

Hajnal Kornél, Békési Bertold

Precíziós növényvédelmi kijuttatás légi és földi megvalósításának rendszerszintű összehasonlító elemzése

A precíziós növényvédelem fejlődése egyre inkább a platformfüggetlen technológiai megközelítés felé halad, ahol a légi és földi kijuttató rendszerek azonos működési elvekre épülnek, ugyanakkor eltérő fizikai és üzemeltetési sajátosságokkal rendelkeznek. A légi rendszerek működését elsősorban aerodinamikai és repülésdinamikai tényezők befolyásolják, amelyek hatással vannak a cseppeloszlásra és az elsodródásra, míg a földi rendszereknél a stabil hidraulikai és mechanikai környezet biztosítja az egyenletes kijuttatást. A tanulmány célja egy multikopteres drón és egy vontatott szántóföldi permetező összehasonlító vizsgálata azonos agronómiai körülmények között, ULV-technológia alkalmazásával. A kutatás elemzi a két platform működési sajátosságait, teljesítményét, időigényét és hatékonyságát, majd azonos tesztfeltételek mellett értékeli a kijuttatás minőségét és alkalmazhatóságát. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a légi és földi rendszerek összehangolt alkalmazása jelentős előnyöket kínálhat a precíziós növényvédelemben.

Kulcsszavak: precíziós növényvédelem, multikopteres drón, vontatott permetező, ULV-technológia, kijuttatási hatékonyság

1. Bevezetés

A növényvédelem a mezőgazdasági termelési rendszerek egyik legkritikusabb eleme, hatékonysága közvetlen hatással van a termésbiztonságra, valamint a gazdaságosságra [8]. A technológiai fejlődés eredményeként a kijuttatási rendszerekkel szemben támasztott követelmények a dózishelyesség, az egységnyi területre vetített precíz kijuttatás, valamint a környezetre gyakorolt negatív hatások minimalizálásának irányába tolódott el [1], [3]. Ennek következtében a permetezőtechnológia fejlődése nem csupán új megoldások megjelenésében, hanem a meglévő rendszerek határainak egyre meghatározóbbá válásában is megmutatkozik [2], [8]. A szántóföldi permetezés esetében a legjelentősebb, nehezen kezelhető, ugyanakkor meg nem szüntethető problémát a talajjal való fizikai kapcsolatból adódó tapadási kár jelenti [1], [7]. A nagy tömegű gépek ismétlődő áthaladása a termesztett állományon és a talajon nemcsak közvetlen növénykárosodást okoz, hanem a talajszerkezet tartós romlásán keresztül is negatívan befolyásolja a termelést [7], [8]. Kedvezőtlen talajállapot mellett ez a hatás

felerősödik, a kijuttatás időzítését, valamint bizonyos esetekben annak megvalósíthatóságát is korlátozza [1]. Ezzel párhuzamosan a drónos permetezés esetében eltérő jellegű, de hasonlóan meghatározó probléma jelentkezik, amely az energiaellátás és a hordozható tömeg korlátozottságából adódik [2], [5], [10]. A repüléshez szükséges folyamatos teljesítményigény, valamint a rendelkezésre álló energiatárolási kapacitás együttesen határozza meg a kijuttatható folyadékmennyiséget és az egy repülési ciklusban kezelhető terület nagyságát [2], [9], [10]. Ez a korlát alapvetően befolyásolja a technológia hatékonyságát, különösen nagyobb összefüggő területek esetében [3], [9].

Megállapítható, hogy a két technológia működését eltérő fizikai korlátok határozzák meg, amelyek nem csupán a rendszerek kialakítására, hanem azok gyakorlati alkalmazhatóságára is jelentős hatással vannak. Jelen cikk célja ezen eltérő korlátozó tényezők mentén a szántóföldi és a drónos permetezési rendszerek összehasonlító vizsgálata. A tárgyalás középpontjában annak bemutatása áll, hogy a két technológia milyen működési sajátosságokkal rendelkezik, valamint hogy ezek a sajátosságok milyen módon befolyásolják a kijuttatás hatékonyságát és alkalmazhatóságát a gyakorlatban [2], [9].

