

ŠONINIO VĖJO GREIČIO ĮTAKA DRONŲ-PURKŠTUVŲ IŠPURKŠTŲ LAŠELIŲ NUNEŠIMUI PAVĖJUI

Arūnas ŠIMKUS Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: 29as07@gmail.com; arunas.simkus1@stud.vdu.lt

Michail SEMENIŠIN, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: michailsem@gmail.com

Dainius STEPONAVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: dainius.steponavicius@vdu.lt

Santrauka

Naujos aplinkosaugos tendencijos paskatino dronų pritaikymo galimybių vystymąsi žemės ūkyje. Skirtingai nei antžeminė purškimo technika, jie nepažeidžia augalų technologinėse vėžėse ir netankina dirvožemio. Tačiau dronais purškiant pesticidus iš didesnio aukščio galimas didesnis lašelių nunešimas pavėjui, t. y. jų dreifas už purškimo zonos ribų. Šio tyrimo tikslas buvo kontroliuojamose sąlygose nustatyti šoninio vėjo greičio įtaką skirtingais dronais-purkštuvais išpurkštų skysčio lašelių sklaidai (dreifui), priklausomai nuo skridimo aukščio. Tyrimuose naudoti du dronai-purkštuvai: keturių propelerių (rotorių) XAG XP2020 ir šešių propelerių TTA M6E. Atlikant atskirus vandens purškimo tyrimus, dronai nuo žemės paviršiaus buvo pakelti į 2 m, 3 m ir 4 m aukštį. Dronų skridimo greitis purškimo metu siekė 2 m s^{-1} . Dronų tyrimuose, naudojant tinklo įtampos dažnių keitiklius, šoninio oro srauto greitis buvo keičiamas nuo 2 m s^{-1} iki 8 m s^{-1} . Nustatytas lašelių skaičius vandeniui jautraus lapelio plote (vnt. cm^{-2}).

Atlikus tyrimus nustatyta, kad tiek drono konstrukcija, tiek šoninio vėjo greitis, tiek ir drono skrydžio aukštis turi įtakos pavėjui, už purškimo zonos ribų, nunešamų lašelių kiekiui (dreifui). Siekiant išvengti lašelių dreifo rizikos, pučiant 4 m s^{-1} šoniniam vėjui, M6E dronu-purkštuvu, rekomenduotina purkšti iš ne didesnio kaip 2 m aukščio, o pučiant 6 m s^{-1} iš mažesnio kaip 2 m aukščio. Pučiant 8 m s^{-1} šoniniam vėjui, M6E drono, purškimui naudoti nerekomenduotina. Siekiant išvengti dreifo rizikos, pučiant 4 m s^{-1} šoniniam vėjui, XP 2020 dronu-purkštuvu rekomenduotina purkšti iš ne didesnio kaip $2,5 \text{ m}$ aukščio, pučiant 6 m s^{-1} – iš 2 m , o pučiant 8 m s^{-1} – iš mažesnio nei 2 m aukščio.

Reikšminiai žodžiai: purškimas, lašelių dreifas, drono skrydžio aukštis.

Įvadas

Ūkininkai susiduria su kylančiomis degalų, trąšų, augalų apsaugos produktų kainomis, todėl yra priversti keisti per ilgus metus susiformavusius ūkininkavimo įpročius. Pesticidų purškimas yra viena rizikingiausių, bet labai svarbių užduočių žemės ūkyje, siekiant apsaugoti augalus nuo kenksmingų organizmų. Naudojant įprastą pesticidų purškimo įrangą, kenksmingos pesticidų cheminės medžiagos patenka į orą ir per kvėpavimo sistemą gali patekti į darbuotojų organizmą, kas dažnai sukelia sveikatos sutrikimus (Meshram et al., 2022). Šiai problemai spręsti vienas iš geriausių sprendimų, kaip atlikti šią užduotį be žmogaus įsikišimo, – žemės ūkyje naudoti dronų-purkštuvų sistemą. Pastaruoju metu žemės ūkyje jau gana perspektyvu naudoti pilotuojamus ar bepiločius orlaivius (dronus) (Dayioğlu, Turker, 2021). Dronai jau ne pirmus metus populiarinami kaip tiksliosios žemdirbystės technika, galinti ne tik sumažinti ūkininkų išlaidas, bet ir ūkio generuojamą taršą (De Clercq et al., 2018). Dronas-purkštuvai gali pasiekti sunkiai prieinamus ar privažiuojamus laukus. Priklausomai nuo gamintojo, vienas dronas-purkštuvai gali atlikti visus šiuos veiksmus: nuskenuoti lauką, atpažinti augalus ir jų ligų židinius, nupurkšti lauką kintama norma pagal surinktus duomenis.

