

Doktori értekezés tézisei

Gyalai Ingrid Melinda

Gödöllő

2025



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**Csípős paprikafajták bioaktív komponenseinek vizsgálata a
genotípusok, az évjárat és a termesztési mód összefüggésében**

Gyalai Ingrid Melinda

Gödöllő

2025

A doktori iskola

megnevezése: Növénytudományi Doktori Iskola
tudományága: növénytermesztési és kertészeti tudományok
Vezetője: Prof. Dr. Helyes Lajos
egyetemi tanár, az MTA levelező tagja
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
Növénytudományi Doktori Iskola

Témavezető: Dr. Lantos Ferenc
egyetemi docens
Szegedi Tudományegyetem, Mezőgazdasági Kar,
Növénytudományi és Környezetvédelmi Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

1. A munka előzményei, célkitűzések

Az értekezésemben négy különböző típusú csípős paprika beltartalmi elemeit vizsgáltam, az általam választott termesztési mód, a genotípus és az időjárás összefüggésében. A vizsgált fajták a Bhut jolokia (*Capsicum chinense* x *Capsicum frutescens*) chili paprika, a Cserkó (*Capsicum annuum* L. var. *cerasiforme*) cseresznyepaprika, a Szegedi 178 (*Capsicum annuum* L. var. *longum grossum*) fűszerpaprika és a Rekord (*Capsicum annuum* L.) étkezési paprika volt. Ezen fajták Magyarországon ismertek és nagyon kedveltek, régóta termesztjük őket.

A növényi eredetű élelmiszerekben található bioaktív vegyületek alapvetően pozitív egészségügyi hatással vannak az emberi szervezet számára. A bioaktív vegyülettartalom és ezek típusa azonban a genetikai és környezeti tényezők függvényében változhat (Bae et al. 2014). Deepa és munkatársai (2007) érett és éretlen paprikában vizsgálták a C-vitamin és kapszaicinoid tartalmat. Az eredményeik szerint az érett termésekben magasabb volt az aszkorbinsav- és kapszaicinoid tartalom is. Marín et al. (2004) szerint azonban a flavonoidtartalom arányosan csökken a paprika érése során. Az Egyesült Államokban, illetve Ázsiában széles körben foglalkoznak a különböző paprika típusok beltartalmának elemzésével és humánélettani, illetve farmakognóziái hatásával (Lantos 2018). A csípős paprika az A-provitamin, az E- és C-vitamin, a karotinoidok és olyan fenolos vegyületeknek forrása, mint a kapszaicinoidok, a kvercetin vagy a luteolin. Ezek a vegyületek antioxidáns hatással, illetve egyéb pozitív biológiai aktivitással rendelkeznek (Batiha et al. 2020). A különböző paprikafajták különböző kombinációban tartalmazzák a karotinoidokat, kapszaicinoidokat és kapszinoidokat, amelyek így a paprikának eltérő szint és csípősséget adnak (Yang et al. 2014).

A környezeti feltételek és az agronómiai tulajdonságok, a genetika és egyéb tényezők megváltoztathatják az élelmiszerek bioaktív tulajdonságait (Jifon et al. 2012), azonban csak néhány tanulmány számolt be a környezeti tényezők és a termesztési módok hatásáról a paprika bioaktív vegyülettartalmára. Hazánkban, leginkább az Alföldön a paprika- és fűszerpaprika-termesztés fő kihívásai közé tartozik a gyakori aszály, a szélsőséges időjárás és az öntözés nehézségei, amelyek jelentősen befolyásolják a termés mennyiségét és minőségét. Kutatói munkám során célul tűztem ki, hogy négy különböző genetikai tulajdonságú paprika beltartalmi elemeit vizsgáljam az adott környezeti feltételek mellett, így tisztább képet kapva arról, hogy ezek a hatások miként befolyásolják a bioaktív elemek jelenlétét a termésekben.

A dolgozatom elkészítéséhez az alábbi célokat fogalmaztam meg:

1. A négy különböző csípős paprika genotípus bioaktív komponenseinek feltárása modern HPLC módszer alkalmazásával.
2. A legfontosabb beltartalmi elemek (kapszaicinoidok, karotinoidok, tokoferolok, C-vitamin) mennyiségének összehasonlítása az általam vizsgált fajták esetén.
3. Fontosnak tartottuk megállapítani, hogy a beltartalmi elemek alakulását milyen tényezők befolyásolták (pl.: genotípus, időjárási körülmények, szedési időpont).
4. Továbbá célként fogalmaztam meg, hogy a három faktor (fajta, évjárat, szedés), valamint ezek interakcióinak hatását meghatározzam a függő változókra (kapszaicinoidok, karotinoidok, tokoferolok, C-vitamin).

2. Anyag és módszer

A kísérleti körülmények

A kísérletet a lakóhelyemen, Pusztaföldváron (Békés vármegye) végeztem szabadföldi körülmények között a 2022 és 2023-as években. GPS koordináták: 46.535054, 20.800754. Blokk: EJYT5-8-17, Hrsz: 117. A termesztéshez nem alkalmaztam talajtakarást és mulcsot sem. Négy különböző mértékben csípős paprikát választottam a kísérlethez, mind a két évben ezeket termesztettem és vizsgáltam. A kísérletet randomizált blokk elrendezésben állítottam be, minden fajta esetében négy ismétléssel.

A palántanevelés egy alacsony légterű, dupla falú fóliasátorban történt, amiben fűtési lehetőség is volt. A vetéshez 37x37x40 mm lyukméretű szaporítótálcát használtam, és Kekkilä DSM 3W tőzegföldet. A kiültetés 2022-ben május 13-án, 2023-ban pedig május 7-én történt. A vizsgálat fajtánként 30 növényen, négy ismételten zajlott, így összesen 480 növény került értékelésre. A sortávolság 90 cm, a tőtávolság 30 cm volt, a termesztés során csepegtető öntözés került alkalmazásra.

Betakarítás, minták előkészítése

A betakarítás két alkalommal történt mind a két évben. 2022-ben szeptember 8-án és 20-án, 2023-ban pedig augusztus 30-án és szeptember 16-án. A betakarítás minden fajta esetében teljes biológiai érettségben történt. Minden fajta terméséből ismételtenként legalább 400 gramm lett begyűjtve a vizsgálat céljából. Minden leszedett mintát egy hétig tároltam ládában, szellős helyen. A mintákat ez után ketté vágtam és a Szegedi Tudományegyetem, mezőgazdasági Kar szárítószekrényében szárítottam 24 órán keresztül 60°C-on. Ez a hőmérséklet optimális a szín és egyéb tartalmak megőrzéséhez. A teljesen száraz mintákat szobahőmérsékleten való lehűlés után

vákuumfóliáztam. Közvetlenül az analitikai mérések előtt daráltam le a mintákat.

Karotinoidok és tokoferolok mérése

A zsírban oldódó karotinoidokat és tokoferolokat őrlött paprikamintákból vontuk ki egy korábbi protokoll szerint (Daood et al. 2014). Fél gramm jól homogenizált mintát 50 ml 1:1:2: metanol-aceton-diklórétán 1:1:2 arányú keverékének hozzáadásával extraháltunk, kézi rázással, szobahőmérsékleten 15 percig. Az elegyet ezután szűrőpapíron keresztül kerek lombikba szűrtük. Az oldószert vákuumos párologtatóval (PRO-400, Vacuubrand, Németország) 40 °C-on szárazra pároltuk. A maradékot ezután újra feloldottuk 10 ml 55:18:24 metanol-2-propanol-acetonitril keverékben. A 0065 traktumot a HPLC-analízis előtt tovább tisztítottuk egy hidrofób PTFE, 0,22 μ , 13 mm-es fecskendőszűrőn keresztül.

A karotinoidok és a tokoferolok egyidejű HPLC-meghatározását fordított fázisú Nulcleodur 100, 3 μ , 240 x4,6 mm-es oszlopon végeztük 8% víz-metanolban (A) és 10:35:55 metanol-acetonitril-2-propanol keverékének gradiens elúciójával 0,7 ml/perc áramlási sebességgel. Az egyidejű detektáláshoz a DAD- és a fluoreszcens detektorokat egyazon futtatásban működtettük.

A karotinoidok LC-DAD-MS/MS azonosítását egy Waters Acquity I-osztályú UPLC-rendszerrel végeztük, amelyhez egy Waters Xevo TQ-XS MS/MS-t csatlakoztattunk, Duah et al. (2021a) részletes leírásai szerint. A karotinoidok és a tokoferolok egyidejű HPLC-meghatározását fordított fázisú Nulcleodur 100, 3 μ m, 240 x4,6 mm-es oszlopon végeztük 8% víz-metanolban (A) és 10:35:55 metanol-acetonitril-2-propanol keverékének gradiens elúciójával 0,7 ml/perc áramlási sebességgel. Az egyidejű detektáláshoz a DAD- és a

fluoreszcens detektorokat egyazon futtatásban működtettük. A karotinoidokat 225 és 600 nm között detektáltuk. A csúcsokat a spektrumtulajdonságaik, tömegspektrumuk (protonált ionok m/z értékei) és retenciós idejük irodalmi adatokkal való összehasonlításával azonosítottuk (Schweiggert et al. 2007; Bonaccrosi et al. 2016). Továbbá a cisz-izomereket a 340 és 362 nm közötti további abszorpciós maximum megjelenése, valamint a Q-arány értéke alapján azonosítottuk (Gupta et al. 2015; Schieber és Carle, 2005).

