



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

MONOFLORÁLIS VIRÁGPORCSOMÓK JELLEMZÉSE ÉS
ÖSSZEHASONLÍTÁSA HUMÁN TÁPLÁLKOZÁSHOZ KAPCSOLÓDÓ
TULAJDONSÁGAIK ALAPJÁN

Végh Rita

Budapest

2025

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

vezetője: Simonné Dr. Sarkadi Livia,
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet
Táplálkozástudományi Tanszék

Témavezetők: Dr. Csóka Mariann,
egyetemi docens, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet
Táplálkozástudományi Tanszék

Dr. Sipos László,
egyetemi docens, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet
Árukezelés, Kereskedelem, Ellátási Lánc és Érzékszervi Minősítés Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezetők jóváhagyása

1. A munka előzményei, célkitűzések

Tápértéküknek és potenciális élettani hatásaiknak köszönhetően a virágporcsomók jelentős népszerűsége tettek szert az egészségtudatos fogyasztók körében. Ennek következtében a közelmúltban egy nemzetközi szabványt dolgoztak ki a termék előállításának, minőségének és vizsgálatának a szabályozására (ISO 24382:2023), illetve felső határértéket állítottak fel a pirrolizidin alkaloid tartalmukra vonatkozóan (2023/915/EU rendelet). A méhészeti termékek jelentőségét mutatja továbbá, hogy a hozzájuk kapcsolódó nemzetközi kutatások száma jelentősen nőtt az elmúlt évtizedekben. A kutatások elsősorban a tápértékükre és potenciális terápiás hatásaikra fókuszálnak, ugyanakkor számos tanulmány foglalkozik a bennük felhalmozódó szennyezőanyagokkal is, például a növényvédőszer-maradék tartalmukra kiemelt tudományos figyelem összpontosul a globális méhpusztulás kapcsán.

A Kárpát-medence éghajlati és természeti adottságainak, a méhészeti programoknak, valamint a generációkon átívelő méhészeti szakértelemnek köszönhetően jelenleg több, mint húszezer méhtartó tevékenykedik az országban. A méhek közvetett haszna, hogy beporzási tevékenységükkel hozzájárulnak a biodiverzitás fenntartásához és a mezőgazdasági termeléshez, közvetlen hasznukat pedig a méhészeti termékek értékesítése adja. A méhek hazánkban többszáz növényfajt látogatnak nektárjáért és/vagy virágporáért, amelynek eredményeképp az előállított méhészeti termékek változatos fizikai, kémiai, érzékszervi, táplálkozás-élettani és élelmiszer-biztonsági tulajdonságokkal rendelkeznek. A méhekkal és méhészeti termékekkel kapcsolatos kutatások szerepe felértékelődött az elmúlt években, ugyanis az ágazat komoly kihívásokkal küzd, ideértve a méhek egészségét kockáztató tényezőket, valamint a növekvő termelési költségek és az olcsó, alacsony minőségű importmézek beáramlása következtében kialakuló gazdasági versenyképesség csökkenést.

Az elmúlt években számos kutatást végeztek a hazai mézek fizikai-kémiai tulajdonságaival és autenticitásával kapcsolatban, mindazonáltal az egyéb méhészeti termékekről kevés tudományos információ áll rendelkezésre magyar nyelven, melynek következményeképp tévhitet övezik a táplálkozási tulajdonságaikat. Doktori munkám során átfogóan értékeltem a különböző forrásnövényekről származó virágporcsomók táplálkozási szempontból releváns jellemzőit, tudományos alapokra helyezve azok táplálkozás-élettani tulajdonságait, élelmiszer-biztonsági kockázatait, érzékszervi jellemzőit és funkcionális élelmiszer-összetevőként való alkalmazhatóságát. Munkám személyes motivációja az volt, hogy segítsen a virágporcsomó fogyasztáshoz kapcsolódó tévhitet eloszlatását, valamint hiteles információkkal támogassam a méhészek munkáját és a fogyasztók tudatos döntéshozatalát.

Értekezésem fő célja a virágporcsomók táplálkozás-élettani, élelmiszer-biztonsági, és érzékszervi szempontokat is magában foglaló, komplex értékelése. További célkitűzésem, hogy kekszek dúsításán keresztül felmérjem, hogy a termékek mennyire hatékonyan alkalmazhatók funkcionális élelmiszer-összetevőként, kiemelt figyelmet fordítva a botanikai eredet hatására. A kutatás céljait az alábbi részcélokra bontva mutatom be:

- A virágporcsomók humán táplálkozásban betöltött szerepéhez kapcsolódó, nemzetközi szakirodalmi információk magyar nyelvű összefoglalása és kritikus elemzése a dolgozatom megalapozásához, továbbá annak céljából, hogy segítsem a terméket övező tévhitek eloszlatását, valamint a tudományosan megalapozott ismeretek szélesebb körű elérhetőségét.
- A virágporcsomó fogyasztás élelmiszer-biztonsági kockázatainak azonosítása, becslése, és értékelése.
- A hazai flórára jellemző vadvirágokról és kultúrnövényekről származó, monoflorális virágporcsomó minták létrehozása és azok botanikai eredetének azonosítása.
- A monoflorális virágporcsomó minták színjellemzőinek,
- makrotápanyag- és aminosav összetételének,
- összes fenolos vegyület- és flavonoidtartalmának,
- valamint antioxidáns kapacitásának a meghatározása, *in vitro* módszerekkel.
- Multikomponenses, folyadék-kromatográfiás tömegspektrometriás (LC-MS/MS) módszer validálása virágporcsomó mátrixra: detektálási határ, kvantifikálási határ, linearitás, precizitás, visszanyerés és mátrix hatás meghatározása. A minták növényvédőszer-maradék tartalmának vizsgálata a validált módszerrel. Humán élelmiszer-biztonsági kockázatbecslés végzése.
- Gőztér mintavételes, szilárd fázisú mikroextrakciós (HS-SPME) paraméterek optimálása a virágporcsomók illó komponenseinek meghatározására. A minták illó frakciójának kvalitatív és szemi-kvantitatív vizsgálata olfaktométerrel összekapcsolt gázkromatográfiás tömegspektrométerrel (GC-MS-O). Aromaaktív vegyületek és potenciális botanikai markerek azonosítása.
- Kekszek különböző koncentrációkban történő gazdagítása a méhek által gyakran látogatott, monokultúras növényekről származó virágporcsomókkal. A kekszek tápértékének, színparamétereinek, érzékszervi profiljának, valamint fogyasztói kedveltségének a vizsgálata, összehasonlítása. A termékfejlesztés további irányainak meghatározása preferenciaterkép és penalty elemzés segítségével.

