

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

SIPOS TAMÁS

MAGYAR AGRÁR-ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

KAPOSVÁRI CAMPUS

KAPOSVÁR

2026



MAGYAR AGRÁR-ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

**KÉPALKOTÓ TECHNIKÁRA ALAPOZOTT KÍSÉR-
LETES MÉHEGYÉSZSÉGÜGYI VIZSGÁLATOK**

SIPOS TAMÁS
KAPOSVÁR
2026

A doktori iskola
megnevezése:

Agrár-és Élelmiszertudományok
Doktori Iskola

Tudományága:

Állattenyésztési
Tudományok

Vezetője:

Prof. Dr. Kovács Melinda
egyetemi tanár, az MTA rendes tagja
MATE, Élettani és Takarmányozástani Intézet

Programvezető:

Prof. Dr. Szabó András
egyetemi tanár, az MTA doktora
MATE, Élettani és Takarmányozástani Intézet
Élettani és Állategészségügyi Tanszék

Témavezetők

Prof. Dr. Keszthelyi Sándor
egyetemi tanár, PhD
MATE, Növénytermesztési-tudományok Intézet
Agronómia Tanszék

Dr. Donkó Tamás
címzetes egyetemi docens, PhD
Medicopus Nonprofit Kft.

.....
A DI vezető jóváhagyása

.....
Témavezető (k) jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. A KUTATÁSI TÉMA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK	2
1.1. CÉLKITŰZÉSEK	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1. A HUMÁN DIAGNOSZTIKAI CT ALKALMAZHATÓSÁGI LEHETŐSÉGEINEK FELTÁRÁSA A MÉHÉSZETI KUTATÁSOKBAN, AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA DETEKTÁLÁSÁRA FÓKUSZÁLVA	6
2.2. A DEFORMÁLT SZÁRNYTORZULÁS VÍRUS (DWV) ÉS AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA KOMBINÁLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA MÉZELŐ MÉH FEJLŐDŐ BÁB EGYEDEKEN.....	7
2.3. AZ ELHASZNÁLÓDOTT LÉPSEJT STRUKTURÁJÁNAK, MÉRETÉNEK ÉS SEJTEN FEJLŐDŐ MÉHBÁBOK MORFOLÓGIÁJÁNAK ELEMZÉSE MICRO-CT KÉSZÜLÉK SEGÍTSÉGÉVEL	8
2.4. A RÖNTGENSUGÁRZÁS HATÁSA AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA ÉS A MÉZELŐ MÉH ÉLETKÉPESSÉGÉRE ÉS HEMOCITA ÖSSZETÉTELÉRE.....	9
2.5 A SZOCIÁLIS LÁZ ÉS AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA KAPCSOLATA.....	11
3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE	12
4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	16
5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	19
AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ PUBLIKÁCIÓK	20
FELHASZNÁLT IRODALOM	22

1. A KUTATÁSI TÉMA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

Korunk globális mértékű ökológiai problémája a beporzók faj- és egyedszámának drasztikus csökkenése. Az érintett csoport emberi szempontból egyik legértékesebb, egyben egyik legsérülékenyebb faja a gazdasági állatként is nyilvántartott házi méh vagy nyugati mézelő méh (*Apis mellifera* L., 1758). Az ökológiai körforgás rendkívül fontos fenntartó elemeként is ismert rovarfaj populációit napjainkban számos negatív hatás sújta, többek között a méhlegelők diverzitáscsökkenése, az okszerűtlen kemikália felhasználás során bekövetkező mérgezések, és nem utolsósorban a méhspecifikus paraziták (mikrobiális és ízeltlábú) kontinenseken átívelő terjedése és súlyosbodó kártételi nyomása (Rosenkranz és mtsai., 2010; Martin és mtsai., 2012; Mordecai és mtsai., 2015; Morfin és mtsai., 2020). Ez utóbbi komplexumból a távolkeletről származó ázsiai nagy méhatka (*Varroa destructor* Anderson és Trueman, 2000) emelhető ki, melynek jelentőségét a méhcsaládokra gyakorolt súlyos káreseményei támasztanak alá a leginkább (Anderson és Truman; Evans és Chen, 2021; Warner és mtsai., 2024).

A kártevő globális terjedését követően a méhészeti kutatók széles körben foglalkoztak a parazita biológiájával, morfológiájával, valamint a méhcsalád lehetséges fertőződési útvonalainak megismerésével (Rosenkranz és mtsai., 2010; Dietemann és mtsai., 2012). A kutatások legfőbb célja megoldási lehetőségek, hatékony akaricid kezelések feltérképezése volt, a kár csökkentése érdekében. Napjainkra elmondható az, hogy mindezen alkalmazott és gyakorlati kutatások eredménye mérsékelni tudta a parazita által okozott nagyobb akár teljes állományokat érintő elhullások számának megjelenését, viszont teljeskörű megoldás a mai napig nem született (Rosenkranz és mtsai., 2010; Warner és mtsai., 2024). A gyakorlatban általánosan bevett konvencionális akaricid készítmények használata - az egyre komolyabb mézminőségi paraméterek és egészséges életmódhoz köthető elvárások okán, valamint a rezisztenciák kialakulása miatt - visszaszorulóban van (Jack és Ellis, 2021; Mitton és mtsai., 2022). A parazita kártételének teljeskörű megszüntetését jelenleg a gyakorlatban alkalmazott

konvencionális és alternatív akaricid készítmények, valamint a biológiai módszerek sem garantálják, emellett a méhtenyésztés oldaláról sem sikerült a termelői méhészetek számára teljeskörű megoldást találni (Le Conte és mtsai., 2020; Jack és Ellis, 2021). A rezisztenciák kialakulása miatt egyre sürgető nyomást gyakorol az új készítmények iránti szükséglet (Kolics és mtsai., 2021; Mitton és mtsai., 2022). Gyakorlatban tevékenykedő méhészként fontosnak tartom eme súlyos problémakör megoldását célzó munkákat, így esett a választás az ázsiai méhatkára, mint célorganizmusra a doktori kutatásomban.

Az atka által kiváltott kórképek, mind egyéni, mind szociális szinten megmutatkoznak, melyek az atka rejtett életmódja miatt nehezen mérhetőek. Az ázsiai nagy méhatka két meghatározó életmódot folytat (Rosenkranz és mtsai., 2010; Warner és mtsai., 2024): foretikus, azaz a családok közötti terjedést biztosító stratégiát, valamint a fenntartásáért felelős reprodukciós ciklust. A kártétel elsődlegesen egyéni szinten jelentkezik a méhek egyedfejlődése során a lépsejtben elzártan, mely súlyosbodva a szuperorganizmus család szociális viselkedésének torzulásában is megmutatkozhat (Ramsey és mtsai. 2019; Warner és mtsai., 2024). A fejlődő méh zsírtestének és hemolimfájának szívogatása eredményeként csökken a méhek lipid szintézise, ezzel az energiaháztartás sérül, mely a fehérjeszintézis minőségére is kihat. Az alacsonyabb lipid- és fehérjeszintézis miatt romlik az anyagcsere-forgalom, ezáltal az immunrendszer is sérülékenyebbé válhat. További következmény a peszticidekkel szembeni tolerancia csökkenése (Bowen-Walker és Gunn, 2001; Dooremalen és mtsai., 2013; Ramsey és mtsai., 2019). A testtömeg csökkenése, valamint a potroh torzulása jól szembetűnő jelenség az egyedfejlődés végén imágók esetében. A testtömeg csökkenés mértéke dolgozók esetében átlagosan 7% az intakt imágók testsúlyához viszonyítva (De Jong és mtsai., 1982, Bowen-Walker és Gunn, 2001). Ez a változás a herék esetében súlyosabb (11-19%) csökkenéssel járhat, a parazitáltság mértékének függvényében (Duay és mtsai., 2003). A testtömeg csökkenés mellett a csökevényes szárny fejlődés a deformált szárnytorzulás vírus (DWV) fertőzöttség esetén, előidézheti a dolgozó méhek funkcionalitásának romlását (Martin és mtsai., 2012). Ez a dolgozó méhek esetében a

