

Dr hab. inż. Grzegorz Doruchowski, prof. IO-PIB  
Pracownia Techniki Ochrony i Nawożenia  
Zakład Agrotechnologii  
Instytut Ogrodnictwa – Państwowy Instytut Badawczy w Skierniewicach

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**  
**mgr inż. Bogusławy Marzeny Berner**  
**pt. „Osadzanie na roślinach cieczy rozpylanej z drona wielowirnikowca”**  
**Promotor pracy doktorskiej: dr hab. inż. Jerzy Chojnacki**  
**Promotor pomocniczy: dr inż. Leszek Sergiel**

## **1. Podstawa opracowania recenzji**

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, prof. dr hab. Dariusza Andrejko, który w piśmie z dnia 3 lipca 2023 roku (pismo RD IM/5100/2023) poinformował mnie, że uchwałą Rady z dnia 23 czerwca 2023 roku zostałem wyznaczony na recenzenta rozprawy. Zgodnie z informacją zawartą w piśmie przewod doktorski został wszczęty i przeprowadzany jest w dziedzinie nauk rolniczych, dyscyplinie inżynieria rolnicza.

## **2. Formalna ocena rozprawy**

Rozprawa doktorska autorstwa Pani Magister Bogusławy Berner, kandydatki na stopień doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (dawniej inżynieria rolnicza) wykonana została w Katedrze Mechaniki i Konstrukcji, na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Ma formę maszynopisu książki z załączonym oświadczeniem Promotora, że przygotowana pod jego kierunkiem praca spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego, oraz oświadczeniem Autorki, że rozprawa została przygotowana samodzielnie pod kierunkiem Promotora i Promotora pomocniczego i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami, a także że rozprawa nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego.

Rozprawa liczy 113 stron, do których dołączono 9 stron załączników w formie tabel, zawierających surowe wyniki pomiarów. W skład rozprawy wchodzi: spis treści, streszczenia ze słowami kluczowymi w języku polskim i angielskim, oraz sześć rozdziałów obejmujących wstęp z przeglądem literatury, wyszczególnienie celu pracy i problemów badawczych, opis zastosowanych materiałów i metod badawczych, omówienie wyników badań z dyskusją, wnioski i alfabetyczny spis literatury. Rozprawa nie zawiera spisu tabel i rysunków oraz wykazu stosowanych skrótów.

Co do elementów rozprawy i ich układu nie wnoszę zastrzeżeń zwracając jedynie uwagę, że autorka przyjęła nieszablonową strukturę rozprawy doktorskiej, nie wyodrębniając rozdziału poświęconego przeglądowi literatury lecz włączając tę część do rozdziału „Wstęp”. W tym obszernym rozdziale kandydatka nakreśliła tło przedmiotu rozprawy i aktualny stan wiedzy stanowiący podstawę do sformułowania problemów badawczych i celu badań w kolejnym rozdziale. Jest to typowa struktura publikacji w czasopiśmie naukowych i jako taka w pełni akceptowalna w rozprawie doktorskiej przez fakt zachowania logicznego toku narracji: co wiemy z dotychczasowych badań, jakie problemy pozostają do rozwiązania, a zatem co jest celem pracy badawczej.

### 3. Ocena celu i zakresu rozprawy

Zgodnie z obowiązującymi w krajach członkowskich UE przepisami, wynikającymi z wymagań stawianych przez Dyrektywę PEiR 2009/128/WE stosowanie środków ochrony roślin w formie opryskiwania upraw przy użyciu bezzałogowych statków powietrznych (dronów) jest dopuszczalne w szczególnych przypadkach, a mianowicie gdy brak jest wykonalnych metod alternatywnych lub gdy zastosowanie dronów wiąże się z wyraźnymi korzyściami pod względem ograniczania wpływu środków ochrony roślin na zdrowie ludzi i środowisko w porównaniu do ich aplikacji sprzętem naziemnym. Wynika to z obawy o wysokie ryzyko zanieczyszczenia środowiska i stworzenie zagrożenia dla ludzi z powodu zwiększonego znoszenia cieczy użytkowej podczas opryskiwania upraw z wysokości istotnie większej niż ma to miejsce w przypadku stosowania typowych opryskiwaczy polowych lub sadowniczych.

Pierwszy ze stawianych przez ww. Dyrektywę warunków dopuszczenia dronów do stosowania środków ochrony roślin może dotyczyć upraw na skłonach, których pochylenie uniemożliwia wykorzystanie tradycyjnych opryskiwaczy (np. winnice), a drugi selektywnego (np. punktowego lub placowego) stosowania tych środków. W dobie intensywnego rozwoju technologii cyfrowych w rolnictwie selektywne opryskiwanie upraw jest docelowym kierunkiem doskonalenia technik ochrony roślin o najwyższym potencjale ograniczenia ilości stosowanych środków ochrony roślin do poziomu wyznaczonego przez strategię „Od pola do stołu” w ramach działań Europejskiego Zielonego Ładu. Szczególna predyspozycja dronów do tego rodzaju precyzyjnych zabiegów jest szansą na upowszechnienie ich stosowania w ochronie roślin z korzyścią dla użytkowników i zachowaniem odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa dla ludzi i środowiska. Ponadto drony bez szczególnych warunków natury środowiskowej lub zdrowotnej mogą być stosowane do opryskiwania roślin przy użyciu biocydów pochodzenia naturalnego oraz płynnych biostymulatorów i mikronawozów. Konieczne jest zatem wzbogacanie bazy danych i poszerzanie wiedzy o zagrożeniach i korzyściach płynących ze stosowania dronów w ochronie roślin w celu modyfikacji podstaw prawnych i agrotechnicznego uzasadnienia do ich wdrażania w praktyce. Dlatego wybór dronów do opryskiwania upraw jako przedmiotu badań naukowych, stanowiących temat rozprawy doktorskiej należy uznać za bardzo aktualny i mający duże znaczenie praktyczne.