2. Anyagok és módszerek

2.1. Szakirodalmi áttekintés és kockázatbecslés

A virágporcsomók élelmiszer-biztonsági kockázataihoz kapcsolódó szakirodalmi áttekintést 2020 és 2021 között végeztem. A felhasznált publikációk angol nyelvű, tudományos folyóiratok elektronikus adatbázisaiból származnak. A kutatásban használt kulcsszavak a következők voltak: „bee pollen”, „apiculture product”, „food safety”, „pesticide residue”, „heavy metal”, „toxic element”, „mycotoxin”, „pyrrolizidine alkaloid”, „allergen”, „case study” és „risk assessment. Kizárólag a témában releváns, 2000 után publikált (az esettanulmányok kivételével) tanulmányokat vettem figyelembe. Az adatokat táblázatokba rendezve mutattam be, amelyekben az átlagos és esetenként a maximális koncentrációértékeket tüntettem fel. A kitettség becslését az **1. egyenlet** szerint végeztem, a publikált átlagos (krónikus kitettség becslése esetén) vagy 2 mg/kg feletti (akut kitettség becslése esetén) koncentrációértékek figyelembevételével. A becslés során 25 g napi bevitellel és 70 kg-os átlagos testsúllyal számoltam.

$$1. \text{ egyenlet: } \text{Napi kitettség (mg/ttkg)} = \frac{\text{koncentráció (mg/kg)}}{1000} \times 25/70$$

A nem genotoxikus karcinogén komponensek esetében kockázati hányadost számoltam oly módon, hogy a kitettséget elosztottam a komponensre vonatkozó aktuálisan megállapított referenciaértékkel (**2. egyenlet**). Növényvédőszeres esetében referenciaértékként az elfogadható napi beviteli értékkel (ADI), illetve az akut referenciadózissal számoltam (ARfD). A referenciaértékek forrása az EU peszticid adatbázisa. A nem genotoxikus karcinogén elemek (Cd, Hg) és mikotoxinok (ochratoxin-A, fumonizinek, zearalenon, deoxinivalenol, T2-toxin) esetében egészség alapú irányadó értékeket, azaz (ideiglenes) tolerálható napi, heti vagy havi beviteli értékeket (PTDI, PTWI, PTMI) állapítottak meg, így ezekkel a referenciaértékekkel számoltam. A krónikus kockázatbecslés során a 0,1 feletti kockázati hányadost jelentős kockázatnak tekintettem, mivel a virágporcsomó fogyasztás rendszerint a napi energiabevitel kis részét adja. Az akut kockázatbecslés során a 0,5 feletti értéket tekintettem jelentős kockázatnak.

$$2. \text{ egyenlet: } \text{Kockázati hányados (krónikus)} = \frac{\text{Kitettség}}{\text{Referenciaérték}}$$

A genotoxikus karcinogén komponensekre, például az arzénra, ólomra, aflatoxin B1-re és a pirrolizidin alkaloidokra nem állapíthatók meg egészség alapú irányértékek. Ilyen esetekben az expozíciós tűrőhatár (Margin of Exposure, MoE) megközelítés alkalmazása javasolt. A MoE

alapját egy referenciapont, az úgynevezett BMDL (benchmark dose lower confidence limit) képezi. Ez egy olyan dózist jelöl, amely egy előre meghatározott válaszváltozást (pl. egy bizonyos daganattípus előfordulásának 10%-os növekedését) eredményez a háttérválaszhoz képest. Az expozíciós tűréshatár (MoE) a BMDL érték és a becsült humán expozíció hányadosa. A MoE egy mértékegység nélküli szám, melynek nagysága arányos a vizsgált kockázat nagyságával. Minél alacsonyabb a számított MoE érték, annál nagyobb a vizsgált anyagnak való expozícióból fakadó közegészségügyi aggály. A megállapított referenciaértékek és javasolt minimális MoE értékek alapján meghatároztam egy „elméleti maximális kitettséget”, és ehhez viszonyítottam a becsült kitettségértékeket. A kockázatbecslés módszeréhez kapcsolódó részletes adatok megtalálhatók a szakirodalmi áttekintésünkben (Végh et al., 2021).

2.2. Kísérleti alap kutatás: Monoflorális virágporcsomók fizikai-kémiai jellemzése és összehasonlítása

2.2.1. Mintagyűjtés

A kutatás során hazai méhészekről és egy méhészeti termékekre specializált szaküzletből vásárolt virágporcsomókat használtam fel. Ezek képezték a monoflorális minták (1. ábra) alapját, melyeket a pelletek manuális válogatásával állítottam elő. A válogatást elsősorban a színük alapján végeztem, de esetenként a pelletek alakja és mérete is információval szolgált.



1. ábra: A kísérletek során felhasznált, monoflorális virágporcsomó minták

2.2.2. Alkalmazott kísérleti módszerek

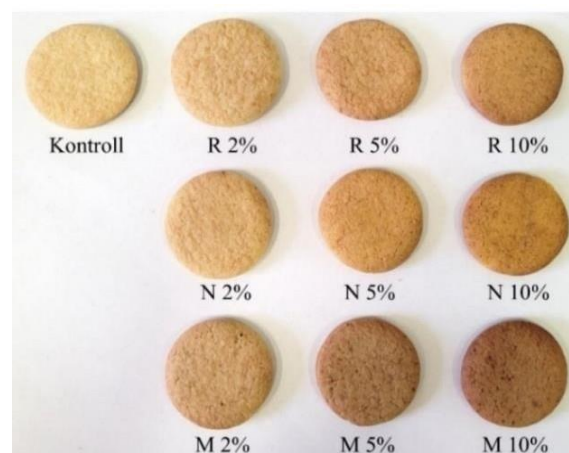
- **Botanikai eredet:** mikroszkópos pollen analízis
- **Színparaméterek:** CIELAB színmérés, darált mintákon
- **Nyersfehérje-tartalom:** klasszikus Kjeldahl-módszer (nitrogén-fehérje átváltási tényező: 5,6)
- **Nyerszsír-tartalom:** klasszikus Soxhlet-módszer, petroléterrel

- **Hamutartalom:** gravimetriás meghatározás hamvasztás (560 °C) után
- **Nedvességtartalom:** gravimetriás meghatározás vákuumszáritás (0,05 MPa, 75 °C) után
- **Összes szénhidráttartalom:** számítással történő becslés
- **Aminosav-összetétel:** ioncserés kromatográfia
- **Összes fenolos vegyület tartalom:** spektrofotometriás módszer
- **Összes flavonoidtartalom:** spektrofotometriás módszer
- **Antioxidáns kapacitás:** spektrofotometriás módszerek, nevezetesen:
 - Vasredukáló képesség mérésén alapuló antioxidáns kapacitás (FRAP) módszer
 - Rézion redukáló képességen alapuló antioxidáns kapacitás (CUPRAC) módszer
 - 2,2'-azino-bisz(3-etilbenzotiazolin-6-szulfonsav (ABTS) gyökfogó kapacitás módszer
 - 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) gyökfogó kapacitás módszer
- **Növényvédőszer-maradék tartalom:** A meghatározás a MATE Élelmiszerkémia és Analitika Tanszékén kifejlesztett, multikomponenses HPLC-MS/MS módszerrel történt. A módszert előzetesen validáltuk virágporcsomó mátrixra a SANTE kritériumrendszere alapján.
- **Illó és aromaaktív komponensek:** A meghatározás a MATE Táplálkozástudományi Tanszékén kifejlesztett módszerrel történt, olfaktométerrel összekapcsolt GC-MS alkalmazásával. Az illó komponensek kivonását a minta gőzteréből végeztük, szilárd fázisú mikroextrakcióval (HS-SPME), melynek paramétereit előzetesen optimaltunk virágporcsomó mátrixra.

2.3. Gyakorlati kutatás: Virágporcsomókkal gazdagított kekszek fejlesztési irányainak meghatározása

2.3.1. Kekszek előállítása

A kekszeket (2. ábra) az Amerikai Gabona Kémikusok Szövetsége által jóváhagyott receptúra (AACC, 1980) szerint készítettem el oly módon, hogy a lisztet repcéről (*Brassica napus*), napraforgóról (*Helianthus annuus*) és mézontófüről (*Phacelia tanacetifolia*) származó, darált virágporcsomókkal helyettesítettem, 2, 5, illetve 10%-ban.