csalásban betöltött szerepük eltolódását, vagyis előbbi hordást, esetenként a kirepülés elmaradását okozza, a méhcsalád számára „felesleges” energia befektetést generálva (De Jong és mtsai., 1982; Amdam és mtsai., 2004). Mindezekon túl, a fejlődésük alatt károsított dolgozókon fejletlen tájékozódó képességet is megfigyeltek, mely az eltájoló méheken keresztül további gyengítő faktorként jelentkezik a család számára (Martin és mtsai., 2012; Mordecai és mtsai., 2015). Összességében a varroatózis, azaz az atka által kiváltott kórképek súlyosságát az atka populáció mérete, valamint az általa terjesztett vírusok kombinációja együttesen befolyásolják. Emellé társulhat a környezet által generált stresszorok összetett hatása, mint például a virágpor minőségének romlása, esetleges növényvédőszeres káros hatása, illetve időszakos nektár hiányok által generált energia defficitek, vagy a helytelen méhészeti technológiából eredő negatív hatások (Dooremalen és mtsai., 2013; Corby-Harris és mtsai., 2019; Morfin és mtsai., 2020, Taha és Al-Kahtani, 2020).

Sürgető szükség mutatkozik olyan új diagnosztikai módszerek kifejlesztésére, amelyek lehetővé teszik a *V. destructor* rejtett életmódjának, biológiájának és kártételének pontosabb feltárását. Az entomológiai kutatásokban - különösen a méhészeti tudományok területén - a digitális képalkotó technikák alkalmazása mindmáig korlátozott (Facchini és mtsai., 2019). Az olyan diagnosztikai technológiák, mint a komputertomográfia (CT), a mikrokomputertomográfia (micro-CT) és az infravörös termográfia, ebben a kutatási területben újszerű megközelítést jelentenek, és bizonyos esetekben lehetővé teszik a *A. mellifera* méhcsalád szuperorganizmus-szintű működésének, anatómiájának és biológiájának, valamint a *V. destructor* biológiájának és kártételének mélyebb megismerését (Alba-Tercedor és Alba-Alejandre, 2017; Castejón és mtsai., 2018; Facchini és mtsai., 2019; De Paula és mtsai., 2022).

A röntgensugárzás entomológiai kutatásokban történő korai alkalmazása elsősorban kártevő-szabályozási stratégiák kidolgozását szolgálta, például a steril hím technika fejlesztését (Hallman, 2013). Bár a diagnosztikai CT- és micro-CT-vizsgálatok során alkalmazott sugárdózisok nem érik el az ilyen kísérletekben alkalmazott gray (Gy)

nagyságrendű értékeket, mindazonáltal hatással lehetnek az egyedek vitalitására. Ennek megfelelően fontos vizsgálni a *A. mellifera* és a *V. destructor* röntgensugárzással szembeni toleranciáját, ezáltal megalapozva az ionizáló sugárzáson alapuló képalkotó eljárások méhészeti kutatásokban történő alkalmazásának alapvető ismereteit (Wipfler et al., 2016; Hall és Martín-Vega, 2019; Facchini és mtsai., 2019).

E megfontolások alapján a doktori kutatás elsődleges célja több, korábban megválaszolatlan kutatási kérdés vizsgálata volt egy teljesen új, nem invazív vizsgálati technikák alkalmazásával úgy, mint a humán diagnosztikai CT, a micro-CT és az infravörös termográfia. A képalkotó eljárások (humán diagnosztikai CT, micro-CT és infravörös képalkotás) alkalmazhatóságának vizsgálata, valamint objektív paraméterek meghatározása a *V. destructor* kimutatására és a lépsejtek deformációinak detektálására. Mindezen vizsgálatok távlati célja egy olyan a méhészeti kutatásokban jól alkalmazható vizsgálati módszer kialakítása, mely az immáron több mint 70 éve tartó küzdelemben a méhészeti társadalmat képes támogatni az ázsiai nagy méhatka elleni harcban.

1.1. CÉLKITŰZÉSEK

- 1.** A *V. destructor* jelenlétének vizsgálata a fiasítási sejtekben, valamint hatásának értékelése a *A. mellifera* preimaginális fejlődési stádiumaira, különös tekintettel a testdeformitásokra és a szöveti denzitás változásaira.
- 2.** A *V. destructor* jelenléte és a szociális láz közötti közvetett kapcsolat további vizsgálata és megerősítése infravörös termográfia alkalmazásával, terepi körülmények között.
- 3.** Kiegészítő célként a lép elhasználódásának, mint a rendelkezésre álló fiasítási sejtterefogat mutatójának - hatásvizsgálata normál és deformált *A. mellifera* bábok esetében.
- 4.** A CT-diagnosztikai eljárásokhoz kapcsolódó ionizáló sugárzás lehetséges hatásainak értékelése a gazdaszervezet (*A. mellifera*) és a parazita (*V. destructor*) életképességére, valamint a gazdaszervezetben esetlegesen kialakuló hisztológiai elváltozások vizsgálata.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A HUMÁN DIAGNOSZTIKAI CT ALKALMAZHATÓSÁGI LEHETŐSÉGEINEK FELTÁRÁSA A MÉHÉSZETI KUTATÁSOKBAN, AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA DETEKTÁLÁSÁRA FÓKUSZÁLVA

2.1.1. A MINTA ELŐKÉSZÍTÉSE

A vizsgálathoz szükséges méhcsaládok nagyboczonádi (továbbiakban „NB”) 18-as fekvő kaptárban kerültek elhelyezésre 2019-ben a Kaposvári Campus területén. A vizsgálatokat megelőző méhészeti évben a családok akaricid kezelését nélkülöztük, a parazita egyedszámának felszaporodása érdekében. A humán diagnosztikai CT felvételezések alapjául 10x8 cm méretű frissen lefedett fiasításos lépdarabok szolgáltak, melyeket 2019 augusztusában nyertünk a családokból.

2.1.2. DIGITÁLIS KÉPALKOTÓ ELJÁRÁSOK

A humán diagnosztikai CT felvételek elkészítését a SVKMOK Dr. Baka József Diagnosztikai, Onkoradiológiai, Kutatási és Oktatási Központjában végeztük, Siemens Somatom AS + CT szkennelrel. A felvételeket 4 időpontban végeztük, az egyedfejlődés 14., 16. 18. és 20. napján. Az elkészített felvételeket 3D Slicer szoftver 4.11. segítségével elemeztük, különböző modulok segítségével (Fiducial, Segment Editor, Markups) 10 intakt és 10 parazitált egyed tekintetében. Az atkák előfordulását a képeken minden időpontban rögzítettük a parazitált egyedek esetében, melyet retrospektív módon a boncolás segítségével validáltunk.

2.1.3. MÉRT PARAMÉTEREK

A diagnosztikai felvételezéseket követően a lépsejteket mikroszipesz és bonctű segítségével boncoltuk, miképpen felvételeztük az atkák egyedszámát, valamint rögzítettük a méhek egyedfejlődési stádiumát és tömegét 1 mg pontossággal, Sartorius A120S eszköz segítségével.

2.1.4. STATISZTIKAI VIZSGÁLATOK

A vizsgált méhbábok Hounsfield-egységének és tömegének értékeléséhez a Shapiro–Wilk-tesztet alkalmaztuk. Az adatok normális eloszlásának vizsgálatához

($p < 0,05$) a Ghasemi- és Zahediasl-típusú módszereket alkalmaztuk. A *V. destructor* hatását a fertőzött bábok térfogatára (mm^3), felületére (mm^2) és szöveti sűrűségére (HU) és annak kölcsönhatását a preimagináls fejlődéssel kéttényezős varianciaanalízissel, a súly és a parazitizmus kapcsolatát pedig egytényezős varianciaanalízissel elemeztük az SPSS 11.5 szoftvercsomag segítségével.