A tokoferolokat Em:295 nm és Ex: 325 nm között detektáltuk. A csúcsokat a spektrumtulajdonságaik, tömegspektrumuk (protonált ionok m/z értékei) és retenciós idejük irodalmi adatokkal való összehasonlításával azonosítottuk (Schweiggert et al. 2007; Bonaccrosi et al. 2016).

Kapszaicinoidok mérése

A kapszaicinoid-tartalom meghatározásához minden mintából 0,5 g jól homogenizált őrleményt mértünk ki egy Erlenmeyer-lombikba, majd 50 ml HPLC minőségű metanolt adtunk hozzá. A lombikokat egy 300 rpm fordulatszámú mechanikus forgó rázógéphez helyeztük 20 percre, majd 5 percen keresztül ultrahangos kezelésnek vetettük alá egy vízfürdős ultrahangos készülék segítségével. A mintákat ezután 0,45 µm pórusméretű Whatman no.1 szűrőpapíron átszűrtük.

A szűrt kivonatokat tízszeres hígítással tovább tisztítottuk HPLC minőségű metanollal, majd Chromofil hidrofób PTFE fecskendőszűrőn átengedve készítettük elő a HPLC műszerbe való injektálásra.

A kapszaicinoid kivonatokat egyedi vegyületekre választottuk szét Purospher Star C18, 2,7 µm, 125 mm fordított fázisú oszlopon, izokratikus eluálással 48:52 arányú víz–acetonitril elegyben, 0,7 ml/perc áramlási sebességgel, Daood et al. (2015) korábbi tanulmányának módszerét követve. A

kapszaicinoidokat fluoreszcens detektorral Ex: 285 nm és Em: 320 nm hullámhossz mellett detektáltuk. Az eluenseket retenciós idejük és egy korábban leírt HPLC-MS/MS protokoll (Daood et al. 2015) alapján azonosítottuk.

C-vitamin mérése

A C-vitamin-tartalom meghatározásához minden mintából 0,5 g paprika őrleményt mértünk ki egy dugóval lezárt lombikba, majd 30 ml lehűtött 3%-os metafoszforsavat adtunk hozzá. A keverékeket egy 300 rpm fordulatszámú mechanikus forgó rázógépből ráztuk 20 percen keresztül. Ezután a keverékeket centrifugacsövekbe öntöttük, és 5000 g-n centrifugáltuk 5 percen keresztül. Az így kapott felülúszót egy 0,22 µm pórusméretű, 25 mm-es nejlon fecskendőszűrőn átszűrve tisztítottuk meg, majd injektáltuk a HPLC készülékbe.

Az L-aszkorbinsavat (C-vitamin) a többi szerves savtól és poláris fenolos vegyülettől egy Nautilus C18 aqua, 3 µm, 150 mm-es oszlopon választottuk el, ahol gradiens eluálást alkalmaztunk acetonitrillel, 0,01 M kálium-dihidrogén-foszfát pufferben, 0,7 ml/perc áramlási sebességgel. A detektálás 244 nm hullámhosszon történt diódás soros detektor (DAD) segítségével. Az L-aszkorbinsavat a mintacsúcs retenciós idejének és spektrális jellemzőinek összehasonlításával azonosítottuk.

Adatelemzés

Minden statisztikai elemzést az R 4.2.1-es verziójával végeztünk (RStudio Team, 2020). A karotinoid, tokoferol, kapszaicinoid és C-vitamin koncentrációk hatását az évek, betakarítások és fajták között általános lineáris modell (GLM) segítségével értékeltük. A kezelések hatékonyságát a Wilks-féle lambda (λ) alapján fogadtuk el. A kovarianciamátrix homogenitását

(homoszkedaszticitást) a Box-teszt segítségével ellenőriztük. A GLM-modell reziduumainak normalitását a Shapiro-Wilk teszt segítségével ellenőriztük minden függő változó esetében. A normalitást Kolmogorov-Smirnov tesztel ellenőriztük. A grafikonok feletti értékek az átlagot $\pm$ szórást (SD) jelentik. A hatásméretet a parciális eta-négyzet (η^2) segítségével értékeltük, amely a hatásméretet és a megfigyelt teljesítményt adja meg, jelezve a szignifikáns hatás helyes azonosításának valószínűségét. Ennek a mutatónak az értéke 0 és 1 között mozog, ahol a 0 a függetlenséget, az 1,00 pedig a determinisztikus kapcsolatot jelzi.

A vizsgált metabolitprofilok (karotinoidok xantofill vegyületek) mintázatainak vizuális megjelenítésére klaszteralapú hőtérképet (heatmap) alkalmaztunk a 'pheatmap' csomag segítségével az R környezetben (Sfaxi et al. 2025). A bemeneti adatok normalizálása oszloponkénti Z-score transzformációval (1) történt:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

ahol x az egyes mért karotinoid mennyiségek, μ az adott karotinoidra számított átlag az összes fajta esetében, σ pedig a szórása. A hőtérképen alkalmazott színspektrum a koncentrációk eltéréseit szemlélteti: a negatív Z-score értékek (átlag alatti) kék, a pozitív Z-score értékek (átlag feletti) piros színnel jelentek meg. A sor- és oszlopcsoportosítást hierarchikus klaszterezéssel végeztük (Euklideszi-távolság és "complete linkage" módszer alkalmazásával), amely a minták és metabolitok közötti hasonlóságok alapján rendezte a mátrixot. Az egyes cellákban szereplő értékek a standardizált (Z-score) értékeket jelenítették meg numerikusan is.

3. Eredmények és megvitatása

Környezeti tényezők (2022-2023)

A vizsgálat két éve között jelentős különbségek voltak a hőmérséklet és a csapadék eloszlásában. Szignifikáns különbségeket találtunk ($p < 0,05$) a júniusi és a szeptemberi átlaghőmérsékletek között is. 2022-ben júniusban és júliusban volt a legkevesebb csapadék a vegetációs időszakban, 24-25 °C-os átlaghőmérséklet mellett. 2023-ban ennek az ellenkezője volt igaz, májustól augusztusig összesen 419 mm csapadék hullott. A nyári hónapokban 20-24 °C-os átlaghőmérséklettel. A csapadékmennyiség 2022-ben az első betakarítást megelőző 15-20 napban 41 mm-ről a második szedés időszakára 67 mm-re nőtt, miközben a hőmérséklet jelentősen csökkent. 2023-ban a csapadékmennyiség 87 mm-ről 18 mm-re csökkent az első betakarítási időszakról a második betakarítási időszakra, miközben a hőmérséklet enyhén csökkent, és 22 °C felett maradt.

2022-ben a maximális hőmérséklet, – az akár 40 °C fölé emelkedő napok száma - valamint az átlaghőmérséklet lényegesen magasabb volt, mint 2023-ban, különösen három héttel az első és második betakarítás előtt. A 2022-es évben a hosszabb napsütéses időszakok a napenergia intenzitásában is megnyilvánultak, ami befolyásolhatta a növények fotoszintetikus aktivitását.

2023 augusztusában (87 mm) több csapadék hullott, mint 2022-ben (41 mm). Ezzel szemben 2022 szeptembere (67 mm) sokkal csapadékosabb volt, mint 2023-ban (18 mm), ami a betakarításkori és az azt megelőző időszakban fordított csapadékeloszlást eredményezett.

Terméseredmények (2022-2023)

Az időjárási viszonyokkal kapcsolatban arra az eredményre tudunk következtetni, hogy a 2022-es év magas hőmérséklete és alacsonyabb csapadékmennyisége enyhe növekedést eredményezett a bogyószámban (db/növény) és a termések tömegében (g/db) a 2023-as évben betakarított bogyókhoz képest, amelyeknél a csapadék mennyisége és a hőmérséklet pont ellentétes. Kivételt ez alól a Bhut jolokia fajta, ahol a bogyószám magasabb volt a 2023-as évben tapasztalt alacsony hőmérséklet és magas csapadékmennyiség ellenére is. Az elért eredmények azt mutatják, hogy a betakarítható termésmennyiség nagyban függ a genetikai és klimatikus viszonyoktól. A termések számát és tömegét tekintve a jobb eredmények, a melegebb termesztési szezonokban a magasabb napsugárzási intenzitásnak tulajdoníthatók be.

Karotinoidok

Az **1. táblázat** a sárga karotinoidok alakulását mutatja be, ahol látható a fajták, szedések és az évjárat hatása a függő változókra.

A 2022-es év első betakarításakor (szeptember 8) a Szegedi 178 fajta szignifikánsan magasabb ($p < 0,05$) értékeket mutatott a szabad sárga xantofill (FYX) tekintetében (370,73 $\mu\text{g/g}$), mint a Bhut Jolokia, a Cserkő és a Rekord fajta a Tukey post hoc teszt szerint. A sárga xantofill monoészter (YXME) mennyisége a Szegedi 178 fajtánál érte el a legmagasabb értéket (633,67 $\mu\text{g/g}$), amely szignifikánsan meghaladta a többi fajta értékeit, a Rekord első betakarítását kivéve. 2022 évben a második betakarítás (szeptember 20) során

Az összes sárga karotinoid (TY) esetében a Szegedi 178 és Bhut Jolokia fajták szignifikánsan magasabb értékeket értek el (1780,38 $\mu\text{g/g}$ és 1796,21 $\mu\text{g/g}$), míg a Cserkó és Rekord fajták alacsonyabb koncentrációt mutattak.