2. ábra: A kontroll, valamint repce (R), napraforgó (N), és mézontófü (M) virágporcsomókkal gazdagított kekszek

2.3.2. Alkalmazott kísérleti módszerek

- **Színparaméterek:** CIELAB színmérés az ép kekszek felületén
- **Nyersfehérje-tartalom:** klasszikus Kjeldahl-módszer (nitrogén-fehérje átváltási tényező: 6,25)
- **Nyerszsír-tartalom:** klasszikus Soxhlet-módszer, petroléterrel
- **Hamutartalom:** gravimetriás meghatározás hamvasztás (525 °C) után
- **Nedvességtartalom:** gravimetriás meghatározás szárítás (105 °C) után
- **Összes szénhidráttartalom:** számítással történő becslés
- **Összes fenolos vegyület tartalom:** spektrofotometriás módszer
- **Antioxidáns kapacitás:** spektrofotometriás módszerek, nevezetesen:
 - Vasredukáló képesség mérésén alapuló antioxidáns kapacitás (FRAP) módszer
 - 2,2'-azino-bisz(3-etilbenzotiazolin-6-szulfonsav (ABTS) gyökfogó kapacitás módszer
 - 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) gyökfogó kapacitás módszer
- **Érzékszervi profil:** kvantitatív leíró elemzés (QDA); bírálók száma: 12
- **Fogyasztói kedveltség:** 9 pontos, monoton növekvő preferenciaskála, 5 pontos JAR (Just About Right) skála; fogyasztók száma: 100
- **Érzékszervi profil és fogyasztói kedveltség közötti összefüggés:** preferenciaterképezés
- **Fogyasztói elfogadottság növelését lehetővé tévő irányok meghatározása:** penalty elemzés

2.4. Statisztikai módszerek

- Alacsony mintaelemszám (<10) esetén: Kruskal–Wallis próba, Dunn-féle páronkénti összehasonlítással, Bonferroni korrekcióval ($\alpha=0,05$)*
- Nagy mintaelemszám (≥ 10) esetén, ha a normalitás és szóráshomogenitás feltételei nem sérülnek: ANOVA, Tukey-HSD post-hoc teszttel ($\alpha=0,05$)
- Spearman-féle korrelációelemzés ($\alpha=0,05$) a szín- és antioxidáns paraméterek közötti korreláció elemzésére
- Hierarchikus klaszterelemzés (HCA) a fogyasztói csoportok létrehozására, preferenciáik alapján
- Főkomponens elemzés (PCA) a preferencia- és termékadatok dimenzióinak csökkentésére

*Megjegyzés: Ez a próba a kapott értékek rangszámait veszi figyelembe, emiatt az adatok közötti különbségek nagysága nem érvényesül, ami jelentősen csökkentheti a teszt érzékenységét. Az eredmények az említett korlát figyelembevételével, megfelelő körültekintéssel értelmezendők.

3. Eredmények és értékelésük

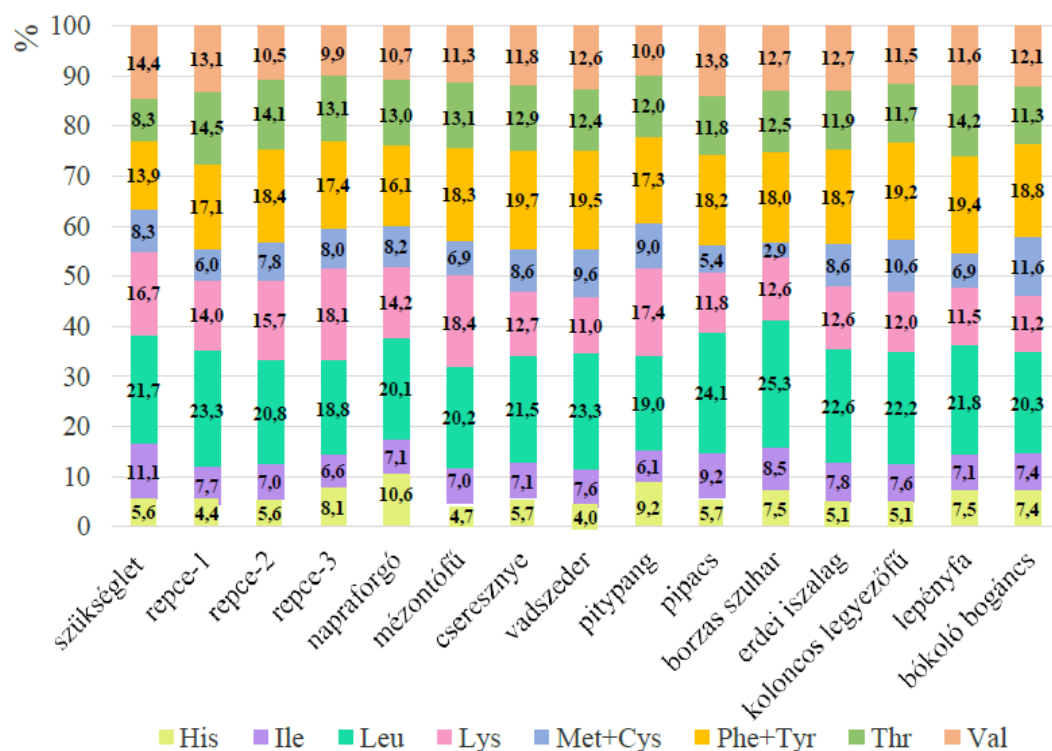
3.1. A szakirodalmi áttekintés és kockázatbecslés eredményei

Az irodalmi kutatás során elemeztem és szintetizáltam a virágporcsomó fogyasztás kockázataihoz kapcsolódó primer tudományos eredményeket, majd élelmiszer-biztonsági kockázatbecslést végeztem, melynek eredményeképp megállapítottam, hogy a virágporcsomók arzén-, kadmium-, ólom-, aflatoxin és pirrolizidin alkaloid tartalmából fakadó kockázat jelentős. Utóbbi kijelentést az is alátámasztja, hogy a közelmúltban felső határértéket állapítottak meg a virágporcsomók pirrolizidin alkaloid tartalmára vonatkozóan (2023/915/EU rendelet). A virágporcsomó fogyasztás által indukált allergiás reakciók esettanulmányai alapján a termék anafilaxiára utaló tüneteket (arcödéma, a száj, nyelv, és a garat duzzanata, nyelési és légzési nehézségek, torokfájás, viszketés, csalánkiütés, rossz közérzet) okozhat az arra érzékeny személyeknél. A tüneteket leggyakrabban pity pang vagy más *Asteraceae* pollent tartalmazó termékek váltották ki, melyek keresztreakciót mutatnak a légúti allergiát gyakran okozó fekete üröm (*Artemisia vulgaris*) pollenjével.

