

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ



mgr inż. Sebastian Szymczyk

Rozprawa doktorska

**Opracowanie i badania mechatronicznego
rozpylacza opryskiwacza rolniczego o zmiennej
charakterystyce oprysku**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c.

Promotor pomocniczy: Dr inż. Jacek Wojciechowski

Poznań 2025

Oświadczenie o zgłoszeniu patentowym

W niniejszej rozprawie doktorskiej zaprezentowano materiały, rozwiązania i koncepcje zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej P.452018. Wszelkie prawa do przedstawionych wyników badań i innowacji pozostają zastrzeżone, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa patentowego.

Oświadczenie o źródle finansowania

Badania zrealizowane w rozprawie doktorskiej zostały przeprowadzone w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego realizowanego w latach 2021–2025 w ramach umowy nr DWD/5/0016/2021.

Podziękowania

Pragnę podziękować moim Promotorom za konsekwentne wsparcie, cenne uwagi oraz bogactwo wiedzy, które umożliwiły realizację założonych celów badawczych.

Pracę dedykuję żonie i córce...

Spis treści

STRESZCZENIE	7
SUMMARY	8
WYKAZ AKRONIMÓW, SYMBOLI i OZNACZEŃ	9
1 Wstęp	10
1.1 Wprowadzenie	10
1.2 Geneza pracy	12
1.3 Zakres pracy	14
2 Stan wiedzy i technologii	16
2.1 Czynniki determinujące innowacje w technologii oprysku rolniczego	16
2.2 Technologia opryskiwania w rolnictwie	19
2.3 Metody badań rozpylaczy i opryskiwaczy rolniczych	22
2.4 Automatyzacja i poprawa procesu oprysku	26
2.5 Systemy wizyjne wspomagające oprysk	32
3 Cel, zakres i teza pracy	38
3.1 Uzasadnienie podjęcia tematu oraz luka badawcza	38
3.2 Cel badawczy i wdrożeniowy	40
3.3 Teza badawcza	41
4 Projektowanie mechatronicznego rozpylacza	43
4.1 Koncepcja rozwiązania	43
4.2 Modele bryłowe rozpylacza oraz systemu poziomowania	47
4.3 Elektronika sterująca, elementy pomiarowe i wykonawcze w konstrukcji	52
4.4 Algorytmy sterujące i rozwiązania wizyjne	57
5 Wyniki i analiza badań	63
5.1 Badanie laboratoryjne - równomierność oprysku	63
5.2 Badanie polowe - skuteczność oprysku	75
5.3 Dyskusja wyników	91
6 Koszty i analiza rynku	94

6.1	Identyfikacja klientów i użytkowników technologii	94
6.2	Analiza konkurencyjności i wartości rynkowej	97
6.3	Analiza kosztów produkcji i technologiczności konstrukcji	100
6.4	Kryteria wyceny gotowego produktu	102
6.5	SWOT technologii	104
6.6	Możliwość wariantowości rozwiązania	107
7	Potencjał wdrożeniowy	110
7.1	Możliwości integracji rozwiązania z istniejącymi opryskiwaczami	110
7.2	Projekty układów pomiarowych do kalibracji i kontroli	112
7.3	Analiza zalet i wad rozwiązania	113
7.4	Możliwości adaptacji technologii poza rolnictwem	115
8	Podsumowanie i wnioski końcowe	116
8.1	Wnioski dotyczące tezy pracy	116
8.2	Wnioski poznawcze	116
8.3	Wnioski utylitarne	117
8.4	Wnioski dotyczące dalszej pracy	118
8.5	Wnioski wdrożeniowe	119
8.6	Podsumowanie	120
	Bibliografia	122
	Spis rysunków	138
	Spis tabel	142

STRESZCZENIE

Rolnictwo odgrywa kluczową rolę w zapewnianiu bezpieczeństwa żywnościowego, a równocześnie musi ograniczać stosowanie środków ochrony roślin ze względów środowiskowych i zdrowotnych. Regulacje wprowadzane przez Unię Europejską nakładają obowiązek redukcji użycia środków ochrony roślin, stanowi to istotne wyzwanie technologiczne i ekonomiczne dla rolników. Analiza stanu wiedzy wykazała brak rozwiązań opryskowych, które łączyłyby jednocześnie aktywne pozycjonowanie zespołu rozpylającego względem roślin lub chwastów, regulację charakterystyki strumienia poprzez automatyczną zmianę rozpylacza, zmianę kąta oprysku oraz punktową aplikację w międzyrzędziach wykonywaną w trakcie jednego przejazdu. Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie i zbadanie mechatronicznego zespołu rozpylającego o zmiennej charakterystyce oprysku, który wypełnia tę lukę, umożliwiając dostosowanie parametrów do warunków polowych, zwiększenie równomierności pokrycia roślin oraz redukcję zużycia środków ochrony roślin w porównaniu z metodami standardowymi. Problemem naukowym dysertacji jest relacja między postacią konstrukcyjną i funkcjonalnością mechatronicznego zespołu rozpylającego o zmiennej charakterystyce oprysku, a jego cechami użytkowymi. W ramach pracy doktorskiej zaprojektowano, skonstruowano i przebadano model badawczy ruchomego zespołu rozpylającego wyposażonego w układ sterowania oraz zintegrowany system wizyjny oparty na sztucznej inteligencji. Zespół rozpylający mógł być odchylany i obracany, co umożliwiało kształtowanie zasięgu oprysku oraz wykonywanie oprysku pasowego wzdłuż rzędów upraw, jak również punktowej aplikacji w międzyrzędziach. Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność proponowanego rozwiązania. W warunkach laboratoryjnych zwiększanie kąta nachylenia zespołu rozpylającego poszerzało pas oprysku i ograniczało miejscowe nadmierne dawki cieczy, natomiast jej skręcanie poprawiało symetrię i równomierność rozkładu. Modyfikacja geometrii strumienia pozwalała zatem aktywnie kształtować jednorodność oprysku. W testach polowych zmiana orientacji zespołu rozpylającego przełożyła się na bardziej równomierne pokrycie roślin niż w przypadku tradycyjnej belki ze stałymi rozpylaczami. Konwencjonalny opryskiwacz przy prędkości 0.5 m s^{-1} powodował duże zróżnicowanie pokrycia liści, różnice między najslabiej a najmocniej opryskanymi obszarami sięgały 35–45%. Z kolei mechatroniczny zespół rozpylający z rozpylaczem pochylony pod kątem około 40° zapewnił znacznie bardziej jednorodne naniesienie cieczy – zakres pokrycia był węższy, a różnice między wartościami minimalnymi i maksymalnymi wyraźnie mniejsze. Analiza ilościowa potwierdziła, że inteligentny zespół rozpylający umożliwia ograniczenie zużycia środka przy zachowaniu wysokiej jednorodności pokrycia.

SUMMARY

Agriculture plays a key role in ensuring food security while simultaneously having to limit the use of plant protection products for environmental and health reasons. Regulations introduced by the European Union impose an obligation to reduce the use of plant protection products, which poses a significant technological and economic challenge for farmers. The analysis of the state of the art revealed a lack of spraying solutions that would simultaneously combine active positioning of the spraying unit relative to crops or weeds, adjustment of the jet characteristics through automatic nozzle change, modification of the spray angle, and spot application in inter-row spaces carried out during a single pass. The aim of the doctoral dissertation was to develop and investigate a mechatronic spraying unit with variable spray characteristics that fills this gap by enabling parameter adaptation to field conditions, increasing the uniformity of plant coverage, and reducing the consumption of plant protection products compared to standard methods. The scientific problem of the dissertation concerns the relationship between the design and functionality of the mechatronic spraying unit with variable spray characteristics and its user-oriented performance features. As part of the doctoral work, a research prototype of a movable spraying unit equipped with a control system and an integrated artificial-intelligence-based vision system was designed, built, and tested. The spraying unit could be tilted and rotated, which made it possible to shape the spray reach and to perform band spraying along crop rows as well as spot application in the inter-rows. The conducted studies confirmed the effectiveness of the proposed solution. Under laboratory conditions, increasing the inclination angle of the spraying unit widened the spray band and limited local overdosing of liquid, whereas yawing it improved the symmetry and uniformity of the distribution. Modifying the jet geometry thus allowed active shaping of spray homogeneity. In field tests, changing the orientation of the spraying unit translated into more uniform plant coverage than in the case of a traditional boom with fixed nozzles. A conventional sprayer at a speed of 0.5 m s^{-1} caused large variability in leaf coverage, with differences between the least and most treated areas reaching 35–45%. By contrast, the mechatronic spraying unit with the nozzle inclined at about 40° ensured a much more uniform liquid deposition—the coverage range was narrower, and the differences between minimum and maximum values were markedly smaller. Quantitative analysis confirmed that the intelligent spraying unit makes it possible to reduce agent consumption while maintaining high coverage uniformity.

WYKAZ AKRONIMÓW, SYMBOLI i OZNACZEŃ

AI – sztuczna inteligencja; algorytmy użyte w systemach wizyjnych opryskiwacza.

ASC – Automatic Section Control; automatyczna kontrola sekcji belki.

CAD – Computer-Aided Design; trójwymiarowe modelowanie komponentów.

CAN – Controller Area Network; magistrala komunikacyjna w maszynach rolniczych

DRA – Drift Reducing Agent; środek ograniczający znoszenie cieczy.

GNSS – Global Navigation Satellite System; nawigacja satelitarna używana do prowadzenia maszyn/robota i wsparcia ASC/SC.

GPS – Global Positioning System; lokalizacja/naprowadzanie w systemach ASC/SC.

IMU – Inertial Measurement Unit; jednostka inercyjna do stabilizacji belki.

INC – Individual Nozzle Control; indywidualne sterowanie rozpylaczami.

IPM – Integrated Pest Management; integrowana ochrona roślin.

ISOBUS – standard komunikacji ciągnik–maszyna; m.in. funkcja Section Control.

LD – Laser Diffraction; laserowa dyfrakcja do pomiaru rozkładu kropli.

PDPA – Phase Doppler Particle Analyzer; analizator wielkości i prędkości kropli.

PID – Proportional–Integral–Derivative; regulator do aktywnej stabilizacji belki.

PROW – Program Rozwoju Obszarów Wiejskich.

PWM – Pulse Width Modulation; modulacja szerokości impulsu do sterowania wydatkiem.

RTK – Real-Time Kinematic; metoda poprawek GNSS do pozycjonowania centymetrowego.

SC – Section Control; automatyczne sterowanie sekcjami zgodne z ISOBUS.

VMD – Volume Median Diameter (DV50); objętościowa średnica mediany kropli.

VRA – Variable Rate Application; aplikacja o zmiennej dawce według map

WOM – wałek odbioru mocy.

WPR – Wspólna Polityka Rolna.

WSP – Water Sensitive Paper; papierki wodoczułe do oceny pokrycia.

1. Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego stanowi jeden z fundamentów stabilności każdego państwa. Kryzysy - począwszy od pandemii chorób zakaźnych (np. COVID-19), przez konflikty zbrojne, aż po wojny handlowe - uwiadcniają kluczową rolę rolnictwa w utrzymaniu ciągłości dostaw żywności. Wydajne i konkurencyjne rolnictwo pozwala nie tylko zaspokajać codzienne potrzeby żywnościowe społeczeństwa, lecz także przygotować kraj na sytuacje nadzwyczajne, w których stabilność łańcucha dostaw może zostać przerwana lub zagrożona [1].

Oprócz kwestii zapewnienia stabilnych dostaw żywności, rolnictwo musi także sprostać coraz wyższym wymaganiom jakościowym stawianym zarówno przez konsumentów, jak i instytucje rządowe odpowiedzialne za zdrowie publiczne. Przez żywność wysokiej jakości rozumie się przede wszystkim produkty rolne o możliwie niskim poziomie pozostałości nawozów syntetycznych i środków ochrony roślin. W trosce o zdrowie społeczeństwa i ochronie środowiska Unia Europejska w ramach Wspólnej Polityki Rolnej, Zielonego Ładu oraz strategii „od pola do stołu” wprowadziła szereg regulacji prawnych mających na celu ograniczyć stosowanie substancji chemicznych w rolnictwie i wspierać bardziej zrównoważone praktyki produkcyjne. Unia Europejska wprowadzając regulacje prawne zamierza zapewnić zarówno bezpieczeństwo żywnościowe mieszkańcom, jak i polepszyć standardy ochrony środowiska oraz dobrostanu zwierząt [2, 3].

Narzucone przez przepisy prawne wymogi oraz rosnące oczekiwania społeczne kształtują rynek, na którym producenci rolni starają się łączyć wysoką jakość oferowanych produktów z ich przystępną ceną. W krajach wysoko rozwiniętych trudność w realizacji tych wymagań potęgują problemy z dostępnością pracowników sezonowych oraz wysokie koszty pracy. W konsekwencji rolnicy często mają trudności w konkurencji cenowej z producentami z krajów o niższych kosztach robocizny i korzystniejszych warunkach środowiskowych, takich jak żyzniejsze gleby [4].

W odpowiedzi na napotkane wyzwania coraz powszechniejsze staje się sięganie po nowoczesne i zaawansowane technologie rolnicze, które nie tylko pozwalają zoptymalizować wydatki lecz także poprawiają jakość i bezpieczeństwo oferowanych produktów. Współczesne problemy sektora rolno-spożywczego, obejmujące zarówno wyższe wymagania konsumentów, jak i presję na redukcję kosztów przy zachowaniu wysokiej jakości żywności, skłaniają do wdrażania

rozwiązań rolnictwa precyzyjnego i tzw. Rolnictwa 4.0. Nowoczesne systemy monitorowania stanu upraw oraz zautomatyzowane narzędzia wspomagające racjonalne stosowanie środków ochrony roślin umożliwiają śledzenie warunków środowiskowych w czasie rzeczywistym, wykrywanie zagrożeń i optymalizację zabiegów agrotechnicznych [5].

Koncepcja Rolnictwo 4.0 (Rys. 1.1) opisuje proces transformacji sektora rolniczego poprzez integrację technologii cyfrowych, takich jak między innymi Internet Rzeczy, sztuczna inteligencja, robotyka oraz analiza big data. Koncepcja ta zakłada kompleksowe podejście do zarządzania gospodarstwem, oparte na integracji danych pochodzących z sensorów, dronów, satelitów oraz systemów zarządzania gospodarstwami rolniczymi, analizowanych w czasie rzeczywistym. Głównymi celami Rolnictwa 4.0 są zwiększenie wydajności, obniżenie kosztów produkcji rolnej, minimalizacja strat oraz ograniczenie negatywnego wpływu działalności rolniczej na środowisko naturalne [6, 7].



Rysunek 1.1: Główne technologie Rolnictwa 4.0 [8]

Zagadnienie rolnictwa precyzyjnego dotyczy nowoczesnego podejścia do zarządzania gospodarstwem rolnym, które opiera się na gromadzeniu i szczegółowej analizie danych pozyskiwanych bezpośrednio z pola uprawnego. Takie podejście wykorzystuje technologie cyfrowe, takie jak zdjęcia satelitarne, sensory czy drony, które umożliwiają dokładne monitorowanie stanu gleby oraz kondycji upraw. Dzięki zgromadzonym danym możliwe jest precyzyjne dostosowanie ilości nawozów, środków ochrony roślin, nawadniania oraz innych zabiegów agrotechnicznych do konkretnych potrzeb poszczególnych części pola. Indywidualne podejście do każdego fragmentu pola pozwala zwiększyć plony, obniżyć koszty produkcji, a także zminimalizować negatywny wpływ rolnictwa na środowisko naturalne [9, 10].

1.2 Geneza pracy

Środki chemiczne takie jak herbicydy, fungicydy i insektycydy, określane ogólnie jako pestycydy, odgrywają istotną rolę we współczesnej ochronie roślin w gospodarstwach rolnych. Ich prawidłowe stosowanie ogranicza straty w uprawach spowodowanych przez szkodniki, choroby oraz chwasty. Jednak pomimo korzyści ekonomicznych i agrotechnicznych, stosowanie pestycydów niesie ze sobą także negatywne konsekwencje środowiskowe, szczególnie dla gleby, będącej podstawowym elementem produkcji rolnej [11].