2022-es év második betakarításkor a sárga xantofilok diészter-frakciójának (YXDE) szintjén jelentős növekedés következett be, különösen a Bhut Jolokia fajtában, amelyben a diészterek tartalma a második betakarításkor bekövetkezett időjárási változások eredményeként kétszeresére nőtt a monoészterekéhez képest.

2023-ban az első betakarítás (augusztus 30) során a legmagasabb FYX értéket a Cserkó fajtánál (130,18 $\mu\text{g/g}$), illetve a Szegedi 178-nál mértem (125,30 $\mu\text{g/g}$), amelyek azonban jelentősen alacsonyabbak voltak a 2022-es év értékeihez képest. A YXME szempontjából a Szegedi 178 fajta ismét kiemelkedett (566,23 $\mu\text{g/g}$). A βc esetében az értékek szintén csökkentek az előző évhez képest.

2023-ban a második betakarítás (szeptember 16) során a FYX értékei jóval alacsonyabbak voltak, mint 2022-ben. A YXDE mennyisége szempontjából kiemelném, hogy a 2023-as évben az első és második szedés során minden fajta esetén alacsonyabb értéket kaptam, mint az adott fajtánál 2022-ben, bármelyik szedés esetén.

Összességében a 2022-es év magasabb értékeket mutatott minden sárga karotinoid esetében, míg a 2023-as év alacsonyabb eredményeket hozott ezen beltartalmi elemek szempontjából, ami a kedvezőtlen termesztési körülményekre utalhat. A Szegedi 178 fajta általában jobb beltartalmi mutatókkal rendelkezett, míg a Cserkó és Rekord fajták alacsonyabb értékeket értek el.

1. táblázat. A fajta, betakarítási idő és évjárat hatása a sárga színű karotinoid-csoportok koncentrációjára (µg/g szárazanyag) csípős paprika őrleményekben.

Év	Betak.	Fajta	FYX	YXME	YXDE	TY	AvP	βc
2022	1	BHJ	183,31 ± 1,50 AXa	459,86 ± 4,57 AXab	346,62 ± 8,57 AXa	1351,50 ± 18,02 AXab	425,10 ± 4,78 AXb	361,71 ± 4,03 AXb
		CS	234,27 ± 0,49 AXa	387,83 ± 1,16 AXa	226,28 ± 1,06 AXa	1013,99 ± 1,01 AXa	207,69 ± 0,58 AXa	165,61 ± 0,54 AXa
		R	211,33 ± 0,29 AXa	553,47 ± 0,65 AXbc	389,28 ± 0,70 AXa	1506,96 ± 1,51 AXb	438,83 ± 0,77 AXb	352,89 ± 0,68 AXb
		SZ178	370,73 ± 4,00 AXb	633,67 ± 5,83 AXc	308,21 ± 0,99 AXa	1605,60 ± 4,98 AXb	420,47 ± 4,57 AXb	292,99 ± 1,23 AXb
	2	BHJ	167,17 ± 0,62 AXa	443,72 ± 2,07 AXa	714,09 ± 4,41 AYb	1780,38 ± 9,50 AXa	529,26 ± 2,78 AXb	455,39 ± 2,47 AYc
		CS	226,19 ± 1,58 AXb	544,50 ± 6,14 AYab	393,93 ± 11,40 AXa	1446,05 ± 20,51 AXa	378,70 ± 6,22 AYa	281,43 ± 1,55 AYa
		R	159,99 ± 0,43 AYa	528,80 ± 1,16 AXa	415,84 ± 0,98 AXa	1479,55 ± 2,09 AXa	469,19 ± 0,66 AYab	374,92 ± 0,47 AYb
		SZ178	317,57 ± 0,88 AXc	683,04 ± 1,57 AXb	365,49 ± 0,98 AYa	1796,21 ± 3,28 AYa	509,71 ± 1,32 AXab	430,11 ± 1,20 AYbc
2023	1	BHJ	118,89 ± 0,49 BXab	442,35 ± 1,67 AXa	150,31 ± 0,34 AXb	859,35 ± 2,70 BXa	400,70 ± 1,33 AXab	132,88 ± 0,62 BXa
		CS	130,18 ± 0,49 BXb	543,66 ± 1,03 BXbc	86,32 ± 0,29 BXa	888,59 ± 2,10 BXa	435,34 ± 1,15 BXab	116,45 ± 0,44 BXa
		R	102,66 ± 0,24 BXa	452,46 ± 1,75 BXab	165,11 ± 0,71 BXb	868,40 ± 2,93 BXa	398,11 ± 1,56 AXa	125,88 ± 0,46 BXa
		SZ178	125,30 ± 0,76 BXb	566,23 ± 3,99 AXc	106,51 ± 1,03 BXa	950,82 ± 6,68 BXa	482,46 ± 3,19 AXb	139,68 ± 0,85 BXa
	2	BHJ	125,61 ± 0,27 BXb	277,05 ± 0,57 BYb	204,07 ± 0,37 BYc	769,33 ± 1,37 BYb	218,63 ± 0,37 BYc	162,59 ± 0,24 BYc
		CS	119,41 ± 0,29 BXab	230,34 ± 0,74 BYa	97,96 ± 0,47 BXa	521,80 ± 1,62 BYa	107,47 ± 0,48 BYa	74,09 ± 0,32 BYa
		R	111,32 ± 0,28 BXa	270,90 ± 0,91 BYab	264,54 ± 0,63 BYd	790,79 ± 2,06 BXb	220,90 ± 0,51 BYc	144,03 ± 0,34 BYc
		SZ178	145,77 ± 0,41 BXc	336,11 ± 1,51 BYc	163,92 ± 1,19 BYb	768,01 ± 3,80 BXb	183,84 ± 1,14 BYb	122,21 ± 0,81 BXb

A táblázat a következő rövidítéseket használja: szabad sárga xantofilok (FYX), sárga xantofil prekursorok (AvP), β-karotin (βc). Minden érték négy független ismételés átlagát ± SD jelenti. A különböző betűk eltérő csoportokat jelölnek: a nagybetűk (AB) az évek közötti, valamint a betakarítások közötti különbségeket mutatják (XY); a kisbetűk a fajták közötti különbségeket jelzik. (Tukey-féle HSD teszt, p <0,05).

A **2. táblázat** a piros karotinoidok alakulását mutatja be, ahol látható a fajták, szedések és az évjárat hatása a függő változókra. A három fő faktor hatását Tukey post hoc tesztel mutatom be, ahol a 2022-es év első betakarítása (szeptember 8) során a Szegedi 178 (454,55 µg/g), valamint Cserkó (369,82 µg/g) mutatta a legmagasabb szabad piros xantofill (FRX) értéket, amelyek jelentősen meghaladták a Bhut Jolokia (112,27 µg/g) és Rekord (159,80 µg/g) fajták értékeit. A piros xantofill monoészterek (RXME) szempontjából szintén a Szegedi 178 fajta tartalmazta a legnagyobb mennyiséget. Az összes piros karotinoid (TR) szintén a SZ178 fajtánál volt a legmagasabb (3734,95 µg/g), míg a Rekord (2417,79 µg/g) és Cserkó (2033,31 µg/g) fajták alacsonyabb, a Bhut Jolokia esetében pedig a legalacsonyabb volt (1871,70 µg/g). A TCv (összes látható karotinoid) alapján a Szegedi 178 fajta 5340,55 µg/g értékkel szignifikánsan magasabb volt a többi fajtához képest, mindkét szedés estén. 2022-es év második betakarítása (szeptember 20) során minden vizsgált fajta esetében az összes piros karotinoidok, piros xantofill mono- és diészterek, valamint a szabad piros xantofillok (FRX) koncentrációja csökkent a második betakarításból származó termésekben az első betakarításhoz képest, ami azt jelzi, hogy a 2022-es év második betakarítása idején az időjárási viszonyok nem voltak kedvezőek a vörös xantofillok bioszintéziséhez, különösen a Rekord (60,24 µg/g) és Cerkó (278,23 µg/g) esetén. A Szegedi 178 fajta továbbra is a legmagasabb értéket mutatta (419,85 µg/g), de csökkenést figyeltünk meg az első betakarításhoz képest. A TR mennyisége a Szegedi 178 fajtánál volt a legmagasabb (3597,97 µg/g), azonban az első betakarításhoz képest a Rekord (2159,60 µg/g) és Bhut Jolokia (1207,93 µg/g) fajtáknál szignifikáns csökkenés volt.

A 2023-as szezonban a vörös karotinoid csoportok tartalma általában szignifikánsan alacsonyabb volt ($p < 0,01$), mint a 2022-ben ugyanezen karotinoid csoportok esetében mért érték. Az ilyen nagy eltérés valószínűleg a 2023-as év jelentősen magasabb csapadékszintjének köszönhető (az ültetéstől a betakarításig tartó időszakban). A másik eltérés a két évszak között az volt, hogy a betakarítás időpontja ellentétes hatást mutatott a vörös színű karotinoidokra. A második betakarítási időszak időjárási tényezői a legtöbb vizsgált fajtánál a karotinoid tartalom enyhe, vagy szignifikáns növekedését okozták.