2. Szántóföldi vontatott permetező

2.1. Adatgyűjtés során alkalmazott konfiguráció

Az adatgyűjtés elvégzésekor a [32] irodalomban bemutatott, rekonstruált szántóföldi vontatott permetezőt alkalmaztuk, a célérték hektáronként 100 l permetlé kijuttatása volt, amelyhez a munkavégzés során alkalmazott erőgép egy MTZ 820.4 típusú traktor volt [16]. A traktor üzemi karakterisztikájából adódóan a teljesítményátvitel szempontjából meghatározó, hogy a TLT névleges 540 1/min értéke a motor 2000–2200 1/min tartományában biztosítható, amelyhez illeszkedve a munkavégzést a nyolcadik sebességfokozatban, megközelítőleg 13 km/h átlagsebesség mellett optimalizáltuk [15]. A valós üzemi körülmények között azonban a haladási sebesség nem tekinthető állandónak, hanem 10 és 16 km/h közötti tartományban változik, amely a szabályozórendszer számára folyamatos korrekciós feladatot jelent. A hidraulikai rendszer működése ezen sebességtartományhoz illeszkedve 1,8 és 2,3 bar közötti nyomástartományban valósul meg [11], [12], ami jelentősen elmarad a szivattyú maximálisan mért, 7,2 bar teljesítményétől, ugyanakkor elegendő a kívánt kijuttatási karakterisztika biztosításához. Az adatgyűjtés során kék színekű, azaz 03-as méretű szabványos fúvókákat alkalmaztunk [13], amelyek az üzemi nyomás és sebesség tartományban optimális porlasztási és térfogatáram viszonyokat biztosítanak [11], [15]. A szórókereten összesen 36 db fúvóka található, 50 cm-es osztással [14], öt szakaszra bontva. A szakaszolás elrendezése szimmetrikus, az első és az ötödik szakaszon 7–7 db, a második és negyedik szakaszon 9–9 db, a középső szakaszon pedig 4 db fúvóka helyezkedik el, biztosítva ezzel a teljes 18 m-es munkaszélesség egyenletes lefedettségét.



1. ábra

A 03-as méretű fúvókás kijuttató egység szerkezeti felépítése és elhelyezkedése a szórókereten
[Hajnal Kornél]

Az adatgyűjtés elvégzéséhez használt kijuttató egység szerkezeti felépítését az 1. ábra szemlélteti. Az 1. jelölés a fúvóka rögzítését biztosító bajonettzárat mutatja, amely lehetővé teszi a gyors és üzembiztos cserét, a 2. jelölés az 50 mesh¹ ($\gg 300 \mu\text{m}$) finomságú szűrőt jelöli [12], amely a szennyeződések visszatartásával védi a rendszert az eltömődéstől [16], míg a 3. jelölés a 03-as méretű lapos sugarú fúvókát ábrázolja. A 4. jelölés ezen elemek összeépített egységét mutatja a fúvókataratóban, míg az 5. jelölés a szórókereten elhelyezett, összesen 36 db kijuttató egységet szemlélteti.



2. ábra

A szakaszolási rendszer működése és megjelenítése monitoron, valós üzemi körülmények között [Hajnal Kornél]

¹ A „mesh” egy szitasűrűségi érték, azt jelenti, hogy 1 inch (25,4 mm) hosszúságon 50 nyílás található a szítán. A tényleges nyílásméret a huzalvastagságtól is függ, de általánosan elfogadott érték szerint: 50 mesh $\approx 297 \mu\text{m}$. Tehát egy 50 mesh szita körülbelül 300 μm szemcseméret alatti anyagok átérésztésére alkalmas.

A rendszer fontos eleme a GNSS-alapú helymeghatározásra épülő szakaszolás, amelynek működését a 2. ábra mutatja be. Az 1. jelölés a traktor fülkéjében elhelyezett monitort jelöli, míg a 2. jelölés a monitoron látható útvonalat szemlélteti. A vezérlőrendszer a pozícióadatok és a munkavégzés során rögzített pálya alapján folyamatosan értékeli az átfedettséget, és amennyiben az adott szakaszon az átfedés mértéke meghaladja az 50%-ot, a szakasz automatikusan lezáródik.

2.2. Adatgyűjtés kiértékelése

A gyűjtött adatok alapján megállapítható, hogy a rendszer különböző sebességtartományokban eltérő jellegű dóziseltérést mutat. Alacsonyabb, körülbelül 9 km/h sebesség esetén a kijuttatás enyhe túladagolást eredményez, megközelítőleg 104 l/ha értékkel, míg magasabb, körülbelül 16 km/h sebességnél a kijuttatás enyhén aluladagolt, körülbelül 96 l/ha értékkel. Ez az eltérés nem esetleges, hanem a rendszer fizikai és szabályozástechnikai sajátosságaiból adódó, közel állandó jellegű működési karakterisztika. A gyakorlatban a munkavégzés során a sebesség folyamatosan változik, a táblák geometriai adottságai, a fordulók, valamint az átfedések kezelése kiegyenlítő hatást eredményeznek.