Gleba jest narażona na kontakt z substancjami chemicznymi zarówno w wyniku aplikacji doglebowej, jak i poprzez spływ kropel z powierzchni roślin. Według badań, większość aplikowanych pestycydów trafia nie do organizmów docelowych, ale właśnie do gleby i środowiska w przypadku oprysku całego pola. Szacuje się, że jedynie około 0,1% użytych środków ochrony roślin osiąga faktycznie zamierzone cele, natomiast pozostałe 99,9% zanieczyszcza środowisko glebowe. Szczególnie w przypadku herbicydów i insektycydów, aż 95–98% zastosowanych środków oddziałuje negatywnie na mikroorganizmy glebowe, zamiast na docelowe chwasty czy owady [12]. Niekontrolowana akumulacja pestycydów w glebie prowadzi do zaburzeń w bioróżnorodności życia glebowego oraz do degradacji pożytecznych mikroorganizmów [13]. Pestycydy stosowane na polach uprawnych przemieszczają się również poza miejsce aplikacji, zanieczyszczając ekosystemy wodne. Spływ powierzchniowy z pól oraz wsiąkanie w głąb profilu glebowego powodują przenikanie pestycydów do wód powierzchniowych i gruntowych [14, 15].

Na negatywne skutki stosowania pestycydów szczególnie narażone są również owady zapylające, takie jak pszczoły, które pełnią kluczową rolę w produkcji żywności poprzez zapylanie roślin. Wzrost intensywności produkcji rolniczej, w tym intensywne stosowanie chemicznych środków ochrony roślin, przyczynia się do spadku liczebności zapylaczy. Liczne

badania jednoznacznie wskazują na korelację między obecnością pestycydów a pogorszeniem kondycji zdrowotnej pszczół oraz obniżeniem ich przeżywalności [16].

Mimo negatywnych skutków stosowania pestycydów, całkowite ich wyeliminowanie rodzi poważne obawy dotyczące bezpieczeństwa żywnościowego. Współczesne rolnictwo polega na środkach ochrony roślin, które umożliwiają utrzymanie wysokich plonów. Szacuje się, że w przypadku całkowitego zaprzestania stosowania środków ochrony roślin globalne straty w produkcji mogłyby sięgać nawet 50-82% potencjalnych zbiorów [17]. Miałoby to katastrofalne skutki dla dostępności żywności i przyczyniłoby się do znaczącego spadku podaży, doprowadzając do gwałtownego wzrostu cen i zwiększenia niepewności związanej z zaopatrzeniem w żywność. Ponadto brak chemicznej ochrony upraw istotnie zwiększa ryzyko rozprzestrzeniania się epidemii chorób roślin oraz inwazji szkodników, które w korzystnych warunkach mogą całkowicie zniszczyć plony na danym obszarze [18]. W obliczu tych wyzwań realistyczna strategia ochrony roślin powinna koncentrować się nie na całkowitym wyeliminowaniu pestycydów, lecz na ograniczeniu ich stosowania do niezbędnego minimum oraz stopniowym zastępowaniu najbardziej szkodliwych substancji bezpieczniejszymi alternatywami [19].

Kompromisem pomiędzy względami ekonomicznymi i bezpieczeństwem żywnościowym a ochroną środowiska może być rolnictwo zrównoważone, które zakłada holistyczne podejście do produkcji rolnej. Rolnictwo zrównoważone kładzie między innymi nacisk na racjonalne wykorzystanie chemicznych środków ochrony roślin zgodnie ze strategią Integrated Pest Management (IPM). IPM polega na integracji różnych metod zwalczania agrofagów, umożliwiając utrzymanie ich populacji poniżej poziomu powodującego ekonomicznie istotne szkody przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnego wpływu na ekosystem [19, 20]. Dynamiczny rozwój nowoczesnych technologii, takich jak systemy automatyki, mechatronika czy sztuczna inteligencja, stwarza realne możliwości wdrażania inteligentnych rozwiązań w opryskiwaczach rolniczych. Technologie te wspierają zrównoważone podejście do ochrony roślin, umożliwiając precyzyjne i selektywne dawkowanie środków chemicznych zgodnie z rzeczywistymi potrzebami upraw [21, 22].

Bezpośrednim impulsem do podjęcia tematu niniejszej rozprawy doktorskiej była obserwacja nieefektywności tradycyjnych metod oprysku, opartych zazwyczaj na oprysku całopowierzchniowym. Prowadzi to do nadmiernego zużycia środków chemicznych, co przekłada się na straty ekonomiczne oraz negatywne skutki środowiskowe – zarówno w obrębie upraw, jak i w przestrzeni międzyrzędowej. Podejście, oparte na oprysku całopowierzchniowym, prowadzi do istotnych strat ekonomicznych wynikających z nadmiernego zużycia środków ochrony roślin, które nie przekłada się bezpośrednio na poprawę skuteczności zabiegu ochronnego.

W odpowiedzi na zidentyfikowane wyzwania i problemy, w ramach pracy doktorskiej, zaproponowano opracowanie, wykonanie i zbadanie modelu badawczego mechatronicznego zespołu rozpylającego, który byłby w stanie dostosować swoje parametry oprysku do warunków polowych i faz wzrostu roślin. Zaprojektowane rozwiązanie wpisuje się w rosnący trend wdrażania koncepcji Rolnictwo 4.0, której celem jest szersze wykorzystanie nowoczesnych czujników, algorytmów sztucznej inteligencji oraz zaawansowanych metod sterowania w celu podniesienia dokładności, wydajności i bezpieczeństwa zabiegów [6, 7]. W konsekwencji, proponowana konstrukcja powinna przyczynić się do istotnej redukcji dawek środków chemicznych stosowanych w polu, a także zapewnić wysoki stopień elastyczności w adaptacji do odmiennych warunków upraw.

1.3 Zakres pracy

Zakres niniejszej pracy doktorskiej obejmuje opracowanie, budowę oraz badania mechatronicznego rolniczego zespołu rozpylającego o zmiennej charakterystyce oprysku, przeznaczonego do realizacji precyzyjnych zabiegów chemicznej ochrony roślin w uprawach rzędowych, szczególnie szerokokorzystowych. Realizacja tematu rozprawy doktorskiej ma na celu zaprojektowanie nowoczesnej konstrukcji zespołu rozpylającego, zdolnej do współpracy z systemami wizyjnymi, co umożliwi precyzyjne dostosowanie parametrów oprysku do warunków polowych oraz aktualnego stanu roślin. Kluczowym aspektem pracy jest integracja elementów mechanicznych, elektronicznych oraz informatycznych, tworząc jeden funkcjonalny system mechatroniczny, zapewniający efektywne i oszczędne dawkowanie środków ochrony roślin.

Aspekty naukowe pracy obejmują przede wszystkim opracowanie metody umożliwiającej dostosowanie charakterystyki oprysku do rodzaju uprawy, fazy rozwoju rośliny oraz panujących na polu warunków pogodowych. W szczególności praca koncentruje się na integracji projektowanej konstrukcji z algorytmami sztucznej inteligencji i systemami wizyjnymi, które pozwolą na dokładne rozpoznawanie roślin uprawnych, chwastów, chorób czy insektów. Opracowane rozwiązania były oceniane pod kątem równomierności pokrycia powierzchni opryskiwanych roślin oraz efektywności wykorzystania środków ochrony roślin.

Aspekty wdrożeniowe obejmują opracowanie konstrukcji możliwej do komercjalizacji i adaptacji przez producentów maszyn rolniczych. Rozwiązanie, oparte na modułowej konstrukcji, umożliwi jego łatwe wdrożenie do istniejących systemów opryskowych w postaci pojedynczego modułu. Analiza techniczno-ekonomiczna przedstawi informacje o potencjalnych korzyściach finansowych wynikających z ograniczenia zużycia środków ochrony roślin, wody oraz paliwa czy energii. Dodatkowo przeprowadzono procedurę zgłoszenia patentowego, mającą na

celu ochronę praw własności intelektualnej opracowanego rozwiązania. Zgłoszenie patentowe oznaczono numerem: P.452018.

Realizacja pracy przebiegała etapowo. W pierwszej fazie przeprowadzono szczegółową analizę literatury oraz przegląd obecnie dostępnych rozwiązań na rynku maszyn rolniczych, w celu ustalenia aktualnego stanu wiedzy i określenia potrzeb technologicznych w zakresie oprysku rolniczego. Szczególną uwagę zwrócono na systemy wizyjne oraz algorytmy sztucznej inteligencji, które są wykorzystywane aktualnie w nowoczesnych opryskiwaczach. Wyniki analizy literaturowej posłużyły do sformułowania tezy badawczej oraz opracowania koncepcji konstrukcyjnej mechatronicznego zespołu rozpylającego.

Kolejnym etapem było trójwymiarowe modelowanie komponentów z wykorzystaniem oprogramowania CAD 3D. Równolegle prowadzono proces projektowania dedykowanych układów elektronicznych w postaci autorskich płytek PCB, służących do zarządzania elementami wykonawczymi oraz akwizycji sygnałów z czujników. Następnie wykonano fizyczną konstrukcję, podłączono wymagane elementy wykonawcze, zbudowano układ cieczeniowy oraz zainstalowano autorskie płytki PCB i czujniki. W kolejnych krokach opracowano oprogramowanie wewnętrzne dla sterowników na płytkach PCB oraz wykonano integrację systemów wizyjnych ze sterownikami układów wykonawczych.

W dalszym etapie przeprowadzono badania polowe, mające na celu ocenę skuteczności działania urządzenia w warunkach rzeczywistych. Badania obejmowały testy na uprawie szerokokorzeniowej, gdzie oceniano zdolność systemu do precyzyjnego pozycjonowania zespołu rozpylającego oraz jakość pokrycia opryskiwanych roślin. Wyniki badań porównano z tradycyjnymi metodami oprysku, pozwoliło to na dokładne określenie przewagi technologicznej opracowanego rozwiązania.

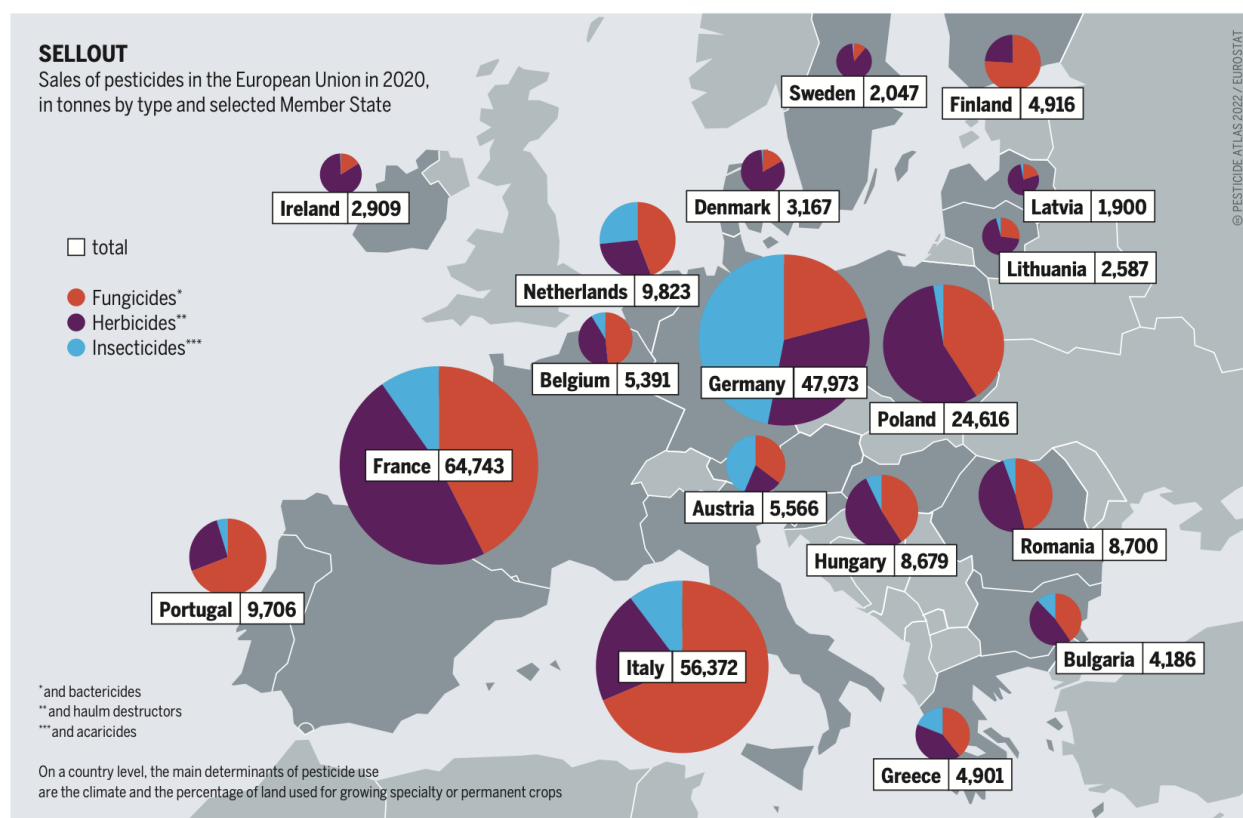
W końcowej fazie przeprowadzono analizy wdrożeniowe, obejmujące ocenę technologiczności zaprojektowanego systemu, analizę SWOT systemu, szacunkowe koszty produkcji jednostkowej w różnych wariantach oraz możliwości adaptacji modułów do istniejących maszyn rolniczych różnych producentów. Dodatkowo opracowano założenia procedury kalibracyjnej oraz zaproponowano koncepcję maszyn do kontroli jakości w przypadku produkcji seryjnej.

W podsumowaniu pracy zaprezentowano szczegółowe wnioski wynikające z przeprowadzonych badań, które weryfikują postawioną tezę. Całość przeprowadzonych badań pozwoliła na sformułowanie rekomendacji dotyczących dalszego rozwoju technologicznego opracowanego mechatronicznego zespołu rozpylającego i możliwości jego wykorzystania w przyszłych aplikacjach rolnictwa precyzyjnego.

2. Stan wiedzy i technologii

2.1 Czynniki determinujące innowacje w technologii oprysku rolniczego

Stosowanie środków ochrony roślin na polach uprawnych stało się powszechną praktyką. Według danych zawartych w publikacji „Pesticide Atlas 2022” wynika, że każdego roku w Europie stosuje się ponad 468 tysięcy ton preparatów ochrony roślin. Przekłada się to na około 2 kilogramy tych środków na każdy hektar gruntów rolnych. Najwyższe wolumeny sprzedaży odnotowano we Francji (ponad 64 tysiące ton w 2020 roku) oraz we Włoszech (ponad 56 tysięcy ton). Polska z kolei sprzedała przeszło 24 tysiące ton (Rys. 2.1). Największy udział w rynku środków ochrony roślin, wynoszący około 50%, przypada na herbicydy [23].



Rysunek 2.1: Przykładowe zużycie środków ochrony roślin na polach rolniczych w różnych krajach Europy [23]

Innowacje w technologii oprysku rolniczego mają kluczowe znaczenie dla poprawy efektywności i zrównoważenia ochrony roślin. Nowoczesne systemy oprysku umożliwiają precyzyjne aplikowanie środków ochrony roślin, przy mniejszym zużyciu i wpływie na środowisko. Wpro-

wadzenie nowych technologii bywa jednak uwarunkowane wieloma czynnikami od postępu technicznego, przez regulacje prawne i wymagania środowiskowe, po czynniki ekonomiczne i społeczne [24, 25].

Czynniki społeczne, takie jak oczekiwania i nastawienie rolników wobec nowych technologii oraz poziom wiedzy rolników, odgrywają kluczową rolę w rozpowszechnianiu innowacji dotyczących technologii oprysku rolniczego. Nawet najbardziej zaawansowana technologia nie wpłynie istotnie na praktykę rolniczą, jeśli rolnicy nie będą przekonani o korzyściach lub nie będą potrafili skutecznie wykorzystać tej technologii [26]. Badania ankietowe przeprowadzone na grupie 333 niemieckich rolników, dotyczące wdrażania oprysku punktowego wykorzystującego sztuczną inteligencję, pokazują, że decyzja o zastosowaniu innowacyjnych metod oprysku zależy przede wszystkim od postaw rolników, poczucia kontroli, presji otoczenia oraz norm społecznych panujących w środowisku. Wyniki badań ankietowych wskazują, że kluczowe znaczenie dla zwiększenia zainteresowania innowacjami ma organizowanie pokazów polowych oraz dni otwartych, które sprzyjają wymianie wiedzy między rolnikami, a także zapewnienie wsparcia finansowego, wzmacniającego rolnikom poczucie kontroli nad nową technologią [27].