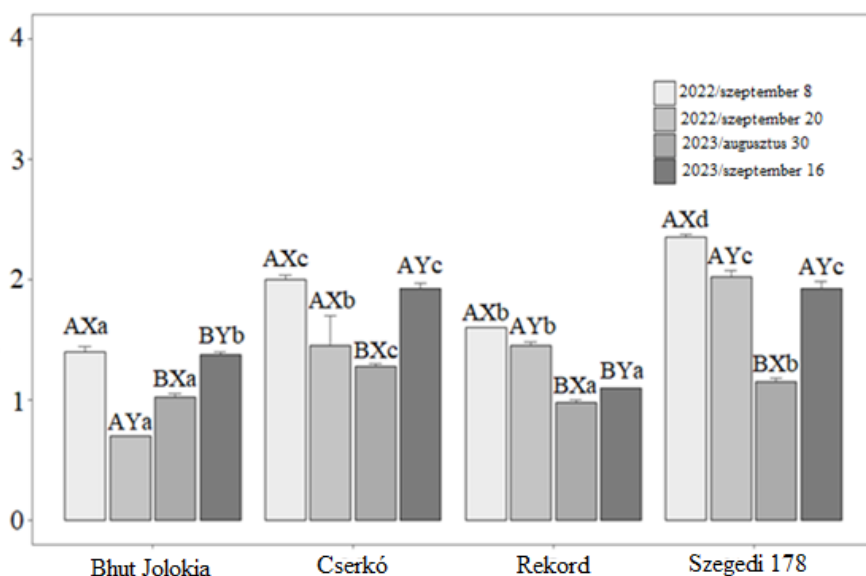
A 2023-as év első betakarítása (augusztus 30) során a RXME szempontjából a Cserkó fajta mutatta a legmagasabb értéket ($394,44 \mu\text{g/g}$), míg a Rekord fajta ($265,99 \mu\text{g/g}$) a legalacsonyabbat. A RXDE mennyisége szintén csökkent, a Szegedi 178 fajta tartalmazta a legnagyobb mennyiséget ($627,03 \mu\text{g/g}$), míg a Rekord fajta ($503,09 \mu\text{g/g}$) és Bhut Jolokia fajta ($495,54 \mu\text{g/g}$) alacsonyabb volt. Az összes piros karotinoid (TR) alapján a Cserkó ($1132,71 \mu\text{g/g}$) és Szegedi 178 fajta $1112,56 \mu\text{g/g}$ -mal szignifikánsan különböztek a Rekord ($830,94 \mu\text{g/g}$) és Bhut Jolokia ($904,12 \mu\text{g/g}$) eredményeitől. Az összes látható karotinoid (TCv) mennyiségét megnézve is hasonló tendenciát láthatunk. A második betakarítás (szeptember 16) során a szabad piros xantofilok (FRX) mennyisége tovább csökkent a Bhut Jolokia kivételével, az első betakarításhoz képest. A Szegedi 178 fajta továbbra is a legmagasabb értéket mutatta ($175,78 \mu\text{g/g}$). A RXME tekintetében a Bhut Jolokia fajta magasabb értékkel rendelkezett ($360,24 \mu\text{g/g}$), míg az Rekord fajta továbbra is a legalacsonyabb volt ($268,11 \mu\text{g/g}$). A RXDE és TR szintén a Szegedi 178 fajtánál volt a legmagasabb ($785,60 \mu\text{g/g}$ és $1467,75 \mu\text{g/g}$).

2. táblázat. A fajta, betakarítási idő és évjárat hatása a piros színű karotinoid-csoportok koncentrációjára (µg/g szárazanyag) csípős paprika őrleményekben.

Év	Betak.	Fajta	FRX	RXME	RXDE	TR	TCv
2022	1	BHJ	112,27 ± 0,79AXa	428,33 ± 3,41AXa	1331,10 ± 19,08 AXab	1871,70 ± 23,18 AXa	3223,20 ± 41,15 AXa
		CS	369,82 ± 0,97 AXb	634,25 ± 1,00 AXb	1029,24 ± 2,39 AXa	2033,31 ± 2,51 AXa	3047,30 ± 2,16 AXa
		R	159,80 ± 0,49 AXa	577,14 ± 0,95 AXb	1680,86 ± 1,86 AXb	2417,79 ± 3,03 AXa	3924,75 ± 4,23 AXa
		SZ178	454,55 ± 4,33 AXb	1097,39 ± 4,38 AXc	2183,01 ± 8,40 AXc	3734,95 ± 14,73 AXb	5340,55 ± 19,56 AXb
	2	BHJ	93,53 ± 0,26AXa	336,97 ± 1,85 AXa	777,44 ± 5,31 AYa	1207,93 ± 7,26 AYa	2988,31 ± 16,67 AXa
		CS	278,23 ± 0,79 AYb	582,99 ± 3,46 AXb	1096,92 ± 12,90 AXb	1958,13 ± 16,49 AXb	3404,18 ± 10,75 AYab
		R	60,24 ± 0,39 AYa	450,73 ± 2,19 AYa	1648,62 ± 4,08 AXc	2159,60 ± 6,22 AYb	3639,15 ± 8,15 AYb
		SZ178	419,85 ± 1,49 AXc	1075,78 ± 3,45 AXc	2102,33 ± 3,44 AXd	3597,97 ± 7,50 AXc	5394,18 ± 9,58 AXc
2023	1	BHJ	100,83 ± 0,41 AXab	307,74 ± 1,61 BXab	495,54 ± 1,82 BXa	904,12 ± 3,79 BXa	1629,47 ± 5,92 BXab
		CS	171,32 ± 1,05 Bxc	394,44 ± 0,88 Bxc	566,95 ± 1,36 BXab	1132,71 ± 2,98 Bxb	1896,82 ± 4,90 Bxb
		R	61,86 ± 0,10 Bxa	265,99 ± 1,03 Bxa	503,09 ± 1,89 BXa	830,94 ± 2,89 BXa	1522,66 ± 5,40 Bxa
		SZ178	132,37 ± 0,82 Bxb	353,15 ± 1,82 Bxb	627,03 ± 3,86 Bxb	1112,56 ± 6,25 Bxb	1931,07 ± 12,11 Bxb
	2	BHJ	107,20 ± 0,30 Bxb	360,24 ± 0,97 AYb	580,55 ± 1,20 BYb	1047,99 ± 2,42 AYb	1949,27 ± 4,39 BYb
		CS	166,50 ± 0,32 Bxb	357,34 ± 1,01 BYb	463,50 ± 1,53 BYa	987,34 ± 2,68 BYab	1617,24 ± 4,46 BYa
		R	60,12 ± 0,30 AXa	268,11 ± 1,01 Bxa	558,29 ± 1,40 Bxb	886,52 ± 2,68 BXa	1804,51 ± 5,24 BYab
		SZ178	175,78 ± 0,33 BYc	506,37 ± 1,72 BYc	785,60 ± 3,33 BYc	1467,75 ± 5,15 BYc	2463,34 ± 9,62 BYc

A táblázat a következő rövidítéseket használja: szabad piros xantofilok (FRX), piros xantofil monoészter (RXME), piros xantofil diészter (RXDE), összes piros karotinoid (TR), összes látható karotinoid (TCv). Minden érték négy független ismétlés átlagát ± SD jelenti. A különböző betűk jelentősen eltérő csoportokat jelölnek: a nagybetűk (AB) az évek közötti, valamint a betakarítások közötti különbségeket mutatják (XY); a kisbetűk a fajták közötti különbségeket jelzik.

Az évjárat okozta eltérések és a betakarítási idő hatása a színminőségre és a színstabilitásra jobban látható és követhető a vörös és a sárga karotinoidok aránya (R/Y) alapján, amelyet az **1. ábra** mutat. Az R/Y arány a 2022-ben vizsgált összes fajta esetében a második betakarítás felé csökkenő tendenciát mutatott, ami valószínűleg a levegő hőmérsékletének csökkenése miatt következett be, különösen a betakarítást megelőző éjszaka. A 2022-es évtől eltérően az R/Y arány 2023-ban minden fajtánál növekvő tendenciát mutatott a második betakarításkor, amikor a csapadék jelentősen alacsonyabb volt. A legmagasabb R/Y arányt az Szegedi 178-as örleményéből mutattam ki a 2022-es termesztési időszak első betakarításakor, illetve ennél és a Cserkő fajtánál a 2023-as második betakarításkor. Az ilyen arány magas értékei fontosak a paprikából készült termékek minőségének, piaci értékének és várható tárolhatóságának értékelésében.



1. ábra. A vörös és sárga karotinoidok aránya (R/Y). A nagybetűk (AB) a fajták közötti különbségeket mutatják az egyes évek között, valamint a betakarítások között (XY); a kisbetűk az ugyanazon évek fajtái közötti különbségeket jelzik.