3.2. A monoflorális virágporcsomó minták botanikai-, szín- és beltartalmi jellemzői

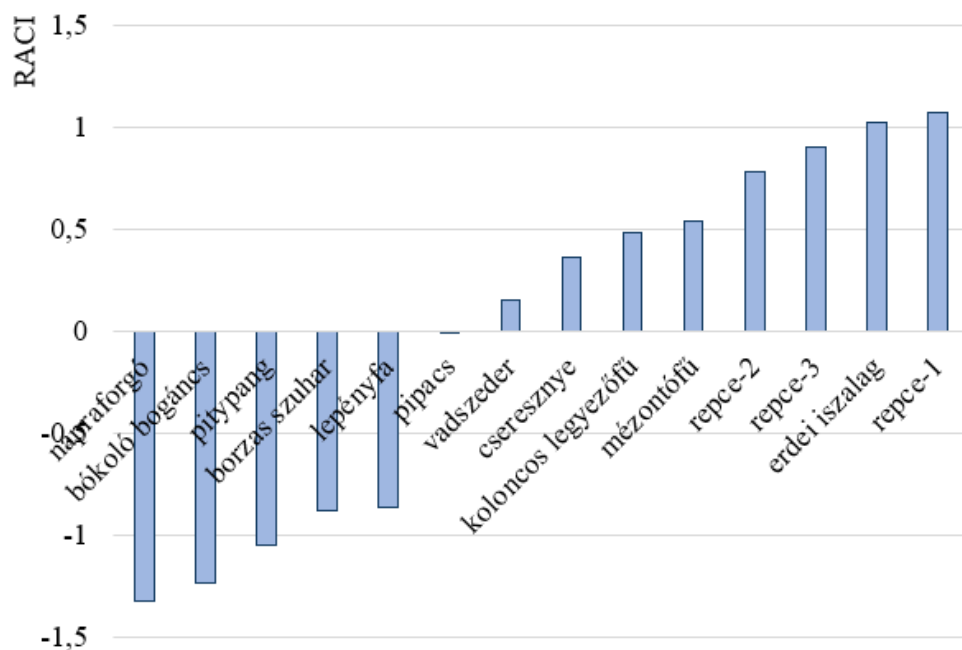
A kísérleti kutatásaim tárgyát 14 monoflorális, azaz 80% feletti vezérpollentartalommal (ISO 24382:2023) rendelkező virágporcsomó minta képezte, melyek között kultúrnövényekről (repce, napraforgó, mézontófű, cseresznye) és a természetes flóra részét képező növényekről (vadszeder, pity pang, pipacs, borzas szuhar, erdei iszalag, koloncos legyezőfű, lepényfa, bókóló bogáncs) származó termékek is szerepeltek. A kutatásba három különböző méhészetből származó repce pollencsomót vontam be, így a földrajzi eredet hatásának vizsgálatára is lehetőség nyílt.

A virágporcsomók színvizsgálata alapján megállapítottam, hogy a termékekben a vörös és sárga színezetek dominálnak a zöld, illetve kék színezetekkel szemben, mely megfigyelés a termékek karotinoid és flavonoidtartalmára vezethető vissza. A minták nyersfehérje- (13,01-23,96%), hamu- (1,05-3,24%) és zsírtartalma (1,40-10,52%) a közelmúltban megjelent szabvány kritériumainak megfelelően alakult. Nyersfehérjetartalom tekintetében a repce és mézontófű pollenek, hamutartalom tekintetében a cseresznye és bókóló bogáncs pollenek, nyerszsír tartalom tekintetében pedig a pity pang pollen mutattak kimagasló értékeket. Az esszenciális aminosav profilt vizsgálva az erdei iszalag és a pipacs virágporcsomók feleltek meg leginkább az emberi szükségletnek, a legkevésbé kiegyensúlyozott összetételt pedig a borzas szuhar pollenjében mutattam ki (3. ábra).



3. ábra: A virágporcsomó minták esszenciális aminosav profilja a referenciafehérjéhez (FAO/WHO/UNU, 2007) viszonyítva

Egy pollenkeverék alkalmazásával kiválasztottam a legnagyobb összes fenolos vegyület tartalmat eredményező oldószert a desztillált víz és szerves oldószerek (metanol, etanol, aceton) különböző koncentrációjú oldatai közül. A legnagyobb értéket a 60%-os etanol oldat mutatta, így a minták antioxidáns tulajdonságainak vizsgálatához ezt az elegyet használtam. A minták összes fenolos vegyület tartalma 9,82 és 25,31 mg galluszsav egyenérték (GAE)/g minta között, összes flavonoid tartalmuk pedig 0,83 és 10,51 mg kvercetin egyenérték (QE)/g minta között változott. A TFC:TPC arány nagy variabilitást mutatott, e paraméter tekintetében 9% (lepényfa pollen) és 44% (erdei iszalag pollen) közötti értékeket mutattam ki. Az *in vitro* antioxidáns kapacitás vizsgálatok (FRAP, CUPRAC, ABTS, DPPH) eredményei alapján kiszámítottam a minták relatív antioxidáns kapacitás indexeit, majd ezeket sorba rendeztem (4. ábra). A legnagyobb értékeket a repcéről és erdei iszalagról származó virágporcsomók mutatták, a legkisebb értékeket pedig az *Asteraceae* fajok, vagyis a napraforgó, bókóló bogáncs és pitypang pollenjei. A relatív antioxidáns kapacitás index erősen korrelált a fenolos vegyület tartalommal és az antioxidáns kapacitás vizsgálatok eredményeivel, mellyel megerősítettem, hogy ez a megközelítés jól alkalmazható a virágporcsomók antioxidáns potenciáljának jellemzésére. A szín- és antioxidáns paraméterek között – egy korábbi kutatás következtetésével ellentétben – nem mutattam ki pozitív irányú korrelációt.



4. ábra: A virágporcsomók relatív antioxidáns kapacitás indexei

3.3. A virágporcsomók növényvédőszer-maradék tartalma

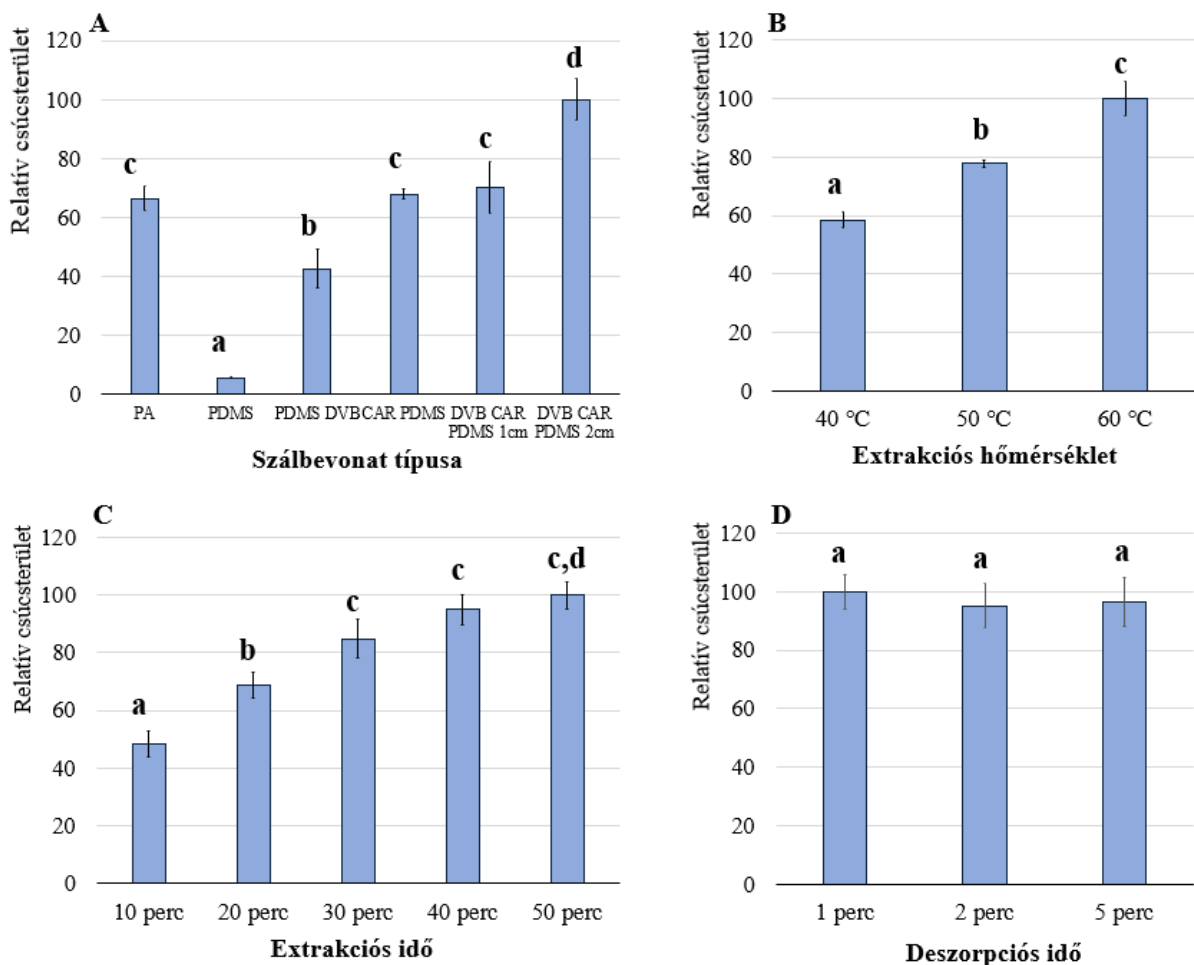
A minták növényvédőszer-maradék tartalmának meghatározásához egy multikomponenses módszert validáltam virágporcsomó mátrixra. A kapott teljesítményjellemzők alapján, a SANTE kritériumrendszerét alkalmazva, 247 komponensre tekinttem validáltnak a módszert. A kimutatási határ (LOD) 1,25 és 15,63 $\mu\text{g/kg}$ között változott. A mennyiségi meghatározási határ (LOQ) az analitok közel háromnegyed részénél 6,50 $\mu\text{g/kg}$ volt, és egy esetben sem haladta meg a 32,50 $\mu\text{g/kg}$ értéket. A kalibrációs görbék korrelációs együtthatói hat analit kivételével 0,990 feletti értéket mutattak. A legalacsonyabb korrelációs együtthatót ($r^2=0,965$) az oxadixil esetében figyeltem meg. Az analitok 85%-ánál az előre meghatározott kritériumoknak megfelelő, 80 és 120% közötti mátrixhatást figyeltem meg, azonban ez a paraméter néhány esetben rendkívül nagy (>200%) vagy alacsony (<30%) volt. Az eredmények arra utalnak, hogy a virágporcsomók esetében erős a mátrixhatás, ami szükségessé teszi a mátrix-illesztett kalibráció alkalmazását. Az átlagos visszanyerés értékek az esetek túlnyomó többségében megfeleltek a 70 és 120% közötti kritériumnak, azonban 15 analit esetében ennél alacsonyabb visszanyeréseket figyeltünk meg, amelyeket a módszer alkalmazása során folyamatosan ellenőrizni és korrigálni kell (on-going validálás). A napon belüli ismételhetőség minden esetben megfelelőnek bizonyult, mivel a relatív szórásértékek 20% alattiak voltak.