W świetle stanu wiedzy przedstawionej w obszernym przeglądzie literatury Pani Magister Bogusława Berner stwierdziła, że brak jest wystarczającej wiedzy na temat naniesienia cieczy użytkowej na roślinach opryskiwanych przy użyciu dronów wirnikowców, precyzując tym samym ogólny problem badawczy. Odpowiedzią kandydatki na ten problem było postawienie hipotez zakładających, że: (I) wysokość i prędkość przemieszczania się drona oraz prędkość obrotowa jego śmigieł wynikająca ze stopnia wypełnienia zbiornika cieczą użytkową mają wpływ na naniesienie cieczy na opryskiwane rośliny; (II) jakość naniesienia cieczy na roślinach uzyskana przy użyciu drona może być lepsza od tej jaką uzyskuje się przy użyciu opryskiwacza naziemnego. Hipotezy te skłoniły kandydatkę do sformułowania pytań badawczych, moim zdaniem niefortunnie określonych jako problemy badawcze. Pytania te dotyczyły: (i) wpływu wysokości i prędkości przemieszczania się drona oraz prędkości obrotowej jego śmigieł na naniesienie cieczy użytkowej na rośliny; (ii) jakości naniesienia cieczy na roślinach uzyskanej przy użyciu drona w porównaniu z tą jaką uzyskuje się przy użyciu opryskiwacza naziemnego; (iii) wpływu morfologicznych cech roślin, takich jak ich wysokość i stopień ulistnienia, na jakość naniesienia cieczy. Wywiedzionym z tych pytań celem prac badawczych kandydatki było określenie wpływu parametrów pracy drona wielowirnikowca oraz morfologicznych cech wybranych upraw na poziom i równomierność

naniesienia cieczy użytkowej na roślinach podczas symulowanych zabiegów opryskiwania z użyciem drona w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Aby zrealizować ten cel zdefiniowano zadania badawcze, które w istocie okazały się powtórzeniem treści zawartych w pytaniach badawczych.

Zdefiniowanie ogólnego problemu badawczego należy uznać za trafne, wybór celu badań za zasadny, a sformułowanie pytań badawczych i hipotez za odpowiednio określające zakres pracy, który spełnił wymóg oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. W opisie tej części rozprawy kandydatka nie uniknęła jednak niezręcznego logicznie toku planowania pracy badawczej stawiając hipotezy przed określeniem celu badań i sformułowaniem pytań badawczych. **Opis planowania badań i zdefiniowanie intencji wykonawcy powinien zachować następującą kolejność: (i) diagnoza ogólnego problemu badawczego wynikającego z opisu stanu wiedzy; (ii) zdefiniowanie celu badań, będącego odpowiedzią na zdiagnozowany problem; (iii) postawienie pytań badawczych lub szczegółowych problemów badawczych w formie pytań (jakkolwiek je nazwiemy), które określają zakres prac badawczych; (iv) sformułowanie hipotez badawczych, które warunkują lub uzasadniają wybór metodologii badań. Chcąc zachować konstruktywność mojej recenzji sugeruję przyjęcie przez kandydatkę tego toku narracji w prezentacji podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

#### 4. Merytoryczna ocena rozprawy

**TYTUŁ** rozprawy doktorskiej Pani Magister Bogusławy Berner właściwie odzwierciedla przedmiot prac badawczych choć nie stawia go w relacji do badanych czynników, jakimi są parametry robocze drona wirnikowca i charakterystyka opryskiwanych upraw. Uwzględnienie ich w tytule wskazywałoby na cel i zakres przeprowadzonych prac badawczych, podnosząc tym samym jego walor informacyjny. Problematiczne jest użycie w tytule, oraz w tekście całej rozprawy określenia „osadzanie cieczy roboczej”. Wyrażeniem powszechnie przyjętym w literaturze przedmiotu, w tym także w licznych cytowanych przez kandydatkę polskojęzycznych publikacjach, jest „naniesienie cieczy”. Zarówno rozszerzenie tytułu jak i użycie powszechnie stosowanego nazewnictwa zawężyłoby obszar poszukiwań potencjalnych czytelników w rzeczowych indeksach literatury naukowej.