A **2. ábra** a vizsgált karotinoidok Z-score adatait mutatja. A sorok a különböző paprika fajtákat (illetve fajták x év x szedés kombinációit) mutatják, az oszlopok pedig az egyes karotinoid komponenseket jelzik. A különböző színek a Z-score értékeket tükrözi, ahol piros vagy vörös színt kap az a cella, amely az adott komponensből (adott oszlop) átlag feletti mennyiséget mutat az adott paprikafajtánál (adott sor) az adott évben és betakarítási időben. Kék szín jelzi, hogy az adott komponens mennyisége átlag alatti. A fehér vagy nagyon világos szín pedig a közel átlagos értéket mutatja.

A hőtérképről leolvasható, hogy a Szegedi 178 a 2022-es év első és második szedésében több karotinoid komponensben is felül múlta a többi fajta, év, és szedés eredményeit. Ebben az esetben a RXDE, FRX, RXME, FYX és YXME mennyiségei jóval az átlag felett voltak. A Bhut Jolokia és Rekord fajták esetében szintén a 2022-es év első és második szedésében látható nagyobb eltérés, viszont itt a YXDE, YXME, β c és AvP tartalomban volt pozitív eltérés az átlagoktól. A legnagyobb eltérés negatív irányba minden fajta esetében a 2023-as év második szedésében volt tapasztalható. Leginkább a sárga színű karotinoidok esetében. Összességében elmondható, hogy a vizsgált komponensek közül a 2022-es év első és második szedésében volt a legtöbb átlagnál magasabb mennyiségű karotinoid. A 2023-as évben pedig az átlagnál többnyire alacsonyabbak, leginkább a második szedés esetén.

Fajta/év/szedés										
1,97	2,11	2,35	2,49	0,20	0,47	1,32	0,43	SZ178/22/1	2	
1,83	1,84	2,26	1,80	0,56	1,54	1,69	1,11	SZ178/22/2	1	
-0,42	-0,69	-0,64	-0,14	2,70	1,74	-0,12	1,26	BHJ/22/2	0	
1,11	-0,18	0,30	0,43	0,70	0,94	0,71	0,57	R/22/1	-1	
0,52	-0,55	-0,28	0,07	0,44	1,01	0,00	0,46	BHJ/22/1	-1	
1,06	-0,95	-0,19	-0,23	0,87	1,11	0,52	0,80	R/22/2	-2	
-0,76	-0,59	-0,55	-0,68	-0,44	-0,55	-1,38	-1,11	BHJ/23/2		
-0,80	-0,95	-0,91	-0,86	-0,06	-0,70	-1,43	-1,09	R/23/2		
-0,96	-0,13	-0,56	-0,76	-1,09	-1,25	-1,74	-1,96	CS/23/2		
-0,41	-0,05	0,03	-0,42	-0,68	-0,87	-0,93	-1,37	SZ178/23/2		
-0,90	-0,64	-0,75	-0,77	-0,77	-0,79	-0,13	0,28	BHJ/23/1		
-0,89	-0,94	-0,92	-0,98	-0,67	-0,84	-0,05	0,26	R/23/1		
-0,78	-0,09	-0,41	-0,62	-1,16	-0,92	0,64	0,54	CS/23/1		
-0,68	-0,39	-0,58	-0,68	-1,03	-0,73	0,81	0,90	SZ178/23/1		
0,00	1,46	0,53	0,73	-0,30	-0,53	-0,54	-1,19	CS/22/1		
0,12	1,74	0,33	0,62	0,73	0,38	0,64	0,11	CS/22/2		
RXDE	FRX	RXME	FYX	YXDE	β_c	YXME	AVP			

2. ábra. A paprika fajták hőtérképe a karotinoid komponensek alapján (Z-pontszám normalizálva). A piros szín magas Z-score-t, azaz az átlagtól való pozitív irányú eltérést, míg a kék szín negatív eltérést jelez. A 0-hoz közeli értékek (fehér) azt jelzik, hogy az összetevő koncentrációja közel van az átlaghoz, és nincs jelentős különbség a fajták között. A vonalak hierarchikus klaszterezést ábrázolnak, a fajtákat és a karotinoid komponenseket hasonlóságuk alapján csoportosítják.

Tokoferolok

Az E-vitamin-vegyületek elválasztására és meghatározására alkalmazott fordított fázisú HPLC protokoll lehetővé tette a fő tokoferolok és származékaik elválasztását, kivéve a dehidrogénezett tokotrienolokat, amelyek alig fordulnak elő a fűszerpaprikában (**3. táblázat**).

A 2022-es év első betakarításában a Szegedi 178 fajta mutatta a legmagasabb értékeket minden tokoferol esetében, különösen az α -Toc (601,08 $\mu\text{g/g}$) és az összes tokoferol (Total) (938,50 $\mu\text{g/g}$) tekintetében. A második betakarítású Rekord α -TocHQ és Szegedi 178 α -TocAC tartalmán kívül a többi fajta esetében nem volt szignifikáns különbség az első betakarításhoz képest.

A 2023-as év első betakarításában az α -Toc és Total mennyiségei kiemelkedtek a 2022-es évhez képest a legtöbb fajta esetében. Például a Bhut Jolokia fajta, ahol jelentős növekedést mutatott az α -Toc (752,12 $\mu\text{g/g}$) és Total (997,00 $\mu\text{g/g}$) mennyisége. A Cserkó fajta α -TocHQ (260,77 $\mu\text{g/g}$) értéke kiugróan magas volt. A második betakarítás során az α -TocHQ tartalomban csökkenést tapasztaltam, bár ez szignifikánsan csak a Bhut jolokia és Rekord fajtáknál volt bizonyítható. A Szegedi 178 fajtánál azonban továbbra is kiemelkedő volt α -Toc (836,01 $\mu\text{g/g}$) és Total (1205,98 $\mu\text{g/g}$) tokoferol mennyisége.

3. táblázat. A fajta, betakarítási időpont és évjárat hatása a tokoferolok koncentrációjára (µg/g szárazanyag) csipős paprika örleményekben.

Év	Betak.	Fajta	α-TocHQ	α-Toc	α-TocAC	α-TocES	Total
2022	1	BHJ	28,19 ± 5,15 AXa	515,11 ± 71,68 AXbc	34,03 ± 6,53 AXa	26,09 ± 4,88 AXa	603,43 ± 87,39 AXb
		CS	167,36 ± 9,73 AXd	433,41 ± 18,89 AXb	83,47 ± 5,66 AXb	63,64 ± 3,36 AXb	747,88 ± 28,39 AXb
		R	35,20 ± 5,78 AXb	129,62 ± 8,33 AXa	60,81 ± 2,59 AXb	54,52 ± 1,69 AXb	280,15 ± 12,32 AXa
		SZ178	90,25 ± 17,33 AXc	601,08 ± 60,45 AXc	151,70 ± 20,42 AXc	95,49 ± 18,39 AXc	938,50 ± 110,50 AXc
	2	BHJ	27,87 ± 1,36 AXa	445,67 ± 38,58 AXbc	37,75 ± 2,63 AXa	21,78 ± 1,58 AXa	533,07 ± 43,30 AXab
		CS	114,54 ± 44,39 AXb	337,37 ± 126,84 AXb	91,94 ± 36,49 AXb	52,08 ± 19,56 AXb	595,92 ± 227,03 AXb
		R	51,83 ± 8,12 AYa	136,12 ± 16,89 AXa	58,97 ± 3,07 AXab	54,83 ± 4,19 AXb	301,75 ± 23,81 AXa
		SZ178	100,83 ± 7,31 AXb	580,69 ± 66,14 AXc	198,43 ± 10,82 AYc	101,57 ± 13,54 AXc	981,53 ± 79,17 AXc
2023	1	BHJ	43,38 ± 5,70 BXa	752,12 ± 89,08 BXa	139,18 ± 35,49 BXb	62,32 ± 13,61 BXa	997,00 ± 142,65 BXa
		CS	260,77 ± 32,37 BXC	676,01 ± 57,00 BXa	55,10 ± 8,28 BXa	76,36 ± 4,64 BXa	1068,23 ± 66,42 BXa
		R	115,56 ± 26,77 BXb	402,61 ± 303,15 AXa	96,88 ± 28,52 BXab	62,29 ± 5,40 BXa	677,34 ± 356,16 AXa
		SZ178	151,71 ± 27,81 BXb	675,23 ± 292,33 AXa	100,54 ± 21,20 BXab	62,08 ± 6,35 BXa	989,56 ± 335,54 BXa
	2	BHJ	31,54 ± 1,99 BYa	765,56 ± 38,52 BXC	175,74 ± 17,79 BXb	55,95 ± 6,33 BXa	1028,79 ± 63,67 BXb
		CS	255,25 ± 22,81 BXd	550,35 ± 28,07 BYb	92,69 ± 9,66 AYa	68,52 ± 4,05 AYb	966,81 ± 55,19 BXb
		R	56,65 ± 10,37 AYb	206,73 ± 22,25 BXa	87,11 ± 6,37 BXa	50,21 ± 3,85 AYa	400,70 ± 39,60 BXa
		SZ178	119,78 ± 7,16 BXC	836,01 ± 23,80 BXd	168,36 ± 6,68 BYb	81,83 ± 5,28 BYc	1205,98 ± 18,89 BXC

Az ábrán található elnevezések a következőket jelentik: α-TocHQ: α-tokoferol-hidrokinon; α-Toc: α-tokoferol; α-TocAC: α-tokoferol-acetát; α-TocES: α-tokoferol-szukcinát; Total: összes azonosított tokoferol.