A validált módszerrel megvizsgáltam a 14 monoflorális pollencsomó peszticid-maradék tartalmát. A minták közel fele legalább egy hatóanyagot tartalmazott az LOQ feletti koncentrációban. Eredményeim alapján a kultúrnövényekről, különösen a repcéről származó

termékekben nagy valószínűséggel detektálhatók hatóanyagok, ellentétben a vadvirágok és fák pollenjével. A virágporcsomókban összesen 12 hatóanyagot mutattam ki, főként inszekticideket és fungicideket, melyek közül 7 hatóanyag (tiakloprid, klórpirifosz, idoxakarb, ciprokonazol, dimoxistrobin, propamokarb, linuron) jelenleg nem engedélyezett az Európai Unióban. Kockázatbecslés alapján a minták peszticid-maradék tartalmából eredő akut és krónikus élelmiszer-biztonsági kockázat elhanyagolható.

3.4. A virágporcsomók illó frakciója, aromaaktív komponensek

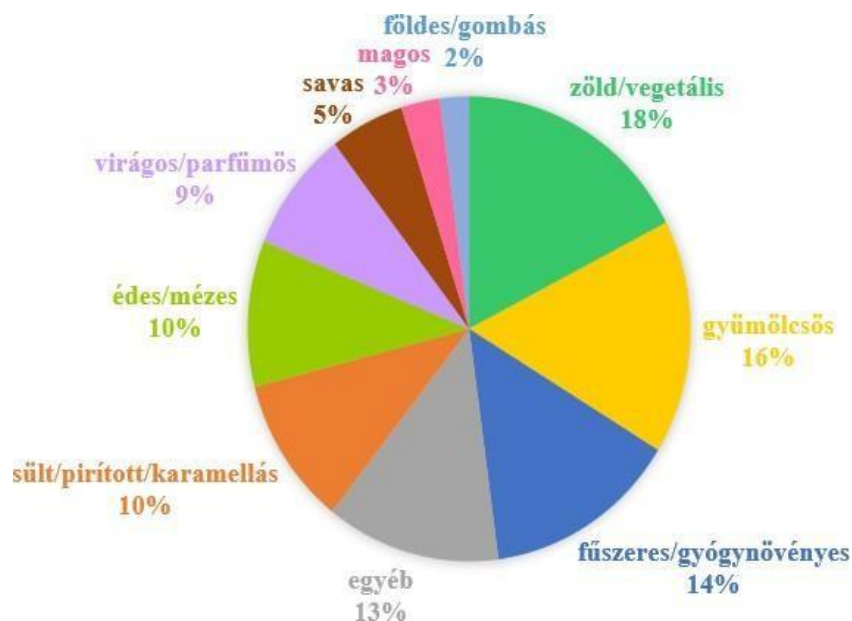
Az illó komponensek vizsgálatához optimalám az extrakciós paramétereket, melynek eredményei alapján a leghatékonyabb kinyerést az 50/30 µm-es DVB/CAR/PDMS szálbevonat (2 cm-es hossz), 60 °C-os extrakciós hőmérséklet, 30 perces extrakciós idő és 1 perces deszorpciós idő biztosítja. Az **5. ábra** ezeket az eredményeket szemlélteti.



5. ábra: SPME paraméterek optimalálása virágporcsomók illó komponenseinek a kivonásához a teljes csúcsterület alapján

A különböző betűk szignifikánsan különböző csoportokat jelölnek ($p < 0,05$)

A mintákban 75 és 101 közötti számban mutattam ki illó komponenseket. A vegyületek számát tekintve a terpének/terpenoidok és észterek, területarányukat tekintve pedig a savak és észterek domináltak a legtöbb virágporcsomóban. Kivételként említhető a mézontófü pollen, amely kiemelkedő mennyiségben tartalmazott aldehideket és ketonokat. Munkám során azonosítottam az egyedi komponenseket és azokat a nem specifikus illó vegyületeket, melyek egy-egy mintában rendkívül nagy arányban fordultak elő. A hexanal és a 3,5-oktadién-2-on például kizárólag a mézontófü pollenben, az α -pinén pedig kizárólag a napraforgó pollenben mutatott nagy területarányt. Orgona-aldehideket és orgona-alkoholokat kizárólag a cseresznye pollenben detektáltam, a *cisz*-geraniol bomlástermékei pedig a pipacs pollen jellemző komponensei voltak. Ezek a vegyületek potenciális botanikai markerekként szerepet játszhatnak a termékek kémiai eredetazonosításában. A 14 mintában összesen 296 különböző illékony vegyületet azonosítottam, melyek több, mint fele olfaktometriásan is detektálható volt legalább egy termék vizsgálata során. Az érzékelt illatjegyek jellegük szerinti megoszlását a **6. ábra** szemlélteti. Az ábra a virágporcsomók illatának általános leírására és a bennük érzékelhető illatjegyek komplexitásának a szemléltetésére szolgál, bár fontos megjegyezni, hogy a különböző mintákban nagy eltéréseket figyeltünk meg az illataktív vegyületek összetételét és intenzitását illetően.