**WSTĘP** jest bardzo obszernym rozdziałem, obejmującym gruntowny i przejrzyste usystematyzowany przegląd literatury. Merytorycznie jest mocną stroną rozprawy. W oparciu o licznie cytowane, trafnie dobrane i aktualne publikacje kandydatka dokonuje przeglądu dronów, zarówno płatowców jak i wirnikowców, opisuje ich wyposażenie, parametry techniczne i możliwości eksploatacyjne oraz wskazuje na korzyści i zagrożenia wynikające z ich stosowania w rolnictwie. Następnie skupia się na wykorzystaniu dronów wirnikowców w ochronie roślin, przetaczając liczne przykłady badań z ich użyciem do opryskiwania zbóż (ryżu, pszenicy i kukurydzy), rzepaku, ziemniaków, papryki, trzciny cukrowej i bawełny oraz upraw przestrzennych, takich jak winorośl i drzewa, w tym drzewa owocowe (cytrusowe, brzoskwinie). Przytłaczająca większość cytowanych badań prowadzona była w krajach azjatyckich, głównie w Chinach, gdzie brak ograniczeń prawnych dla tej techniki ochrony upraw rodzi większe zainteresowanie potencjalnych użytkowników niż w Europie.

Z przeglądu literatury wynika, że drony powszechnie wyposaża się w rozpylacze ciśnieniowe, płaskostrumieniowe, zarówno drobnokropliste standardowe jak i grubokropliste eżektorowe, a więc takie same jak montowane na tradycyjnych opryskiwaczach rolniczych. Osobny podrozdział kandydatka poświęciła parametrom

zabiegów ochrony roślin przeprowadzanych z użyciem dronów. Zakres prędkości lotów w cytowanych badaniach wynosił najczęściej od 3,0 do 5,0 m s<sup>-1</sup> przy minimalnych i maksymalnych wartościach wynoszących odpowiednio 1,0 i 6,0 m s<sup>-1</sup>, a wysokości rozpylaczy nad uprawami zwykle od 1,5 do 3,0 m, z wartościami ekstremalnymi 0,8 i 5,0 m. Wyniki większości prowadzonych badań wskazywały na wpływ obu tych parametrów na jakość zabiegów, co mogło być skutkiem ich wpływu na strumień powietrza wytwarzany przez wirniki, i tym samym na trajektorię i energię kropeł cieczy użytkowej. W świetle cytowanych badań większa wysokość opryskiwania z dronów niż stosowana z użyciem opryskiwaczy naziemnych (0,5 m) była zwykle powodem gorszej penetracji cieczy użytkowej w uprawach i zwiększonego ryzyka znoszenia cieczy.

W kolejnym podrozdziale kandydatka przytoczyła wyniki badań laboratoryjnych z użyciem dronów do ochrony roślin. Koncentrowano się w nich na efektach działania strumienia powietrza wytwarzanego przez wirniki przy istotnie niższych prędkościach przemieszczania się drona niż ma to miejsce w rzeczywistych warunkach polowych.

Na uwagę zasługuje także bogato ilustrowany i poparty licznymi cytowaniami podrozdział, w którym kandydatka wszechstronnie omówiła stosowane metody pomiarów naniesienia cieczy w uprawach. Przytoczyła w nim publikacje opisujące badania z użyciem różnych próbników i schematów ich rozmieszczenia w łanach upraw, pozwalających na ocenę poziomu naniesienia i równomierności rozkładu cieczy użytkowej w roślinach.

Gruntowny przegląd literatury pozwolił kandydatce na prawidłowe zaplanowanie badań, zorganizowanie stanowiska badawczego, odpowiednie wyposażenie drona oraz właściwy dobór materiałów i metod pomiarów naniesienia cieczy użytkowej na roślinach.

W rozdziale **MATERIAŁY I METODY** Pani Magister Bogusława Berner opisuje laboratoryjne stanowiska badawcze, metody przeprowadzonych pomiarów oraz sposób analizy wyników. Użyty do badań heksakopter DJI S-900 został podwieszony na stanowisku w formie bieżni umożliwiającej opryskiwanie umieszczonych poniżej roślin podczas jego przemieszczania po powtarzalnym torze, na dwóch wysokościach, 0,5 i 1,0 m, oraz przy dwóch prędkościach przesuwu, 0,54 i 1,0 m s<sup>-1</sup>. Osobne stanowisko, wyposażone w wagę elektroniczną, zostało zbudowane i wykorzystane przez kandydatkę w toku wcześniejszych badań do opracowania równania regresji (4):  $F = 9 \cdot 10^{-7} \cdot n^{2,137}$ , opisującego zależność siły ciągu drona od prędkości obrotowej jego wirników (Berner i Chojnacki, 2018a). W rozprawie doktorskiej autorka odwołała się do tego równania w celu wykorzystania go do wyznaczenia prędkości obrotowych wirników drona, przy których siła ciągu równoważyłaby siłę ciężkości działającej na drona o masie z pustym i pełnym zbiornikiem cieczy. Wyznaczone przez kandydatkę prędkości obrotowe wynosiły odpowiednio 5000 i 6350 obr min<sup>-1</sup>. W tym miejscu zastrzeżenie budzi tok wyznaczania prędkości obrotowych wirników, wyniki obliczeń siły ciągu drona z pustym i pełnym zbiornikiem cieczy oraz użyte przez kandydatkę pojęcia fizyczne związane z tym zagadnieniem. Wszędzie tam gdzie podawana jest w kilogramach [kg] lub kontekstowo omawiana masa drona (fizyczna wielkość skalarna) kandydatka mylnie używa pojęcia „ciężar” lub „waga”, właściwego dla określenia siły ciężkości działającej na masę, czyli wielkości wektorowej, wyrażanej w niutonach [N]. Uwaga dotyczy wszystkich rozdziałów rozprawy. Co do sposobu wyznaczania z równania (4) prędkości obrotowych wirników drona obciążonego pustym o pełnym zbiornikiem cieczy logiczny tok postępowania sugeruje, by dla przyjętych do badań mas drona  $m$  [kg], wynoszących 7,5 kg z pustym zbiornikiem i 12,5 kg z pełnym zbiornikiem, obliczyć odpowiednio siły ciężkości działające na dron (ciężary drona)  $F_d[N] = m[\text{kg}] \cdot g[\text{m s}^{-2}]$ , które należałoby zrównoważyć siłami ciągu drona  $F_c$  (stąd:  $F_c = F_d$ ) aby dron zawisł w powietrzu (pomijam tu konieczność uwzględnienia dodatkowej siły, która w