1. táblázat

Permetezési munkamenetek rögzített üzemi adatai [Hajnal Kornél]

Dátum / Időszak	Megtett távolság [m]	Lefedett terület [ha]
2026/04/27 18:10:50 – 2026/04/27 18:37:11	1509	1,52
2026/04/26 00:43:22 – 2026/04/26 00:51:11	670	0,72
2026/04/25 22:35:20 – 2026/04/26 00:01:07	4515	7,48
2026/04/25 21:06:12 – 2026/04/25 21:50:05	6078	9,81

Az 1. táblázatban látható rögzített mérési adatok alapján a rendszer a négy különböző munkamenet során összesen 12 772 m utat tett meg, 18 m-s munkaszélességgel, ami 22,98 ha lefedettséget jelent. A valósan kezelt terület 19,53 ha, ami azt eredményezi, hogy az átfedettség aránya a valósan kezelt területhez viszonyítva 17,7%. Az alkalmazott technológiai sebesség optimálisan 13 km/h, ez a rendszer üzemi munkapontjaként értelmezhető, és ehhez történt a hidraulikai, valamint a kijuttatási paraméterek illesztése. Ezzel szemben a teljes műveletre meghatározott átlagsebesség 4,7 km/h értéket ad, azonban a két érték eltérő jelentéstartalmú, így közvetlen összehasonlításuk nem indokolt. A munkasebesség a kijuttatás szempontjából releváns üzemállapotot jellemzi, amikor a gép a beállított dózis tartására optimalizált állapotban van. Az átlagsebesség a teljes munkafolyamatra vonatkozó mutató, amely magában foglalja a fordulókat, a pályakorrekciókat, az átfedésekből adódó többletmozgásokat, valamint a nem produktív haladási szakaszokat is. Megállapítható, hogy az átlagsebesség csökkenése nem a kijuttatási folyamat hatékonyságának romlását jelzi, hanem a tábla geometriájából, az üzemeltetési sajátosságokból, valamint a precíziós kijuttatás érdekében alkalmazott szakaszolásból következik. Ennek megfelelően a munkasebesség és az átlagsebesség együttes értelmezése ad valós képet a rendszer működéséről, ahol az előbbi a technológia, míg az utóbbi a teljes munkafolyamat gyakorlati hatékonyságát írja le.

3. Multikopteres permetező

3.1. Adatgyűjtés során alkalmazott konfiguráció

Az adatgyűjtés során a [31] irodalomban bemutatott és elkészített agráripari permetező drónt alkalmaztuk, valamint a kijuttatási dózis 10 l/ha [19], [25], amely a rendszer működésének alapvető célparamétereként szolgált [22]. A kijuttatás megvalósítását két darab, egyenként 4 l/min névleges térfogatáramú szivattyú biztosítja [19], amelyek redundáns kialakításban működnek [22], biztosítva a rendszer üzembiztosságát. A hidraulikai rendszer üzemi nyomása előzetes mérések alapján 8 bar [18], [19], amely a kis dózisú kijuttatás mellett szükséges megfelelő porlasztási viszonyok biztosításához [11], [21], [27].



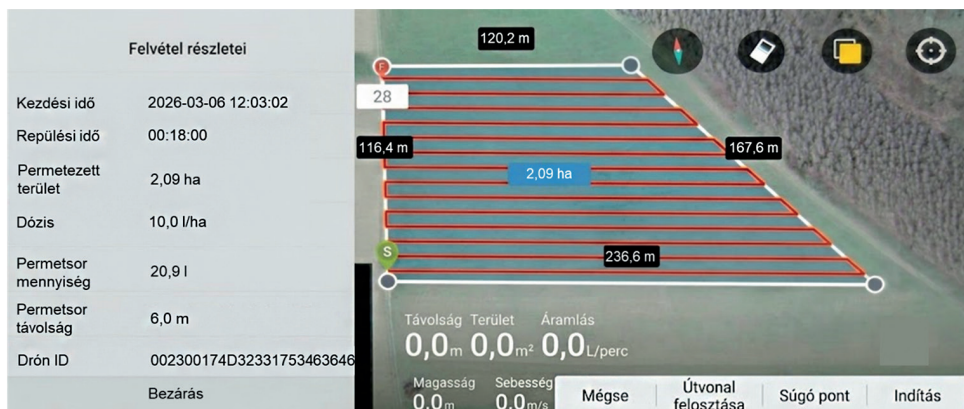
3. ábra

Multikopteres permetező drón tesztüzemeltetése [Hajnal Kornél]