Kapszaicinoidok

A 2022-es év során a kapszaicinoidok tartalma jelentősen eltért a fajták között (**4. táblázat**) azonban a betakarítás időpontja csak elvétve volt szignifikánsan meghatározó tényező.

Az első betakarítás során a CAP (kapszaicin) tartalom a legmagasabb (1586,36 µg/g) a Bhut Jolokia fajtánál, míg legalacsonyabb mennyiség (514,24 µg/g) a Rekord fajtában volt. A DC (dihidro-kapszaicin) mennyiség hasonlóan magas volt a Szegedi 178 fajtánál (1263,53 µg/g) és a Cserkő fajtánál (1133,67 µg/g), míg a legalacsonyabb (640,13 µg/g) Bhut Jolokia fajtánál volt. A második betakarítás során a NDC tartalom a vizsgált fajtákban minden esetben emelkedett, bár szignifikánsan ez nem volt bizonyítható. A DC (dihidro-kapszaicin) értékek növekedést mutattak minden fajta esetében, különösen a Szegedi 178 (1448,39 µg/g) és a Cserkő (1171,11 µg/g) fajtáknál, valamint a Rekord fajtánál, ahol a legnagyobb arányú volt a növekedés (522,76 µg/g-ról 744,30 µg/g-ra, bár ezek az értékek nem voltak szignifikánsan bizonyíthatók.

A 2023-as évben a NDC értéke az első betakarítás során a Szegedi 178 fajtánál volt a legmagasabb (208,28 µg/g), azonban a második betakarításra jelentős csökkenés következett be (47,26 µg/g). A CAP koncentráció a Szegedi 178 esetében a legkiemelkedőbb (1233,90 µg/g), amely a második betakarításkor tovább növekedett (1430,46 µg/g). Az eredmények azt mutatják, hogy a statisztikai tesztek alapján a fajták és a betakarítási időpontok között szignifikáns különbségek voltak kimutathatók ($p < 0,05$), ami arra utal, hogy mind a genetikai háttér, mind pedig a betakarítás időpontja jelentős hatással van a vizsgált paraméterek értékeire.

4. táblázat. Kapszaicinoid-tartalom ($\mu\text{g/g DW} = \mu\text{g/g szárazanyag}$) alakulása a fajta, betakarítási időpont és az évszázad hatására a 2022-es és 2023-as években.

Év	Betak.	Fajta	NDC	CAP	DC	HCAP	HDC-2
2022	1	BHJ	36,11 ± 5,36 AXa	1586,36 ± 123,35 AXc	640,13 ± 85,04 AXa	35,04 ± 4,86 AXb	5,27 ± 0,52 AXa
		CS	246,31 ± 25,12 AXd	1339,94 ± 73,36 AXbc	1133,67 ± 83,22 AXb	9,87 ± 0,90 AXa	92,25 ± 6,84 AXd
		R	82,39 ± 3,50 AXb	514,24 ± 38,25 AXa	522,76 ± 26,40 AXc	10,37 ± 0,81 AXa	29,41 ± 1,26 AXb
		SZ178	195,02, ± 22,33 AXc	1200,74 ± 124,39 AXb	1263,53 ± 123,30 AXb	30,33 ± 4,12 AXb	65,38 ± 6,30 AXc
	2	BHJ	37,88 ± 1,10 AXa	1734,01 ± 44,41 AXc	646,98 ± 7,70 AXa	10,05 ± 1,08 AYa	10,16 ± 0,37 BXa
		CS	268,84 ± 16,28 AXc	1319,94 ± 145,89 AXb	1171,11 ± 103,56 AXb	8,28 ± 0,70 AYa	104,98 ± 6,78 AXd
		R	129,41 ± 21,22 AXb	771,99 ± 147,49 AXab	744,30 ± 125,36 AXab	14,15 ± 2,10 AXa	43,10 ± 5,67 BYb
		SZ178	239,06 ± 32,32 AXc	1401,93 ± 132,62 AXb	1448,39 ± 161,53 AXc	37,91 ± 5,04 AXb	81,01 ± 10,60 AXc
2023	1	BHJ	73,04 ± 9,72 BXa	919,09 ± 26,91 BXb	854,83 ± 38,27 BXb	25,58 ± 11,99 AXb	18,98 ± 3,23 BXa
		CS	38,72 ± 3,58 BXa	246,03 ± 38,21 BXa	289,00 ± 32,97 BXa	5,56 ± 1,65 BXa	22,76 ± 1,35 BXa
		R	48,61 ± 9,55 BXa	241,38 ± 38,18 BXa	337,19 ± 51,57 BXa	12,01 ± 1,38 AXab	29,57 ± 4,49 BXa
		SZ178	208,28 ± 31,47 AXb	1233,90 ± 218,18 AXc	1417,39 ± 224,81 AXc	63,04 ± 12,52 BXc	81,22 ± 11,50 BXb
	2	BHJ	51,03 ± 23,31 AXa	786,38 ± 490,60 BXb	775,94 ± 72,51 BXa	17,23 ± 1,78 AXa	22,90 ± 1,56 AXa
		CS	38,28 ± 5,49 BXa	202,29 ± 59,04 BYa	267,50 ± 63,36 BXa	4,08 ± 0,92 BYa	20,59 ± 2,05 BYab
		R	81,18 ± 10,84 BYa	558,50 ± 154,48 AYab	664,62 ± 98,34 AYa	13,66 ± 1,54 AXa	39,77 ± 4,62 AYab
		SZ178	47,26 ± 54,49 BYa	1430,46 ± 236,65 BYab	1425,24 ± 218,95 AXc	15,18 ± 1,78 BYb	76,42 ± 9,46 BYb

A nagybetűk (AB) a fajták közötti különbségeket mutatják az évek között, valamint a betakarítások közötti eltéréseket (XY). A kisbetűk a fajták közötti különbségeket jelzik. A hasonló betűvel jelölt értékek az oszlopon belül nem különböznek szignifikánsan egymástól (Tukey HSD teszt, $p < 0,05$). A rövidítések jelentése a következő: NDC: nordihidrokapkszaicin, CAP: kapszaicin, DC: dihidrokapszaicin, HCAP: homokapszaicin, HDC-2: homodihidrokapkszaicin -2.

Az **5. táblázatban** a CAP/DC (kapszaicin/dihidrokapszaicin) aránya látható, ahol jelentős eltéréseket tapasztaltam az egyes fajták és betakarítási időpontok között a 2022-es és 2023-as években. Ez a két komponens alkotja a csípős paprikák teljes kapszaicinoid-tartalmának legnagyobb részét. Az első betakarítás során a 2022-es évben a Bhut Jolokia fajta mutatta a legmagasabb értéket (2,48), amely 2023-ban jelentősen csökkent (1,08). A második betakarítás során szintén csökkenés volt megfigyelhető a legtöbb fajtánál. Összességében a Bhut Jolokia fajta mutatta a legmagasabb CAP/DC arányt mindkét évben és betakarítási időpontban. A 2023-as évben az előző év eredményeihez képest minden fajta esetében csökkent az arány, kivéve a Szegedi 178 esetében, ahol enyhe növekedés volt megfigyelhető. CAP/DC arányok statisztikai elemzése során az évek és szedési időpontok szerint nem, csupán a fajták között találtam szignifikáns különbséget.

5. táblázat. A kapszaicin és dihidrokapszaicin (CAP/DC) arány alakulása.

Év	Betakarítás	Fajta	CAP/DC
2022	szeptember 8	Bhut Jolokia	$2,48 \pm 0,33^{AXa}$
		Cserkó	$1,18 \pm 0,06^{AXb}$
		Rekord	$0,98 \pm 0,07^{AXc}$
		Szegedi 178	$0,95 \pm 0,12^{AXc}$
	szeptember 20	Bhut Jolokia	$2,03 \pm 0,05^{AXa}$
		Cserkó	$1,13 \pm 0,10^{AXb}$
		Rekord	$1,04 \pm 0,20^{AXb}$
		Szegedi 178	$0,97 \pm 0,16^{AXb}$
2023	augusztus 30	Bhut Jolokia	$1,08 \pm 0,03^{AXa}$
		Cserkó	$0,58 \pm 0,04^{AXb}$
		Rekord	$0,72 \pm 0,11^{AXc}$
		Szegedi 178	$0,87 \pm 0,12^{AXc}$
	szeptember 16	Bhut Jolokia	$1,01 \pm 0,08^{AXa}$
		Cserkó	$0,76 \pm 0,13^{AXcb}$
		Rekord	$0,84 \pm 0,10^{AXb}$
		Szegedi 178	$1,01 \pm 0,11^{AXa}$

A **3. ábrán** jól megfigyelhető, hogy néhány fajta a legtöbb kapszaicinoid esetében inkább negatív Z-score-t kapott (kék szín), vagyis az átlaghoz képest alacsonyabb az egyes kapszaicinoidok tartalma. Ez főleg a CAP és DC mennyiségénél jelentkezett a 2023-as év első és második szedésekor a Rekord és Cserkó fajtáknál. Ezzel szemben a 2022-ben betakarított fajták, mind a két szedése esetén több kapszaicinoidnál is magasabb értékeket (piros szín) mutat, ami azt jelzi, hogy ezek a paprika minták erőteljesebb kapszaicinoid-profillal rendelkeztek. A Szegedi 178 fajta esetén láthatjuk, hogy a legtöbb vizsgált kapszaicinoid mennyiségében átlag feletti eredménnyel rendelkezik.