praktyce byłaby potrzebna do pokonania oporu powietrza w celu przemieszczania drona). Przyjmując przyspieszenie ziemskie  $g=9,81 \text{ m s}^{-2}$  siły te powinny wynosić 73,58 i 122,63 N odpowiednio dla pustego i pełnego zbiornika. Wyznaczone z równania (4) prędkości obrotowe wirników  $n$  powinny wynosić odpowiednio 5042 i 6404 obr  $\text{min}^{-1}$ .

Opryskiwania roślin przeprowadzane były dla wszystkich dwunastu kombinacji trzech ww. czynników (zmiennych niezależnych), tzn: wysokości opryskiwania, prędkości przemieszczania drona i prędkości obrotowej wirników, których wpływ na naniesienie cieczy na roślinach (zmienna zależna) był przedmiotem badań. Kombinacje z wyłączonymi wirnikami (zerowa prędkość obrotowa wirników) symulowały opryskiwanie przy użyciu tradycyjnego opryskiwacza rolniczego. Dron wyposażony był w płaskostrumieniowy rozpylacz ciśnieniowy Lechler ST 110-02, zasilany przez ciecz użytkową pod stałym dla wszystkich kombinacji ciśnieniem 0,2 MPa. Tym samym wszystkie zabiegi przeprowadzono przy stałym wydatku rozpylacza, wynoszącym  $0,63 \text{ L min}^{-1}$ . Wynika z tego, że w kombinacjach zabiegów, przeprowadzonych przy prędkości  $0,54 \text{ m s}^{-1}$  dawka cieczy na powierzchnię upraw [ $\text{L ha}^{-1}$ ] była niemal dwukrotnie większa niż przy prędkości  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , co musiało, i faktycznie miało istotny wpływ na poziom naniesienia cieczy na roślinach. Fakt ten jednak nie został odnotowany przez kandydatkę, która w dalszych rozważaniach o wpływie czynników na naniesienie cieczy konsekwentnie omawiała efekt prędkości przemieszczania drona zamiast faktyczny efekt dawki cieczy. W celu badania wpływu prędkości przemieszczania drona na naniesienie cieczy na roślinach należałoby zaplanować inny układ doświadczenia. **Sugeruję, by w prezentacji podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej skorygować opis materiałów i metod, wyników i dyskusji oraz wynikające z nich wnioski zastępując prędkość drona dawką cieczy.**

Do pomiarów naniesienia cieczy użytkowej na rośliny kandydatka wybrała trzy różniące się cechami morfologicznymi uprawy o dużym znaczeniu gospodarczym w Polsce, tzn. rzepak, pszenicę i ziemniaki. Rośliny umieszczono w laboratorium pod bieżnią drona w liczbie i układzie właściwym dla tych upraw, dobrze symulującym rzeczywiste warunki polowe. Naniesienie cieczy oceniane było przy użyciu sztucznych próbników umieszczonych na różnych poziomach łanu roślin, trzech dla rzepaku i pszenicy, a pięciu dla ziemniaków. Na każdym poziomie znajdowały się cztery próbniki rozłożone na szerokości działania rozpylacza. Opryskiwanie roślin według określonej kombinacji badanych zmiennych niezależnych powtarzano pięć razy. Metodą naniesienia na sztucznych próbnikach oceniano także poprzeczny rozkład cieczy z rozpylacza dla poszczególnych kombinacji parametrów opryskiwania. Próbniki rozmieszczone były w rozstawie co 10 cm, na trzech listwach o długości 2,0 m, ułożonych co 0,5 m poprzecznie do kierunku ruchu drona. Każda kombinacja powtarzana była dwa razy. W opisanych doświadczeniach ciecz użytkową stanowił roztwór nigrozyny o stężeniu 0,5%. Naniesienie cieczy określano na podstawie spektrofotometrycznego pomiaru stężenia nigrozyny w roztworze wody użytej do zmywania próbników.