Aspekty ekonomiczne są ważnym czynnikiem determinującym tempo i skalę wdrażania nowych technologii oprysku. Wysokie koszty zakupu i wdrożenia nowoczesnych systemów często hamują ich upowszechnienie, zwłaszcza wśród mniejszych gospodarstw rolniczych. Raport GAO ukazuje na przykładzie USA, że choć technologie precyzyjnego rolnictwa dostępne są od lat 90., do roku 2023 korzystało z nich tylko około 27% gospodarstw. Głównymi powodami były złożoność rozwiązań oraz wysokie koszty początkowe, które dla części rolników stanowią barierę wejścia [28]. Nowoczesne opryskiwacze z czujnikami, systemami zmiennego dawkowania czy systemami wizyjnymi to wydatek znaczący dla większości rolników. Dodatkowo, niepewność co do zwrotu z inwestycji - czyli tego, czy oszczędności na środkach ochrony roślin oraz zwiększone plony zrównoważą koszt zakupu zaawansowanego technologicznie opryskiwacza w relatywnie krótkim czasie sprawia, że wielu rolników waha się przed podjęciem decyzji zakupowej. Z drugiej strony czynniki ekonomiczne mogą też napędzać innowacje, jeśli nowa technologia udowodni swoją opłacalność [29].

Czynniki polityczne, takie jak regulacje prawne i instrumenty państwowego lub europejskiego wsparcia finansowego, odgrywają kluczową rolę w stymulowaniu innowacji w rolnictwie. Dotacje oraz programy dofinansowujące zakup sprzętu rolniczego, w tym opryskiwaczy rolniczych pozwalają rolnikom szybciej wdrażać nowe technologie, zmniejszając ich obciążenie kosztami. Na szczeblu Unii Europejskiej szczególne znaczenie ma Wspólna Polityka Rolna (WPR), w ramach której rolnicy mogą korzystać z różnego rodzaju subsydiów i grantów. Program zachęca do inwestowania w precyzyjne technologie, ułatwiając przejście na bardziej

efektywne i ekologiczne praktyki [30, 31]. W wielu krajach UE dopłaty z Programów Rozwoju Obszarów Wiejskich (PROW) obejmują dofinansowanie zakupu opryskiwaczy rolniczych wyposażonych w najnowocześniejsze rozwiązania, ograniczające zużycie oraz znoszenie środków ochrony roślin. Dzięki temu modernizację mogą przeprowadzić nawet mniejsze gospodarstwa [32].

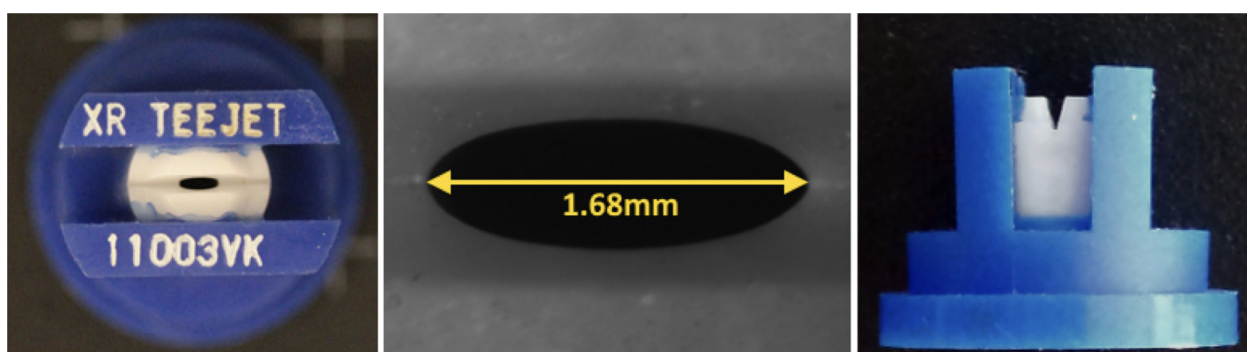
Wpływ czynników środowiskowych na decyzje rolników dotyczące stosowania środków ochrony roślin jest istotny, jednak, jak wskazują badania przeprowadzone wśród rolników z regionu Wielkopolski, większe znaczenie mają aspekty ekonomiczne i polityczne. Należy jednak zaznaczyć wzrost świadomości ekologicznej, szczególnie wśród właścicieli dużych gospodarstw rolnych oraz osób posiadających wyższe wykształcenie [33]. Tradycyjne metody opryskiwania, polegające na aplikacji środków chemicznych na całej powierzchni uprawianego pola, skutkują nadmiernym zużyciem środków ochrony roślin. Takie podejście prowadzi do degradacji gleby, zanieczyszczenia wód gruntowych oraz wzrostu odporności organizmów szkodliwych [34]. Odpowiedzią na przedstawione wyzwania są inteligentne technologie opryskiwania, które umożliwiają selektywne, precyzyjne dozowanie środków ochrony roślin. Najnowocześniejsze systemy, wyposażone w zaawansowane czujniki oraz sterowniki z zaimplementowanymi algorytmami, pozwalają na rozróżnienie rośliny uprawnej od chwastów i ich selektywny oprysk. Redukują tym samym zużycie chemikaliów, minimalizują negatywny wpływ na środowisko naturalne oraz przyczyniają się do obniżenia kosztów eksploatacyjnych [35].

Innowacje w technologiach oprysku wynikają między innymi z intensywnych badań naukowych oraz bliskiej współpracy pomiędzy ośrodkami badawczo-rozwojowymi a firmami produkującymi maszyny rolnicze. Badania naukowe dostarczają fundamentów teoretycznych oraz opracowują pierwsze prototypy nowych rozwiązań, natomiast partnerstwo z przemysłem umożliwia skuteczne wdrożenie i upowszechnienie na rynku maszyn rolniczych. Kolaboracja nauki z przemysłem jest kluczowa, aby przyspieszyć transfer technologii z laboratoriów badawczych bezpośrednio na pola uprawne. Przykładami mogą być projekt ONE SMART SPRAY, realizowany we współpracy firm Bosch i BASF [36], czy partnerstwo John Deere z Uniwersytetem Southern Queensland, które koncentruje się na rozwoju systemów wizyjnych do oprysku punktowego [37]. Ważną rolę odgrywają również badania terenowe i programy pilotażowe, w których naukowcy współpracują bezpośrednio z rolnikami. Testowanie prototypowych rozwiązań w rzeczywistych warunkach gospodarowania pozwala na wczesne wykrycie ewentualnych problemów technicznych, a także na ich optymalizację jeszcze przed wprowadzeniem produktu na rynek [38].

2.2 Technologia opryskiwania w rolnictwie

Prawidłowe stosowanie środków ochrony roślin na uprawach opiera się na precyzyjnym rozbijaniu ciągłej strugi cieczy na krople, które podczas oprysku osiadają na powierzchni roślin. Wielkość kropli ma kluczowe znaczenie praktyczne, mniejsze zapewniają lepsze pokrycie, ale jednocześnie są bardziej narażone na znoszenie przez wiatr zwane dryftem. Odpowiedni dobór rozpylacza o danym rozmiarze kropli odgrywa decydującą rolę dla skuteczności zabiegu. Parametry oprysku należy dostosować do rodzaju zabiegu, specyfiki uprawy oraz panujących warunków atmosferycznych. Poniżej przedstawiono kolejne etapy powstawania kropeł w najpopularniejszych rozpylaczach szczelinowych [39].

W rozpylaczach szczelinowych ciecz pod wysokim ciśnieniem jest wypychana przez wąski, precyzyjnie ukształtowany otwór. Geometria i wymiary szczeliny rozpylacza (Rys. 2.2) są ściśle dostosowane do wymaganego kąta oprysku oraz pożądanej wielkości kropeł, nadając wypływającemu strumieniowi charakterystyczny trójkątny kształt. Po opuszczeniu rozpylacza ciecz tworzy cienką błonę zwaną filmem lub arkuszem, która początkowo pozostaje ciągła i stabilna na krótkim odcinku. Niemal natychmiast jednak, pod wpływem sił aerodynamicznych i wewnętrznych niestabilności, powierzchnia błony ulega zaburzeniom, pojawiają się fale i zakłócenia. W ich następstwie arkusz cieczy zaczyna się rozpadać, powstają w nim szczeliny i wąskie pasma cieczy, tzw. ligamenty, które w dalszym etapie dzielą się na pojedyncze krople. Ostatecznie, w pewnej odległości od rozpylacza, pierwotna ciągła struga przechodzi w rozproszoną chmurę kropeł o zróżnicowanej średnicy. Proces ten nazywa się atomizacją [40–42].



Rysunek 2.2: Rozpylacz firmy TeeJet - widok z góry, w powiększeniu otworu wylotowego oraz widok z boku [43]

Proces powstawania kropeł w rozpylaczu rolniczym zależy od parametrów pracy opryskiwacza oraz właściwości cieczy. Wyższe ciśnienie zasilania w opryskiwaczu powoduje zwiększenie prędkości wypływu cieczy, prowadzi to do wzrostu sił inercyjnych i aerodynamicznych. W praktyce podniesienie ciśnienia skutkuje intensywniejszym rozpadem strugi i zmniejsze-

niem średniego rozmiaru kropli [44, 45]. Średnica oraz kształt szczeliny wylotowej rozpylacza wpływają na grubość arkusza cieczy i początkową wielkość formującej się strugi. Mniejszy otwór przy tym samym ciśnieniu powoduje powstawanie cieńszej strugi i zwykle drobniejszych kropeł, natomiast większy otwór prowadzi do tworzenia kropeł grubych [46].

Napięcie powierzchniowe jako właściwość cieczy, ma wpływ na proces rozpylania. Im wyższe napięcie powierzchniowe, tym trudniej następuje rozpad strugi cieczy na krople. Obniżenie napięcia powierzchniowego ułatwia przezwyciężenie sił spójności pomiędzy cząsteczkami powodując powstanie drobniejszych kropeł [43]. Kolejną właściwością cieczy, mającą wpływ na powstawanie kropli, jest lepkość cieczy. Wraz ze wzrostem lepkości cieczy, przy tym samym ciśnieniu, powstające krople stają się grubsze. Bardziej lepkie medium formują grubsze i mniej podatne na rozrywanie strugi, które rozpraszają się w sposób łagodniejszy. Gęstość oddziałuje przede wszystkim na siły bezwładności, cięższa ciecz przy tej samej prędkości wypływu posiada większą energię kinetyczną. W praktyce jednak większość roztworów wodnych cechuje się gęstością zbliżoną do 1 g cm^{-3} , dlatego jej zmiany mają mniejsze znaczenie niż zmiany napięcia powierzchniowego czy lepkości [47].

Dobór odpowiedniego typu rozpylacza ma kluczowe znaczenie dla skutecznej aplikacji środków ochrony roślin oraz ograniczenia znoszenia cieczy roboczej. Producenci oferują wiele rodzajów rozpylaczy, różniących się m.in. kształtem strumienia czy technologiami ograniczającymi znoszenie [48]. Ważne jest, aby stosowane rozpylacze spełniały wymagania obowiązujących norm krajowych i europejskich dotyczących sprzętu rolniczego. Jedną z najważniejszych i powszechnie stosowanych norm jest Międzynarodowa Norma ISO 10625:2018, wdrożona w Polsce jako PN-EN ISO 10625. Norma wprowadza ujednolicony system identyfikacji rozpylaczy opryskiwaczy oparty na kolorach i kodach numerycznych. Norma przypisuje określonym rozmiarom i wydatkom rozpylaczy, przy ciśnieniu referencyjnym 3 bar, konkretne barwy, umożliwiając łatwą identyfikację niezależnie od producenta. Norma wymaga również trwałego oznaczenia typu i rozmiaru na każdego rozpylacza [49, 50].

Istotną regulacją odnośnie rozpylaczy rolniczych jest norma ISO 25358:2018, która porządkuje klasyfikację spektrum kropeł generowanych przez rozpylacze. Dokument wyróżnia siedem kategorii wielkości od bardzo drobnokroplistej do bardzo grubokroplistej. Norma przypisuje każdej z kategorii przedziały objętościowej średnicy mediany kropli VMD. Norma szczegółowo opisuje metodykę pomiaru rozkładu wielkości kropli oraz kryteria przyporządkowania wyników do właściwych kategorii. Ujednolicona klasyfikacja kroplistości pozwala użytkownikom opryskiwaczy dobrać rozpylacze dające wymaganą wielkość kropeł [51, 52].

Najprostszym typem korpusu rozpylacza jest pojedyncza oprawa, przystosowana do montażu tylko jednej końcówki rozpylającej. Rozpylacze montuje się bezpośrednio w korpusie, a jej

wymiana wymaga ręcznego odkręcenia i zastąpienia innym typem. Rozwiązanie to jest proste, lecz mało elastyczne, szczególnie w sytuacjach wymagających szybkiej zmiany parametrów oprysku. Rozszerzeniem są podwójne oprawy (Rys. 2.3), umożliwiające zamontowanie dwóch rozpylaczy na jednym stanowisku belki. Najczęściej są one ustawione pod różnymi kątami – na przykład jedna do przodu, a druga do tyłu pod kątem około 30°. Oba rozpylacze pracują jednocześnie, wytwarzając dwa strumienie cieczy, pozwala to na lepsze pokrycie roślin oraz głębszą penetrację łąnu [53].



Rysunek 2.3: Korpus rozpylacza z dwoma rozpylaczami skierowanymi do przodu i do tyłu w stosunku do kierunku ruchu opryskiwacza [53]

Większą elastyczność zapewniają wielopozycyjne głowice, zwane głowicami wielorozpylaczowymi. Pozwalają one na montaż kilku rozpylaczy jednocześnie, standardowo 3 lub 4. Mechanizm działania opiera się na ręcznym obracaniu głowicy tzw. karuzeli, tak aby wybrany rozpylacz znalazł się w pozycji roboczej. Głowica blokuje się w odpowiednich położeniach, zapewniając szczelność układu i właściwe ukierunkowanie strumienia cieczy. Dzięki temu możliwa jest szybka zmiana typu rozpylacza w zależności od warunków polowych czy rodzaju zabiegu, bez konieczności demontażu końcówek, wystarczy obrócić głowicę [53].

Najnowocześniejszym rozwiązaniem są wielopozycyjne głowice z automatycznym, zdalnym przełączaniem rozpylaczy. W takich systemach głowice wyposażone są w mechanizmy elektryczne lub pneumatyczne, które pozwalają na zmianę rozpylacza bez udziału operatora przy belce. Przykładowo firma Amazone opracowała system AmaSelect z głowicą 4-pozycyjną,

w których wybór rozpylacza odbywa się elektrycznie z poziomu terminala. Możliwy jest także tryb automatyczny – komputer samodzielnie przełącza rozpylacze w zależności od parametrów pracy. Przykładowo, jeśli jedno ustawienie wychodzi poza optymalny zakres ciśnienia, system może automatycznie przełączyć się na inną końcówkę lub dołączyć dodatkową, aby zachować pożądaną rozmiar kropli [54, 55]. Podobne możliwości oferuje system ExactApply firmy John Deere, wyposażony w 6-pozycyjną głowicę i funkcję AutoSelect A/B, umożliwiającą automatyczne przełączanie między dwoma rozmiarami rozpylaczy. Dzięki temu system utrzymuje stałe ciśnienie i jednakowy rozmiar kropli nawet przy zmiennych prędkościach jazdy [56].

Najczęściej stosowaną metodą chemicznej ochrony roślin w gospodarstwach polowych są opryskiwacze belkowe zawieszane na trzypunktowym układzie zawieszenia ciągnika lub w formie opryskiwaczy ciągnionych [57]. W większych gospodarstwach rośnie popularność opryskiwaczy samojezdnych, charakteryzujących się dużym prześwitem (1,0–1,2 m) oraz pojemnością zbiorników od 3000 do 8000 litrów [58]. Typowy opryskiwacz składa się z ramy nośnej, na której zamontowany jest zbiornik roboczy z układem mieszania cieczy oraz systemem wielostopniowej filtracji. Ciecz tłoczona jest przez pompę napędzaną z wałka odbioru mocy (WOM) ciągnika, a następnie trafia do układu regulacji ciśnienia i sterowania sekcjami. Rozprowadzana jest dalej do składanej belki polowej o szerokości od 12 do 36 metrów, na której w równych odstępach (25–50 cm) rozmieszczone są zespoły rozpylające [50, 57]. W przypadku opryskiwaczy samojezdnych dodatkowo instalowany jest silnik spalinowy oraz kabina operatora [58].