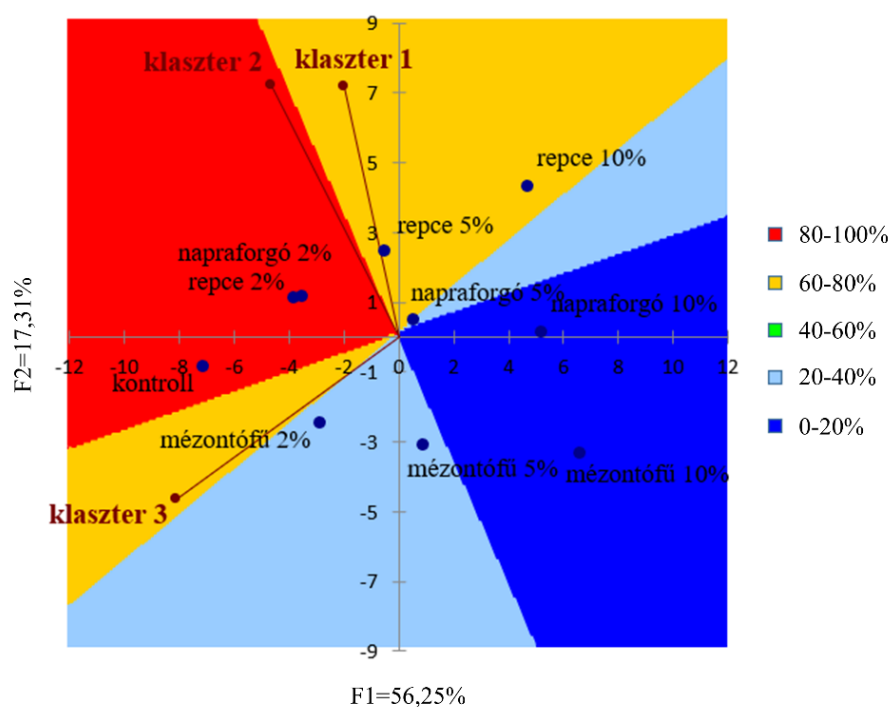


6. ábra: A virágporcsomókban azonosított illatjegyek megoszlása jellegük szerint

3.5. Monoflorális virágporcsomókkal gazdagított kekszek fizikai, kémiai és érzékszervi tulajdonságai

A munkám termékfejlesztéssel kapcsolatos fázisában repce, napraforgó és mézontófü virágporcsomókkal gazdagított kekszek fizikai-kémiai tulajdonságait, érzékszervi profilját és fogyasztói kedveltségét vizsgáltam. A kutatás eredményeképp megállapítható, hogy a kekszek

táplálkozás-élettani tulajdonságait a mézontófű pollen adagolása javította a legnagyobb mértékben. A fogyasztói preferencia tekintetében ellenben a napraforgó virágporcsomó bizonyult a legmegfelelőbbnek mindhárom, különösen a 10%-os koncentrációsinten. Ennek legfőbb oka feltehetően az, hogy a repce pollennel gazdagított kekszek káposztára emlékeztető illattal és ízzel rendelkeztek, a mézontófű pollent tartalmazó kekszekben pedig enyhe, vágott szalmára emlékeztető aroma volt érzékelhető a szakértői teszt eredményei alapján. A fogyasztói preferenciavizsgálat és szakértői profilanalitikus intenzitás tesztek eredményeinek kombinálásával kapott preferenciaterkép azt mutatta, hogy a fogyasztók preferenciái elsősorban a kontroll és az alacsony pollentartalmú kekszek irányába mutatnak (7. ábra). Mivel a kekszek tápértékének a szignifikáns javításához a 10% pollen adagolására volt szükség, penalty elemzést végeztem annak meghatározására, hogy hogyan javítható a magas pollentartalmú kekszek fogyasztói elfogadottsága. Eredményeim alapján ehhez olyan receptúra kidolgozása szükséges, amely lehetővé teszi a kekszek globális ízének, globális illatának, színintenzitásának és keménységének a csökkentését, valamint az édes íz- és illatintenzitás növelését.



7. ábra: Különböző virágporcsomókkal gazdagított kekszek preferenciaterképe

4. Következtetések és javaslatok

A doktori munkám első fázisában szakirodalmi kutatást végeztem a virágporcsomók élelmiszer-biztonsági kockázataival kapcsolatban, beleértve a növényvédőszer maradékok, toxikus elemek, mikotoxinok, pirrolizidin alkaloidok és allergének jelenlétét. Az elemzést kockázatbecsléssel is kiegészítettem, melynek eredményei alapján a termékek arzén-, kadmium-, ólom-, pirrolizidin alkaloid- és aflatoxin szennyezettségéből fakadó kockázat jelentős. Esettanulmányok alapján az allergiás tüneteket leggyakrabban a pitypang vagy más *Asteraceae* családba tartozó taxonok pollenjei okozzák, melyek keresztreakciót mutatnak a légúti allergiát gyakran kiváltó fekete üröm (*Artemisia vulgaris*) pollenjével. Mindezek fényében szükséges a virágporcsomó szabvány népszerűsítése, valamint a méhészek edukálása a pollencsomók élelmiszer- biztonsági veszélyforrásairól, mivel megfelelő méhészeti gyakorlattal a kockázatok minimalizálhatók. A fogyasztók védelme érdekében ajánlott a termékek rendszeres monitorozása és hatósági ellenőrzése, illetve a pirrolizidin alkaloid tartalom szabályozásán kívül további határértékek felállítása is indokolt lehet. Javasolt továbbá a virágporcsomók potenciális allergénitáshoz kapcsolódó kötelező figyelmeztető jelölés bevezetése a termékek csomagolásán.

Kísérleti eredményeim megerősítik, hogy a különböző botanikai eredetű virágporcsomók szín- és kémiai paraméterei jelentős variabilitást mutatnak. A minták nyersfehérje-, hamu-, és zsírtartalma a közelmúltban megjelent szabvány kritériumainak megfelelően alakult. Ugyanakkor a szakirodalomban közölt adatokhoz képest rendszerint alacsonyabb nyersfehérje tartalmakat mutattam ki. Ez elsősorban annak tulajdonítható, hogy a kutatásokban gyakran túlbecsülik a termékek fehérjetartalmát a Kjeldahl meghatározás során, mivel az általános nitrogén-fehérje átváltási tényezőt (6,25) alkalmazzák a virágporcsomó szabványban előírt, specifikus szorzófaktor (5,6) helyett. A repce és mézontófű virágporcsomók fehérjékben és fenolos vegyületekben gazdagnak bizonyultak, viszonylag kiegyensúlyozott aminosav-összetétellel rendelkeztek, továbbá *in vitro* vizsgálatok során nagy antioxidáns kapacitást mutattak. Az *Asteraceae* családba tartozó növényekről származó termékek kevésbé előnyös táplálkozás-élettani tulajdonságokkal rendelkeztek. Ezek az eredmények több más kutatási eredménnyel összhangban állnak, így feltehetően általános érvényűek. A relatív antioxidáns kapacitás index erősen korrelált a fenolos vegyületek mennyiségével és az antioxidáns kapacitás vizsgálatok eredményeivel, mellyel megerősítettem, hogy ez a megközelítés jól alkalmazható a virágporcsomók antioxidáns potenciáljának jellemzésére. A szín- és antioxidáns paraméterek között – egy korábbi kutatás következtetésével ellentétben – nem mutattam ki pozitív irányú korrelációt.