2.2. A DEFORMÁLT SZÁRNYTORZULÁS VÍRUS (DWV) ÉS AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA KOMBINÁLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA MÉZELŐ MÉH FEJLŐDŐ BÁB EGYEDEKEN

2.2.1. A MINTA ELŐKÉSZÍTÉSE

A vizsgálathoz szükséges méhcsaládok nb 18-as fekvő kaptárban a Kaposvári Campus területén voltak. A vizsgálatokat megelőző méhészeti évben akaricid kezelést nem alkalmaztunk. A CT felvételezések alapjául 10x8 cm méretű fiasításos lépdarabok szolgáltak, melyeket 2019 szeptemberében nyertünk a családokból.

2.2.2. DIGITÁLIS KÉPALKOTÓ ELJÁRÁSOK

A humán diagnosztikai CT felvételek elkészítését a SVKMOK Dr. Baka József Diagnosztikai, Onkoradiológiai, Kutatási és Oktatási Központjában végeztük, Siemens Somatom AS + CT szkennelvel. A felvételeket 4 időpontban az egyedfejlődés 14., 16., 18. és 20. napján végeztük. Az elkészített felvételeket 3D Slicer szoftver 4.11 verziójának segítségével elemeztük, különböző modulok segítségével (Fiducial, Segment Editor, Markups). Python 3.6. program segítségével határoztuk meg a marker pontok közötti távolságokat a térben.

2.2.3. MÉRT PARAMÉTEREK

A diagnosztikai felvételezéseket követően a lépsejteket feltártuk, és felvételeztük az atkák egyedszámát, és a méhek egyedfejlődési stádiumát. Rögzítettük a bábok tömegét 1 mg pontossággal, Ohaus Explorer Pro EP214CE eszköz segítségével. A mintákat -80°C mélyhűtve tároltuk, a molekuláris biológiai vizsgálatokig.

2.2.4. MOLEKULÁRIS BIOLÓGIAI VIZSGÁLATOK, DWV VÍRUS JELENLÉTÉNEK KIMUTATÁSA

A deformált szárnytorzulás vírusának kimutatásához, az 5 intakt és 5 parazitált bábót választottuk ki random módon. Az RNS kivonást RNeasy Fibrous Tissue Mini Kit és cDNS írást QuantiTect Reverse Transcription Kitekkel hajtottuk végre. A PCR vizsálatot Berényi és mtsai. 2006-os munkája alapján végeztük. A PCR termék vizsgálatát 2%-os Tris-acetate-EDTA–agaróz gél és SYBR™ Gold Nucleic Acid Gel Stain DNS festékkel és a GeneRuler™ 1 kb Plus DNA létra segítségével.

2.2.5. STATISZTIKAI VIZSGÁLATOK

Az adatok normális eloszlásának vizsgálatához ($p < 0,05$) a Kolmogorov-Smirnov próbát alkalmaztuk ($n=50$). A parazitizmus hatását a fertőzött bábok mért morfológiai paramétereire egytényezős varianciaanalízis segítségével vizsgáltuk ($p < 0,05$). A bábok, fej tor és potroh méretének alakulását a fejlődés előrehaladtával regresszió elemzéssel és Pearson-féle korrelációval vizsgáltuk.

2.3. AZ ELHASZNÁLÓDOTT LÉPSEJT STRUKTURÁJÁNAK, MÉRETÉNEK ÉS SEJTBN FEJLŐDŐ MÉHBÁBOK MORFOLÓGIÁJÁNAK ELEMZÉSE MICRO-CT KÉSZÜLÉK SEGÍTSÉGÉVEL

2.3.1. A MINTA ELŐKÉSZÍTÉSE

A vizsgálatához szükséges lépdarabok egy nb 18-as fekvő kaptárról kerültek begyűjtésre, a Kaposvári Campus területéről. A CT felvételezések alapjául 10x8 cm méretű fiasításos lépdarabok szolgáltak, melyeket 2022 áprilisában nyertünk a családokból. Előválogatást követően, 10-10 egyedet kiválasztottunk a CT felvételeken melyek a későbbi a micro-CT felvételét jelentették. A kiválasztás alapja a lépsejtek elhasználódása volt, ugyanis a fiasításos lépdarabok 3 méhészeti évben már használt keretekről származtak.

2.3.2. DIGITÁLIS KÉPALKOTÓ ELJÁRÁSOK

A humán diagnosztikai CT felvételek elkészítését a SVKMOK Dr. Baka József Diagnosztikai, Onkoradiológiai, Kutatási és Oktatási Központjában végeztük, Siemens Somatom AS + CT szkennelvel. A képek felbontása $0.0977 \text{ mm} \times 0.0977 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ volt. A humán diagnosztikai felvételeket a micro-CT képek Hounsfield érték kalibrációjára használtuk, az alábbi képlet alapján: $HU = \mu - CT \text{ voxel érték} \times 20.78 - 1024$. A két készülék képét 3D Slicer Elastix modul segítségével regisztráltuk. A micro-CT vizsgálatokat Bruker Biospin SkyScan 1176 készülékkel hajtottuk végre, a PTE Szentágothai János Kutató Központban. A készülék által eredményezett képek pixelmérete, $8.75 \mu\text{m}$ volt. A felvételeket 3D Slicer szoftver segítségével elemeztük, Fiducial, Segment Editor és Markups modulok segítségével.

2.3.3. MÉRT PARAMÉTEREK

A felvételeken elkülönítésre kerültek a lépsejt különböző elemei, Hounsfield értékek alapján, melyhez 5 mintavételi pontot használtunk egyes elemek esetében. A micro-CT felvételeken 10 intakt és 10 elhasználdott sejtben fejlődő a báb fej, tor potroh átmérője, hossza került mérésre. Emellett felvételezésre került a bábok teljes testhossz, felület és térfogat értéke, valamint a lépsejtek térfogata is.

2.3.4. STATISZTIKAI VIZSGÁLATOK

Az adatok normál eloszlásának megállapítása érdekében Kolmogorov és Smirnov tesztet használtunk. A lépsejt méretének különböző báb morfológiai paraméterekre gyakorolt hatását egytényezős varianciaelemzéssel határoztuk meg, melyet Tukey-teszt segítségével elemeztünk tovább ($p < 0,05$).

2.4. A RÖNTGENSUGÁRZÁS HATÁSA AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA ÉS A MÉZELŐ MÉH ÉLETKÉPESSÉGÉRE ÉS HEMOCITA ÖSSZETÉTELÉRE

2.4.1. A MINTA ELŐKÉSZÍTÉSE

A vizsgálathoz szükséges méhminták alapjául 2022 júniusában 1.5 kg méhből készített műrajok szolgáltak, 2022 évben kelt méhanyával ellátva. A családok közel azonos atkaterheltségének elérése érdekében a műrajokat, oxálsav szublimálással

kezeltük, 2 héttel a családok alapítása után. A laborvizsgálatokhoz 20 mintát készítettünk, a mintákat 60g méh (500 egyed/minta) képezte. A mintákat speciális polipropilén műanyagból készített tárolóba helyeztük a sugár terápia, valamint a laboratóriumi vizsgálatok idejére. Ad libitum 40%-os szacharóz oldatot kapott a kísérleti állomány. A laboratóriumban 25 °C volt, 70% páratartalom mellett.