Dauguma dronų-purkštuvų šiuo metu gaminami su standartiniais plyšiniais lengvai pakeičiamais purkštukais, kuriuos galima bet kada pakeisti pagal individualius ūkyje auginamų augalų poreikius ar klimato sąlygas. Kai kurie gamintojai yra pradėję dronų su reguliuojamais rotaciniais purkštukais gamybą. Šie purkštukai unikalūs tuo, kad jais, esant poreikiui, galima keisti lašelių dydį. Tuomet programinėje įrangoje užtenka nustatyti norimą lašelio dydį ir purkštukai automatiškai pakeičia savo sukimosi dažnį.

Nors jau yra nemažai atlikta dronų purškimo sistemų tyrimų, tačiau trūksta apibendrintų duomenų, kurie ūkininkams padėtų suprasti, kokia sistema reikalinga jų ūkyje, kaip ja tinkamai naudotis ir kokios iš to galima tikėtis ekonominės naudos. Labai svarbu parinkti optimalų drono aukštį ir darbinį greitį virš augalų, norint pasiekti geriausią augalų padengimą purškiamu preparatu. Taip pat ne mažiau svarbi yra ir vėjo krypties ir intensyvumo įtaka purškimo kokybei.

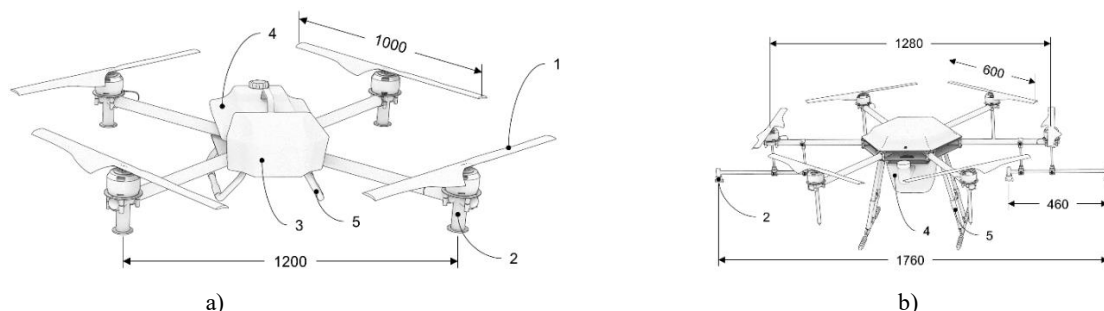
Tyrimo tikslas – kontroliuojamose sąlygose nustatyti šoninio vėjo greičio įtaką skirtingais dronais-purkštuvais išpurkštų skysčio lašelių sklaidai priklausomai nuo skridimo aukščio.

Išskeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Nustatyti atskiro drono-purkštovo išpurkštų lašelių sklaidą drono darbiname plote (nustatytoje purškimo zonoje).
2. Nustatyti šoninio vėjo greičio įtaką atskiro drono-purkštovo išpurkštų lašelių nunešimui pavėjui (dreifui).
3. Nustatyti šoninio vėjo greičio įtaką atskiro drono-purkštovo išpurkštų lašelių nunešimui pavėjui (dreifui) priklausomai nuo drono skridimo aukščio.