2.3 Metody badań rozpylaczy i opryskiwaczy rolniczych

Stan techniczny opryskiwaczy polowych ma kluczowe znaczenie dla skutecznego przeprowadzenia zabiegu ochrony roślin i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko [59, 60]. W całej Unii Europejskiej wprowadzono obowiązkowe okresowe badania opryskiwaczy polowych mające potwierdzić ich sprawność techniczną oraz poprawność działania. Zgodnie z Dyrektywą 2009/128/WE w sprawie zrównoważonego stosowania pestycydów, państwa członkowskie zobowiązane są do regularnej inspekcji technicznej opryskiwaczy używanych w rolnictwie [61]. Spełnienie tych wymagań jest w Polsce weryfikowane przez upoważnione stacje kontroli opryskiwaczy, a użytkowanie sprzętu niesprawnego technicznie lub niepoddanego badaniom podlega karom administracyjnym [59, 60].

Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 13 grudnia 2013 r., ogłoszone

w tekście jednolitym (Dz.U. z 2021 r. poz. 775), ustala zasady organizacyjne i techniczne prowadzenia badań oraz precyzuje ich metodykę, z uwzględnieniem sposobu dokumentowania i znakowania sprzętu, który spełnił wymagania techniczne. Przed rozpoczęciem badania opryskiwacz należy dokładnie umyć wewnątrz i na zewnątrz oraz napełnić zbiornik do połowy czystą wodą. Pierwszy etap obejmuje oględziny maszyny w celu wykrycia ewentualnych braków, uszkodzeń lub nieszczelności. Szczególną uwagę zwraca się na stan obudów i osłon elementów wirujących, zaczepów i mocowań, kondycję zbiornika oraz szczelność przewodów i połączeń. W dalszej kolejności sprawdza się pracę pompy przy normalnym obciążeniu, jej wydajność, działanie układu tłumienia pulsacji cieczy użytkowej oraz poprawne funkcjonowanie zaworów bezpieczeństwa.

Kolejnym krokiem jest weryfikacja poprawności wskazań elementu pomiarowego, takiego jak manometr, na specjalnie przygotowanym stanowisku kontrolnym. Następnie ocenia się równomierność rozkładu cieczy, a także działanie filtrów i rozpylaczy. Szczególną rolę odgrywa tu badanie rozpylaczy, które powinny zapewniać możliwie jednolitą ilość cieczy na jednostkę powierzchni. W tym celu konieczne jest zachowanie właściwego ciśnienia oraz odpowiedniej wydajności każdego rozpylacza, jak również prawidłowej wysokości belki opryskowej nad uprawą.

Weryfikację rozkładu cieczy przeprowadza się zgodnie z metodami określonymi w rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Obejmują one:

- Pomiar nierównomierności poprzecznego rozkładu cieczy przy nominalnym ciśnieniu roboczym, z użyciem ręcznego stołu rowkowego, przy dopuszczalnym błędzie pomiaru do 2%.
- Pomiar współczynnika nierównomierności poprzecznego rozkładu cieczy przy nominalnym ciśnieniu roboczym, z wykorzystaniem elektronicznego stołu rowkowego; przy natężeniu przepływu 300 mL min^{-1} dopuszczalny błąd pomiaru nie przekracza 4%.
- Jednoczesny pomiar natężenia wypływu cieczy z rozpylaczy zamontowanych na sekcji belki polowej opryskiwacza (lub po ich demontażu), przy użyciu urządzenia do pomiaru natężenia wypływu, dopuszczalny błąd pomiaru nie powinien przekraczać 2,5%.

Po zakończeniu wszystkich badań sporządza się protokół zawierający dane właściciela, opis wykonanych czynności kontrolnych, wykaz stwierdzonych usterek lub potwierdzenie właściwego stanu technicznego, a także określa się termin następnego przeglądu. W przypadku uzyskania pozytywnego wyniku opryskiwacz otrzymuje znak kontrolny umieszczany w widocznym miejscu na zbiorniku [60, 62].

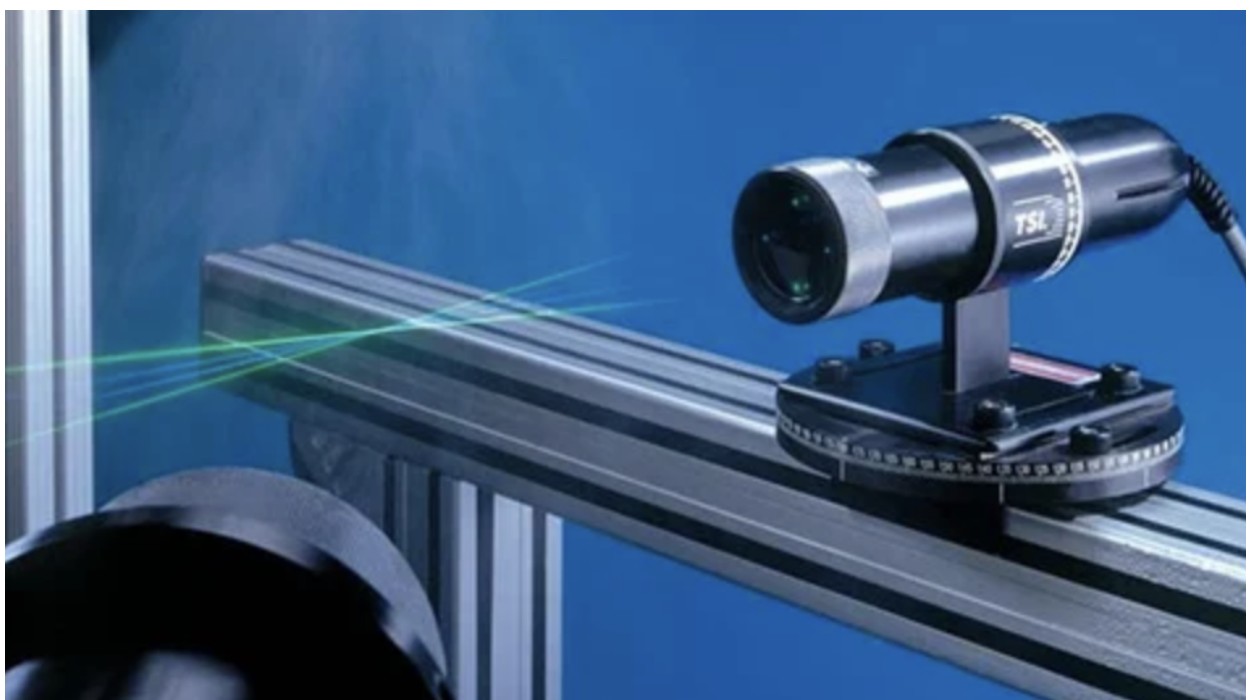
Oprócz standardowej oceny stanu technicznego opryskiwaczy rolniczych, prowadzone są badania naukowo-rozwojowe, które mają na celu szczegółową charakterystykę pracy rozpylaczy rolniczych w celu optymalizacji parametrów działania. Weryfikacja efektywności rozpylaczy opryskowych prowadzona jest zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych, z wykorzystaniem zestandaryzowanych metod pomiarowych. Badania tego typu pozwalają na ocenę jakości zabiegu ochrony roślin, redukcji znoszenia cieczy roboczej, poziomu zużycia czy wpływu oprysków na środowisko.

Każdy rozpylacz stosowany w opryskiwaczu polowym opisany jest szeregiem parametrów, z których część zakodowana jest na jej froncie w postaci literowo-cyfrowych oznaczeń. Do najważniejszych z nich należą: poziom wielkości generowanych kropli, przepustowość wyrażanej w litrach na minutę, kąt rozpylania, typ konstrukcyjny (np. eżektorowa, szczelinowa, wirowa), zalecane ciśnienie robocze oraz materiał wykonania, który wpływa na trwałość i czas użytkowania. Szczególnie istotnym parametrem w kontekście skuteczności i precyzji aplikacji jest rozkład wielkości kropli. Parametry takie jak DV10, DV50 znany również jako VMD (ang. Volume Median Diameter) oraz DV90 opisują objętościowy rozkład średnic kropli: DV10 oznacza, że 10% objętości cieczy tworzą krople mniejsze niż ta wartość, DV50 – że połowa cieczy jest rozpylona w postaci kropli mniejszych, a połowa większych, natomiast DV90 określa granicę, poniżej której znajduje się 90% objętości kropli [63].

W zależności od celu badania oraz dostępnego zaplecza aparaturowego, stosuje się różnorodne metody pomiarowe, które można podzielić na dwie główne kategorie: inwazyjne oraz bezinwazyjne. Metody inwazyjne to techniki charakteryzujące się prostotą i niskimi kosztami, choć ich dokładność pozostaje ograniczona. Przykładem może być papier wodoczuły, który zmienia barwę w kontakcie z cieczą, umożliwiając ocenę pokrycia, głębokość penetracji oraz orientacyjną analizę wielkości kropli. Inną metodą jest technika zanurzeniowa, w której ciecz osadzona na powierzchni jest zbierana i analizowana optycznie lub wagowo. Rozwiązania inwazyjne są łatwe w implementacji i popularne w praktyce polowej, ich precyzja bywa niewystarczająca dla zaawansowanych analiz [52].

Z kolei metody bezinwazyjne oferują znacznie wyższy poziom dokładności i szczegółowości pomiarów, dzięki czemu są szeroko wykorzystywane w badaniach naukowych. Technika laserowej dyfrakcji (LD, ang. Laser Diffraction), uznawana za standard przemysłowy, pozwala na precyzyjny pomiar rozkładu wielkości kropli poprzez analizę kąta dyfrakcji światła lasera przechodzącego przez strumień cieczy. Kolejną zaawansowaną metodą jest analizator cząstek fazy Dopplera (PDPA, ang. Phase Doppler Particle Analyzer) (Rys. 2.4), który umożliwia równoczesny pomiar wielkości i prędkości kropli w locie, dodając informacji na temat dynamiki rozpylania [52, 64].

Dodatkowo, coraz powszechniej stosuje się techniki oparte na szybkiej rejestracji obrazu, takie jak High-Speed Imaging, umożliwiające analizę kształtu, deformacji, rozpadu i trajektorii kropli w czasie rzeczywistym. Metody Shadowgraphy i Backlighting, oparte na zastosowaniu kontrastowego tła i odpowiedniego oświetlenia, pozwalają na rejestrację sylwetek kropli i ich analizę morfologiczną. Metody High-Speed Imaging, Shadowgraphy i Backlighting oferują bardzo wysoką rozdzielczość i umożliwiają szczegółowe badania fizyki rozpylania, lecz wdrożenie wiąże się z dużymi kosztami sprzętowymi, koniecznością kalibracji oraz wymaganiami warunków środowiskowych w trakcie pomiarów [52].



Rysunek 2.4: Analizator cząstek fazy Dopplera PDPA [65]

Rozpylacze opryskiwaczy rolniczych mogą być oceniane pod kątem ilościowej jednorodności rozkładu cieczy, którą emitują. Zgodnie z normą EN-ISO 16119-2:2015, kluczowym wskaźnikiem jakości oprysku jest współczynnik zmienności rozkładu poprzecznego (CV, ang. coefficient of variation) który nie powinien przekraczać 10%. Do precyzyjnego pomiaru stosuje się stoły rowkowe, umożliwiające zebranie cieczy w równoległych rowkach (zwykle o szerokości 50mm) (Rys. 2.5). Dzięki temu możliwe jest dokładne obliczenie wartości CV oraz pomiar natężenia wypływu zarówno z pojedynczych rozpylaczy, jak i z całych sekcji belki opryskiwacza [66, 67].

Rozpylacze opryskiwaczy rolniczych można również testować w tunelu aerodynamicznym, umożliwia to dokładny pomiar udziału cieczy znoszonej przy określonej prędkości wiatru. Tego typu testy wyróżniają się wysoką powtarzalnością i rozdzielczością, przewyższając pod tym

względem badania terenowe. Dzięki kontrolowanym warunkom w tunelu aerodynamicznym łatwiej porównać względne różnice między rozpylaczami, pozbawiając je wpływu czynników pogodowych. Najczęściej pomiary w tunelu przeprowadza się zgodnie z normami ISO 22856 i ISO 22866 [68].



Rysunek 2.5: Stół rowkowy do pomiaru jednorodności rozkładu cieczy [69]

2.4 Automatyzacja i poprawa procesu oprysku

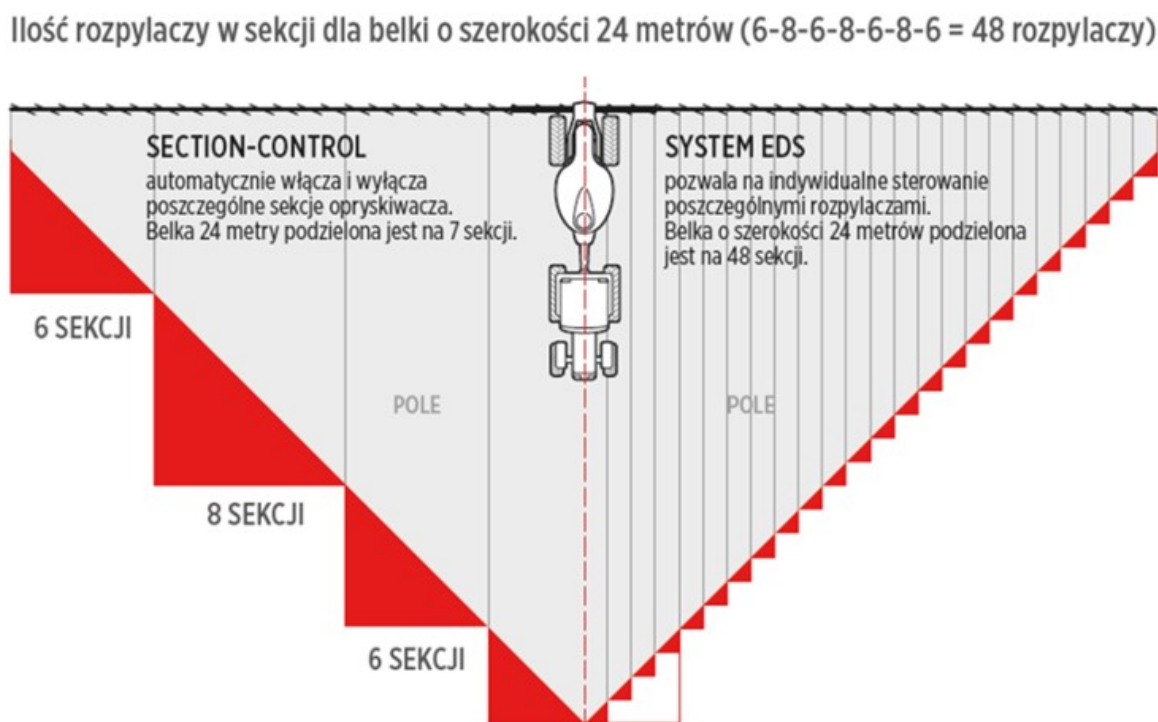
Rewolucję w automatyzacji oprysków rolniczych zapoczątkowało zastosowanie systemów sterowania opartych na technologii GPS w połączeniu z automatyczną kontrolą sekcji (ASC, ang. Automatic Section Control) [70]. System ASC dzieli belkę opryskiwacza na równe odcinki, z których każdy zawiera kilka rozpylaczy, tworząc sekcję. Sterowanie odbywa się poprzez kontrolę zaworów sekcyjnych. W momencie, gdy belka opryskiwacza wyjeżdża poza zdefiniowane granice pola, następuje automatyczne wyłączenie odpowiednich sekcji. W przypadku wyjazdu pod kątem do pola sekcje są wyłączane pojedynczo. Rozszerzeniem tej technologii jest monitorowanie obszaru wewnątrz wyznaczonego pola i dezaktywacja poszczególnych sekcji w momencie, gdy znajdują się nad wcześniej opryskanym terenem [71, 72].