2.4.2. NAGY ENERGIÁJÚ RÖNTGENSUGÁR BESUGÁRZÁS LEÍRÁSA

A röntgensugár besugárzási vizsgálatok tervezéséhez szükséges CT felvételek elkészítését a SVKMOK Dr. Baka József Diagnosztikai, Onkoradiológiai, Kutatási és Oktatási Központjában, Siemens Somatom AS + CT szkennelrel végeztük. A besugárzás tervezéséhez Varian Eclipse tervező programot használtunk. A méhmintákat nagy energiájú röntgen sugárzáshoz Varian Clinac IX lineáris gyorsítót használtunk. A sugár mező 40x40 cm méretű, a dózisteljesítmény $600 \text{ MU} \times \text{perc}^{-1}$ míg a fotonnyalábok névleges energiája 6 MV volt. A minták alá és fölé szilárd víz fantomlapokat helyeztünk a dóziseloszlás homogenitásának biztosítása érdekében. A röntgensugárzásnak a parazitára és a gazdaszervezetre gyakorolt hatásának vizsgálatához a mintákra 15, 50, 100 és 150 Gy átlagdózis volt.

2.4.3. MÉRT PARAMÉTEREK

A laboratóriumi vizsgálatok során rögzítettük a méhek, valamint az ázsiai nagy méhatka mortalitási értékeit a következő időpontokban: 12h, 24h, 2d, 3d, 6d, 12d, 18d, 24d. Citológiai vizsgálatokra a 6. valamint a 12 napon vettünk hemolimfa mintát, melyeket mikroszkópos vizsgálatok során elemeztünk. Az elemzések során a hemociták arányának változását figyeltük meg.

2.4.4. STATISZTIKAI VIZSGÁLATOK

A méh és atka mortalitás adatokat Abbott féle formulával számítottuk ki. Az adatok eloszlását Kolmogorov-Smirnov normalitás teszttel elemeztük. A különböző röntgensugár dózisek hatását a mortalitás és a hemocita értékek tekintetében kéttényezős varianciaelemzéssel elemeztük ($p < 0,05$), és Duncan tesztet használtunk.

2.5 A SZOCIÁLIS LÁZ ÉS AZ ÁZSIAI NAGY MÉHATKA KAPCSOLATA

2.5.1. A MÉHCSALÁDOK ELŐKÉSZÍTÉSE

A vizsgálatokat 2022 és 2023 évben végeztük, évente 5 méhcsalád bevonásával. A családok 8 NB kereten voltak elhelyezve azonos, 18 NB típusú kaptárban. A családokat minden év júniusában készítettük 1.5 kg-os műrajokból. A műrajokat alapításukat követő 2 héten belül oxálsav szublimálásban részesítettük, hogy redukáljuk a paraziták számát, így a rajok természetes fertőződési lehetőségét szimulálva.

2.5.2. INFRAVÖRÖS HŐKÉP VIZSGÁLATOK

Az infravörös hőkamerával végzett vizsgálatokat 5 napot követően 12:00-16:00 között végeztük, minden év október 10-15 között. A képeket FLIR E5-XT WIFI kézi infravörös kamera segítségével végeztük, melynek felbontása 160×120 pixel, érzékenysége $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. A felvételeket fedett fiasításos keretekről készítettük, 50 és 18-20 cm távolságból. Az imágók a képek készítése előtt eltávolításra kerültek. A kereteket zárt, napfénytől védett helyen fotóztuk, ahol állandó hőmérséklet volt. A kereteket 30 mp-belül fotózásra kerültek, a hőveszteség elkerülése érdekében. A képeket Teledyne FLIR Thermal Studio segítségével elemeztük, mellyel 1005 intakt és 1005 parazitált egyed hőmérsékletét határoztuk meg.

2.5.3. LÉPSEJTEK BONCOLÁSA

A hőkamerás vizsgálatok után a kereteket fagyasztóba helyeztük, ahol $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ tároltuk a boncolás megkezdéséig. A boncolt egyedek esetében meghatároztuk az egyedfejlődési stádiumukat Rembold, 1980 munkája alapján, emellett feljegyeztük a lépsejben lévő atkák számát.

2.5.4. STATISZTIKAI VIZSGÁLATOK

Az adatok normalitásának tesztelésére Shaphiro-Wilk tesztet alkalmaztunk. Az eltérő napok hőmérséklet értékeinek összehasonlítása céljából Pearson korrelációs vizsgálatot használtunk. Az emelkedett hőmérséklet és a parazitizmus tényének vizsgálatához egytényezős varianciaelemzést végeztünk ($p < 0,05$). Emellett a paraziták számát és a lépsejt hőmérséklet értékének teszteléséhez is ezt végeztük.

3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

A humán diagnosztikai CT felvételek alapján a fejlődő méh bábok testfelületén érzékelhető atkák száma az egyedfejlődés előrehaladtával folyamatosan növekedik. Az atka észlelési százalékok növekvő tendenciát mutattak a fejlődés előrehaladtával. A méhek 14. életnapjában készült képeken az atkák 43,33%-át érzékeltek. A 16. életnapon készített felvételeken már 76,66%-ban tudtuk megállapítani a parazita jelenlétét a lépsejtben. A 18. napon a képek 90%-ban, a 20. napon a preimaginális fejlődés időszakában pedig az összes fertőzött lépsejtben látható volt az ázsiai nagy méhatka jelenléte.

A felvételezések időpontja, azaz az egyedfejlődés előrehaladta hatással volt a bábok térfogat ($p < 0,0001$), a felszín ($p < 0,0001$) és a szövet radiodenzitás ($p < 0,0001$) eredményeire. Az ázsiai nagy méhatka parazitizmusa által okozott térfogat ($p = 0,271$) és felszín ($p = 0,842$) csökkenés nem minden egyedfejlődési időszakban volt igazolható statisztikailag a CT felvételek alapján. Ezzel szemben a radiodenzitás (Hounsfield) értékben kifejezett átlageltérés a parazitált és intakt egyedek között szignifikáns változásnak felel meg ($p < 0,0001$), mely eltérés leginkább az egyedfejlődés 20. napjára volt számottevő. A testtömeg csökkenés az atka parazitált egyedek esetében jól érzékelhető. A parazitált méhek testtömeg átlaga $105,2 \pm 1,84$ mg, míg az egészséges egyedek átlagos testtömege $121,9 \pm 1,32$ mg volt ($p < 0,0001$).

A CT vizsgálatokra alapozott báb testtáj hossz értékeinek felvételezések során azt tapasztaltuk, hogy a parazitizmus, valamint a deformált szárnytorzulás vírus együttes kombinált hatása statisztikailag igazolható elváltozást okozott ($p < 0,001$). A fertőzött egyedek teljes testhosszának átlaga $11,025 \pm 0,065$ mm volt míg potrohuk $5,21 \pm 0,062$ mm átlagos értékekkel rendelkezett. Ezzel szemben az intakt egyedek $11,37 \pm 0,062$ mm báb mérettel és $5,57 \pm 0,056$ mm potroh hosszal rendelkeztek.

A CT képeken mért hossz értékekből számolt arányszámok alapján, a parazitizmus egyértelműen befolyásolta a testarányok alakulását ($n=35$) ($p < 0,001$). Az atka terhelt egyedek teljes test és a potroh hányadosa 3,77 % kisebb, mint intakt társaik értéke. A

fej, valamint potroh tekintetében 6,86 % kisebb értékkel rendelkeztek a vírussal fertőzött míg a teljes testméret és tor hányadosa 3,33 % növekedést mutatott az intakt csoport esetében. Míg a potroh és a fej méretei a teljes testmérethez vonatkoztatva csökkentek a parazitált egyedek esetében, úgy az egészséges egyedek torának mérete a teljes testhez viszonyítva növekedett.