A méretezési számítások, valamint az ezt megerősítő sikeres tesztüzemeltetés alapján az adatgyűjtés során alkalmazott szórófejrendszert szabványos, lila színkódú, 0,25-ös méretű fúvókákkal alakítottuk ki [17]. Ezek a fúvókák az adott nyomástartományban képesek biztosítani az alacsony térfogatáram melletti egyenletes és finom porlasztást [24], [26]. A fúvókákhoz tartozó szűrők 80 mesh finomságúak [18], amelyek feladata a rendszerbe kerülő szennyeződések visszatartása [22], ezáltal a fúvókák eltömődésének megelőzése és az egyenletes működés fenntartása [18], [19], [23]. A kijuttatási rendszer működése során a térfogatáram és a nyomás együttesen határozza meg a tényleges kijuttatási intenzitást, amelyhez a fúvókák karakterisztikája illeszkedik [28]. Megállapítható, hogy a beállított paraméterek olyan üzemállapotot eredményeznek, amelyben a rendszer képes a kis dózisú kijuttatás stabil és reprodukálható biztosítására [25], [29].

3.2. Adatgyűjtés kiértékelése

A rögzített mérési adatok alapján megállapítható, hogy a rendszer az adott munkamenet során 18 min repülési idő alatt összesen 2,09 ha területet kezel, amelyhez 10 l/ha kijuttatási dózis mellett 20,90 l permetlé felhasználása tartozik. A kijuttatott mennyiség és a kezelt terület aránya alapján megállapítható, hogy a rendszer a beállított dózisértéket elfogadható hibahatáron belül tartotta. A munkavégzés során alkalmazott szórásszélesség 6 m, míg a technológiai munkasebesség 8 m/s volt. A teljes műveletre vonatkozó értékeléshez figyelembe kell venni, hogy a kezelt 2,09 ha terület és a szórásszélesség alapján az effektív permetezési úthossz megközelítőleg 3483 m. Ezt a teljes, 18 min-es repülési időre vetítve a rendszer tényleges átlagsebessége 3,23 m/s értékre adódik.



4. ábra

Permetezési munkamenet rögzített üzemi adatai [Békési Bertold]

A két sebességértéknek eltérő a jelentéstartalma, így közvetlen összehasonlításuk nem indokolt. A 8 m/s érték a kijuttatás szempontjából releváns üzemi állapotot jellemzi, amikor a rendszer aktív szórás mellett, stabil paraméterekkel működik. Ezzel szemben a 3,23 m/s átlagsebesség magában foglalja a fordulókat, a pályakorrekciókat, valamint az egyéb nem produktív repülési szakaszokat is. A repülési magasság az állomány felett megközelítőleg 3 m volt, amely a kijuttatás során meghatározó szerepet játszik a fedettség kialakulásában. A választott sebesség és magasság együttesen olyan üzemi állapotot eredményezett, amely mellett a rendszer képes a beállított dózis stabil tartására. Összességében megállapítható, hogy a drónos kijuttatási rendszer a vizsgált üzemi körülmények között képes a kijuttatási dózis pontos és reprodukálható biztosítására. A technológiai munkasebesség és a teljes műveletre jellemző átlagsebesség együttes értelmezése ad valós képet a rendszer működéséről, amely így közvetlenül összevethető a földi kijuttatási rendszer hasonló módon értelmezett paramétereivel.