Główną korzyścią stosowania ASC jest eliminacja podwójnej aplikacji środków ochrony roślin na już opryskane fragmenty pola [73]. Badania wykazały, że zastosowanie kontroli sekcji znacząco zmniejsza powierzchnię objętą nadmiernym opryskiem. Testy przeprowadzone przed

i po wyposażeniu opryskiwacza w system ASC wykazały, że średni naddatek opryskanego areału spadł z 12,4% do 6,2%, co przełożyło się na redukcję strat o 50% [71, 72]. Precyzja zależy od liczby i szerokości sekcji, im mniejsza liczba rozpylaczy i węższe sekcje, tym dokładniejsze pokrycie i mniejsze straty. Dodatkowym wyzwaniem są opóźnienia w reakcji układu, podczas włączania lub wyłączania sekcji może wystąpić chwilowe wahanie ciśnienia i przepływu. W efekcie przy opuszczaniu strefy oprysku dochodziło do nadmiernej aplikacji, a przy ponownym wejściu, do jej niedostatecznego poziomu [74].

Rozwinięciem koncepcji automatycznej kontroli sekcji jest indywidualne sterowanie rozpylaczami (INC, ang. Individual Nozzle Control). W tym przypadku każdy rozpylacz zamontowany na opryskiwaczu stanowi osobną sekcję, co oznacza, że liczba sekcji odpowiada liczbie zamontowanych rozpylaczy. Takie podejście pozwala na precyzyjniejsze pokrycie opryskiwanego obszaru, szczególnie w przypadku pól o nieregularnym kształcie, takich jak trójkątne fragmenty działek. Dzięki INC możliwe jest indywidualne wyłączanie rozpylaczy w momencie opuszczania granic pola lub selektywne wyłączenie skrajnych rozpylaczy w przypadku nakładania się oprysku [75].

Korzyści wynikające z redukcji zużycia środków ochrony roślin rosną wraz ze stopniem nieregularności pola. Badania wykazały, że zastosowanie trzech sekcji rozpylaczy pozwoliło na oszczędności na poziomie 8%, natomiast zwiększenie liczby sekcji do 30 przyniosło oszczędności rzędu 15,2%–17,5% na badanym polu (Rys. 2.6) [71].



Rysunek 2.6: Różnica stopnia nadmiernego pokrycia między ASC a INC w przypadku wyjazdu z pola o trójkątnym kształcie [76]

Kolejnym krokiem w redukcji zużycia środków ochrony roślin jest technika dynamicznego i automatycznego zmiennego dawkowania, która dostosowuje ilość aplikowanej cieczy do prędkości opryskiwacza oraz przypadku stosowania map aplikacyjnych jego aktualnego położenia na polu. Wyróżnia się kilka metod regulacji dawki, z których najczęściej stosowane to sterowanie dawką za pomocą zmiany ciśnienia (RC, ang. Rate Controller) oraz sterowanie przepływem poprzez modulację szerokości impulsu (PWM, ang. Pulse Width Modulation) [77]. Istnieją również mniej popularne rozwiązania, takie jak VariTarget, które bazują na zmianie geometrii rozpylacza [78].

Regulacja dawki poprzez zmianę ciśnienia polega na dostosowywaniu ciśnienia cieczy w układzie w zależności od prędkości opryskiwacza. Wzrost prędkości powoduje zwiększenie ciśnienia, a tym samym wydatek cieczy, natomiast spadek prędkości skutkuje obniżeniem ciśnienia i zmniejszeniem dawki. Jest to rozwiązanie proste i stosunkowo łatwe w implementacji, jednak jego wadą jest wpływ zmiany ciśnienia na wielkość kropli. Przy wyższym ciśnieniu krople stają się drobniejsze, co zwiększa ryzyko ich znoszenia przez wiatr, natomiast przy niższym ciśnieniu krople mogą być zbyt duże, co negatywnie wpływa na równomierność pokrycia roślin [44].

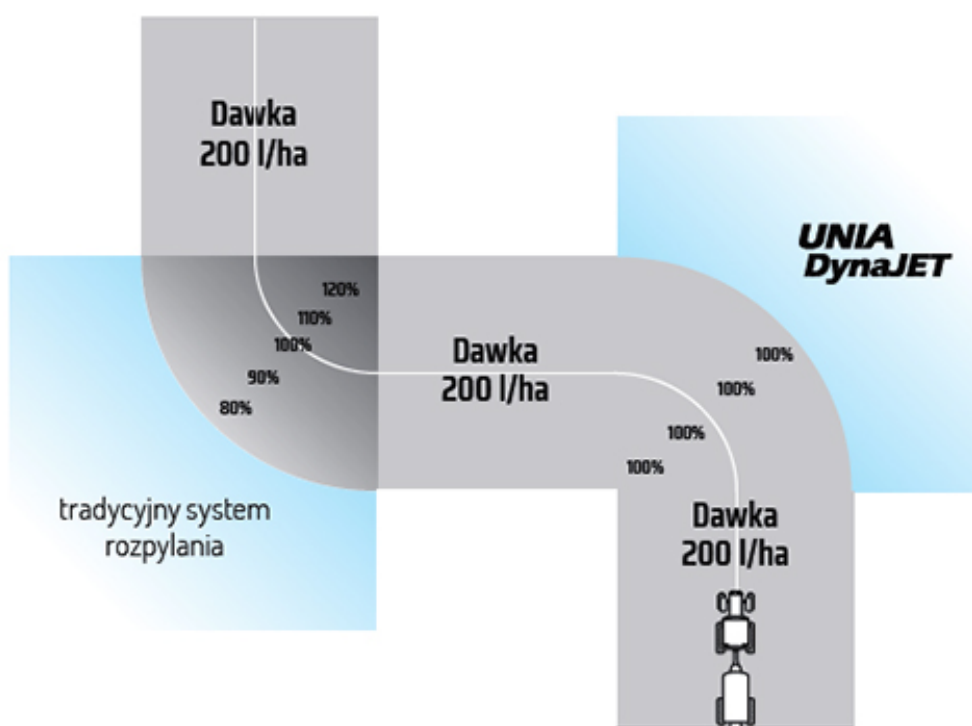
Rozwinięciem systemu RC, eliminującym jego główne niedoskonałości, są systemy PWM, które pozwalają na precyzyjne sterowanie ilością cieczy bez konieczności zmiany ciśnienia. Każdy rozpylacz wyposażony jest w elektromagnetyczny zawór sterowany impulsowo, który otwiera i zamyka przepływ cieczy z zadaną częstotliwością. Regulacja dawki odbywa się poprzez zmianę współczynnika wypełnienia impulsu (ang. duty cycle), czyli czasu otwarcia zaworu w stosunku do całego cyklu pracy. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne utrzymanie zadanej dawki przy jednoczesnym zachowaniu stałego ciśnienia oprysku, eliminując problem zmiany wielkości kropli w przypadku RC [79, 80]. Badania wykazują, że sterowanie dawką za pomocą PWM jest znacznie bardziej efektywne niż tradycyjne systemy RC, szczególnie w zakresie stabilności dawkowania oraz szybkości reakcji na zmiany prędkości opryskiwacza [77].

System PWM umożliwia indywidualne sterowanie każdym rozpylaczem z osobna, zwiększając precyzję aplikacji środków ochrony roślin. Rozwiązanie jest szczególnie istotne podczas wykonywania zakrętów, gdzie sekcje zewnętrzne poruszają się szybciej niż sekcje wewnętrzne, co w tradycyjnych systemach prowadzi do nierównomiernego dawkowania. Dzięki zastosowaniu rozpylaczy PWM możliwa jest kompensacja tej różnicy – rozpylacze na zewnętrznych sekcjach mogą zwiększyć wydatek poprzez zwiększenie współczynnika wypełnienia impulsów, natomiast rozpylacze bliżej środka mogą zmniejszyć wydatek, powodując równomierne pokrycie opryskiwanego obszaru (Rys. 2.7) [75].

Alternatywnym podejściem do regulacji dawki jest zastosowanie systemu takiego jak np. VariTarget, który zamiast zmiany ciśnienia lub sterowania impulsowego, dostosowuje parametry oprysku poprzez dynamiczną zmianę geometrii rozpylacza. Zastosowana technologia pozwala na modyfikację kąta rozpylania lub średnicy otworu wylotowego w zależności od warunków polowych i prędkości opryskiwacza, umożliwiając lepszą kontrolę nad wielkością kropli i redukcję strat wynikających ze znoszenia cieczy [78].

Kompensacja dawki na zakrętach

Kompensacja umożliwia wyrównanie zadanej dawki na zakrętach lub łukowatych polach



Rysunek 2.7: Kompensacja dawki na zakrętach przy wykorzystaniu rozpylaczy PWM [76]

W procesie automatyzacji opryskiwaczy rolniczych istotnym krokiem było wprowadzenie standaryzacji komunikacji między ciągnikami a opryskiwaczami. Celem tego działania było wyeliminowanie dublujących się systemów, takich jak np. moduły GPS, oraz redukcja liczby dodatkowych urządzeń montowanych wewnątrz kabiny ciągnika. Technologia ISOBUS (ISO 11783) standaryzuje protokół komunikacyjny, zapewniając kompatybilność i łączność między wyświetlaczami, ciągnikami i maszynami rolniczymi różnych producentów, co umożliwia integrację systemów i ułatwia zarządzanie procesem oprysku.

Jedną z kluczowych funkcji ISOBUS jest Section Control (SC), która automatycznie steruje sekcjami opryskiwacza, eliminując nakładanie się oprysku oraz ograniczając straty

środków ochrony roślin. System ten nie tylko wyłącza oprysk po przekroczeniu granic pola, ale także pozwala na selektywne dezaktywowanie poszczególnych sekcji, co jest szczególnie przydatne w przypadku nieregularnych kształtów pól, takich jak tzw. „kliny” na obrzeżach działek.

Kolejnym istotnym rozszerzeniem funkcjonalności ISOBUS jest Task Controller (TC), który umożliwia zmienne dawkowanie środków ochrony roślin na podstawie map aplikacyjnych współpracujących z systemami nawigacji rolniczej [81, 82]. Dane wykorzystywane do opracowania map mogą pochodzić z różnych źródeł, takich jak zdjęcia satelitarne, analizy rejestracji wideo wykonanych za pomocą dronów czy wyniki badań gleby. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne określenie przestrzennego zróżnicowania zapotrzebowania na środki ochrony roślin lub nawozy. W praktyce oznacza to, że każda sekcja opryskiwacza może pracować z indywidualnie dostosowaną dawką, odpowiadającą rzeczywistym potrzebom roślin na danym fragmencie pola [83, 84].

Istotnym wyzwaniem w oprysku pól rolniczych jest znoszenie cieczy roboczej przez wiatr (dryf), powodując zmniejszenia skuteczności zabiegów oraz zanieczyszczenia sąsiednich upraw i środowiska [85]. Możliwa jest redukcja stopnia znoszenia stosując odpowiednie środki redukujące znoszenie (DRA ang. Drift Reducing Agent), jak wykazano w badaniach możliwa jest redukcja przy użyciu DRA znoszenia nawet o 50% przy wietrze 4 m s^{-1} [86]. Istnieje również szereg rozwiązań technologicznych zwiększających poziom redukcji efektu zanoszenia.

Najprostszą i skuteczną metodą ograniczania znoszenia oprysku jest zastosowanie rozpylaczy eżektorowych. Ich konstrukcja pozwala przez niewielki boczny otwór, zasysanie powietrza i mieszanie się z cieczą. Prowadzi to do powstawania większych kropeł zawierających pęcherzyki powietrza. Większe krople mają większą prędkość opadania przez co są mniej podatne na znoszenie przez wiatr, redukując straty środków ochrony roślin [46, 87]. W jednym z badań stwierdzono, że rozpylacze eżektorowe mogą zmniejszyć ilość drobnych kropeł podatnych na znoszenie o 80% w porównaniu z tradycyjnymi rozpylaczami. Dodatkowo, badania wykazały, że pomimo większego rozmiaru kropli, rozpylacze eżektorowe nie obniżają skuteczności biologicznej aplikowanych herbicydów [88]. Stosowanie rozpylaczy eżektorowych można dodatkowo uzupełnić o dobre praktyki, takie jak zmniejszenie prędkości jazdy opryskiwacza czy obniżenie wysokości belki opryskowej. Dzięki temu możliwe jest jeszcze skuteczniejsze ograniczenie znoszenia cieczy roboczej [89–91].

Wiatr atmosferyczny stanowi wyzwanie podczas wykonywania zabiegów opryskowych. Dodatkowo, w trakcie ruchu opryskiwacza występuje wiatr wymuszony, który negatywnie wpływa na równomierne nanoszenie środka ochrony roślin na rośliny. Jednym ze sposobów ograniczenia tego niepożądanego efektu jest zastosowanie specjalnie wyprofilowanej osłony,

montowanej wzdłuż całej belki opryskowej przed rozpylaczami. Dodatkowo rozpylacze montowane są na elastycznych mocowaniach umożliwia obniżenie belki na taką wysokość, że osłona wraz z rozpylaczami przylegały do górnej części łanu, lekko się pod nią uginając. Dzięki precyzyjnemu kształtowi osłony oraz sposobowi jej ugięcia, wiatr jest kierowany w dół łanu, co sprzyja lepszej penetracji środka ochrony roślin w strukturę uprawy. Według producenta firmy Wingssprayer (Rys. 2.8) rozwiązanie to skutecznie ogranicza znoszenie – nawet przy prędkościach wiatru do 20 km h^{-1} redukując je o ponad 90% [92].

W trudniejszych warunkach polowych, szczególnie przy silnym wietrze atmosferycznym, można zastosować osłony w formie kurtyn powietrznych, które tworzą barierę ograniczającą dryf cieczy roboczej poza wyznaczony obszar oprysku [93, 94]. W rozwiązaniu scentralizowanym, jeden wysokowydajny wentylator tłoczy powietrze do elastycznego rękawa umieszczonego wzdłuż belki opryskowej. Powietrze wypływa przez otwory w dolnej części rękawa, zgodnie z kierunkiem oprysku, stabilizując krople i ogranicza ich znoszenie. Przykładem takiego systemu jest Alpha firmy Hardi, w którym dwie boczne dmuchawy generują przepływ do $2000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ przy prędkości około 35 m s^{-1} , umożliwiając bezpieczne wykonywanie zabiegów nawet przy silniejszym wietrze [94].



Rysunek 2.8: Rozwiązanie Wingssprayer zamontowane na belce opryskiwacza rolniczego [92]

Kołysanie belki opryskowej jest kolejnym wyzwaniem podczas zabiegów opryskowych, wywołane nierównościami podłoża. Pomiar na opryskiwaczu samojezdnym firmy John Deere o szerokości belki opryskowej 27 m wykazał, że na trasie z garbem w wysokości 20 cm i 20 cm zagłębieniem, wysokość końcówek belki wahała się od 3,5 m do 0,4 m, a współczynnik zmienności pokrycia (CV) sięgał 55% [95]. Kołysanie belki dodatkowo jak wykazują badania prowadzi do lokalnego przedawkowania cieczy nawet o 36 % [96]. Wahania belki polowej można

ograniczyć za pomocą układu pasywnego, czyli zawieszenia mechanicznego niewymagające zewnętrznego zasilania. Najpopularniejsza konstrukcja wahadłowa lub trapezowa, w którym środek ciężkości belki samoczynnie dąży do położenia równowagi, a wbudowane sprężyny, tłumiki lub/i amortyzatory tłumią oscylacje [93, 97].

Najwyższą precyzję stabilizacji zapewniają obecnie aktywne systemy zawieszenia belki, w których elektryczne lub hydrauliczne siłowniki, sterowane w czasie rzeczywistym za pomocą klasycznego regulatora PID lub algorytmów logiki rozmytej, korygują wychylenie belki względem nierównego podłoża. Odległość belki od podłoża jest na bieżąco monitorowana przez czujniki ultradźwiękowe lub radarowe zamontowane na jej końcach oraz jednostki inercyjnej IMU (ang. Inertial Measurement Unit) [95, 98, 99].