A micro-CT alapú lépsejt vizsgálataink alapján a módszer alkalmasnak bizonyult a lépsejt különböző részeinek elkülönítésére és a mézelő méh morfológiájának elemzésére. A micro-CT felvételek egyértelműen kimutatták, hogy az intenzív használat miatt elhasználódott lépsejtek két, jól elkülönülő rétegből állnak. Egy világosabb (nagyobb röntgensugár-elnyelésű) belső rétegből, és egy sötétebb, alacsonyabb denzitású külső rétegből. A sejtfalak alján és belső felületén felgyülemelő szerves anyag (FRP komponens) felelős az abnormális falvastagodásért, míg a viaszos külső réteg (FRPW) főként a sejtek fedőrétegében, mint friss viasz játszik szerepet. Kísérleteink során bebizonyosodott, hogy az elhasználódott lépek belső ürmérete jelentősen csökken. A normál sejtek átlagos belső térfogata átlagosan $234,103 \pm 4,105$ mm³, ezzel szemben az elhasználódott, beszűkült sejtek értéke csupán $151,237 \pm 4,957$ mm³. A szűk (több generáció által használt) sejtek belső térfogata így átlagosan 35,4%-kal kisebbnek bizonyult mely különbség statisztikailag igazolható ($p < 0,001$). A beszűkült térfogatú sejtekben fejlődő dolgozó bábok mérete elmarad a normál sejtekben fejlődő egyedekétől. A bábok testfelszíne a szűk sejtekben átlagosan $218,97 \pm 1,94$ mm² volt szemben a normál sejtekben mért $266,86 \pm 2,23$ mm²-rel, vagyis mintegy 17,9%-kal kisebb ($p < 0,001$). A 18 napos bábok testtérfogata is jelentősen csökkent a normál sejtekben fejlődő bábok $120,61 \pm 1,43$ mm³-es átlagos térfogatával szemben, ugyanis az elhasználódott sejtekben fejlődőké $105,87 \pm 1,29$ mm³ volt, ami kb. 12,2%-os térfogatcsökkenést jelent ($p < 0,001$). Az elhasználódott sejtekben fejlődő bábok teljes testhossza ($8,87 \pm 0,11$ mm) elmaradt a kontrollként szolgáló normál sejtekben mért értéktől ($11,06 \pm 0,05$ mm) továbbá mindhárom fő testrészüket a fej, tor és potroh hossza is szignifikánsan rövidebb volt a normál sejtekből származó bábok méreteihez viszonyítva ($p < 0,001$).

Vizsgálataink során meghatároztuk, hogy rövid hullámhosszú röntgen sugárzás 15 Gy esetében 24 nap elteltével csupán 7%-kal nagyobb mortalitást okozott a kontroll csoporthoz képest mindösszesen 27%-os veszteséget. A kéttényezős varianciaelemzés igazolta, hogy a dózisok között és a méh mortalitási értékek, valamint az atka mortalitások között statisztikailag igazolható különbség van ($p < 0.001$). Ezen túl meghatároztuk, hogy 50 Gy-nél nagyobb dózis esetében a méhek nem tolerálják jól az ionizáló sugárzást, miképpen a 12. életnapjukra okoz oly mértékű irreverzibilis sejt szintű elváltozásokat *in-vitro* körülmények között mely közel 100% mortalitást eredményezett. Kísérletünk során mind az 50, 100, 150 Gy sugárdózist kapott csoport elhalálozott a kísérlet 18. napjára.

A 2023-ban végzett kísérletünk során bebizonyosodott, hogy az ázsiai méhatkák és a méhek eltérő röntgensugár toleranciával rendelkeznek. Ezen vizsgálataink alapján kijelenthető, hogy a humán diagnosztikai CT és a micro-CT által generált elektromágneses sugárdózisok a méhek életképességét nem ronthatják. Az atkák obligát parazita mivoltából adódóan azon esetben, ha a gazda szervezet életminősége rendkívüli mértékben romlik, az az ő pusztulásukat is okozza melyet tapasztaltunk az 50, 100 és 150 Gy esetében. A 15 Gy sugárterhelt atkák esetében mely során azok mortalitási trendje polinomiális görbével jellemezhetően a kísérlet során folyamatosan növekedett egészen a 24. napig a kísérlet befejező napjáig. A kísérleti atka populáció 48%-a hullott le a higiénikus aljra szemben a kontroll csoport 21%-kal, mely 27%-os eltérést jelent a kontroll csoporthoz képest a 15 Gy terhelttség esetében. A röntgen sugárzást elszenvedett atkák pusztulása már a 6. és a 12. napon jelentkezett a kontroll csoporthoz képest, ahol nem volt megfigyelhető a paraziták pusztulása és csak a kísérlet 18. napra jelentkezett. Ezen eredmények alapján a 15 Gy sugárterhelés az atkák életminőségét jobban befolyásolja, mint a gazdaszerveztét.

Kísérletünkben alkalmazott rövid hullámhosszúságú röntgensugár dózisok (15, 50, 100, 150 Gy) hemocita típusokra gyakorolt hatásának feltérképezése során megállapítottuk, hogy a 50 Gy nél magasabb röntgensugárzás hatással van méhek differenciált hemocita értékeire ($p < 0,001$). A vizsgálat alapján a plazmatociták és a prohemocitákban találtuk

a legnagyobb eltéréseket, míg az oenociták és a granulociták mennyiségi változása is feljegyezhető volt az idő előrehaladtával viszont a dózis függvényében felmerülő változások nem voltak megfigyelhetők. Statisztikai vizsgálataink bizonyították, hogy az eltérő röntgensugár dózisos hatással vannak a plazmatocita és prohemocita mennyiségekre ($p < 0,001$). A 50, 100 és 150 Gy esetében mért mortalitási trendekre jól illeszkedik a hemocita típusokban történő eltolódás mely a prohemocita értékek csökkenését és a plazmatocita értékek növekedését eredményezte. A 15 Gy dózisban részesült méhek hemocita összetétele közel megegyező volt a kontroll csoportéval, a post hoc Duncan-teszt eredményei alapján.

Az infravörös hőkép elemzési vizsgálataink során bizonyítottuk, hogy az egyedfejlődési stádiumok, mint a lárva és az előbáb és a báb stádiumok is elkülöníthetők voltak a hőmérséklet alapján ($p = 0,001$).

A dolgozó méhek fedett fiasításos sejtjeinek infravörös (IR) hőképes vizsgálata kimutatta, hogy magasabb hőmérséklet észlelhető a fejlődő bábót fedő viaszréteg felületén atkafertőzöttség esetén. A kutatás egyik fő megállapítása, hogy két különböző melegedési mintázat figyelhető meg a hőképeken, s mindkettő felelős a parazitált sejtek megemelkedett hőmérsékletéért. A leggyakoribb melegítési minta az nyitott fűtő sejt, mely egy fűtő sejt mellett helyezkedik el, és magasabb hőmérsékletet mutat, mint a szomszédos sejtek. A kísérlet során bizonyított másik mintázat, egy forró pont, ahol az atkafertőzött sejt a középpontban van, és hasonló tendenciát mutat, átlagosan $0,65^{\circ}\text{C}$ -kal magasabb értékekkel, mint a szomszédos sejtek. A kétéves vizsgálat esetében hasonló a tendenciát mutatták, a fertőzött és intakt sejtek egyaránt. A fertőzött egyedek átlaghőmérséklete 2022-ben $30,78 \pm 0,09^{\circ}\text{C}$ volt, ami körülbelül $0,82^{\circ}\text{C}$ -kal magasabb, mint az egészséges dolgozó sejtéké ($29,96 \pm 0,08^{\circ}\text{C}$). A 2023-as vizsgálatok szintén megerősítették, hogy a parazitált sejtek magasabb hőmérséklettel rendelkeztek ($30,62 \pm 0,14^{\circ}\text{C}$), mint a szomszédos egészséges egyedek ($29,86 \pm 0,08^{\circ}\text{C}$), átlagosan $0,76^{\circ}\text{C}$ -kal magasabb értékkel. Mindkét kísérleti évben parazitált egyedek hőmérséklete szignifikánsan magasabb volt, mint az intakt egyedeké ($p < 0,001$).