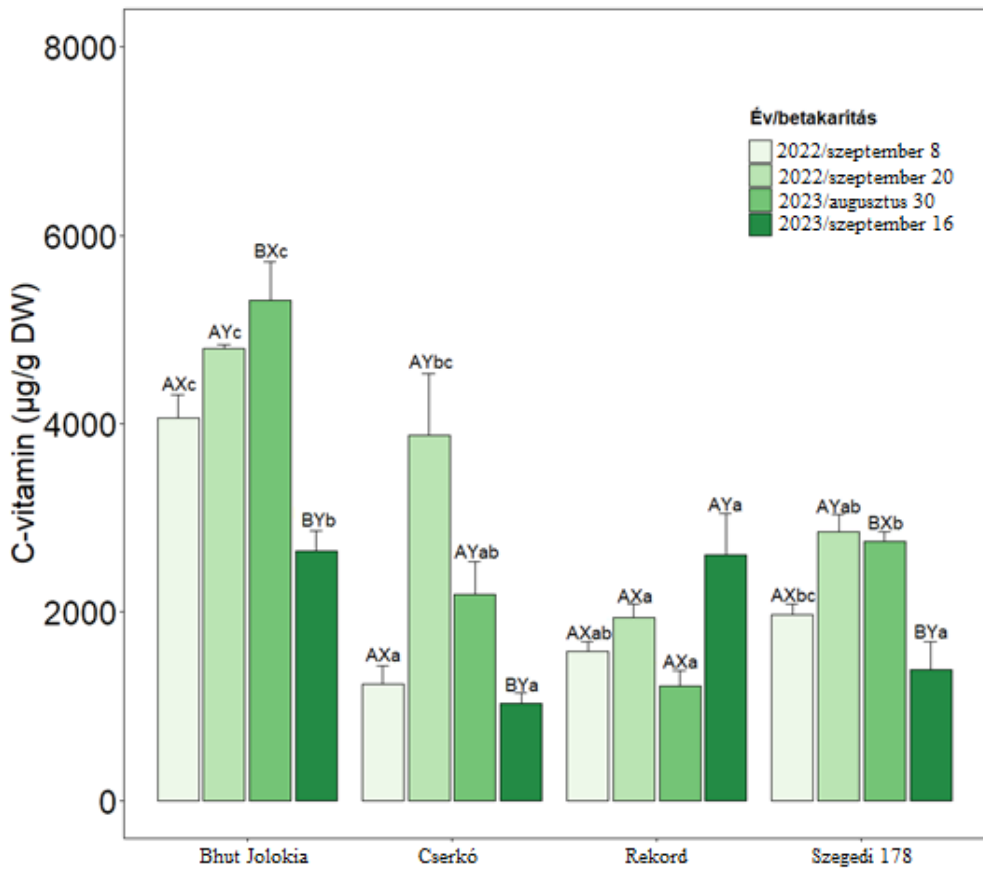
Az egyes fajták összehasonlításakor látszik, hogy ugyanannak a fajtának a különböző évjárai és szedési időpontjai is eltéréseket okoztak az egyes kapszaicinoidok mennyiségében. Ez arra utal, hogy a környezeti tényezők (esetemben az időjárás és betakarítási idő) jelentősen befolyásolták a csípősséget adó vegyületek szintjét ugyanazon fajtákban is. Az eredmények segíthetnek rávilágítani arra, hogy egy-egy kapszaicinoid mennyire stabil vagy változékony különböző körülmények között, különböző fajták esetén.

C-vitamin

C-vitamin tartalom tekintetében a vizsgált genotípusok értékei jelentős eltéréseket mutattak az egyes években és betakarítási időpontokban egyaránt (4. ábra). 2022 évben az első betakarítás során a legmagasabb C-vitamin tartalmat (4060,67 µg/g) a Bhut Jolokia fajtánál mértük, míg a legalacsonyabbat (1232,46 µg/g) Cserkő fajtánál. A második betakarítás során minden fajtánál C-vitamin tartalom növekedését figyeltük meg.

A 2023 évben az első betakarításkor a Bhut Jolokia fajtában a C-vitamin tartalom jelentősen nőtt az előző évihez képest és a legmagasabb (5309,00 µg/g) volt a fajták között. Ilyen körülmények alatt a Cserkő fajta C-vitamin tartalma (2188,13 µg/g) volt, ami jelentősen csökkent az előző év második betakarításához képest. Ebben az évben a második betakarítás során minden fajtánál a C-vitamin tartalomban csökkenés volt megfigyelhető a Rekord fajta kivételével, ami a korábbi szedésekhez képest ebben az esetben szignifikánsan magasabb volt.

A betakarítás időpontjában fennálló meteorológiai viszonyok hatását vizsgálva megállapítottuk, hogy az összes genotípus esetében szignifikáns növekedés volt tapasztalható a C-vitamin koncentrációjában, ahogy a csapadékmennyiség is jelentősen emelkedett ($p < 0,01$) az első termesztési szezon második betakarításakor. Különösen a Cserkő fajtánál volt ez a növekedés kiemelkedő, ahol a C-vitamin koncentrációja közel háromszorosára emelkedett, ezzel a Bhut Jolokia után a második legmagasabb szintet elérve.



4. ábra. A C-vitamin tartalom változása a 2022-es és 2023-as évben, két különböző szedési időpontban. A nagybetűk (AB) a fajtákon belüli különbségeket mutatják az egyes évek között, valamint a betakarítások között (XY); a kisbetűk az ugyanazon évek különböző fajtái közötti különbségeket jelzik. Az egy oszlopon belüli, azonos betűvel jelölt átlagok nem különböznek szignifikánsan (Tukey HSD teszt, $p < 0,05$).

4. Következtetések és a javaslatok

Az összes sárga karotinoid tekintetében jelentős különbség volt megfigyelhető a 2022-es és a 2023-as szezon között. A 2022-es évben a második betakarítás alkalmával a termések β -karotin-tartalma magasabb volt, mint az első betakarításkor mért érték, ami valószínűleg az abiotikus tényezők, mint a levegő hőmérséklete, a csapadék és a napsütéses időszak változása miatt következett be, ami megegyezik a Duah et al. (2021b) által megállapított eredményekkel. A β -karotin abiotikus tényezőkre adott válasza minden vizsgált fajtánál hasonló volt, kiemelve a Szegedi 178 fajtát, ahol 2022-ben a második betakarításnál 46%-os növekedést mértem az első betakarításhoz képest. A β -karotinhoz hasonló változási tendencia volt megfigyelhető az összes A-vitamin prekursor esetében is. A 2023-as szezonban az A vitamin prekursor koncentráció tekintetében ellentétes tendenciát találtam, mivel az első betakarításkor magasabb értékeket ($p < 0,01$) kaptam, mint a második betakarításkor, ami alátámasztja azt az elképzelést, hogy a fő sárga karotinoidok bioszintézisét jelentősen befolyásolják a betakarítást megelőző időjárási hatások. Az A vitamin prekursor legnagyobb mértékű csökkenését (76%) a Cserkő esetében figyeltem meg, amelyet a Szegedi 178 fajta 54%-os csökkenése követett, ami az időjárás hatásaira való nagyfokú érzékenysükről árulkodik. A különböző vizsgált fajták különböznek a xantofilok zsírsavakkal történő észterezésében is. A sárga xantofilok túlnyomórészt monoészterek formájában észtereződtek. A fajták közötti eltérés a betakarítást megelőző időjárás észteresedési folyamatra gyakorolt hatásának tudható be.

A 2022-es szezon második betakarításakor a legmagasabb A-provitamin- és β -karotin-szint a Bhut Jolokiánál, majd a Szegedi 178-nál volt. A Bhut Jolokia

fajta örleményéből, naponta 10 g elfogyasztása 380 µg retinolaktivitás-egyenértéknek (RAE) felel meg.

A sárga xantofillokhoz hasonlóan a vörös színű karotinoidok is zsírsavakkal észtereződve fordultak elő, ahol a diészterek domináltak. Ezek felelősek a vörös színért és annak stabilitásáért a friss- és feldolgozott piros paprikakészítményekben, egyetértve Jang et al. (2022) eredményeivel, akik megállapították, hogy a piros színű paprika termésének teljes karotinoidtartalma szorosan korrelál a piros xantofillok tartalmával.