Ponadto w badaniach kandydatki oceniano rozkład prędkości strumienia powietrza wytwarzanego przez wirniki drona dla obu badanych prędkości obrotowych i obu wysokości opryskiwania. Do tego celu użyto sześciu termoanemometrów, umieszczonych w rozstawie co 20 cm, na belce ustawionej poprzecznie do kierunku ruchu drona. W tym miejscu ponownie zwracam uwagę na nieścisłość pojęć fizycznych użytych w rozprawie. W podrozdziałach dotyczących analizy wyników rozkładu cieczy pod wpływem strumienia powietrza kandydatka używa pojęcia „pędu powietrza”, co z punktu widzenia fizyki powinno

uwzględniać zarówno prędkość jak i i masę powietrza. W prezentowanej pracy pęd powietrza w rozumieniu mechaniki nie był faktycznym przedmiotem rozważań.

Do opisanej metodyki pomiarów nie zgłaszam zastrzeżeń. Mając na uwadze ograniczenia związane z badaniami laboratoryjnymi liczba i układ próbników oraz liczba powtórzeń w ramach każdej kombinacji badanych czynników była wystarczająca do przeprowadzenia analiz statystycznych. Szkoda tylko, że do pomiarów naniesienia cieczy w roślinach użyto próbek zbiorczych, mierząc w jednym roztworze stężenie nigrozyny zmytej z wszystkich czterech próbników dla każdego poziomu w łanie upraw. W ten sposób kandydatka pozbawiła się możliwości pełnej oceny zmienności naniesienia na poszczególnych poziomach, co biorąc pod uwagę przestrzenne zróżnicowanie pokroju roślin oraz zmienność wielkości i gęstości kropeł na szerokości działania rozpylacza mogło być cenną informacją. Z punktu widzenia skuteczności zabiegów ochrony roślin istotna jest równomierność rozkładu środka ochrony roślin w całej roślinie i w przestrzeni całego łanu, zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. Wyrazem tej równomierności w badaniach kandydatki byłby w pełnym zakresie współczynnik zmienności CV, określane dla całej populacji odczytów naniesienia na pojedynczych próbnikach.

W tym miejscu kolejny raz zwracam uwagę na poprawność nazewnictwa. Współczynnik CV jest w rozprawie określane wymiennie jako „współczynnik zmienności”, „współczynnik równomierności”, lub „współczynnik nierównomierności”, gdy tymczasem jedynym poprawnym określeniem jest pierwsze z wymienionych.

Wyróżniającym, i tym samym interesującym aspektem rozprawy była ocena indeksu powierzchni liści (LAI) dla użytych w badaniach upraw. Indeks ten był szacowany na podstawie pomiaru powierzchni liści na poszczególnych poziomach roślin i obliczany kumulatywnie dla tych poziomów. Wyznaczenie wartości LAI posłużyło do oceny wpływu gęstości roślin na penetrację cieczy użytkowej w łanach upraw.

Uzyskane wyniki analizowane były statystycznie metodą analizy wariancji (ANOVA) w celu wyznaczenia istotności wpływu badanych czynników na naniesienie cieczy użytkowej na roślinach. Podrozdział poświęcony analizie statystycznej nie zawiera informacji czy uzyskane w toku pomiarów dane przetestowano pod kątem spełnienia warunków umożliwiających przeprowadzenie analizy wariancji, tzn. zapewnienie normalności rozkładu danych i równości wariancji w badanych populacjach. Rozkłady danych naniesienia w badaniach nad technikami opryskiwania są niemal zawsze dalekie od normalności, a wariancje bardzo zróżnicowane, dlatego dane te wymagają doboru odpowiednich transformacji. Analiza wariancji powinna być wtedy przeprowadzona na danych transformowanych.

W rozdziale **OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ I Dyskusja**, podrozdział WYNIKI BADAŃ ogranicza się do przedstawienia w formie graficznej i tabelarycznej wyników pomiarów i analiz statystycznych naniesienia cieczy na roślinach poszczególnych upraw i na liniach pomiarowych do ceny rozkładu cieczy, a następnie wyników rozkładu prędkości strumienia powietrza. Ich omówienie, interpretację i dyskusję Pani Magister Bogusława Berner zawarła w kolejnym podrozdziale ANALIZA WYNIKÓW I Dyskusja.

Wykresy skrzynkowe przedstawiające średnie wartości naniesienia cieczy na różnych poziomach łanu upraw dla wszystkich kombinacji badanych zmiennych niezależnych zostały wykonane dla poszczególnych upraw w jednolitej skali i zestawione w sposób umożliwiający łatwe wizualnie porównanie. Ten sposób prezentacji wyników daje czytelny pogląd na istotę zjawisk i pozwala na ich prawidłową interpretację.

Istotność wpływu badanych zmiennych (prędkości obrotowej wirników, wysokości opryskiwania i prędkości lotu drona (faktycznie dawki cieczy)) na naniesienie cieczy na