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Vizsgálatainkra alapozva kijelenthető, hogy a méhészeti kutatásokban újszerű CT-vel végzett non-invazív felvételezés alkalmas az ázsiai nagy méhatka lépsejtben történő előfordulásának detektálására. Kiemelendő, hogy a módszer érzékenysége nagymértékben függ a méhsejtben lévő atkák fejlettségi stádiumától, melynek magyarázata, hogy az ázsiai nagy méhatka nőtények biológiai sajátosságában, és a reprodukciós ciklusában keresendő (Rosenkranz és mtsai., 2010; Ramsey és mtsai. 2019; Warner és mtsai., 2024).

A fejlődési időszak előrehaladtával a parazitizmus mértéke egyre pontosabban meghatározható, ez magyarázható azzal, hogy a nőtény atkák a fejlődési stádium kezdetén rejtett életmódot folytatnak a lépsejt alján, emellett csak az anya atkák vannak csak a lépsejtben jelen (Rosenkranz és mtsai., 2010; Warner és mtsai., 2024). A nimfák táplálkozásuk folyamán általában a gazdaállat potrohának 5. szelvényén, anyjuk által ejtett seben keresztül táplálkoznak, ami az úgynevezett „belső akkumulációs zóna” közelében található a lépsejt alján mely kísérleteink során is bebizonyosodott (Kanbar és Engels, 2003; Rosenkranz és mtsai., 2010).

A vizsgálataink megerősítették, hogy fejlődő méhek egyes morfológiai paramétereire a parazitizmus igazolható hatást gyakorol. Az egészséges és parazitált egyedek térfogat, valamint felület értékeinek eltérése nem volt kimutatható, azonban a parazitált egyedek tömege és radiodenzitása, valamint a testhossz és testkompozíció szignifikánsan változik az egészséges egyedek értékeihez képest. Ez a megállapításunk megegyezik Duay és munkatársainak (2003) következtetéseivel, akik „red-eyed” fejlődési stádiumban lévő herefiasítások parazitizmus által bekövetkező testtömeg csökkenéséről publikáltak. A varroatozis által kiváltott radiodenzitás csökkenés a fejlődő méhbábok szöveteiben a nagyobb radiodenzitású szerves (pl: fehérjék, szénhidrátok) és szervetlen (pl.: víz, ásványi anyagok) vegyületek mennyiségének csökkenésével magyarázható (Annoscida és mtsai., 2012). E megfigyelésünk egybevág korábbi kutatások eredményeivel: Ramsey és munkatársai (2019) kimutatták, hogy a

parazita nem csupán a zsírszöveteket fogyasztja, hanem a gazda hemolimfájának tartalmát is csökkenti. Továbbiakban a varroatózis méh bábok degeneratív fejlődését, csökkent lipid- és fehérjeszintézisét, kiszáradását, valamint anyagcsere-funkciós zavarait okozza, mely a későbbiekben a téli mortalitás megnövekedésével, csökkent élettartammal és a peszticid tolerancia mérséklődésével párosul (Dooremalen és mtsai., 2013).

Vizsgálataink során először határoztuk meg a preimaginális fejlődési időszakban a sejtek lefedését követően végbemenő morfológiai változásokat az egyedek átlagos térfogatára, radiodenzitására, felületére, testarányaira vonatkozóan. Továbbá először nyert bizonyítást az a tény, hogy a parazitizmus és a DWV együttes hatása a méhek leginkább a méhek potrohának torzulását indukálja az egyedfejlődés során.

A micro-CT vizsgálat eredményei egyértelműen igazolják, hogy a lépek hosszú távú használata során bekövetkező lépsejt torzulások, káros hatással vannak a méhlárvák és bábok fejlődésére (Berry és Delaplane, 2001). A micro-CT technológia alkalmazásával első ízben sikerült non-invazív módon, térhatású képeken vizualizálni ezeket a strukturális változásokat és azok következményeit. Az eredmények összhangban állnak korábbi megfigyelésekkel, miszerint az előregedett lépek negatívan befolyásolják a család teljesítőképességét (Berry és Delaplane, 2001; Al-Kahtani, 2018). E kutatás bizonyította, hogy a modern képalkotó eljárások - a humán diagnosztikai CT a nagyobb léprészek áttekintésére, míg a micro-CT a finom részletek kimutatására - együttesen hatékonyan alkalmazhatók a méhészeti kutatásokban. Eredményeink tudományos megalapozottsággal támasztják alá a régi, elhasználdott lépek cseréjének fontosságát, ami hosszú távon hozzájárulhat a méhcsaládok vitalitásának és termelőképességének megőrzéséhez (Berry és Delaplane, 2001; Al-Kahtani, 2018; Taha és Al-Kahtani, 2020).

A röntgensugárzás káros hatásainak meghatározása céljából készített vizsgálataink igazolták, hogy a nagyenergiájú röntgensugárzás dóziszfüggően növeli mind a gazda, mind a parazita mortalitását, továbbá 15 Gy feletti dózis esetében jelentős immunológiai változásokat indukál a mézelő méhek esetében, viszont ezen dózis értékek a diagnosztikai vizsgálatok tekintetében ezredekkel alacsonyabbak (Easton, 2012). Így a

kutatásunk során megerősítettük azt a tényt, hogy a méhészeti kutatásokban alkalmazhatók a röntgensugár alapú diagnosztikai technikák, különös tekintettel az ázsiai nagy méhatka vizsgálatok esetében. A kártevő védekezési lehetőségeket illetően a röntgensugárzás nem éri el a kívánt hatékonyságot, bár az alacsony dózis (15 Gy) ígéretesebb eredményeket mutatott, a módszer gyakorlati alkalmazása több okból is kifogásolható, mindemellett a méhek élethossza és immunrendszere is károsodik.

A kézi infravörös kamerával végzett mérések igazolták, hogy a fedett fiasításában szignifikáns hőmérsékleti eltéréseket idéz elő. A fertőzött sejtekben regisztrált 0,8 °C-os hőmérséklet-többlet megbízhatóan elkülönítette a parazitált és az ép bábokat. Ez a jelenség a családok szociális lázreakciójával magyarázható, amelynek célja a parazita életfeltételeinek rontása (Seeley, 2009; Bauer és mtsai., 2018; Goblirsch és mtsai., 2020). Ezen tények az ázsiai nagy méhatka esetében munkánk során került először bizonyításra *in situ* körülmények között, így az eredmények alapján az infravörös hőkamera ígéretes, non-invazív diagnosztikai eszközként alkalmazható a varroózis terepi kimutatásában és a szelekciós nemesítésben. Ugyanakkor a módszer széles körű elterjedéséhez, további fejlesztések szükségesek melyek az AI-alapú képelemző szoftvereken alapulnak.

Az ismertetett kutatások alapján potenciálisan két új diagnosztikai módszer lehetőségét tártuk fel úgy, mint az infravörös hőkép elemzés, valamint a humán diagnosztikai CT által kínált lehetősége. A módszerek gyakorlatba történő ültetésével, valamint széles körű használatával számos olyan új tudományos és gyakorlati szempontból is értékes kutatás lehetőségei nyílnak meg melyek ezidáig akadályokba ütköztek.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Elsőként igazoltuk a humán diagnosztikai komputertomográfia (CT) alkalmazhatóságát a *Varroa destructor in situ* kimutatására a *Apis mellifera* fedett fiasításos sejtjeiben.
2. Nem invazív képalkotó módszerek alkalmazásával elsőként dokumentáltuk a *Apis mellifera* preimaginális fejlődési stádiumaiban jelentkező fejlődési rendellenességeket és a szöveti összetétel változásait. A *Varroa destructor* által fertőzött bábok átlagos radiodenzitás-változása 1,657 HU (1,481%) volt ($p=0,001$).
3. Elsőként végeztünk kvantitatív micro-CT elemzést ép *Apis mellifera* fejlődő bábokon, amely közvetlen szerkezeti bizonyítékot szolgáltat arra, hogy a lép öregedése, valamint a sejtfalak megvastagodása a fejlődő lárvák és bábok számára rendelkezésre álló sejtterefogat átlagosan 12,22%-os csökkenését eredményezi ($p<0,05$).
4. Dózis- és időfüggő nagyenergiájú röntgensugárzási kísérletek alapján meghatároztuk a biológiai válasz küszöbértékeit mind a *Apis mellifera*, mind a *Varroa destructor* esetében; a röntgensugárzás az egyedek mortalitására szignifikáns hatást gyakorolt ($p<0,001$). Eredményeink továbbá elsőként igazolják, hogy a mézelő méhben az ionizáló sugárzás dóziszfüggő változásokat idéz elő a plazmatociták ($p<0,001$) és a prohemociták ($p<0,001$) számában.
5. Kutatásunk elsőként szolgáltat terepi körülmények között bizonyítékot arra, hogy a *Apis mellifera* méhcsaládok a *Varroa destructor* által fertőzött fedett fiasításos sejtek környezetében lokális hőmérséklet-emelkedést hoznak létre (+0,79 °C). Eredményeink megerősítik, hogy a szociális láz a méhcsaládok aktív, kollektív immunvédelmi mechanizmusaként működhet ($p=0,001$).