Tyrimų objektas ir metodai

Eksperimentiniai tyrimai atlikti 2024 m. Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos (VDU ŽŪA) Žemės ūkio inžinerijos ir saugos katedroje. Tyrimuose naudoti du purškimui skirti dronai: keturių propelerių (rotorių) XAG XP2020 (XAG, Kinija) ir šešių propelerių TTA M6E (Beijing TT Aviation Technology Co. Ltd, Kinija) (žr. 1 pav.).

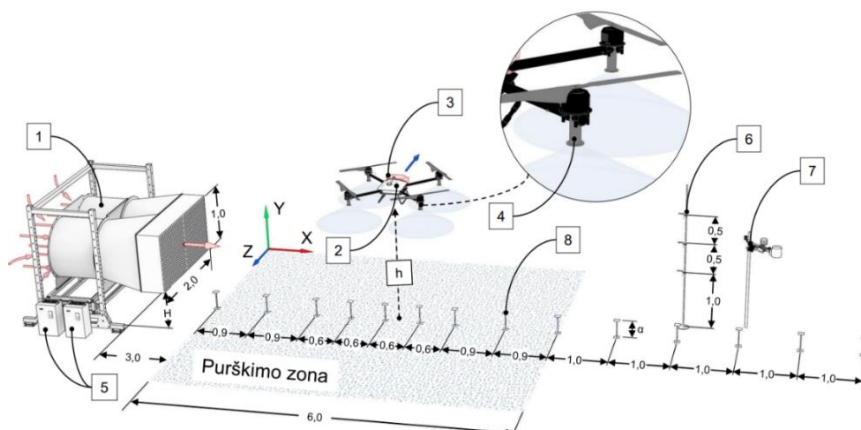


1 pav. Keturių XAG XP2020 (a) ir šešių TTA M6E rotorių (b) dronai: 1 – rotorius (propeleris), 2 – purkštukas, 3 – baterija, 4 – skysčio rezervuaras (talpa), 5 – drono atramos

Fig. 1. Drones with four XAG XP2020 (a) and six TTA M6E rotors (b): 1 – rotor, 2 – nozzle, 3 – battery, 4 – fluid tank, 5 – supports

Dronuose-purkštuvuose įrengtos dviejų skirtingų veikimo principų purškimo sistemos: peristaltinė beslėginė (XAG XP2020) ir slėginė (TTA M6E). XAG XP2020 sistemą sudaro peristaltinių siurblių blokas (4 siurbliai, t. y. kiekvienam purkštukui atskiras siurblys), 4 išcentriniai purkštukai (skysčio skleistuvai) su elektros varikliais ir skysčio tiekimo vamzdeliai. Šiame drone įrengti keturi propeleriai, po kuriais ir sumontuoti keturi rotaciniai purkštukai. Kiekvieną purkštuką suka atskiras elektros variklis, o kiekvienam purkštukui skystį tiekia atskiras peristaltinis siurblys. Peristaltiniai siurbliai buvo PP-14A (našumas $1,4 \text{ l min}^{-1}$), o rotaciniai purkštukai – SNZ-18000A modelio. Siurblyje besisukančiam būgneliui suspaudžiant žarnelę, skystis tiksliais porcijomis vamzdeliu tiekiamas link purkštuko, kurį pasiekęs skysčio slėgis susivienodina su aplinkos slėgiu, o elektros variklio sukamas rotacinio purkštuko rievėtas diskas skystį išskaido į smulkius lašelius ir paskleidžia ant purškiamo lauko paviršiaus. Tokia purškimo sistema vadinama beslėgine. Šešių rotorių TTA M6E purškimo drone įrengti keturi purkštukai sijoje, o ne po rotoriais (žr. 1 pav., b). Šiame drone yra sumontuota slėginė purškimo sistema, su įprastiniu membraniniu siurbliu ir standartiniais plyšiniais plokščiasraučiais purkštukais. Sistemoje skysčio slėgis gali būti nustatomas $0,2\text{--}0,5 \text{ MPa}$ diapazone. Įprastai sistemoje nustatomas $0,3 \text{ MPa}$ (3 bar) slėgis. Šiame tyrime drone sumontuoti įmonės „Lechler“, žalios spalvos, plyšiniai plokščiasraučiai purkštukai. Todėl, priklausomai nuo į purkštukus tiekiamo skysčio slėgio, gali būti išpurškiami $145\text{--}225 \mu\text{m}$ skersmens lašeliai. Taigi, tyrimų metu naudojant šį droną, naudojama ta pati standartinė 10 l ha^{-1} purškimo norma, kuriai esant palaikomas anksčiau minėtas sistemos slėgis ir gaunami atitinkamai apie $200 \mu\text{m}$ dydžio lašeliai.