poszczególnych poziomach roślin, przy różnych wartościach pozostałych zmiennych niezależnych, identyfikowano za pomocą wartości prawdopodobieństwa testowego  $p$ , uzyskanych w wyniku jednoczynnikowych analiz wariancji, przeprowadzonych dla prędkości obrotowej wirników. Kandydatka stwierdzała istotność zmiennej jeśli wartość  $p$  była mniejsza lub równa od krytycznego poziomu istotności  $\alpha=0,5$ . Tymczasem taka sytuacja pozwala jedynie na odrzucenie hipotezy zerowej, zakładającej równość średnich w badanych populacjach i uzasadnia wniosek, że średnie z populacji mogą się różnić, nie przesądzając jednak o **praktycznej istotności** tych różnic, a więc o **istotności efektu**. Według wielu statystyków (Lang i in., 1998 [DOI: [10.1097/00001648-199801000-00004](https://doi.org/10.1097/00001648-199801000-00004)]; Greenland i in., 2016 [DOI: [10.1007/s10654-016-0149-3](https://doi.org/10.1007/s10654-016-0149-3)]) wartość  $p$  jest narzędziem nadużywanym w testowaniu istotności zmiennych bo jedynie pośrednio świadczącym o wartości dowodowej danych. Twierdzą, że nie wyraża ona wprost istotności praktycznej badanego zjawiska, a właściwą jej miarą jest **wielkość efektu**. Ponieważ nadinterpretacja istotności efektów na podstawie wartości  $p$  dotyczy szczególnie bardzo licznych populacji to w przypadku relatywnie małej liczby obserwacji w badaniach będących przedmiotem rozprawy może nie mieć miejsca. A zatem, o ile sposób badania istotności czynników przyjęty przez kandydatkę można uznać za poprawny to w zaprezentowanej formie był bardzo rozdrobniony, utrudniając śledzenie istotności kolejnych czynników i nie dając ogólnego poglądy na siłę ich efektu. Syntetyczną i bardzo prostą metodą oceny siły efektu jest analiza standardowej tabeli ANOVA, będącej wynikiem wieloczynnikowej analizy wariancji przeprowadzonej na kompletnej populacji danych. Analizując podane w tabeli ANOVA sumy kwadratów, będące miarą zmienności danych powodowanej przez poszczególne czynniki (źródła zmienności) można określić procentowy udział każdego z nich w zmienności całkowitej, co jest miarą siły efektu. Pozwala to na uporządkowanie badanych czynników według siły ich wpływu na obserwowane zjawisko.

Wątpliwości budzi przyjęty przez kandydatkę sposób oceny równomierności naniesienia cieczy w roślinach dla poszczególnych kombinacji parametrów zabiegu na podstawie średnich wartości współczynników zmienności  $CV_k$ , obliczonych dla każdego powtórzenia w tych kombinacjach. Z punktu widzenia jakości zabiegów opryskiwania interesująca jest zmienność naniesienia danej kombinacji uwzględniająca wszystkie jej powtórzenia, bo taka jest istota powtórzeń eksperymentów. W tym celu współczynnik zmienności  $CV$  dla kombinacji należy obliczać na całej populacji danych z tej kombinacji. Tak obliczony  $CV$  może się dalece różnić od średniej wartości  $CV_k$  dla poszczególnych powtórzeń, która nie uwzględnia zmienności między powtórzeniami.

Wątpliwość budzi także zasadność i interpretacja równań regresji opisujących zależność współczynnika zmienności  $CV$  naniesienia cieczy w roślinach od prędkości obrotowej wirników drona. Ideą regresji jest przewidywanie wartości jednej zmiennej (objaśnianej; tu:  $CV$ ) na podstawie innej zmiennej (objaśniającej; tu: prędkość wirników). Ponieważ różnicę między wartościami  $CV$  dla badanych prędkości wirników uznano za nieistotne to przewidywanie wartości  $CV$  dla pośrednich prędkości wirników jest bezzasadne. Podobnie bezcelowe jest przewidywanie wartości  $CV$  dla prędkości wirników między wartością 0 a prędkością wirników drona z pustym zbiornikiem, ponieważ w tym zakresie dron nie jest w stanie się unieść i wykonać zabiegu opryskiwania. **Dlatego w prezentacji podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej sugeruję pominąć równania regresji w przedstawionej formie.**

Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano interesujące prawidłowości. Biorąc pod uwagę wcześniej opisany fakt, że zmienna określona przez kandydatkę jako prędkość przemieszczania się drona jest w istocie dawką cieczy czynnik ten w przypadku wszystkich upraw miał istotny wpływ na naniesienie cieczy w roślinach. Na uwagę zasługuje fakt, że w każdym przypadku zależność między dawką cieczy a naniesieniem była wprost proporcjonalna (między prędkością a naniesieniem odwrotnie proporcjonalna), co w technice opryskiwania nie jest oczywiste z powodu ryzyka obniżonej retencji cieczy na opryskiwanym obiekcie przy wyższych dawkach cieczy. Wynik ten wskazuje, że dla obu stosowanych dawek cieczy retencja była na podobnym poziomie, co jest okolicznością pożądaną z punktu widzenia poprawności w ich doborze.

Wysokość opryskiwania istotnie wpływała na naniesienie cieczy szczególnie w górnych partiach łanu upraw. Wyższe wartości naniesienia, średnio o 40%, obserwowano przy niższej wysokości drona.

Porównując efekty symulowanych zabiegów wykonanych dronem i opryskiwaczem naziemnym, a faktycznie przeprowadzonych przy pomocy tego samego stanowiska z udziałem i bez udziału strumienia powietrza, stwierdzono istotnie wyższe naniesienia cieczy w roślinach w przypadku drona. W uprawach rzepaku i pszenicy prawidłowość tą zaobserwowano dla obu wysokości opryskiwania, a w ziemniakach była oczywista dla wysokości 1,0 m i w niższych partiach roślin.