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ PUBLIKÁCIÓK

Idegen nyelvű referált tudományos folyóiratcikkek

Keszthelyi, S., **Sipos, T.**, Csóka, Á., & Donkó, T. (2021), CT-supported analysis of the destructive effects of *Varroa destructor* on the pre-imaginal development of honey bee, *Apis mellifera*. *Apidologie*, 52(1), 155-162.

Sipos, T., Donkó, T., Jócsák, I., & Keszthelyi, S. (2021), Study of Morphological Features in Pre-Imaginal Honey Bee Impaired by *Varroa destructor* by Means of Computer Tomography. *Insects*, 12(8), 717.

Sipos, T., Donko, T., Csoka, A., Kiss, T., & Keszthelyi, S. (2023), Comparative micro-computed tomographic analysis of the structure of brood cells and its effect on the development of the pupae of honey bee (*Apis mellifera*). *European Journal of Entomology*, 120.

Sipos, T., Glavák, C., Turbók, J., Somfalvi-Tóth, K., Donkó, T., & Keszthelyi, S. (2024), Analysis of X-ray irradiation effects on the mortality values and hemolymph immune cell composition of *Apis mellifera* and its parasite, *Varroa destructor*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 204, 108109.

Sipos, T., Orsi-Gibicsár, S., Schieszl, T., Donkó, T., Zakk, Z., Farkas, S., Binder, A., & Keszthelyi, S. (2024). Tracking Varroa Parasitism Using Handheld Infrared Cameras: Is Eusocial Fever the Key? *Insects*, 15(9), 693.

Konferencia előadások, absztraktok

Sipos T., Donkó T., Jócsák I., Keszthelyi S., (2021), A varroatózis méhegészségügyi vonatkozásainak feltárása CT képalkotásra alapozott non-invazív technikával, LXIII. Georgikon Napok Nemzetközi Tudományos Konferencia Méhészeti Workshop, 2021. 10. 7-8. Keszthely

Sipos T., Donkó T., Keszthelyi S., (2022), Mézelő méh ázsiai nagy méhatka által okozott morfológiai és szervi elváltozásainak diagnosztikai CT-vel történő elemzése, EFOP 3.6.3- VEKOP-16-2017-00008, Kaposvár, 2022. 04.27., Kaposvár

Sipos T., Donkó T., Glavák Cs., Turbók J., Keszthelyi S., (2023), Röntgen sugárzáson alapuló módszer fejlesztése az ázsiai nagy méhatka (*Varroa destructor*) elleni védekezésben, Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem ÚNKP konferencia, 2023. 03.29. Kaposvár

Sipos T., Donkó T., Keszthelyi S., (2023), A modern képalkotási technikák nyújtotta lehetőségek a beporzók védelmében, II. Alkalmazott Növénytudományi Konferencia: Roncsolásmentes képalkotó technológiák a növénytermesztésben: legújabb eredmények és alkalmazási lehetőségek 2023.09.28., Kaposvár

Sipos T., Donkó T., Zakk Zs., Orsi-Gibicsár S. Keszthelyi S., (2024), Az ázsiai nagy méhatka kaptáron belüli elhelyezkedésének meghatározása infravörös képelemzéssel, Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem ÚNKP konferencia, 2024. 03.20. Kaposvár

Sipos T., Lukács H., Keszthelyi S., Donkó T., Csóka Á., Orsi-Gibicsár Sz., (2024), Application of human diagnostic computed tomography in the field of entomological research at Kaposvár Campus, XXVII. Tavasz Szél Konferencia, 2024. 05. 05-07., Budapest

Sipos T., (2024), Szántóföldi peszticidés kezelések valamint biotikus és abiotikus befolyásoló tényezők hatása a mézelő méh egészségügyi állapotára, Magyar Tudomány Ünnepe növényvédelmi rendezvény, MTA VEAB Növényvédelmi Munkabizottság, 2024.11.18., Keszthely

Sipos T., (2025), Entomológiai vonatkozású képalkotó vizsgálatok, VI. Országos Röntgentomográfiai Fórum, Pannon Egyetem, 2025.06.19-20., Veszprém

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Alba-Alejandre, I., Alba-Tercedor, J., & Vega, F. E. (2017). Anatomical study of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) using micro-computed tomography. *Scientific reports*, 9(1), 1-16.
2. Alba-Tercedor, J., & Alba-Alejandre, I. (2019). Comparing micro-CT results of insects with classical anatomical studies: The European honey bee (*Apis mellifera* Linnaeus, 1758) as a benchmark (*Insecta: Hymenoptera, Apidae*). *Microscopy*.
3. Al-Kahtani, S. N. (2018). Morphometric characteristics of carniolan honeybee workers in relation to age of comb. *Scientific Journal of King Faisal University (Basic and Applied Sciences)*, 19(2), 1440H.
4. Amdam, G.V., Hartfelder, K., Norberg, K., Hagen, A., Omholt, S.W., (2004). Altered physiology in worker honey bees (*Hymenoptera: Apidae*) infested with the mite *Varroa destructor* (*Acari: Varroidae*): a factor in colony loss during overwintering? *Journal of Economic Entomology* 97 (3), 741-747.
5. Anderson, D., Trueman, J. (2000) *Varroa jacobsoni* (*Acari: Varroidae*) is more than one species. *Experimental and Applied Acarology* 4, 165-189.
6. Anguiano-Baez, R.; Guzman-Novoa, E.; Hamiduzzaman, M.M.; Espinosa-Montaña, L.G.; Correa-Benítez, (2016) *A. Varroa destructor* (*Mesostigmata: Varroidae*) parasitism and climate differentially influence the prevalence, levels and overt infections of deformed wing virus in honey bees (*Hymenoptera: Apidae*). *Journal of Insect Science* 16, 44.
7. Annoscia, D., Del Piccolo, F., & Nazzi, F. (2012). How does the mite *Varroa destructor* kill the honeybee *Apis mellifera*? Alteration of cuticular hydrocarbons and water loss in infested honeybees. *Journal of insect physiology*, 58(12), 1548-1555.
8. Bauer, D., Wegener, J., & Bienefeld, K. (2018). Recognition of mite-infested brood by honeybee (*Apis mellifera*) workers may involve thermal sensing. *Journal of thermal biology*, 74, 311-316.
9. Berényi, O., Bakonyi, T., Derakhshifar, I., Köglberger, H., & Nowotny, N. (2006). Occurrence of six honeybee viruses in diseased Austrian apiaries. *Applied and environmental microbiology*, 72(4), 2414-2420.
10. Berényi, O.; Bakonyi, T.; Derakhshifar, I.; Köglberger, H.; Nowotny, N. (2006) Occurrence of Six Honeybee Viruses in Diseased Austrian Apiaries. *Applied Environmental Microbiology* 72, 2414-2420.
11. Berry, J. A., & Delaplane, K. S. (2001). Effects of comb age on honey bee colony growth and brood survivorship. *Journal of Apicultural Research*, 40(1), 3-8.
12. Bowen-Walker, P. L., & Gunn, A. (2001). The effect of the ectoparasitic mite, *Varroa destructor* on adult worker honeybee (*Apis mellifera*) emergence weights, water, protein, carbohydrate, and lipid levels. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 101(3), 207-217.
13. Castejón, D., Alba-Tercedor, J., Rotllant, G., Ribes, E., Durfort, M., & Guerao, G. (2018). Micro-computed tomography and histology to explore internal morphology in decapod larvae. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.