Tyrimams atlikti buvo naudojamas oro srauto generatorius (žr. 2 pav.).



2 pav. Dronų tyrimų įrangos schema: 1 – du ašiniai ventiliatoriai su oro srauto lygintuvu; 2 – skysčio talpa; 3 – baterijos; 4 – purkštukai; 5 – tinklo įtampos dažnio keitikliai; 6 – vertikalaus lašelių dreifo pasiskirstymo nustatymo strypas su vandeniu jautriais lapeliais; 7 – meteorologinė stotelė; 8 – stoveliai; a – horizontalaus lašelių dreifo pasiskirstymo nustatymo stovelių, su vandeniu jautraus popieriaus laikikliais, aukštis; h – drono-purkštuko skridimo aukštis

Fig.2. Schematic of the drone research equipment: 1 – two axial fans with airflow straightener; 2 – liquid tank; 3 – batteries; 4 – nozzles; 5 – voltage frequency converters; 6 – vertical spray drift detection rod with water-sensitive papers; 7 – meteorological station; 8 – stands; a – height of the ground spray drift detection stands with water-sensitive paper holders; h – flying height of the drone

Horizontalia (x ašies) kryptimi lašelių nunešimui stebėti buvo sumontuoti stoveliai su 20 cm aukštyje pritvirtintais „Syngenta“ vandeniu jautriais lapeliais. Stoveliai išdėstyti purškimo zonoje ir už jos $1, 2, 3, 4, 5, 7,5, 10, 15$ ir 20 m

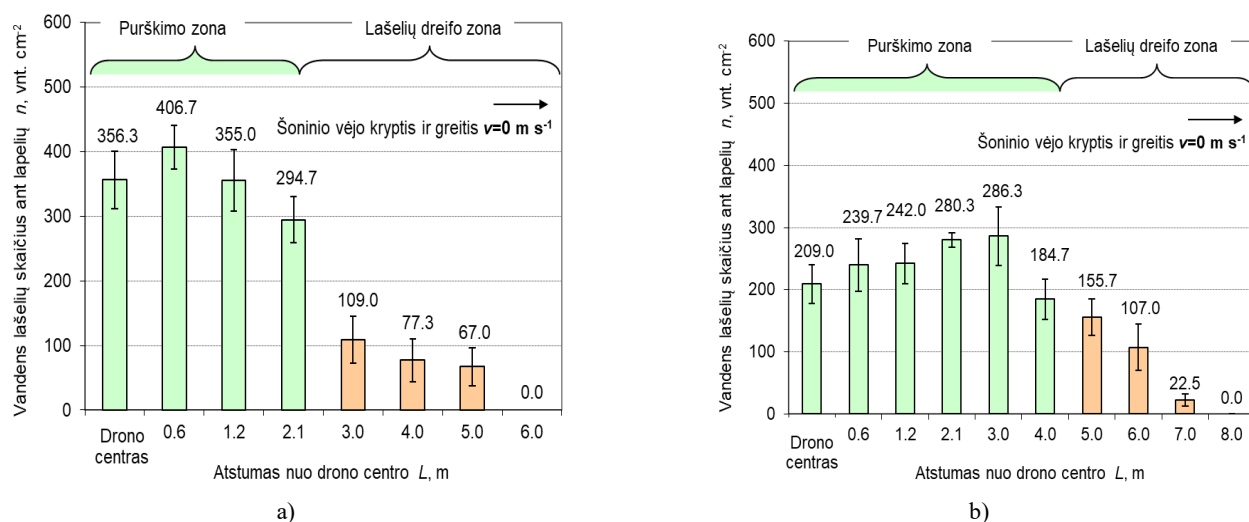
atstumais (laikantis ISO 22866:2005 standarto reikalavimų). Po kiekvieno bandymo skysčio lašeliais padengti lapeliai buvo surenkami, išdžiovinami, nuskenuojami ir analizuojami naudojant *DepositScan* programinę įrangą. Nustatytas lašelių skaičius lapelio plote (vnt. cm^{-2}). Vertinant tyrimo duomenis apskaičiuoti aritmetiniai vidurkiai ir jų pasisklidusieji intervalai.