Badania dynamiczne 27-metrowej belki opryskiwacza polowego wykazały, że jej stabilność ma kluczowe znaczenie dla równomierności nanoszenia cieczy roboczej. W warunkach terenowych, na torze z garbem i zagłębieniem o wysokości/dołku 20 cm, dochodziło do gwałtownych przyspieszeń pionowych końców belki rzędu $\pm 21,4$ g, przy czym wartości średnie przekraczały ± 6 g nawet na gładkim odcinku. W tych warunkach maksymalna wysokość końców belki nad celem sięgała aż 3,5 m, a minimalna spadała do 0,34 m, co prowadziło do znacznej nierównomierności oprysku. Dla rozpylaczy generujących drobniejsze krople (ER4, $Dv_{0,5} = 255 \mu m$), współczynnik zmienności pokrycia (CV) osiągał do 55%, natomiast dla rozpylaczy generujących większe krople (UPLD3, $Dv_{0,5} = 588 \mu m$) spadał do 39%. W warunkach kontrolowanych, z wykorzystaniem aktywnego systemu stabilizacji belki gdy końce belki utrzymywano na wysokości 1,01–1,50 m nad roślinnością, CV obniżał się istotnie o kilkanaście punktów procentowych, szczególnie w przypadku drobnych kropel [95].

Przedstawione rozwiązania technologiczne wyraźnie pokazują, że automatyzacja procesu oprysku nie tylko zwiększa jego precyzję i skuteczność, ale także przyczynia się do zmniejszenia zużycia środków ochrony roślin oraz ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko. W dalszych częściach pracy omówione zostaną systemy wizyjne, które – zintegrowane z zaawansowaną automatyką – stanowią fundament inteligentnych, selektywnych metod aplikacji, wpisujących się w założenia rolnictwa precyzyjnego.

2.5 Systemy wizyjne wspomagające oprysk

Jednym z kluczowych obszarów, w których dokonuje się dynamiczny postęp technologiczny, jest precyzyjne stosowanie środków ochrony roślin z wykorzystaniem zaawansowanych systemów montowanych bezpośrednio na opryskiwaczach rolniczych. Nowoczesne opryskiwacze wyposażane są w czujniki optyczne lub kamery z zaawansowanymi algorytmami AI,

które w czasie rzeczywistym identyfikują obecność chwastów czy objawy chorób na liściach roślin, umożliwiając oprysk punktowy, czyli dozowanie środka ochrony wyłącznie w miejscach, w których jest wymagany [100].

Systemy wizyjne typu "Green-on-Brown" (GoB) służą do identyfikacji chwastów, które zwykle mają zielony kolor i występują na tle nieporośniętej gleby w odcieniach brązu lub resztek poźniwnych w odcieniach żółci. Technologia jest szczególnie przydatna w okresach między uprawami, gdy pole jest ugorowane lub przygotowywane do siewu. Dzięki zastosowaniu czujników lub kamer wykrywających różnice kolorystyczne pomiędzy roślinnością a glebą, pozwala na aplikację herbicydu wyłącznie w miejscach, gdzie występują chwasty [101, 102].

Systemy wizyjne typu „Green-on-Green” (GoG) to zaawansowane technologie umożliwiające rozróżnianie chwastów i roślin uprawnych w ramach rolnictwa precyzyjnego. W przeciwieństwie do technologii typu GoB, które wykrywają dowolną zieleń na tle gleby, systemy GoG potrafią rozróżniać chwasty rosnące wśród roślin uprawnych. Działanie GoG opiera się na analizie subtelnych różnic wizualnych, takich jak odcień koloru, tekstura liści czy faza rozwojowa, mimo że chwasty i uprawy często wyglądają bardzo podobnie. Tak wysoki poziom precyzji możliwy jest dzięki wykorzystaniu sieci głębokiego uczenia (ang. Deep Learning, DL), trenowanych na dużych i zróżnicowanych zbiorach zdjęć z pól uprawnych. Badania i przeglądy literatury potwierdzają, że techniki DL umożliwiają stabilną i skuteczną detekcję w czasie rzeczywistym, nawet w przypadku minimalnych różnic morfologicznych między roślinami [103, 104].

Przykładem systemu wizyjnego opartego na technologii GoB jest produkt holenderskiej firmy WEED-IT o nazwie WEED-IT Quadro (Rys. 2.9). Urządzenie stanowi nowoczesny sensor przeznaczony do wykrywania zielonej roślinności. Sensory rozmieszczone są wzdłuż belki opryskiwacza i każdy sensor odpowiada za detekcję 1 m szerokości pola oraz obsługę 5 zespołów rozpylających PWM. Dzięki temu opryskiwacz może natychmiastowo aktywować odpowiednie rozpylacze w momencie wykrycia chwastów [105].

WEED-IT Quadro wykorzystuje zaawansowaną technologię GoB, umożliwiającą precyzyjne wykrywanie wszystkich zielonych roślin zawierających chlorofil, przy jednoczesnym ignorowaniu elementów takich jak odkryta gleba, resztki poźniwne czy usychające części roślin. Dzięki temu system koncentruje się wyłącznie na eliminacji chwastów, minimalizując wpływ na pożądaną roślinność. Co istotne, WEED-IT Quadro działa skutecznie zarówno w dzień, jak i w nocy. Wbudowane niebieskie diody LED zapewniają optymalne warunki detekcji, gwarantując wysoką precyzję działania niezależnie od panującego oświetlenia.

Sensor WEED-IT Quadro oferuje trzy tryby pracy, zaprojektowane z myślą o maksymalizacji skuteczności i elastyczności działania systemu:

- W pierwszym trybie wszystkie rozpylacze pozostają wyłączone, a oprysk uruchamiany jest wyłącznie w momencie wykrycia chwastów przez którykolwiek z sensorów. Pozwala to na znaczące ograniczenie zużycia środków chemicznych, koncentrując aplikację wyłącznie na niepożądaną roślinność.
- W drugim trybie wszystkie rozpylacze pracują z minimalną intensywnością, a w przypadku detekcji chwastów system automatycznie zwiększa dawkę w odpowiednich sekcjach belki. Dzięki temu zapewnione jest precyzyjne dozowanie substancji aktywnej tam, gdzie jest ona najbardziej potrzebna.
- Trzeci tryb odpowiada tradycyjnemu trybowi opryskiwania – wszystkie rozpylacze działają w sposób ciągły, z pełnym wykorzystaniem technologii PWM i zgodnością ze standardem ISOBUS, co pozwala na pełną integrację z nowoczesnymi systemami rolnictwa precyzyjnego.



Rysunek 2.9: Rozwiązanie WEED-IT zamontowane na belce opryskiwacza[106]

Zastosowanie systemu WEED-IT Quadro umożliwia precyzyjne zwalczanie niepożądaną roślinności, jednocześnie znacząco ograniczając zużycie środków chemicznych i minimalizując negatywny wpływ na środowisko. Warto jednak podkreślić, że skuteczność działania systemu

jest najwyższa w warunkach braku roślin uprawnych, obumarłych resztek roślinnych lub po zakończeniu zbiorów [105–107].

Kolejnym komercyjnym przykładem jest rozwiązanie Ecorobotix ARA. Urządzenie to montowane jest na ciągniku i stanowi sześciometrowy opryskiwacz punktowy nowej generacji, którego konstrukcja opiera się na trzech modułach roboczych o szerokości 2 metrów każdy. Każdy moduł wyposażony jest w dwie kamery RGB z własnym oświetleniem LED, odizolowane obudową od światła dziennego, umożliwiając systemowi wizyjnemu analizę obrazu w niezmiennych warunkach o każdej porze dnia. Obrazy z kamer przetwarzane są przez komputer Nvidia Jetson, który w czasie rzeczywistym klasyfikuje pojedyncze rośliny (GoG). Po identyfikacji chwastu algorytm otwiera odpowiedni z 52 elektrozaworów, rozmieszczonych co 40 mm, a ciecz aplikowana jest przez rozpylacz o kącie 25° . Przy prędkości 7 km h^{-1} system jest w stanie obsłużyć niemal 4 ha h^{-1} . Dzięki zastosowanej technologii UHP™ (Ultra-High Precision) możliwe jest ograniczenie zużycia środków ochrony roślin oraz nawozów nawet o 95% w porównaniu z opryskiem powierzchniowym, przy jednoczesnym zminimalizowaniu znoszenia cieczy dzięki osłoniętej belce spryskującej [108–110].

Walidacja polowa przeprowadzona na trzech łąkach wykazała, że sieci neuronowe zastosowane w systemie Ecorobotix ARA prawidłowo rozpoznawały i opryskiwały ponad 85–90% przypadków występowania szczawiu. Średnia powierzchnia liści pokryta środkiem ochrony roślin wyniosła 89%, a obszar poza liściem był o 39% mniejszy niż w przypadku oprysku ręcznego za pomocą opryskiwacza plecakowego. Skutkowało to redukcją dawki herbicydu o 87% przy zagęszczeniu 10 000 roślin na hektar. W warunkach szwajcarskich wartości te przekładają się na oszczędność rzędu 112 € ha^{-1} [109].

Kolejną technologią selektywnego oprysku jest system Greeneye (Rys. 2.10), wykorzystujący wizyjny system typu "green-on-green". Belka opryskiwacza wyposażona jest w 24 kamery RGB rejestrujące obraz z częstotliwością 40 klatek na sekundę. Kamery te współpracują z algorytmami głębokiego uczenia, które w czasie rzeczywistym – przy prędkości jazdy do 24 km h^{-1} – rozpoznają różnice morfologiczne między rośliną uprawną a chwastem o średnicy większej niż 0,635 cm. Urządzenie posiada 144 rozpylacze, z których każda otwiera się w ciągu milisekund wyłącznie nad zidentyfikowanym chwastem. Dodatkowy, niezależny obieg cieczy umożliwia jednoczesną aplikację środka dogłębowego w systemie "broadcast" oraz środka nalistnego w trybie "spot-spray" [111, 112]. Badania polowe przeprowadzone w latach 2022–2024 wykazały, że selektywny oprysk rozwiązaniem Greeneye utrzymuje skuteczność zwalczania najważniejszych chwastów w kukurydzy i soi w zakresie 94–99% przy równoczesnym obniżeniu zużycia substancji aktywnej do nawet 90%. Niemniej efektywność ekonomiczna systemu maleje w warunkach ekstremalnie wysokiej presji chwastów, a dokładność detekcji jest wrażliwa

na skrajne warunki oświetleniowe [112].

Ostatni przykład to robot Asterix. Rozwiązanie do chemicznego odchwaszczania w uprawach szerokorzędowych opracowane w Norwegii. Urządzenie posiada trójkołowe podwozie oraz hybrydowy napęd o napięciu 48 V, który umożliwia poruszanie się wzdłuż rzędów bez konieczności zmiany dotychczasowych praktyk agrotechnicznych, m.in. w uprawie marchwi, pora czy sałaty. Kluczowym elementem platformy jest moduł Drop-on-Demand (DoD) z rozpylaczami rozmieszczonymi co 6 mm, z których każda jest indywidualnie sterowana. Układ dozowania współpracuje z kamerą RGB oraz klasyfikatorem roślinnym, pozwala to na precyzyjne kierowanie pojedynczych kropeł cieczy (1–2 μl) bezpośrednio na liście chwastów, przy prędkości roboczej do 0,8 m s^{-1} . Dzięki temu rozwiązaniu unika się uszkodzeń roślin uprawnych oraz powstawania drobnych kropeł znoszonych przez wiatr [113, 114].



Rysunek 2.10: Rozwiązanie Greeneye podczas wykonywania zabiegu [111]

Przeprowadzone badania z użyciem chwastów wyhodowanych w doniczkach potwierdziły skuteczne zwalczanie czterech kluczowych gatunków chwastów przy zastosowaniu zaledwie 7,6 μg glifosatu lub 0,15 μg jodosulfuronu na roślinę. Z kolei badania polowe w uprawie marchwi wykazały całkowite zniszczenie chwastów przy aplikacji 5,3 μg glifosatu na pojedynczą kroplę. Zabieg objął jedynie około 10% powierzchni pola, co przełożyło się na redukcję zużycia substancji czynnej o 73–95% w porównaniu z dawkami zalecanymi na etykietach herbicydów selektywnych. Ograniczenie objętości cieczy oraz brak znoszenia zapewniają istotne korzyści zarówno dla środowiska, jak i zdrowia ludzi, opracowany system DoD jest skuteczną alternatywą dla standardowych metod chemicznego odchwaszczania w warzywnictwie [113].

Systemy wizyjne wspomagające oprysk stanowią jeden z najważniejszych kierunków rozwoju nowoczesnej technologii aplikacji środków ochrony roślin. Wprowadzenie rozwiązań typu GoB oraz GoG umożliwia selektywne dawkowanie herbicydów, przekłada się to na znaczne oszczędności ekonomiczne i ograniczenie wpływu na środowisko. Opisane w rozdziale systemy różnią się stopniem zaawansowania technologicznego, zakresem działania oraz skutecznością w różnych warunkach polowych. Wysoka precyzja działania oraz integracja z nowoczesnymi systemami sterowania czynią je istotnym komponentem rolnictwa precyzyjnego, a ich dalszy rozwój i adaptacja mogą stanowić kluczowy element przyszłych strategii ochrony roślin.

3. Cel, zakres i teza pracy

3.1 Uzasadnienie podjęcia tematu oraz luka badawcza

Przeprowadzona analiza dostępnego stanu wiedzy, przeglądu rozwiązań komercyjnych i osiągnięć w dziedzinie technologii związanych z precyzyjnym opryskiem jednoznacznie wskazuje na rosnącą potrzebę opracowywania innowacyjnych rozwiązań, które pozwolą na znaczące ograniczenie zużycia środków ochrony roślin. Wpływ na aktualną tendencję mają nie tylko coraz bardziej rygorystyczne regulacje prawne w tym założenia Europejskiego Zielonego Ładu wprowadzające liczne ograniczenia w stosowaniu substancji chemicznych, lecz także realne, wieloaspektowe korzyści płynące z redukcji ilości aplikowanych preparatów. Należy podkreślić, że w wielu przypadkach środki ochrony roślin nadal pozostają najskuteczniejszym, a jednocześnie najtańszym sposobem zwalczania chwastów, chorób upraw czy szkodników. Precyzyjny oprysk łączy w sobie zdolność do punktowego oraz ukierunkowanego stosowania preparatów z możliwością istotnego ograniczenia zarówno kosztów ekonomicznych oraz negatywnego wpływu na środowisko oraz zdrowie roślin.

Współczesnym trendem w ochronie roślin jest integracja zaawansowanych, opartych na sztucznej inteligencji systemów detekcji chwastów z opryskiwaczami polowymi. Nowoczesne algorytmy widzenia maszynowego – w tym głębokie sieci neuronowe i analizy hiperspektralne potrafią w czasie rzeczywistym odróżnić roślinę uprawną od chwastu. Dzięki temu rozpylacze uruchamiane są wyłącznie nad miejscem występowania chwastu, pozwala to ograniczyć zużycie środków ochrony roślin nawet o ponad 50 % w porównaniu z tradycyjnymi zabiegami na całej powierzchni. Wprowadzenie AI wymusza zarazem transformację samej mechanicznej części opryskiwacza, która powinna rozwijać się wraz z technologią i poszerzać funkcjonalność całego procesu zabiegowego.

W ostatnich latach większe znaczenie w rozwijaniu koncepcji precyzyjnego oprysku odgrywają roboty rolnicze projektowane w taki sposób, aby prowadzić pracę nieprzerwanie, z możliwie minimalnymi przestojami obsługowymi. Zastosowanie wielkogabarytowych zbiorników na środki ochrony roślin zwiększa jednak masę maszyny, generując dodatkowe zapotrzebowanie na moc oraz prowadząc do niekorzystnego, intensywniejszego ugniatania gleby. Alternatywą mogą być dłużej trwające, a jednocześnie bardziej precyzyjne zabiegi z zastosowaniem mniejszych zbiorników, które pozwalają robotom na swobodne poruszanie się w terenie bez nadmiernego obciążenia. Tego typu strategia staje się szczególnie atrakcyjna w obliczu wciąż rozwijających się technologii autonomicznych i rosnących wymagań doty-

czących bezpieczeństwa, które nakładają konieczność ograniczenia prędkości poruszania się maszyn. Wolniejsza, ale wydajna i skrupulatnie realizowana aplikacja środków ochrony roślin może przyczynić się do osiągnięcia optymalnego kompromisu między efektywnością produkcji a ochroną środowiska, jednocześnie stymulując dalsze prace badawcze ukierunkowane na rozwijanie inteligentnych systemów rozpoznawania i selektywnego zwalczania zagrożeń upraw. Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny od 10 lat zajmuje się rozwijaniem technologii robotów rolniczych, a prace wykonane w ramach doktoratu wdrożeniowego są kolejnym krokiem rozwoju narzędzi do współpracy z robotami rolniczymi.