14. Corby-Harris, V., Snyder, L., & Meador, C. (2019). Fat body lipolysis connects poor nutrition to hypopharyngeal gland degradation in *Apis mellifera*. *Journal of insect physiology*, 116, 1-9.
15. De Jong, D., De Jong, P.H., Gonçalves, L.S., (1982). Weight loss and other damage to developing worker honeybees from infestation with *Varroa jacobsoni*. *Journal of Apicultural Results* 21, 165-216.
16. De Paula, J. C., Doello, K., Mesas, C., Kapravelou, G., Cornet-Gómez, A., Orantes, F. J., Martínez, R., Linares, F., Prados, C. J., Porres, J. M., Osuna, A., & de Pablos, L. M. (2022). Exploring honeybee abdominal anatomy through micro-CT and novel multi-staining approaches. *Insects*, 13(6), 556
17. Dietemann, V., Pflugfelder, J., Anderson, D., Charrière, J. D., Chejanovsky, N., Dainat, B., de Miranda, J., Delaplane, K., Dillier, F-X., Gallmann, S. F. P., Gauthier, L., Imdorf, A., Koeniger, N., Kralj, J., Meikle, W., Pettis J., Rosenkranz, P., Sammataro, D., Smith, D., Yañez, O., & Neumann, P. (2012). *Varroa destructor*: research avenues towards sustainable control. *Journal of Apicultural Research*, 51(1), 125-132.
18. Dooremalen v C., E.Stam, L. Gerritsen, B. Cornelisen, J. van der Steen, F. van Langevelde, T. Blacquiére, (2013). Interactive effect of reduced pollen availability and *Varroa destructor* infestation limits growth and protein content of young honey bees. *Journal of Insect Physiology*, 59 (4), 487-493.
19. Duay P., De Jong D., Engels W., (2003). Weight loss in drone pupae (*Apis mellifera*) multiply infested by *Varroa destructor* mites. *Apidologie* 34, 61-65.
20. Easton, S. (2012). *Practical Veterinary Diagnostic Imaging* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd., Chichester United Kingdom. Chapter 12. 127-128.
21. Evans, J.D. and Chen, Y. (2021). Colony Collapse Disorder and Honey Bee Health. In *Honey Bee Medicine for the Veterinary Practitioner*, Edited by Kane. R. T and Faux M. C., John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, Chapter 19, 229-234
22. Facchini, E.; Nalon, L.; Andreis, M.E.; Andreis, M.A.; Di Giancamillo, M.; Rizzi, R.; Mortarino, M. (2019) Honeybee pupal length assessed by CT-scan technique: Effects of *Varroa* infestation, developmental stage and spatial position within the brood comb. *Scientific Reports*, 9, 10614.
23. Goblirsch, M., Warner, J. F., Sommerfeldt, B. A., & Spivak, M. (2020). Social fever or general immune response? Revisiting an example of social immunity in honey bees. *Insects*, 11(8), 528.
24. Hall, M.J., Martín-Vega, D. (2019) Visualization of insect metamorphosis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374, 20190071.
25. Hallman, G.J. (2013) Control of stored product pests by ionizing radiation. *Journal of Stored Products Research*, 52, 36-41.
26. Jack, C. J., & Ellis, J. D. (2021). Integrated pest management control of *Varroa destructor* (Acari: Varroidae), the most damaging pest of (*Apis mellifera* L.(Hymenoptera: Apidae)) colonies. *Journal of Insect Science*, 21(5), 6.
27. Kanbar, G., & Engels, W. J. P. R. (2003). Ultrastructure and bacterial infection of wounds in honey bee (*Apis mellifera*) pupae punctured by *Varroa* mites. *Parasitology research*, 90(5), 349-354.

28. Kolics, É., Sajtos, Z., Mátyás, K., Szepesi, K., Solti, I., Németh, G., Taller, J., Baranyai, E., Specziár, A., & Kolics, B. (2021). Changes in Lithium Levels in Bees and Their Products Following Anti-Varroa Treatment Insects, 12(7), 579.
29. Le Conte, Y., Meixner, M. D., Brandt, A., Carreck, N. L., Costa, C., Mondet, F., & Büchler, R. (2020). Geographical distribution and selection of European honey bees resistant to *Varroa destructor*. Insects, 11(12), 873.
30. Martin, S. J., Highfield, A. C., Brettell, L., Villalobos, E. M., Budge, G. E., Powell, M., Nikaido, S., & Schroeder, D. C. (2012). Global honey bee viral landscape altered by a parasitic mite. Science, 336(6086), 1304-1306.
31. Mitton, G. A., Meroi Arcerito, F., Cooley, H., Fernandez de Landa, G., Eguaras, M. J., Ruffinengo, S. R., & Maggi, M. D. (2022). More than sixty years living with *Varroa destructor*: a review of acaricidal resistance. International Journal of Pest Management, 1-18.
32. Mordecai, G.J.; Brettell, McMenamin, A.J.; Genersch, E. (2015) Honey bee colony losses and associated viruses. Current Opinion in Insect Science, 8, 121-129.
33. Morfin, N., Goodwin, P. H., & Guzman-Novoa, E. (2020). Interaction of field realistic doses of clothianidin and *Varroa destructor* parasitism on adult honey bee (*Apis mellifera* L.) health and neural gene expression, and antagonistic effects on differentially expressed genes. PLoS One, 15(2), e0229030.
34. Ramsey S.D., Ochoa R., Bauchan G, Gulbranson C, Joseph D. Mowery, Cohen A., Lim D., Joklik J., Cicero M. J., Ellis D. J., Hawthorne D., VanEngelsdorp D., (2019). *Varroa destructor* feeds primarily on honey bee fat body tissue and not hemolymph; PNAS January 29, 116 (5)
35. Rembold, H., Kremer, J. P., & Ulrich, G. M. (1980). Characterization of postembryonic developmental stages of the female castes of the honey bee, *Apis mellifera* L. Apidologie, 11(1), 29-38.
36. Rosenkranz P., Aumeier P, Ziegelmann B., (2010). Biology and control of *Varroa destructor*, Journal of Invertebrate Pathology, Volume 103, Supplement, Pages S96- S119
37. Seeley, T. D. (2009). The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of Honey Bee Colonies. Harvard University Press. United States of America
38. Sipos, T., Donkó, T., Jócsák, I., & Keszthelyi, S. (2021). Study of Morphological Features in Pre-Imaginal Honey Bee Impaired by *Varroa destructor* by Means of Computer Tomography. Insects, 12(8), 717.
39. Taha, E. K. A., & Al-Kahtani, S. N. (2020). The relationship between comb age and performance of honey bee (*Apis mellifera*) colonies. Saudi Journal of Biological Sciences, 27(1), 30-34.
40. Warner, S., Pokhrel, L. R., Akula, S. M., Ubah, C. S., Richards, S. L., Jensen, H., & Kearney, G. D. (2024). A scoping review on the effects of Varroa mite (*Varroa destructor*) on global honey bee decline. Science of the total environment, 906, 167492.
41. Wipfler, B., Pohl, H., Yavorskaya, M.I. & Beutel, R.G. (2016) A review of methods for analysing insect structures—the role of morphology in the age of phylogenomics. Current Opinion in Insect Science, 18, 60-68