A kutatás során egy multikomponenses növényvédőszer maradék meghatározási módszert validáltam virágporcsomó mátrixra. A kapott teljesítményjellemzők alapján, a SANTE kritériumrendszerét alkalmazva, 247 komponensre tekintettem validáltnak a módszert. A szakirodalmi adatokkal összhangban, számos analitra erős mátrixhatást figyeltem meg, tehát a pollenek peszticid-analitikai vizsgálata során mátrix-illesztett kalibráció alkalmazása javasolt. A validált módszerrel megvizsgáltam a kutatásba bevont virágporcsomók peszticid-maradék tartalmát. Eredményeim alapján a kultúrnövényekről, különösen a repcéről származó termékekben nagy valószínűséggel detektálhatók hatóanyagok, ellentétben a vadvirágok és fák pollenjével. A virágporcsomókban kimutatott hatóanyagok többsége, például a tiakloprid, a klórpirifosz és a hexakonazol potenciális egészségügyi és környezeti kockázataik miatt jelenleg nem engedélyezettek az Európai Unióban, ugyanakkor a minták peszticid-maradék tartalmából eredő akut és krónikus élelmiszer-biztonsági kockázat alacsonynak bizonyult.

Eredményeim alapján az illó komponensek kivonása a következő paraméterek mellett a leghatékonyabb: 50/30 μm -es DVB/CAR/PDMS szálbevonat (2 cm-es hossz), 60 °C-os extrakciós hőmérséklet, 30 perces extrakciós idő és 1 perces deszorpciós idő. Optimális extrakciós paramétereket alkalmazva 75 és 101 közötti számban mutattam ki illó komponenseket a virágporcsomókban. Minden minta tartalmazott legalább egy egyedi illékony összetevőt, melyek potenciális botanikai markerként értelmezhetők. A repce pollenek esetében nem figyeltem meg forrás-specifikus jellemzőket, így az illó komponens összetétel vizsgálata valószínűleg nem alkalmas a repce eredet azonosítására. Az illó komponensek több, mint fele legalább egy mintában olfaktometrián is detektálható volt. Az illataktív vegyületek többségét „zöld/vegetális”, „gyümölcsös”, „fűszeres/gyógynövényes”, „sült/pirított/karamellás”, „édes/mézes” vagy „virágos/parfümös” jegyekkel jellemeztük. Ezek az illatok azonban mind intenzitásuk, mind jellegük tekintetében nagy variabilitást mutattak a különböző botanikai és földrajzi eredetű minták között, tehát a detektált illatanyagok eltérő mértékben és komplex módon járultak hozzá a virágporcsomók egyedi aromájához. Az eredmények fényében valószínűsíthető, hogy a botanikai eredet jelentős hatást gyakorol a pollencsomókkal gazdagított élelmiszerek érzékszervi tulajdonságaira és fogyasztói kedveltségére.

A fenti megállapítás tesztelésére alkalmas a munkám termékfejlesztéssel kapcsolatos része, melynek során repce, napraforgó és mézontófű virágporcsomókkal gazdagított kekszek kémiai, fizikai és érzékszervi tulajdonságait vizsgáltam. A kutatás eredményeképp megállapítható, hogy a kekszek táplálkozás-élettani tulajdonságainak a javításához mézontófűpollen, a fogyasztói elfogadottságuk növeléséhez pedig napraforgó pollen adagolása a leghatékonyabb. Preferenciaterkép alkalmazásával szemléltettem, hogy a fogyasztók az

alacsony pollentartalmú kekszeket és a kontrollt kedvelték a leginkább, a legkevésbé pedig a magas pollentartalmú termékeket preferálták. Optimumskálán vizsgálva a fenti megfigyelésekkel összhangban álló eredményeket kaptam: a legtöbb „pont jó” értékelést a 2% napraforgó pollent tartalmazó kekszek mutatták. A 10% pollent tartalmazó kekszek rendelkeztek a legelőnyösebb táplálkozás-élettani tulajdonságokkal, azonban ezek a termékek mutatták a legalacsonyabb fogyasztói kedveltséget. Penalty elemzéssel megállapítottam, hogy a magas pollentartalmú kekszek fogyasztói elfogadottságának növeléséhez olyan receptúra kidolgozása szükséges, amely lehetővé teszi a kekszek globális ízének, globális illatának, színintenzitásának és keménységének a csökkentését, valamint az édes íz- és illatintenzitás növelését.

Mint minden tudományos munka, eredményeim további kérdéseket vetnek fel, melyek megválaszolása jövőbeli kutatások tárgyát képezheti. Eredményeim megerősítik, hogy a virágporcsomók gazdag forrásai a különféle tápanyagoknak és bioaktív komponenseknek, mindazonáltal érdemes volna átfogó, *in vivo* és *in vitro* kísérleteket végezni a különböző forrásnövényekről származó virágporcsomók tápanyagainak emészthetőségével és biológiai hozzáférhetőségével kapcsolatban. Mivel a különböző növényekről származó pollenek eltérő sejtfalszerkezettel rendelkeznek, feltehetően eltérő mértékben hasznosulnak, azonban egyelőre kevés információ áll rendelkezésre a botanikai eredet hatásáról. További tudományos hiányterületként említhető az alternatív technológiák, például a nagy hidrosztatikai nyomáskezelés (HHP) vagy pulzáló elektromos térerő (PEF) alkalmazhatósága a pollenek emészthetőségének növelésére. Érdemes volna további kutatást végezni a virágporcsomók élelmiszer-biztonsági paramétereivel kapcsolatban is, kiemelt figyelmet fordítva a toxikus elemekre, mikroműanyagokra, pirrolizidin alkaloidokra és mikotoxinokra, valamint fontos kutatási témaként említhető az *Asteraceae* pollenekben fellelhető, allergén és potenciálisan keresztreakciót okozó fehérjék azonosítása is. Eredményeim alapján a különböző forrásnövényekről származó virágporcsomók egyedi illó komponens összetétellel rendelkeznek. Ennek fényében érdemes lehet kutatásokat végezni a botanikai markerek azonosítása, illetve az eredetmeghatározási módszerek kidolgozása és validálása céljából. Végezetül érdekes kutatási témát vetnek fel a penalty elemzés eredményei is, amely lehetővé tenné a magas pollentartalmú kekszek fogyasztói elfogadottságának a javítását.