Pomimo postępu w precyzyjnej ochronie roślin, dotychczas nie zaproponowano rozwiązań do oprysku, który w sposób zintegrowany łączyłby trzy kluczowe funkcje, dotychczas niespotykane w jednym urządzeniu:

- aktywne pozycjonowanie rozpylaczy w przestrzeni względem zarówno rzędu uprawy, jak i pojedynczego chwastu w międzyrzędziu w uprawach szerokokorędowych,
- adaptację charakterystyki strumienia np. rozmiaru kropli, kąta stożka i wydatku, na podstawie danych z czujników i kamer,
- jednoczesne prowadzenie pasmowego oprysku rzędów i punktowego aplikowania cieczy w międzyrzędziach w jednym przejeździe roboczym.

Dotychczasowe prace naukowe i rozwiązania rynkowe rozwijają wybrane elementy, ale nie łączą ich w jeden układ realizujący synchronizację ruchu rozpylaczy z detekcją wizyjną AI i równoczesne prowadzenie oprysku pasmowego i punktowego podczas tego samego przejazdu. W literaturze i praktyce brakuje układu, który potrafi adaptować geometrię strumienia na podstawie danych z czujników lub kamer oraz utrzymywać rozpylacz nad rośliną w sposób aktywny.

Aby wypełnić wskazaną lukę badawczą, zakres rozprawy doktorskiej obejmuje opracowanie i weryfikację mechatronicznego zespołu rozpylającego zintegrowanego z systemem wizyjnym, zdolnego do aktywnego pozycjonowania rozpylaczy oraz adaptacji charakterystyki strumienia tak, by w jednym przejeździe realizować zarówno oprysk pasmowy w rzędach, jak i punktowy w międzyrzędziach. Zakres zrealizowano poprzez: projekt i budowę modułowej konstrukcji z możliwością pochylenia/skrętu rozpylacza i układem sterowania, integrację czujników/kamer i algorytmów detekcji, przygotowanie i przeprowadzenie serii testów laboratoryjnych i polowych, oraz ocenę efektów w odniesieniu do rozwiązań standardowych.

3.2 Cel badawczy i wdrożeniowy

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy i technologii pozwoliła na określenie celu badawczego:

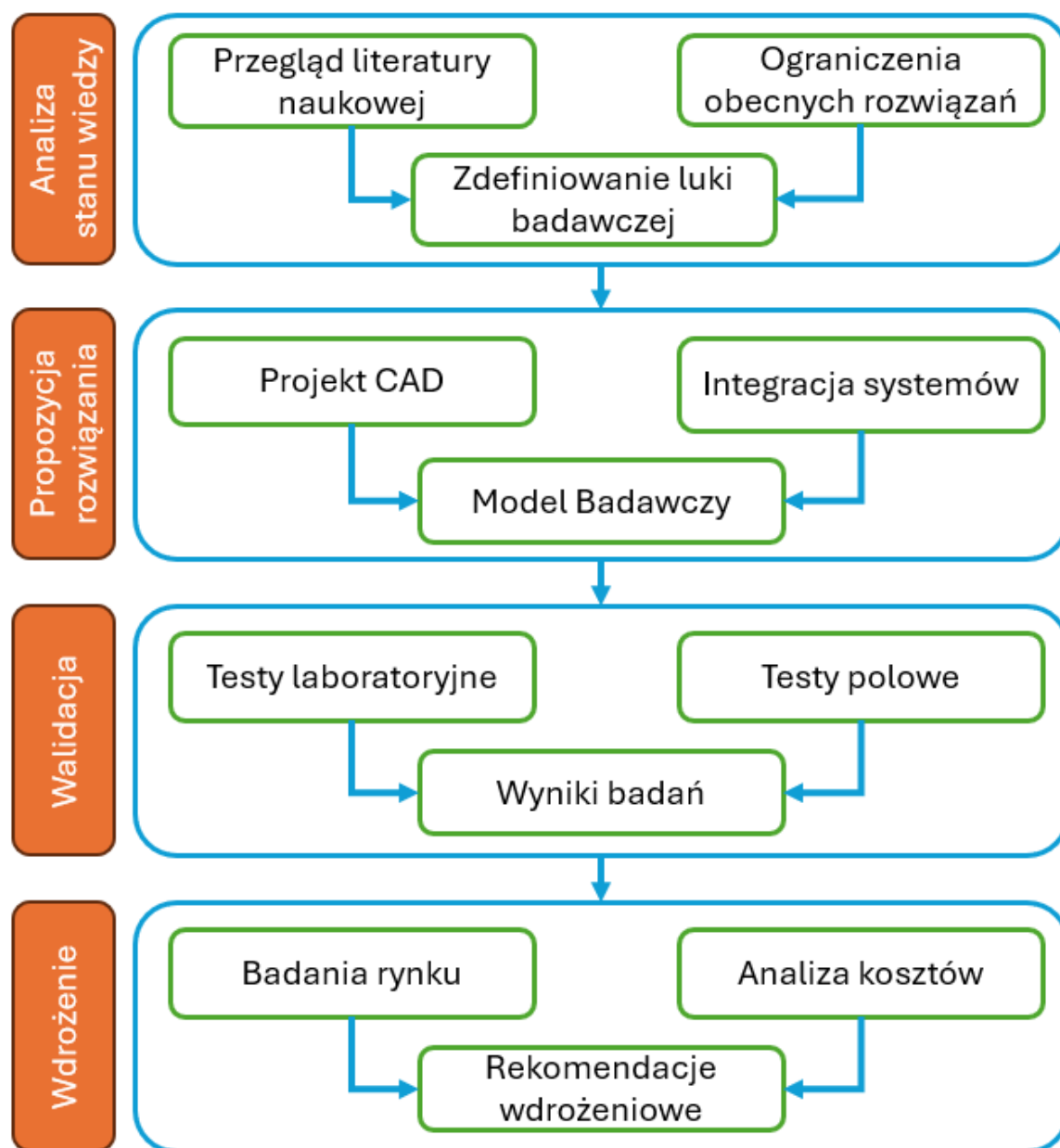
"Opracowanie i ocena mechatronicznego rozpylacza o zmiennej charakterystyce, dostosowującego parametry oprysku do warunków polowych, w celu zwiększenia równomierności pokrycia powierzchni rośliny oraz redukcji zużycia środków ochrony roślin względem rozwiązań standardowych"

Celem wdrożenia jest opracowanie kompletnego, modułowego systemu mechatronicznego zespołu rozpylającego, który będzie zgodny z obowiązującymi wymaganiami legislacyjnymi i rynkowymi, a także wpisze się w założenia „Europejskiego Zielonego Ładu” oraz strategii „Od pola do stołu”. System ma zapewniać co najmniej 30% redukcję zużycia środków chemicznych w porównaniu z konwencjonalnymi metodami, przy zachowaniu porównywalnej skuteczności działania. Każdy moduł systemu powinien umożliwiać indywidualną adaptację oraz zapewniać kompatybilność z popularnym interfejsem komunikacyjnym CAN.

Punktem wyjścia realizacji celu badawczego i wdrożeniowego (Rys. 3.1) jest analiza stanu wiedzy, obejmująca systematyczny przegląd literatury naukowej oraz diagnozę ograniczeń istniejących rozwiązań rynku opryskiwaczy rolniczych. Zestawienie tych dwóch perspektyw prowadzi do zdefiniowania luki badawczej, czyli jasno opisanej potrzeby technologicznej, której nie ma aktualnie na rynku. Na tej podstawie formułowana jest propozycja rozwiązania, w środowisku CAD opracowuje się koncepcję mechatronicznego zespołu rozpylającego, równolegle planując integrację systemów. Obie wykonane prace łączą się w model badawczy, fizyczny prototyp umożliwiający weryfikację założeń.

Kolejny etap to walidacja, prowadzona dwutorowo. Badania laboratoryjne pozwalają w kontrolowanych warunkach ocenić geometrię oprysku, natomiast testy polowe weryfikują skuteczność i stabilność działania w realnym środowisku pracy. Oba rodzaje badania zasilają wyniki, które stanowią podstawę do modyfikacji prototypu i doprecyzowania algorytmów sterowania. Proces ten ma charakter iteracyjny, aż do uzyskania parametrów spełniających zakładane kryteria.

Ostatnia faza ma charakter wdrożeniowy. W oparciu o zweryfikowane wyniki prowadzi się badania rynku oraz analizę kosztów. Podsumowaniem tych prac są rekomendacje wdrożeniowe, obejmujące warianty konfiguracji, ścieżkę działania i integracji z istniejącymi opryskiwaczami, a także wskazania dotyczące kalibracji, utrzymania oraz dalszego rozwoju. Cały cykl od analizy, przez projekt i walidację, po rekomendacje, zapewnia spójne powiązanie celów naukowych z celami wdrożeniowymi.



Rysunek 3.1: Ogólny schemat realizacji badań i wdrożenia

3.3 Teza badawcza

Wyniki przeglądu literatury oraz analiza obecnie dostępnych technologii wskazują na potrzebę rozwiązań pozwalających kształtować charakterystykę oprysku w zależności od geometrii i fazy rozwojowej roślin, tak aby uzyskać jednocześnie wysoką jakość pokrycia i ograniczyć zużycie środków ochrony roślin. Pozwoliło to na postawienie następującej tezy badawczej:

"Zastosowanie opracowanej konstrukcji i algorytmu sterowania pracą mechatronicznego rozpylacza umożliwi dostosowanie się charakterystyki oprysku do uprawianej rośliny zmniejszając

ilość stosowanego środka ochrony roślin przy zachowaniu wymaganej skuteczności"

Przez wymaganą skuteczność rozumie się równomierne pokrycie całej rośliny, które będzie oceniane za pomocą papierka wodoczułego. Opracowane rozwiązanie powinno wykazywać lepsze parametry niż rozwiązania standardowe lub być jak najbardziej zbliżone do wyznaczonego wzorca.

Problemem naukowym dysertacji jest relacja między postacią konstrukcyjną i funkcjonalnością mechatronicznego zespołu rozpylającego o zmiennej charakterystyce oprysku, a jego cechami użytkowymi, takimi jak równomierność pokrycia roślin oraz redukcja zużycia środków ochrony roślin. Zakłada się, że wartości tych cech będą lepsze, z punktu widzenia rolnictwa precyzyjnego, w porównaniu z ich wartościami uzyskiwanymi metodami standardowymi.

Potwierdzenie tezy badawczej zaplanowano w dwóch etapach, laboratoryjnym i polowym. W części laboratoryjnej analizowane będą kluczowe parametry rozpylania takie jak przebiegi poprzecznego rozkładu, szerokość użytecznego pasa oraz asymetrię. W części polowej weryfikacja będzie miała charakter porównawczy względem opryskiwacza standardowego. Analizie poddane zostały ślady na papierkach wodoczułych oraz statystyka pokrycia w standardowo wybranych punktach na roślinie i wzdłuż rzędu. W obu środowiskach celem jest wykazanie istotnej statystycznie poprawy jednorodności przy zmiennej orientacji rozpylacza oraz potwierdzenie, że funkcjonalna skuteczność oprysku nie ulega pogorszeniu. Badania prowadzone były w ściśle zdefiniowanych warunkach brzegowych:

- określonych wysokościach roboczych,
- dwóch zakresach prędkości przejazdu,
- ciśnienie referencyjne,
- dopuszczalnych warunkach pogodowych.

Tak przygotowana rama badawcza umożliwia rzetelną weryfikację postawionej tezy w dwóch etapach, laboratoryjnym i polowym.

4. Projektowanie mechatronicznego rozpylacza

4.1 Koncepcja rozwiązania

Rolnik, dostrzegając problem na polu uprawnym, podejmuje decyzję dotyczącą sposobu jego eliminacji. Jednym z często stosowanych rozwiązań jest zastosowanie chemicznych środków ochrony roślin. Wyróżnia się pięć podstawowych grup cieczy roboczych: herbicydy służące do zwalczania chwastów, fungicydy ograniczające rozwój chorób grzybowych, insektycydy stosowane przeciwko szkodnikom, nawozy dolistne poprawiające kondycję roślin oraz regulatory wzrostu, wpływające na wysokość rośliny uprawnej. Aplikacja roztworu środka ochrony roślin polega na jego rozpyleniu nad polem uprawnym [115]. Każdy z roztworów wymaga innej charakterystyki oprysku, a ich skuteczność działania zależy od rodzaju zastosowanego rozpylacza, ciśnienia roboczego, prędkości przejazdu opryskiwacza, a przede wszystkim od średnicy kropli oraz dawki cieczy roboczej [116].

Realizowana praca doktorska koncentrowała się na opracowaniu urządzenia, które, wykorzystując osiągnięcia w dziedzinie wizji maszynowej oraz sztucznej inteligencji, umożliwi dostosowywanie się charakterystyki oprysku do rodzaju upraw oraz zmieniających się warunków środowiskowych. Głównym celem było zminimalizowanie zużycia środków ochrony roślin przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej skuteczności biologicznej. W ramach pracy skupiono się na analizie i projektowaniu urządzenia współpracującego z nowoczesnymi systemami wizyjnymi, które stanowią kluczowy element umożliwiający precyzyjny oprysk. Ze względu na ograniczony czas realizacji projektu w ramach doktoratu przyjęto uproszczone podejście do oceny skuteczności biologicznej. Przyjęto, że oprysk wykonany we właściwym miejscu, z zachowaniem odpowiednich parametrów, takich jak wielkość kropli czy równomierność oprysku, można traktować jako skuteczny.

Podstawę kształtowania charakterystyki oprysku rolniczego stanowi sterowanie ciśnieniem roboczym, natężeniem przepływu cieczy oraz geometrią rozpylacza. Większe ciśnienie wiąże się ze wzrostem prędkości wypływu i rozdrobnieniem strugi, prowadząc do powstawania drobniejszych kropli. Natomiast obniżenie ciśnienia skutkuje pojawieniem się większych, cięższych kropli. Wielkość przepływu, wyrażana zazwyczaj w litrach na minutę przy danym ciśnieniu, w korelacji z prędkością przejazdu opryskiwacza i rozstawem rozpylaczy, określa dawkę cieczy roboczej podawaną w litrach. Kluczowym elementem układu natryskowego pozostaje rozpylacz, którego wielkość i kształt otworu są zdefiniowane i zależne od wymaganego rozkładu wielkości kropli i kształtu generowanej strugi. Na parametry oprysku wpływa

również orientacja rozpylacza w przestrzeni poprzez zmiany kąta oprysku. Projektowane rozwiązanie uwzględnia wszystkie podstawowe charakterystyki oprysku, a w szczególności znacznie rozszerza zakres zmiany orientacji rozpylacza w przestrzeni.