Zmniejszenie prędkości obrotowej wirników drona, wynikające z opróżniania się zbiornika cieczy podczas zabiegu, w większości badanych przypadków nie spowodowało istotnego spadku naniesienia cieczy w roślinach. Wynika z tego istotna informacja, że ze zmniejszeniem masy drona i obniżeniem prędkości obrotowej wirników nie wiąże się ryzyko pogorszenia jakości zabiegu.

Z opisanym wyżej zastrzeżeniem dotyczącym metody oceny równomierności naniesienia cieczy w roślinach obserwowany współczynnik zmienności CV był wyższy dla zabiegów wykonywanych bez udziału strumienia powietrza, a więc techniką tradycyjną. Rozkład naniesienia w roślinach pszenicy i rzepaku był bardziej wyrównany niż w ziemniakach. Powodem tego była znacznie większa powierzchnia i gęstość ulistnienia ziemniaków wyrażona indeksem powierzchni liści LAI.

Ogólnie korzystne dla drona wyniki naniesienia cieczy użytkowej w roślinach mogły być efektem modyfikacji rozkładu cieczy pod rozpylaczem, pod wpływem działania strumienia powietrza wytwarzanego przez wirniki. Modyfikacja ta polegała na zwężeniu zakresu działania strumienia rozpylonej cieczy a jej efekt był istotny dla wysokości opryskiwania 1,0 m, która w odróżnieniu od wysokości 0,54 m ma znacznie większe szanse praktycznego stosowania w uprawach polowych. Przy większej wysokości opryskiwania zaobserwowano większe wyrównanie prędkości strumienia powietrza mierzonej na poziomie wierzchołków roślin.

Merytoryczną część rozprawy doktorskiej Pani Magister Bogusławy Berner kończy rozdział **STWIERDZENIA I WNIOSKI**, w którym kandydatka precyzuje 13 wniosków szczegółowych. W ogólności potwierdzają one realizację zakładanych celów badawczych oraz prawdziwość postawionych hipotez. Co do wniosku (1), w którym jest mowa o „wpływie prędkości przemieszczania się drona nad roślinami” na nanoszenie cieczy w roślinach należy zamienić cytowane wyrażenie na „wpływ dawki cieczy”. Wnioski (6) i (8), w których jest mowa o równomierności naniesienia cieczy w roślinach należy odbierać z omówionym powyżej zastrzeżeniem, dotyczącym metodyki obliczania współczynników zmienności CV. Wniosek (9)



nie jest uprawniony z powodu braku dostatecznego dowodu na wpływ masy drona na naniesienie cieczy w roślinach.

**BIBLIOGRAFIA** obejmuje 111 pozycji literatury naukowej i 11 linków do stron internetowych. Wszystkie pozycje są cytowane w tekście rozprawy.

Po lekturze rozprawy doktorskiej Pani Magister Bogusławy Berner nasuwają się następujące pytania:

- 1) Jak należałoby zaplanować i przeprowadzić badania mające na celu określenie wpływu prędkości opryskiwacza na naniesienie cieczy na opryskiwanych obiektach.
- 2) Czym wytłumaczyć fakt, że zmienność naniesienia cieczy na roślinach rzepaku w większości kombinacji spadła (rys. 32), a w przypadku pszenicy niemal nie zmieniła się (rys. 40) wraz ze spadkiem dawki cieczy o 50% (dwukrotnym wzrostem prędkości przemieszczania się drona) jeśli w świetle licznych doniesień znaczne obniżenie dawki cieczy zwykle skutkuje wzrostem zmienności naniesienia.
- 3) W jakiej sytuacji współczynnik zmienności CV, obliczony dla wszystkich obserwacji badanego traktowania (np. metody opryskiwania upraw) powtórzonego n razy będzie się różnił od średniej wartości współczynnika CV z poszczególnych powtórzeń traktowania. Proszę podać przykład.
- 4) Czy z punktu widzenia przepisów prawa i ogólnych zasad bezpieczeństwa realne jest w Europie dopuszczenie opryskiwania niskich upraw rolniczych (np. zbóż, ziemniaków) przy użyciu drona lecącego na wysokości 0,5 -1,0 m nad uprawą.

Odpowiedzi na postawione pytania oczekuję podczas publicznej obrony pracy doktorskiej Pani Magister Bogusławy Berner.

## 5. Uwagi

Eksperymentalna część badań będących przedmiotem rozprawy doktorskiej Pani Magister Bogusławy Berner została przeprowadzona zgodnie z przyjętą w tego rodzaju pracach metodyką. Na uznanie zasługuje bardzo szeroki zakres przeprowadzonych doświadczeń, wymagających stworzenia stanowisk laboratoryjnych, przygotowania materiału roślinnego i wykorzystania specjalistycznej aparatury badawczej. Pozwoliło to na zebranie bardzo obszernej bazy prawidłowo pozyskanych danych, stanowiących o ich dużym potencjale naukowym. Zgłoszone wyżej uwagi metodyczne dotyczą sposobu opracowania i prezentacji tych danych, mogącego mieć wpływ na interpretację niektórych wyników. Korekty w tym zakresie pozwolą na pełne wykorzystanie potencjału danych w przyszłych publikacjach.