5. Új tudományos eredmények

1. Szakirodalmi adatok elemzésével szekunder kutatást végeztem a virágporcsomók élelmiszer-biztonsági kockázataival kapcsolatban. Kockázatbecsléssel igazoltam, hogy a termékek ólom-, kadmium-, arzén-, pirrolizidin alkaloid- és aflatoxin szennyezettségéből fakadó krónikus kockázat jelentős, ezzel szemben a bennük gyakran felhalmozódó növényvédőszer-maradékok alacsony humán kockázatot jelentenek. A virágporcsomó fogyasztáshoz köthető allergiás esettanulmányok elemzésével megállapítottam, hogy a reakciót kiváltó összetevők általában a pitypang (*Taraxacum officinale*) vagy más *Asteraceae* családba tartozó fajok pollenjei.
2. Elsőként profiloztam hazai kultúrnövényekről és vadvirágokról származó, többségében ismeretlen kémiai tulajdonságokkal rendelkező, monoflorális virágporcsomókat táplálkozás-élettani tulajdonságaik alapján. Megállapítottam, hogy a termékek 93%-ában az izoleucin vagy a lizin a limitáló aminosav a felnőtt fogyasztók szükségleteit tekintve. Elsőként alkalmaztam a relatív antioxidáns kapacitás megközelítést pollencsomókra vonatkozóan, amellyel kapcsolatban megállapítottam, hogy a repce (*Brassica napus*) és az erdei iszalag (*Clematis vitalba*) pollenek nagy antioxidáns potenciállal rendelkeznek, szemben a pitypangról (*Taraxacum officinale*), napraforgóról (*Helianthus annuus*) és bókoló bogáncsról (*Cardus nutaans*) származó pollenekkel.
3. A virágporcsomók növényvédőszer-maradék tartalmának meghatározására egy új, multikomponenses módszert validáltam, amellyel igazoltam, hogy a vizsgált teljesítményjellemzők (LOD, LOQ, linearitás, precizitás, visszanyerés és mátrix hatás) 247 hatóanyag esetében megfelelnek az előre meghatározott kritériumoknak. A módszert elsőként alkalmaztam hazai virágporcsomók vizsgálatára, melynek során a kultúrnövényekről származó minták mindegyikében kimutattam legalább egy növényvédőszer jelenlétét. Összesen 12 hatóanyagot detektáltam a mintákban, amelyek közül 7-et a közelmúltban betiltottak az Európai Unióban humán- és/vagy ökotoxikológiai szempontok miatt. Kockázatbecsléssel megállapítottam, hogy a vizsgált minták szermaradék tartalmából fakadó akut és krónikus élelmiszer-biztonsági kockázat elhanyagolható.
4. HS-SPME módszert fejlesztettem virágporcsomók illó komponenseinek gázkromatográfiás vizsgálatához, melynek során meghatároztam az optimális szálbevonatot (50/30 μm -es, 2 cm-es DVB/CAR/PDMS), extrakciós hőmérsékletet (60 °C), extrakciós időt (30 perc) és deszorpciós időt (1 perc). A fejlesztett mintavételi módszert alkalmazva elsőként vizsgáltam

hazai virágporcsomók illó komponens-összetételét GC-MS-O műszeregyüttes alkalmazásával, melynek során a vegyületek műszeres azonosítását az illat szaglással történő jellemzésével párosítottam. Megállapítottam, hogy az érzékelt illatjegyek általában a „zöld/vegetális”, „gyümölcsös”, fűszeres/gyógynövényes”, „sült/pirított/karamellás”, „édes/mézes” vagy a „virágos/parfümös” kategóriákba sorolhatók. Igazoltam továbbá, hogy a különböző forrásnövényekről származó minták illó és aromaaktív komponensei mind mennyiség, mind minőség tekintetében jelentős különbségeket mutatnak, valamint, hogy egyes vegyületek fajspecifikus markerként segíthetik a termékek eredetazonosítását.

5. Elsőként bizonyítottam, hogy a repce (*Brassica napus*), napraforgó (*Helianthus annuus*) és mézontófü (*Phacelia tanacetifolia*) virágporcsomókkal gazdagított kekszek eltérő fizikai, kémiai és érzékszervi tulajdonságokkal rendelkeznek. Eredményeim alapján a táplálkozás-élettani tulajdonságok javításához a mézontófüpollen a legalkalmasabb. Vizsgálataimmal bizonyítottam, hogy a mézontófü pollennel gazdagított kekszek vágott szalmára emlékeztető ízzel és illattal rendelkeznek. Ezek intenzitása a pollenkoncentráció növelésével (2, 5, és 10%) fokozódik, melynek eredményeképpen csökken a termék fogyasztói elfogadottsága. A fogyasztói kedveltség növeléséhez a napraforgó pollen adagolása bizonyult a leghatékonyabbnak mindhárom koncentrációszin ten. Fogyasztói preferenciavizsgálat és szakértői profilanalitikus intenzitás tesztek eredményeinek kombinálásával preferenciaterképet készítettem, valamint penalty elemzéssel meghatároztam a 10% pollent tartalmazó kekszek fejlesztésének további irányait.

6. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Könyvfejezet

Rita Végh, Mariann Csóka (2024). Amino acids, peptides and proteins of pollen. Chapter in: Nesrin Ecem Bayram, Aleksandar Z. Kostic & Yusuf Can Gercek (Editors), *Pollen – Chemistry and Biotechnology*. Springer Nature Switzerland AG. ISBN: 978-3-031-47563-4, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47563-4>

Folyóiratcikkek

Mariann Csóka, **Rita Végh**, László Sipos (2025). Volatile Profile of Bee Pollens: Optimization of Sampling Conditions for Aroma Analysis, Identification of Potential Floral Markers, and Establishment of the Flavor Wheel. *Food Science & Nutrition*, 13, e4707 (Q1, IF: 4,667)

Rita Végh, Mariann Csóka, Csilla Sörös, László Sipos (2024). Underexplored food safety hazards of beekeeping products: Key knowledge gaps and suggestions for future research. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23, e23404. (D1, IF: 15,679)

Rita Végh, Gizella Sipiczki, Mariann Csóka (2023). Investigating the antioxidant and colour properties of bee pollens of various plant sources. *Chemistry & Biodiversity*, 20, e202300126. (Q2, IF: 2,468)

Rita Végh, Mariann Csóka, Éva Stefanovits-Bányai, Réka Juhász, László Sipos (2023). Biscuits enriched with monofloral bee pollens: nutritional properties, techno-functional parameters, sensory profile, and consumer preference. *Foods*, 12, 18. (Q1, IF: 5,077)

Végh Rita, Puter Dorina, Vaskó Áron, Csóka Mariann, Mednyánszky Zsuzsanna (2022). Mézek és virágporkok beltartalmi összetételének és színjellemzőinek a vizsgálata. *Élelmiszervizsgálati Közlemények*, 68, 3779-3792. (Q4, IF: 0,220)

Rita Végh, Csilla Sörös, Nándor Majercsik, László Sipos (2022). Determination of Pesticides in Bee Pollen: Validation of a Multiresidue High-Performance Liquid Chromatography-Mass Spectrometry/Mass Spectrometry Method and Testing Pollen Samples of Selected Botanical Origin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70, 1507-1515. (D1, IF: 6,173)

Rita Végh, Mariann Csóka, Csilla Sörös, László Sipos (2021). Food safety hazards of bee pollen – a review. *Trends in Food Science and Technology*, 114, 490-509. (D1, IF: 15,643)

László Sipos, **Rita Végh**, Zsanett Bodor, John-Lewis Zinia Zaukuu, Géza Hitka, György Bázár, Zoltán Kovács (2020). Classification of bee pollen and prediction of sensory and colorimetric Attributes—A sensometric fusion approach by e-nose, e-tongue and NIR. *Sensors*, 20, 6768. (Q2, IF: 4,621)

Konferenciaközlemények

Végh Rita, Sipiczki Gizella, Csóka Mariann. Különböző módon szárított, monoflorális virágporcok összetételének és flavonoidtartalmának vizsgálata. Magyar Agrártudományi Doktoranduszok Szimpóziuma. Debrecen, 2023. február 24-25.

Rita Végh, Mariann Csóka, Éva Stefanovits-Bányai, László Sipos. Effect of enrichment with monofloral pollens on the total phenolic and flavonoid content of baked goods. 4th International Conference on Food Science and Technology. 10-12 June, 2022, Budapest.

Végh Rita, Stefanovitsné Bányai Éva, Csóka Mariann, Sipos László. Különböző repce pollen extraktumok antioxidáns tulajdonságainak a vizsgálata. Magyar Haemorheologiai Társaság XXVIII., Magyar Mikrocirkulációs és Vaszkuláris Biológiai Társaság, Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság VII. Közös Kongresszusa. Pécs, 2022. április 22-23.

Rita Végh, Dornia Puter, Áron Vaskó, Mariann Csóka, Zsuzsanna Mednyánszky. Chemical composition of Hungarian and foreign apicultural products. 4th International Conference on Biosystems and Food Engineering. 4th June, 2021, Budapest.