Atliekant atskirus purškimo tyrimus, dronai nuo žemės paviršiaus buvo pakelti į 2 m, 3 m ir 4 m aukštį. Dronų skridimo greitis purškimo metu siekė 2 m s^{-1} . Šių tyrimų metu buvo purškiamas vanduo. Dronų tyrimuose, naudojant tinklo įtampas dažnių keitiklius, šoninio oro srauto greitis buvo keičiamas nuo 2 m s^{-1} iki 8 m s^{-1} , kas 2 m s^{-1} .

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Abu tiriamų dronų-purkštuvų gamintojai rekomenduoja purškiant iš 2 metrų aukščio purškimo zoną priimti 4 metrų pločio, purškiant iš 3 m – 6 m, o iš 4 m – 8 m. Gamintojai nerekomenduoja dirbti didesniuose aukščiuose dėl lašelių nunešimo pavėjui rizikos. Kadangi drono-purkštovo skridimo aukštis lemia propelerių sukuriamų oro srautų pasiskirstymą (Rancas et al., 2023), galima iškelti hipotezę, kad aukštis taip pat daro įtaką ir augalų padengimo lašeliais kokybei. Taip yra dėl to, kad iš didesnio aukščio krentantis lašelis turi didesnę tikimybę būti nuneštam šoninio vėjo. Propelerių kuriamas oro srautas iš dalies šį poveikį kompensuoja, tačiau kuo dronas-purkštovas keliamas aukščiau – tuo prie žemės juntamas oro srautas yra silpnesnis. Tuomet didėja dreifo rizika, o atitinkamai ir aplinkos tarša purškiamais preparatais.

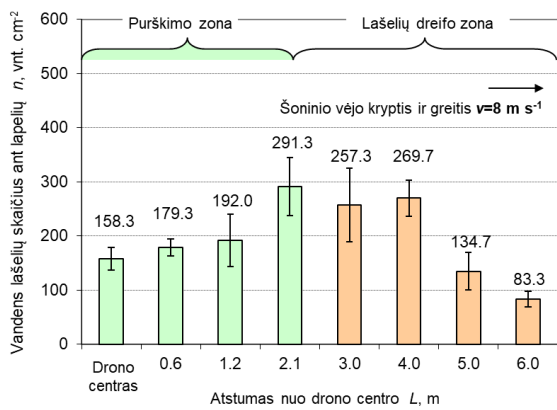
Visų pirma buvo atlikti lašelių sklaidos tyrimai, kai dronas-purkštovas TTA M6E skrido 2 m s^{-1} greičiu 2 m aukštyje, o šoninio oro srauto greitis buvo lygus 0 m s^{-1} (žr. 3 pav., a). Šiame paveiksle matoma, kad išpurkšti lašeliai paskleidžiami platesnėje ribose nei gamintojo rekomenduojami 4 m. Padidinus drono skridimo aukštį iki 4 m stebima panaši tendencija. Tuomet dalis lašelių taip pat buvo fiksuota 3 m atstumu nuo purškimo zonos (žr. 3 pav., b). Su dronu-purkštovu XP2020 kartota analogiška aukščių (nuo 2 iki 4 m) keitimo procedūra, siekiant nustatyti aukščio įtaką šio drono-purkštovo purškiamo lašelių srauto pasiskirstymui. Neveikiant šoniniam vėjui, už gamintojo rekomenduojamos purškimo zonos, nepriklausomai nuo drono aukščio, dalis lašelių buvo fiksuota tik 1 m atstumu nuo purškimo zonos.