Megállapítható, hogy a betakarítás előtti hűvösebb időjárás és a nagy mennyiségű csapadék negatívan befolyásolta a vörös pigment bioszintetikus útját (Duah et al. 2021b). A vörös karotinoidok fő csoportjai az összes látható karotinoiddal párhuzamosan hajlamosak változni, mivel a paprika mintákban a vörös xantofillok domináltak. Mivel a vörös xantofillok diésztereinek és monoésztereinek szintje párhuzamos volt az összes piros karotinoid-tartalommal, várható, hogy a Szegedi 178 és a Rekord fajtákból készült termékek eltarthatósága és piacképessége sokkal magasabb, mint a többi fajtáé. A diészterek arányának fajták közötti eltérése megváltoztathatja a különböző paprika fajtákból származó készítmények tárolási stabilitására vonatkozó várakozásokat. Kimutatható volt, hogy minél kisebb a csapadékmennyiség, annál magasabb a vörös pigmentek aránya. Hasonló eredményeket kapott Duah et al. (2021a); Ráth et al. (2020) is. Úgy tűnik, hogy a 2022-es évszak abiotikus tényezői, mint a hőmérséklet és a csapadék, ideálisak voltak a kiemelkedő tulajdonságok (pl.: intenzív piros szín és magas tápérték) kialakulásához.

A vörös színű karotinoidokhoz hasonlóan az E-vitamin is pozitívan reagált ($p < 0,05$) a csapadékszint csökkenésére a Szegedi 178 fajta második

betakarításakor 2023-ban, mely valószínűleg a karotinoidok és a tokoferolok bioszintézisének közös biokémiai tényezője miatt következhetett be. Ez a tendencia minden E-vitamin-komponensre is igaz volt. Érdekes, hogy 2022-ben, amikor több volt a csapadék mennyisége, nem volt szignifikáns különbség a betakarítások között a különböző fajták E-vitamin-szintjében, kivéve a Cserkót, amelynél a második betakarításkor a vitamin szintje szignifikánsan csökkent ($p < 0,05$). A kapott eredmények azt mutatták, hogy az E-vitamin oxidációjának mértéke független a vitamin bioszintézisétől, és inkább az oxidációs-redukciós útvonalakat szabályozó genetikai tényezőktől függ; az abiotikus tényezőkre adott válasza genotípusonként eltérő volt.

A 2023-as termesztési évben közvetlenül a betakarítást megelőző időszakot a 2022-es évhez képest viszonylag magasabb hőmérséklet (29 °C) és rendkívül alacsony csapadék (18 mm) jellemezte. A kapszaicinoidok időjárási tényezőkre adott válasza néhány héttel a betakarítás előtt elsősorban genetikai tényezőktől függött. Megállapítható, hogy a csípősségért felelős anyagok környezeti tényezőkre adott reakcióját a két fontos abiotikus faktor (levegő hőmérséklete és csapadék) kölcsönhatása nagyban befolyásolja. A levegő hőmérsékletéről kimutatták, hogy befolyásolja a kapszaicin bioszintéziséért felelős gének expresszióját különböző paprikafajtákban. González-Zamora et al. (2013) egy tanulmányában kimutatta, hogy a levegő hőmérsékletének emelkedése növeli a kapszaicin és dihidrokapszaicin szintjét. Yang és munkatársai (2024) több tanulmányt áttekintve arra a következtetésre jutottak, hogy a magas hőmérséklet sok, de nem minden csípős Capsicum genotípus esetében növelte a kapszaicinoidok tartalmát. A jelen tanulmányban a 2022-es évben mért magas kapszaicin és dihidrokapszaicin koncentrációk, amikor a magas sugárzási intenzitás és maximális hőmérséklet az első betakarítást megelőzően néhány napig meghaladta a 40 °C-ot, alátámasztja ezeket a

megfigyeléseket. A másik éghajlati változó, amely hozzájárulhatott a kapszaicinoidok alacsony tartalmához 2023-ban, a magas csapadékmennyiség lehetett. Bizonyította, hogy bizonyos esetekben a túlzott öntözés vagy a jelentős csapadékmennyiség csökkentheti a kapszaicinoid tartalmat bizonyos genotípusokban. Az egyik analitikai paraméter, amely segít a kapszaicinoidok változásának jobb megértésében genetikai variáció és éghajlati változások szempontjából, a kapszaicin/ dihidrokapszaicin arány.

A 2022-es és 2023-as év első és második betakarítása között bekövetkezett időjárási változás nem eredményezett szignifikáns különbséget az arányban egyik vizsgált genotípus esetében sem. A kapszaicin/dihidrokapszaicin arány változása inkább a betakarítás előtti csapadékmennyiséggel, mintsem a levegő hőmérsékletének változásával hozható összefüggésbe. Az eredmények alátámasztják azt a tényt, hogy a magas vízellátás csökkenti a kapszaicinoidok bioszintézisét szabályozó enzimek aktivitását bizonyos csípős paprika fajták esetében. A 2023-as év második betakarítása előtti drasztikus csapadékcsökkenés az arány jelentős növekedését eredményezte az első betakarításhoz képest, ami megerősíti azt a megfigyelést, hogy az enyhe szárazság (alacsony vízellátás) kedvezően hat a kapszaicin szintézisét katalizáló enzimek (kapszaicin-szintáz) aktivitására, miközben bizonyos mértékig csökkenti a dihidrokapszaicin-szintáz enzim aktivitását (Ruiz-Lau et al. 2011; Yang et al. 2024).

Az eredmények megerősítik, hogy a magas csípősségű paprikák esetében a C-vitamin bioszintézisére jelentős hatással van a csapadék vagy az öntözés által növekvő vízellátás, míg az alacsony vagy közepes csípősségű fajták esetében a csökkent vízellátás vagy enyhe szárazság elősegíti a C-vitamin felhalmozódását. A vízellátás és a C-vitamin tartalom közötti pozitív

összefüggés nem egyezik Duah et al. (2021b) korábbi megállapításával, amely szerint fordított kapcsolat áll fenn a vízellátás és a C-vitamin szint között. Valójában a csapadékmennyiség növekedése a talaj nedvességtartalmának emelkedéséhez vezet, amelyet korábban összefüggésbe hoztak a chili paprikákban felhalmozódó C-vitamin mennyiségével. A 2022-es évben a magas napfényintenzitásnak való kitettség, amely során a levegő hőmérséklete néhány napon keresztül meghaladta a 40 °C-ot, hozzájárulhatott a C-vitamin szintézisét szabályozó biokémiai tényezők növekedéséhez.

5. Új tudományos eredmények

- A csípőspaprikák zsírban oldódó fitokemikáliák tartalmát elsősorban az időjárási viszonyok szezonális változása befolyásolta. A sárga xantofilok többsége monoészterként észtereződött. A fajták közötti eltérések háttérében a betakarítást megelőző időjárási hatások állhatnak, amelyek befolyásolták az észteresedést.
- A genotípusok hatása nagymértékben befolyásolta a karotinoid és a tokoferol-tartalmat.
- A kapott eredményeim azt mutatták, hogy az E-vitamin oxidációjának mértéke leginkább az oxidációs-redukciós útvonalakat szabályozó genetikai tényezőktől függ.
- A kapszaicinoid- és C-vitamin-tartalom mennyiségének változása, valamint meteorológiai tényezőkre adott reakciója nemcsak a genotípussal, hanem a genotípus és az évjáráthatás közötti kölcsönhatással is jelentősen összefügg.
- A csípős paprikák fitokémiai összetevőinek érzékenysége az évjáráthatásra genotípusfüggő; a 2022-es és 2023-as termesztési időszakban mért eltérő csapadékmennyiség (154 mm és 437 mm), a betakarítást megelőző átlaghőmérséklet (2023-ban szignifikánsan magasabb, $p < 0,05$), egyaránt előidézhethet kedvező vagy kedvezőtlen változásokat.

6. Az értekezés témaköréhez tartozó publikációk

Impakt faktoros folyóiratcikkek

I.M. Gyalai, L. Helyes, H.G. Daood, F. Kovács, A. Szarvas, F. Lantos (2025). Genetic and seasonal factors influence pungent pepper capsaicinoid and vitamin C content. Horticulturae 11 (3), 286. (Q1)
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11030286>

I.M. Gyalai, F. Lantos, H.G. Daood, F. Kovács, A. Szarvas, L. Helyes (2025). Carotenoid and tocopherol content of pungent spice red peppers as affected by genetic and abiotic factors. Food Chemistry Advances 7 (3), 100987. (Q1)
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100987>

Egyéb tudományos cikkek

Lantos F., Makra L., Mike K., Gyalai I.M. (2022). SPAD values, as well as sugar- and capsaicin content indifferent varieties of outdoor peppers. COLUMELLA: JOURNAL OF AGRICULTURAL AND ENVIRONMENTAL SCIENCES, 9 (1). pp. 5-15. ISSN 2064-7816 (2022).

Konferencia közlemények

Gyalai I.M., Lantos F. (2021). Effect of nutrient solution with different N:K ratios on the yield of Claudius F1 sprouted peppers in container cultivation. RESEARCH JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE, 53 (4). pp. 75-82. ISSN 2066-1843 (2021).

Gyalai I.M. (2021). A kapszaicin antioxidáns hatásának vizsgálatai. Mezőgazdasági és vidékfejlesztési kutatások a jövő szolgálatában 2. Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Akadémiai Bizottság Mezőgazdasági Szakbizottság, p. 10. (2021).

Gyalai I.M. (2023). Különböző csípős paprika fajták beltartalmi elemeinek vizsgálata. Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Akadémiai Bizottság, Mezőgazdasági Szakbizottság.