4. Összefoglalás

A két vizsgált kijuttatási technológia összehasonlítása alapján megállapítható, hogy működési elveikből adódóan jelentős különbségek mutatkoznak a dózismennyiség, a sebességszámok, valamint az ezekből számított hektárteljesítmény tekintetében [2], [3], [30]. A földi rendszer a beállított 100 l/ha dózist 98–102 l/ha tartományban tartja, amely a szabályozás dinamikájából adódó, de hibahatáron belül elhelyezkedő, elfogadható eltérés [15], [25]. Ezzel szemben a légi rendszer 10 l/ha dózisa gyakorlatilag pontosan tartható, ugyanakkor nagyságrenddel kisebb kijuttatott mennyiséget jelent [2], [9], [21]. Sebesség tekintetében a földi rendszer optimális munkasebessége 13 km/h, átlagsebessége 4,7 km/h, míg a légi rendszer esetében ezek rendre 8 m/s (28,8 km/h) és 3,23 m/s (11,6 km/h). Mindkét esetben megfigyelhető, hogy az átlagsebesség jelentősen elmarad a munkasebességtől, ami a fordulókban, pályakorrekciókból és egyéb nem produktív mozgásokból adódik [29], [30], ugyanakkor a légi rendszer mindkét mutatóban kedvezőbb értékeket mutat [2], [3]. Az effektív hektárteljesítmény a földi rendszer esetében ~5,9 ha/h, míg a légi rendszer esetében ~7 ha/h. A drón tehát kisebb munkaszélesség mellett is nagyobb teljesítményt ér el. Az eredmények ugyanakkor egyértelműen mutatják, hogy a teljesítmény az alkalmazási környezettől függ. A földi rendszer hatékonyságát a kis méretű, amorf alakzatú táblák, valamint a gyakori fordulók és átfedések jelentősen csökkentik, így a nagy munkaszélességből adódó előnyei a vizsgált környezetben hátránnyá válnak. Ezzel szemben a légi rendszer kevésbé érzékeny a tábla geometriájára, ezért ilyen körülmények között kedvezőbb teljesítményt biztosít. Nagy, egybefüggő területeken ugyanakkor a földi permetezőrendszer válik előnyössé, ahol az egyenes haladás és a nagy munkaszélesség kedvezőnek bizonyul, ezért hatékonyan kihasználható.

Összességében megállapítható, hogy a kisebb méretű, szabálytalan alakzatú táblák, valamint a foltkezelési feladatok esetében a légi kijuttatás alkalmazása előnyösebb, míg nagyobb, homogén területeken a földi permetezőrendszer biztosít kedvezőbb teljesítményt. A két technológia hatékony alkalmazása nem csupán gazdasági szinten, hanem akár egyazon táblán belül is értelmezhető, ahol az eltérő adottságú területszempontokhoz igazodva célszerű a kijuttatási mód megválasztása. Ennek megfelelően a rendszerek célzott, helyspecifikus kombinációja biztosítja a legkedvezőbb működést, lehetővé téve, hogy minden környezetben az adott feltételekhez leginkább illeszkedő technológiát alkalmazzák, ezáltal maximalizálva a kijuttatás hatékonyságát és gazdaságosságát [15], [30].

Felhasznált irodalom

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Guidelines on Minimum Requirements for Agricultural Pesticide Application Equipment. Volume Two: Vehicle Mounted and Trailed Sprayers*. Rome, FAO, 2001. (fejezet: pp. 1–34). Online: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/be381943-507c-425e-bc2d-2073ef6ab8a7/content>
- [2] J. Kim et al., „Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications,” *IEEE Access*, 7. sz. pp. 105100–105115. 2019. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>

- [3] D. C. Tsouros, S. Bibi, P. G. Sarigiannidis, „A Review on UAV Based Applications for Precision Agriculture”, *Information*, 10. évf. 11. sz. 2019. Online: <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- [4] H. Aasen et al., „Quantitative Remote Sensing at Ultra High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows”, *Remote Sensing*, 10. évf. 7. sz. 2018. Online: <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- [5] B. Békési, J. Seres, „Drónok alkalmazásának lehetőségei”, *Repüléstudományi Közlemények*, 32. évf. 3. sz. pp. 5–19. 2020. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.1>
- [6] B. Békési, I. Papp, P. Szegedi, „UAV-k légi és földi üzemeltetése”, *Economica*, 6. évf. 2. sz. pp. 99–117. 2013. Online: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2013/6/2/4422>
- [7] „Soil Compaction AND Sprayers”. ET Sprayers Technical White Paper. Online: <https://www.etsprayers.com/wp-content/uploads/2015/11/Soil-Compaction-and-Sprayers-white-paper.pdf>
- [8] M. C. Hunter, „Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification”, *BioScience*, 67. évf. 4. sz. pp. 386–391. 2017. Online: <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- [9] A. Talaeizadeh et al. „Agricultural Spraying Drones: A Comprehensive Review”, *Smart Agricultural Technology*, 12. évf. 2025. Online: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101519>
- [10] R. Guebsi, S. Mami, K. Chokmami, „Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review”, *Drones*, 8. évf. 11. sz. 2024. Online: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
- [11] ASABE S-572.1: *Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- [12] „TeeJet Technologies: Spray Application and Sprayer Calibration Manual”, *TeeJet Catalog 51A International Edition*. Wheaton, Illinois. Online: https://www.teejet.com/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_metric.pdf
- [13] *ISO 10625: Equipment for Crop Protection – Sprayer Nozzles – Colour Coding for Identification*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2005.
- [14] *ISO 19732: Equipment for Crop Protection – Mounted and Trailed Sprayers – Measurement of Volume of Residual Liquid*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2007.
- [15] P. Balsari et al., „Spray Application Techniques in Precision Agriculture”, *Aspects of Applied Biology*, 84. sz. pp. 331–338. 2007.
- [16] United States Environmental Protection Agency (EPA), *National Pesticide Applicator Certification Core Manual*. National Association of State Departments of Agriculture Research Foundation, 2014. pp. 157–162. Online: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-09/national-pesticide-applicator-cert-core-manual-2014.pdf>
- [17] *ISO 10625: Equipment for Crop Protection – Sprayer Nozzles – Colour Coding for Identification*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2005.
- [18] *ISO 5682-1: Equipment for Crop Protection – Spraying Equipment – Part 1: Test Methods for Sprayer Nozzles*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2017.
- [19] *ISO 5682-2: Equipment for Crop Protection – Spraying Equipment – Part 2: Test Methods for Hydraulic Sprayers*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2017.