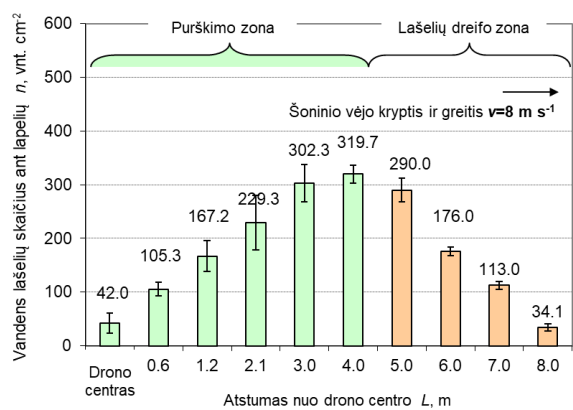
3 pav. Dronu TTA M6E išpurkštų lašelių sklaida, kai jo skridimo aukštis 2 m (a) ir 4 m (b), o šoninio vėjo greitis 0 m s^{-1}

Fig. 3. Spread of droplets sprayed by a TTA M6E drone at 2 m (a) and 4 m (b) with a lateral wind speed of 0 m s^{-1}

Padidinus šoninio vėjo greitį iki 8 m s^{-1} , kai dronas-purkštovas TTA M6E skrido 2 m s^{-1} greičiu 2 m aukštyje, ženkliai didesnė dalis buvo nunešta pavėjui (žr. 4 pav., a). Slėginės purškimo sistemos specifika lemia labai platų paskleidžiamų lašelių dydžių diapazoną, o smulkiausi lašeliai turi didesnę polinkį būti nunešiams pavėjui (Semenišin et al., 2025). Padidinus skridimo aukštį iki 4 m, visas drono-purkštovo išpurškiamas srautas pasislenka iš tikslinės zonos ir joje lieka tik tie lašeliai, kuriuos labiau paveikė drono-purkštovo propelerių generuojamas, žemyn nukreiptas oro srautas, lyginant su šoniniu vėju (žr. 4 pav., b). Dronui-purkštuvui esant didesniame aukštyje padidėja ir lašelių nunešimo pavėjui atstumas, esant bet kokiam šoniniam vėjui, t. y. purškiamo srauto platumas tiesiogiai susijęs su drono-purkštovo darbinio aukščiu. Tyrimo metu nustatyta, kad pagal gamintojo rekomendacijas naudojant droną-purkštuvą M6E ir neeksploatuojant šio įrenginio esant stipresniam kaip 8 m s^{-1} vėjui, lašelių nunešimo pavėjui problematika gali būti kontroliuojama paliekant didesnes nepurškiamas apsaugos juostas lauko pakraščiuose arba mažinant darbinį aukštį.



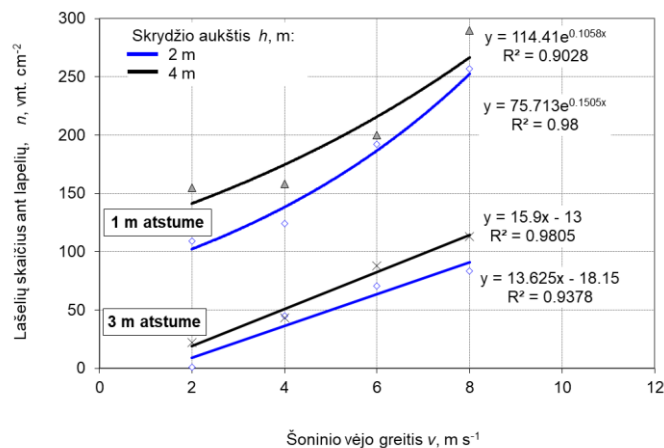
a)