Wartościowe wyniki zasługują na właściwy przekaz z użyciem odpowiedniej terminologii, czytelnego stylu i ścisłości wypowiedzi. W tym względzie zwracam uwagę na wspomnianą już wyżej prawidłowość pojęć fizycznych i stosowanie przyjętej powszechnie nomenklatury. W przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej Pani Magister Bogusława Berner nie uniknęła niefortunnych stylistycznie, składniowo i rzeczowo sformułowań oraz powtórzeń i błędów fleksyjnych i interpunkcyjnych, wynikających zapewne z pośpiechu podyktowanego naglącymi terminami złożenia pracy. W tekście stosowano niejednolity separator dziesiętny (z użyciem kropki lub przecinka) oraz niejednolity sposób wyrażanie złożonych jednostek (z użyciem znaku „/” lub ujemnego wykładnika potęgi). Brak jest uściślających nazw łacińskich

opisywanych organizmów szkodliwych. Zwracam także uwagę na poprawność, zwięzłość i literalną spójność opisów tabel i rysunków z ich treścią. Sugeruję zastąpienie następujących opisów osi na wykresach:

„Naniesienie cieczy” zamiast „Ilość cieczy na próbnikach” (Rys. 28 i inne),

„Współczynnik zmienności” zamiast „Równomierność osadzania cieczy” (Rys. 31 i inne),

„Naniesienie cieczy” zamiast „Pojemność cieczy na próbnikach” (Rys. 48),

„Poziom umieszczenia próbników” zamiast „Wysokość poziomów próbników w roślinach” (Rys. 51),

„Indeks powierzchni liści,” zamiast „Wartość wskaźnika liściowego” (Rys. 51).

Sugeruję także stosowanie powszechnie przyjętych określeń w pracach dotyczących techniki ochrony upraw:

„naniesienie cieczy” zamiast „osadzanie cieczy”,

„objętość cieczy” zamiast „pojemność cieczy”,

„penetracja cieczy” zamiast „równomierność wgłębna osadzania cieczy”,

„łan roślin” zamiast „baldachim roślin”,

„znoszenie” zamiast „dryf”,

„bezzałogowy statek powietrzny” zamiast „bezzałogowy statek latający” lub „bezzałogowy pojazd powietrzny”,

„rozpylanie” zamiast „rozpraszanie”,

„rozpylacz rotacyjny” zamiast „rozpylacz odśrodkowy”,

„kalibrowanie spektrofotometru” zamiast „programowanie spektrofotometru”.

Powyższe uwagi mają charakter redakcyjny, nie umniejszający merytorycznej wartości pracy. Zgłaszam je z nadzieją, że będą wzięte pod uwagę w przyszłych opracowaniach wykorzystujących uzyskane wyniki.

## 6. Ocena końcowa

Recenzowana rozprawa doktorska Pani Magister Bogusławy Berner pt. „Osadzanie na roślinach cieczy rozpylanej z drona wielowirnikowca” podejmuje aktualne problemy dotyczące doskonalenia techniki ochrony roślin z użyciem dronów wielowirnikowych. Na podstawie literatury przedmiotu autorka wykazała się dobrym rozpoznaniem zagadnień związanych ze stosowaniem dronów w ochronie roślin, a następnie trafnie zdiagnozowała problem badawczy i poprawnie sformułowała cele badawcze oraz odpowiednio zaplanowała i zrealizowała doświadczenia z wykorzystaniem właściwie dobranych materiałów, metod i aparatury badawczej. W toku badań zrealizowała zakładane cele uzyskując wyniki, które w mojej opinii mają wartość poznawczą i znaczenie praktyczne. Na podstawie uzyskanych wyników autorka przeprowadziła poprawne wnioskowanie dowodząc swojego przygotowania do samodzielnej pracy naukowej.

To co wyróżnia badania kandydatki spośród licznych badań prowadzonych głównie w krajach pozaeuropejskich i może stanowić cenny wkład do bazy wiedzy to:

- zwrócenie uwagi na fakt, że zmienność masy drona w wyniku opróżniania zbiornika cieczy musi skutkować zmianą prędkości obrotowej wirników i tym samym parametrów wytwarzanego przez nie strumienia powietrza oddziałującego na strumień rozpylonej cieczy nanoszonej na rośliny,

- badanie efektów opryskiwania wybranych upraw z drona i opryskiwacza naziemnego przy zachowaniu dla obu technik dokładnie takich samych parametrów zabiegów w celu pozyskania miarodajnych wyników do porównań,
- wybór typowych dla strefy klimatu umiarkowanego upraw (rzepaku, pszenicy i ziemniaka), powszechnie występujących w krajach europejskich do pomiarów naniesienia cieczy,
- uwzględnienie morfologicznych cech roślin w wyjaśnieniu procesu nanoszenia cieczy użytkowej na uprawy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że praca Pani Magister Bogusławy Berner spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017, poz. 1789) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie o dopuszczenie Pani Magister Bogusławy Berner do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

*Grzegorz Doruchowski*

Skierniewice, 28 sierpnia 2023 roku

dr hab. in. Grzegorz Doruchowski, prof. IO-PIB