- [20] ASABE EP367.3: *Procedure for Measuring Distribution Uniformity and Calibrating Granular Broadcast Spreaders*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [21] ISO 22866: *Equipment for Crop Protection – Methods for Field Measurement of Spray Drift*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2005.
- [22] ISO 16122-1: *Agricultural and Forestry Machinery – Inspection of Sprayers in Use – Part 1: General*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2015.
- [23] ISO 16122-2: *Agricultural and Forestry Machinery – Inspection of Sprayers in Use – Part 2: Horizontal Boom Sprayers*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2015.
- [24] ASABE S561.1: *Procedure for Measuring Drift Deposits from Ground, Orchard, and Aerial Sprayers*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [25] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Guidelines on Good Practice for Aerial Application of Pesticides*. Rome, FAO, 2001.
- [26] ASTM E1260: *Standard Test Method for Determining Liquid Drop Size Characteristics in Agricultural Sprays*. West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM International.
- [27] ISO 25358: *Crop Protection Equipment – Droplet Size Classification of Spraying Equipment*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2018.
- [28] A Herbst, J. Bonds, Z. Wang, „Agricultural UAV Spraying Quality and Drift Characteristics," *Aspects of Applied Biology*, 132. évf. pp. 45–52.
- [29] C. Zhang, J. M. Kovacs, „The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review," *Precision Agriculture*, 13. pp. 693–712. 2012. Online: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- [30] ASABE EP496.3: *Agricultural Machinery Management Data*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.
- [31] K. Hajnal, *Multikopteres drón tervezése és fejlesztése agráripari felhasználásra*. Szakdolgozat, Budapest, Óbudai Egyetem, 2024.
- [32] K. Hajnal, *Szántóföldi permetezőgép precíziós kijuttató rendszerének tervezése és kivitelezése*. Diplomamunka, Budapest, Óbudai Egyetem, 2026.

System-Level Comparative Analysis of Aerial and Ground-Based Implementations of Precision Crop Protection Application Systems

The development of precision crop protection is increasingly moving toward a platform-independent technological approach, where aerial and ground-based application systems are built upon the same operational principles while exhibiting different physical and operational characteristics. The performance of aerial systems is primarily influenced by aerodynamic and flight-dynamic factors affecting droplet distribution and spray drift, whereas ground-based systems rely on stable hydraulic and mechanical conditions to ensure uniform application. The aim of the study is to conduct a comparative analysis of a multirotor drone and a tractor-trailed field sprayer under identical agronomic conditions using ULV technology. The research evaluates the operational characteristics, performance, time requirements, and efficiency of both platforms, followed

by an assessment of application quality and operational applicability under standardised test conditions. The results highlight that the coordinated use of aerial and ground-based systems may provide significant advantages in precision crop protection.

Keywords: *precision crop protection, multirotor drone, trailed sprayer, ULV technology, application efficiency*

Hajnal Kornél MSc-hallgató Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar kishajnalmed@gmail.com orcid.org/0009-0007-1191-5096	Kornél Hajnal MSc Student Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering kishajnalmed@gmail.com orcid.org/0009-0007-1191-5096
Dr. Békési Bertold alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X	Bertold Békési, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X