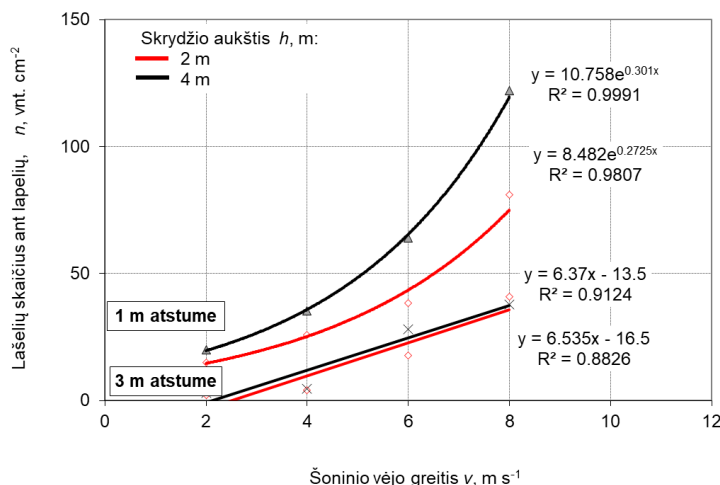
b)

4 pav. Dronu TTA M6E išpurkštų lašelių sklaida, kai jo skridimo aukštis 2 m (a) ir 4 m (b), o šoninio vėjo greitis 8 m s^{-1}
Fig. 4. Spread of droplets sprayed by a TTA M6E drone at 2 m (a) and 4 m (b) with a lateral wind speed of 8 m s^{-1}

Apibendrinant abiejų dronų-purkštuvų palyginamuosius tyrimus, galima teigti, kad XAG XP2020 dronas-purkštuvus dėl didesnių propelerių generuoja stipresnį žemyn nukreiptą oro srautą, kuris lašeliams neleidžia būti nunešiams pavėjui. Kai nėra jokio šoninio vėjo, tik pavieniai lašeliai iš XP2020 purškiamo srauto patenka už tikslinės purškimo zonos ribos (žr. 6 pav.). Priešingai, purškiant dronu-purkštuvu M6E – jo srautas esant tokioms pat sąlygoms iš tikslinės purškimo zonos išskrisdavo bent 3 m atstumu (žr. 5 pav.).



5 pav. Skrydžio aukščio ir šoninio vėjo greičio įtaka dronu-purkštuvu TTA M6E išpurkštų lašelių dreifui (lašelių skaičiui, vnt. cm^{-2})
Fig. 5. Influence of TTA M6E drone flight altitude and lateral wind speed on the spray drift (number of droplets, pcs cm^{-2})



6 pav. Skrydžio aukščio ir šoninio vėjo greičio įtaka dronu-purkštuvu XP 2020 išpurkštų lašelių dreifui (lašelių skaičiui, vnt. cm^{-2})
Fig. 6. Influence of XP 2020 drone flight altitude and lateral wind speed on the spray drift (number of droplets, pcs cm^{-2})

Skrydžio aukščio pakeitimas neigiamai lėmė purškiamo srauto pasiskirstymą. Beveik prie visų vėjo greičių, lašelių patenkančių už purškimo zonos nuotolis siekė 3 m nuo tikslinės zonos krašto jau esant 4 m s^{-1} šoninio vėjo greičiui.

Tačiau lyginant dronus-purkštuvus XP2020 su M6E akivaizdžiai matomas skirtumas tarp į netikslinę purškimo zoną patekusių lašelių kiekio. Tai paaiškinama XP2020 beslėginės purškimo sistemos privalumu – vienodesnio dydžio purškiami lašeliai, lyginant su slėgine purškimo sistema.

Išvados

1. Abu tirtų dronų-purkštuvų gamintojai rekomenduoja, purškiant iš 2 m aukščio, purškimo zoną priimti 4 m pločio, purškiant iš 3 m – 6 m, o iš 4 m – 8 m. Kai šoninio vėjo nėra drono-purkštovo XP2020, purškiant iš 2 m aukščio, purškimo zona išlaikoma tokia pati (4 m), kokią ir deklaruoja drono gamintojas. Tuo tarpu purškiant iš 4 m aukščio, purškimo zona yra šiek tiek platesnė nei 8 m. Tačiau už tikslinės purškimo zonos ribų patenka ženkliai mažesnis kiekis lašelių lyginant su M6E dronu. To priežastimi yra XP2020 drono kuriamas ženkliai stipresnis žemyn nukreiptas oro srautas.

