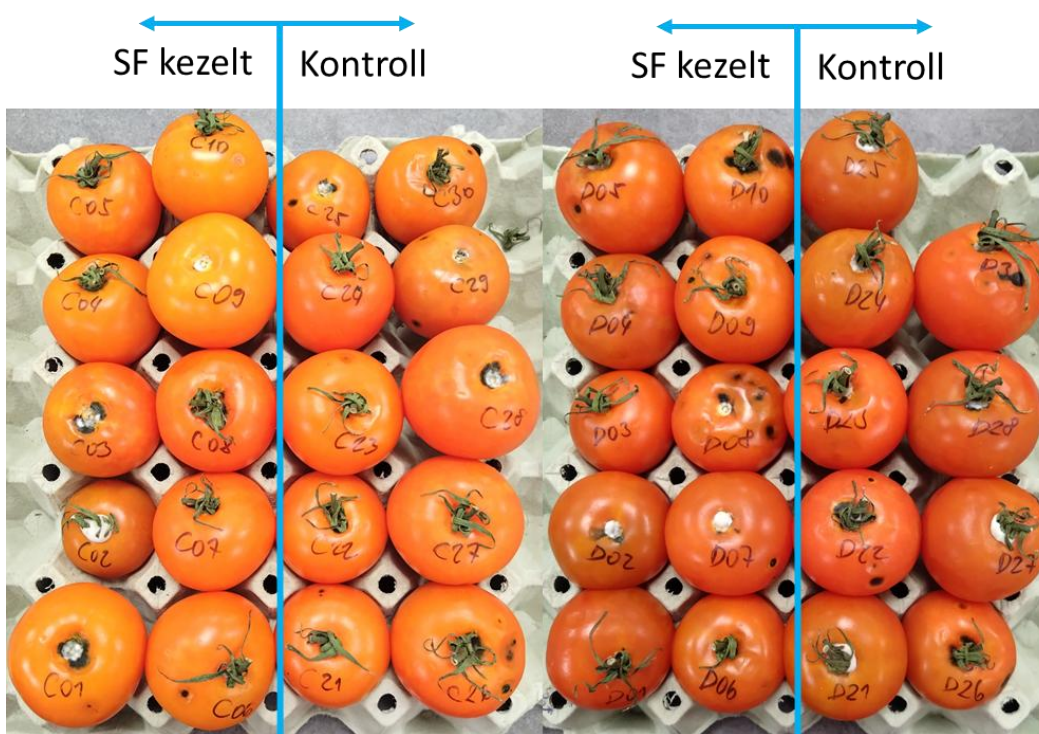


M5. A III. kísérlet végén készített fényképes dokumentáció a 2°C-on tárolt csoportok esetében



A

B



C

D

M6. A hidegkár megjelenési formái a III. kísérlet végén (35. nap)



KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom:

Témavezetőimnek, **Dr. Hitka Gézának** és **Dr. Zsom Tamásnak** a doktori munkám során nyújtott támogatásért és szakmai segítségért. Hozzájuk bármikor fordulhattam, ha segítségre volt szükségem és idejüket nem sajnálva igyekeztek támogatni mind a mérések során, mind a dolgozat elkészítésében. Külön köszönöm Dr. Zsom Tamásnak a paradicsomok beszerzésében való segítségét, ami miatt még a hajnali kelést is bevállalta, továbbá Dr. Hitka Gézának, hogy a SmartFresh™ kezeléshez szükséges anyagokat beszerezte, valamint a területen szerzett többéves szakmai tudásával segített a kezelések kivitelezésében.

Tomoga Péter östermelőnek, aki biztosította számomra a paradicsom mintákat és beengedett a gazdaságába, hogy szabadon válogathassunk.

Az **AgroFresh Inc.**-nek, hogy a méréseimhez szükséges SmartFresh™ technológiát biztosították.

Dr. Nguyen Le Phuong Liennek és **Dr. Szabó Gergőnek** a kezelések és mérések kivitelezésében nyújtott önzetlen segítségükért.

Dr. Baranyai Lászlónak a Polár Minősítő Rendszer területén nyújtott szakmai tanácsaiért, valamint a kiértékelésben való segítségéért.

Dr. Friedrich Lászlónak, hogy - mint a főnököm - lehetővé tette, hogy a munka mellett elvégezhessem a doktori képzést és erőteljesen támogatott, hogy időben be is fejezzem azt.

Az Állattermék és Élelmiszer-tartósítási Technológiai Tanszék minden munkatársának, akik szakmai tudásukkal és támogatásukkal segítettek a doktori cselekményem során.

Az Árukezelés, Kereskedelem, Ellátási Lánc és Érzékszervi Minősítés Tanszéknek, hogy biztosította a kísérleteim elvégzéséhez szükséges infrastruktúrát.

Szaktervezőimnek: **Bátor Emesének** és **Rabatin Jácintnak** a kísérleteim megvalósításában és kiértékelésében való közreműködésükért.

Opponenseimnek: **Dr. Kovács Etelkának**, **Dr. Balla Csabának** és **Dr. Felföldi Józsefnek** a bírálatok elkészítéséért, valamint a doktori munkám során adott hasznos tanácsokért.

Külön köszönet illeti a családomat, legfőképpen a kisfiamat, amiért türelmesen kivárta, hogy le tudjak ülni vele játszani, valamint édesanyámat, aki ezt néha megtette helyettem.

Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Horváth-Mezőfi Zsuzsanna
Neptun-kódja:	OGPDL8
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	☐ BSc/BA ☐ MSc/MA ☒ Doktori (PhD) ☐ Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	
A munka címe:	Az étkezési paradicsom utóérését és tárolhatóságát befolyásoló postharvest tényezők hatásának vizsgálata

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

☐ A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

☒ B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást. (Kérjük, tölts ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztensi vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrektúra, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)
Fordítás és nyelvi korrektúra	OpenAI ChatGPT (GPT-5, 2025)	

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka **mellékletében való csatolása szükséges.**)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve, verziója, elérhetősége	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet bejegyzésének sorszáma
-			

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

.....

.....

.....

.....

4. Doktori képzésben résztvevők nyilatkozata¹

A doktori képzésben részt vevő hallgatókra a fentiekén túl az alábbi további szabályok vonatkoznak:

1. **Kötelező ismertetés:** A II. Táblázatban feltüntetett minden MI-használat körülményeit az értekezés "Anyag és módszer" fejezetében részletesen be kell mutatni.
2. **Témavezetői ellenjegyzés:** A nyilatkozatot a témavezetőnek is jóvá kell hagynia.

Kijelentem, hogy a fentebb részletezett, a doktori képzésre vonatkozó külön szabályokat megismertem és a disszertációm elkészítése során maradéktalanul betartom.

5. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: Budapest, 2025. november 18.

.....
Hallgató aláírása

.....
Témavezetők aláírása

¹ Ez a pont kizárólag a doktori képzések hallgatóira vonatkozik, más képzési szinteken a rész a Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozatig törölhető a dokumentumból.