2. Siekiant išvengti lašelių dreifo rizikos, pučiant 4 m s^{-1} šoniniam vėjui, M6E dronu-purkštovu, rekomenduotina purkšti iš ne didesnio kaip 2,0 m aukščio, o pučiant 6 m s^{-1} iš mažesnio kaip 2,0 m aukščio. Pučiant 8 m s^{-1} šoniniam vėjui, M6E drono, purškimui naudoti nerekomenduotina.

3. Dronui XP2020 dronui skrendant 2 m s^{-1} greičiu ir didinant šoninio vėjo greitį lašelių dreifas didėja. Todėl siekiant išvengti dreifo rizikos, pučiant 4 m s^{-1} šoniniam vėjui, šiuo dronu-purkštovu rekomenduotina purkšti iš ne didesnio kaip 2,5 m aukščio, pučiant 6 m s^{-1} – iš 2,0 m, pučiant 8 m s^{-1} – iš mažesnio nei 2,0 m aukščio

Literatūra

1. Dayioğlu, M. A., Turker, U. (2021). Digital transformation for sustainable future-agriculture 4.0: a review. *Journal of Agricultural Sciences*. 27(4), 373-399.
2. De Clercq, M., Vats, A., Biel, A. (2018). Agriculture 4.0: The future of farming technology. *Proceedings of the World Government Summit, Dubai, UAE*, 11–13.
3. Meshram, A. T., Vanalkar, A. V., Kalambe, K. B., Badar, A. M. (2022). Pesticide spraying robot for precision agriculture: A categorical literature review and future trends. *Journal of Field Robotics*. 39(2), 153–171.
4. Rancas V., Semenišin M., Steponavičius D. (2023). Šoninio vėjo greičio įtaka drono-purkštovo sukuriama oro srauto greičiui. *Jaunasis mokslininkas 2023: 20-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos straipsnių rinkinys*, 250–254.
5. Semenišin, M., Steponavičius, D., Kemzūraitė, A., Savickas, D. (2025). Optimizing UAV Spraying for Sustainability: Different System Spray Drift Control and Adjuvant Performance. *Sustainability*. 17(5), 2083.

EFFECT OF LATTERAL WIND SPEED ON THE SPRAY DRIFT OF DROPLETS SPRAYED BY DRONE

Abstract

New environmental trends have led to the development of drone applications in agriculture. Unlike ground-based spraying techniques, they do not damage the plants in the tramlines and do not compact the soil. However, when drones spray pesticides from higher altitudes, there is the potential for greater spray drift. The aim of this study was to determine, under controlled conditions, the effect of lateral wind speed on the drift of liquid droplets sprayed by different drone sprayers, depending on the flying height. Two drones were used in the study: a four-propeller (rotor) XAG XP2020 and a six-propeller TTA M6E. The drones were lifted from the ground to altitudes of 2 m, 3 m and 4 m in separate water spraying studies. The drones had a flying speed of 2 m s^{-1} during the spraying. In the drone studies, the lateral airflow velocity was varied from 2 m s^{-1} to 8 m s^{-1} using voltage frequency converters. The number of droplets per area of the water-sensitive papers (pcs cm^{-2}) was determined. Studies have shown that drone design, lateral wind speed and drone altitude have an impact on the spray drift, outside the spray zone. To avoid the risk of spray drift, it is recommended that the M6E drone sprayer should be used to spray from a maximum height of 2 m with a lateral wind of 4 m s^{-1} and from a height of less than 2 m with a wind of 6 m s^{-1} . In lateral winds of 8 m s^{-1} the M6E drone is not recommended for spraying. To avoid the risk of spray drift, the XP 2020 drone sprayer should be recommended to spray from a maximum height of 2.5 m in a 4 m s^{-1} lateral wind, from a height of 2 m in a 6 m s^{-1} lateral wind and from a height of less than 2 m in an 8 m s^{-1} wind.

Keywords: spraying, spray drift, drone flight altitude.