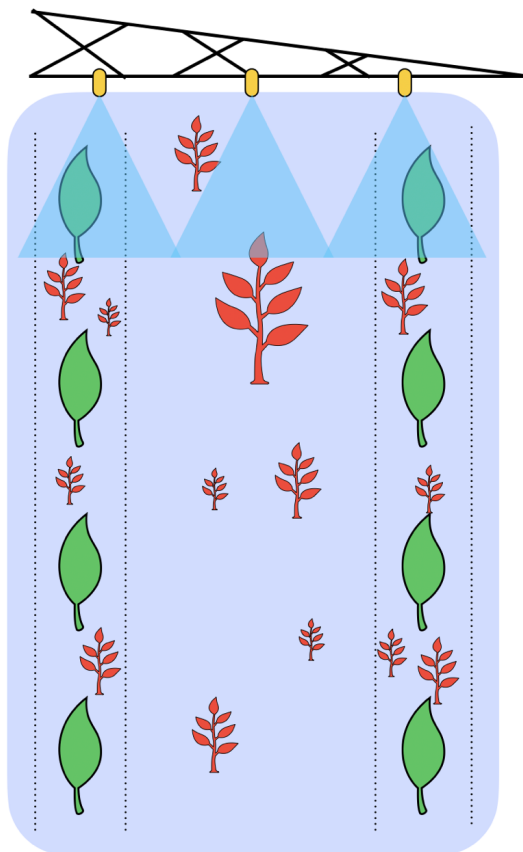
W przypadku upraw prowadzonych w systemie całopowierzchniowym (np. zboża) rośliny rozmieszczone są gęsto, utrudniając selektywną aplikację środków ochrony roślin, zarówno w formie oprysku punktowego, jak i oprysku pasowego. Mała odległość między kłosami utrudnia precyzyjne zidentyfikowanie obszarów wymagających zabiegu, ograniczając możliwości redukcji zużycia agrochemikaliów. Aby osiągnąć zauważalny efekt oszczędności w stosowaniu środków ochrony roślin, zdecydowano się na projektowanie urządzenia w kierunku upraw szerokokorządowych. W takich uprawach, jak na przykład kukurydza, rzędy oddalone są od siebie zazwyczaj w rozstawie 75 cm, a odstęp między roślinami w rzędzie wynosi około 15 cm [117]. Większe odległości między roślinami, szczególnie w początkowych fazach rozwoju, ułatwiają identyfikację pojedynczych roślin i umożliwiają precyzyjne dostosowanie parametrów oprysku.

Ze względu na specyfikę uprawy kukurydzy, która charakteryzuje się stosunkowo dużymi odstępami między roślinami, a także na możliwość wykorzystania istniejących, rozwijanych w innych projektach wewnętrznych, instytutowych systemów wizyjnych oraz stały dostęp do poletka doświadczalnego, na którym prowadzona jest uprawa kukurydzy, podjęto decyzję o ukierunkowaniu prac projektowych i badawczych właśnie na rzędy kukurydzy. Takie zawężenie zakresu badań zapewniało nie tylko korzystne i dostępne warunki testowe, lecz również umożliwiało efektywne wykorzystanie dostępnej infrastruktury badawczej już dostępnych w Łukasiewicz-PIT.

Nie należy jednak interpretować decyzji jako ostatecznego ograniczenia potencjału projektowanego urządzenia do zastosowań wyłącznie w uprawie kukurydzy. Wstępne analizy wskazują, że po odpowiednim dostosowaniu modułów wizyjnych, jak również po rekonstrukcji rozstawu elementów roboczych, możliwe będzie przeniesienie rozwiązania na inne gatunki roślin uprawnych. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę ramy czasowe przewidziane na realizację całego przewodu doktorskiego, konieczne było wprowadzenie świadomych ograniczeń badawczych. Ograniczenia te pozwoliły skupić się na najistotniejszych zagadnieniach inżynierskich i eksperymentalnych, unikając jednocześnie nadmiernego rozproszenia, które mogłoby zagrozić terminowej finalizacji rozprawy doktorskiej.

Tradycyjny oprysk całopowierzchniowy (Rys. 4.1) wykonywany polowym opryskiwaczem belkowym należy do najmniej efektywnych metod aplikacji środków ochrony roślin, gdy celem jest ograniczenie ich zużycia i minimalizacja presji środowiskowej. Na powierzchni 1 ha kukurydzy ciecz robocza musi zostać rozprowadzona na całym polu, co oznacza wyko-

rzystanie pełnej przewidzianej ilości substancji czynnej. Zwiększenie dawki może wynikać z miejsc podwójnego oprysku przy trójkątnych kształtach pola oraz strat wskutek znoszenia i parowania kropel. Taki oprysk wykonuje się wszystkimi rodzinami środków ochrony roślin. Oprysk całopowierzchniowy bywa jednak uzasadniony w sytuacjach wymagających uzyskania równomiernej bariery herbicydowej w wierzchniej warstwie gleby bezpośrednio po siewie lub przy bardzo wysokiej presji chwastów. Dodatkową zaletą jest uniwersalność, przez możliwość oprysku na różnych rodzajach upraw.



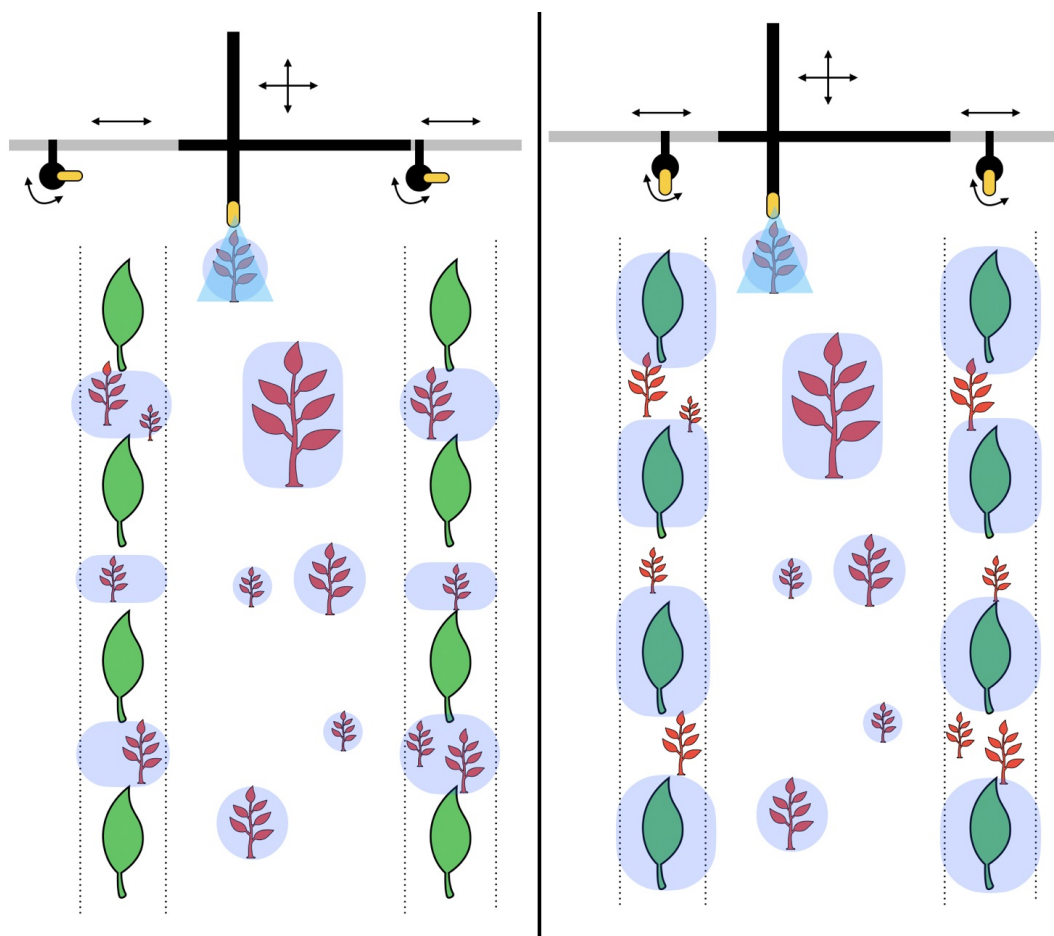
Rysunek 4.1: Oprysk całopowierzchniowy kukurydzy

Redukcję zużycia cieczy roboczej można osiągnąć, stosując opryskiwacze przystosowane do aplikacji rzędowej, w których ciecz наносzona jest wyłącznie w wąskim pasie obejmującym rząd rośliny uprawnej. Rozwiązanie szczególnie dobrze pod względem zużycia sprawdza się przy zabiegach innych niż herbicydowe, ponieważ chwasty występują na całej powierzchni pola, co wymaga oprysku całego pola. Na rynku można spotkać rozwiązania hybrydowe, integrujące mechaniczną eliminację chwastów w międzyrzędziach z chemicznym zwalczaniem chwastów w samym rzędzie uprawy.

Dotychczasowe analizy rynku opryskiwaczy rolniczych oraz przegląd literatury naukowej jednoznacznie wskazują na braki kompleksowych rozwiązań umożliwiających jednoczesne

ograniczanie dawki środków ochrony roślin, możliwość modyfikacji parametrów strumienia cieczy w odpowiedzi na aktualne warunki polowe oraz współpracę z systemami wizyjnymi zwiększającymi ich potencjał. Zidentyfikowana luka nabiera szczególnego znaczenia w kontekście zaostrzających się wymogów środowiskowych wynikających z Europejskiego Zielonego Ładu oraz strategii „Od pola do stołu”. W odpowiedzi na zidentyfikowaną lukę w stanie techniki, w ramach rozprawy doktorskiej opracowano koncepcję mechatronicznego układu oprysku, charakteryzującego się modułową budową oraz rozwiązaniami obejmującymi potencjał systemów wizyjnych, zarówno klasyczne algorytmy przetwarzania obrazu oparte na kolorze, jak i metody głębokiego uczenia.

Projektowany układ roboczy w ogólnej zasadzie działania tworzą trzy zintegrowane podzespoły kinematyczne (Rys. 4.2). Pierwszy z nich stanowi ruchoma belka nośna o dwóch stopniach swobody ruchu: pionowego oraz poziomego. Zastosowane napędy liniowe kompensują zarówno boczne wahania toru jazdy pojazdu, tak zwane „wężykowanie”, oraz zmienną wysokość ładu, dzięki czemu głowica opryskowa utrzymywana jest w stałej odległości pionowej od roślin oraz dokładnie nad osią rzędu, niezależnie od manewrów pojazdu.



Rysunek 4.2: Proponowany oprysk, po lewej oprysk herbicydem, po prawej łączony oprysk herbicydem w międzyrzędziu oraz oprysk na roślinę uprawną w rzędzie

Drugim podzespołem jest mechatroniczna głowica rzędowa. Wyposażona jest w dwa silniki elektryczne, umożliwiające korektę kąta natrysku w dwóch płaszczyznach, oraz głowicę rewolwerową, mieszczącą sześć końcówek rozpylających. Automatyczna zmiana końcówki rozpylającej i płaszczyzny oprysku odbywa się na podstawie danych agrotechnicznych (rodzaj zabiegu, faza rozwojowa roślin, prędkość wiatru itp.). Pozwala to dostosować charakterystykę oprysku do panujących warunków.

Ostatni moduł odpowiada za oprysk międzyrzędowy. Zespół rozpylający zamocowany na kartezyjańskim układzie XYZ pozwala na niezależne przemieszczenia w płaszczyznach poziomej i pionowej, umożliwiając punktową aplikację herbicydu wyłącznie na chwasty zlokalizowane przez dedykowany system wizyjny. Całość tworzy elastyczną platformę opryskową, zdolną do precyzyjnej i selektywnej ochrony roślin w zmiennych warunkach polowych. Proponowane rozwiązanie może prowadzić oprysk punktowy herbicydem na całej powierzchni lub łączyć zabiegi, prowadząc oprysk herbicydem w międzyrzędziu oraz inny zabieg na roślinę uprawną w rzędzie.

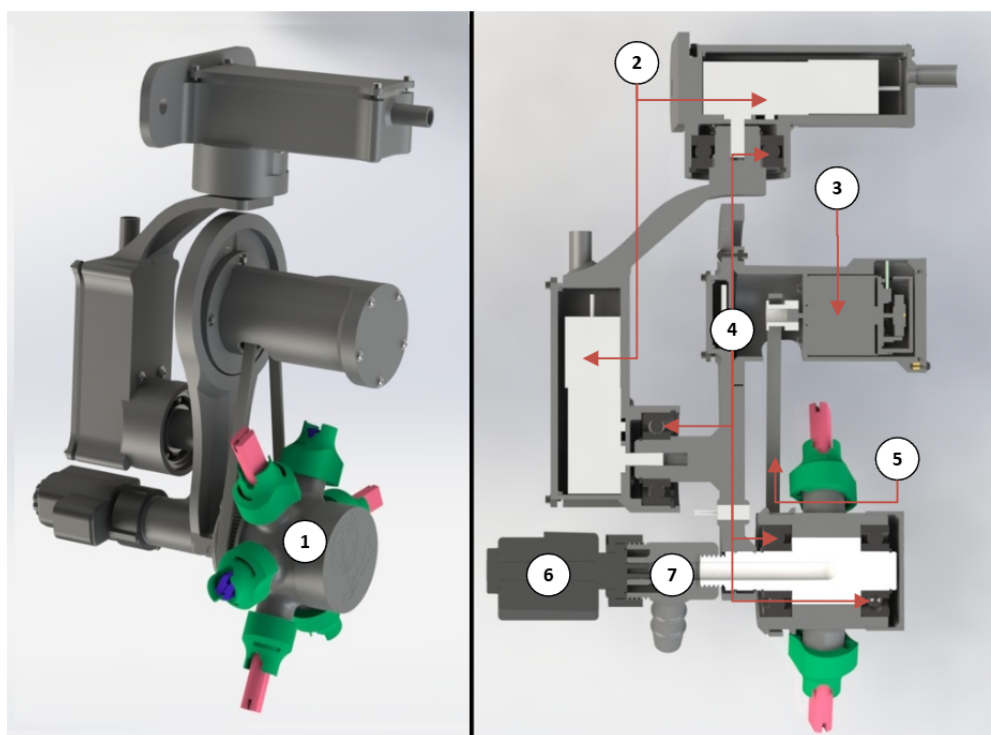
4.2 Modele bryłowe rozpylacza oraz systemu poziomowania

W pierwszym etapie zdefiniowano kilkanaście koncepcji realizacji tematu rozprawy doktorskiej. Po przeanalizowaniu zalet, wad, stopnia skomplikowania oraz możliwości wykonania każdej z nich wybrano najbardziej korzystne rozwiązanie. Prace rozpoczęto od modelowania 3D CAD głowicy rozpylacza przeznaczonej do pracy w rzędach roślin uprawnych, równolegle opracowując listę elementów do zakupu (Rys. 4.3). Od początku procesu projektowania przyjęto ideę modułowej budowy całego urządzenia, tak aby każdy z projektowanych zespołów stanowił odrębny moduł. Z tego względu zdecydowano się na zastosowanie silników elektrycznych ze względu na czynniki ekonomiczne oraz łatwość implementacji w różnych typach belek opryskiwaczy.

Projektowany rozpylacz zmienia położenie w dwóch płaszczyznach. Zmiana pierwszej płaszczyzny realizowana jest przez skrócenie rozpylacza, padającej prostopadle od góry na roślinę uprawną, w celu zmniejszenia szerokości pasa oprysku. Zmiana drugiej płaszczyzny polega na skróceniu rozpylacza, padającej prostopadle od góry, tak aby możliwe było prowadzenie oprysku od boku rośliny uprawnej. Do realizacji przestawiania głowicy w obu płaszczyznach wykorzystano silniki prądu stałego z przekładniami ślimakowymi. Każdy napęd umieszczono w dedykowanej obudowie, która jednocześnie pełni funkcję ruchomego segmentu rozpylacza.

Wszystkie ruchome połączenia zostały łożyskowane, a obudowy wyposażono w odpowiednie uszczelnienia, chroniące elementy elektryczne przed działaniem cieczy roboczej.

Głowicę rewolwerową zaprojektowano na sześć standardowych rozpylaczy montowanych za pomocą kołpaka. Każdy rozpylacz wyposażony jest w uszczelnienie oraz wkład filtracyjny (sitko). Zmiana rozpylaczy odbywa się za pomocą silnika elektrycznego z wbudowanym enkoderem, natomiast obrót realizowany jest przez przekładnię pasową. Tak skonfigurowany układ umożliwia szybką zmianę rozpylaczy w odpowiedzi na zmienne warunki polowe, zapewniając jednocześnie wysoką precyzję ustawienia parametrów oprysku. Ostatecznie zaprojektowana głowica ma wymiary 280 mm wysokości i 93 mm szerokości (bez zamontowanych końcówek rozpylających). Zakres obrotu w płaszczyźnie oprysku od góry wynosi $\pm 90^\circ$, a w płaszczyźnie poziomej przy oprysku bocznym również $\pm 90^\circ$. Uzyskanie takich kątów obrotu pozwala na pełną elastyczność i precyzyjne dostosowanie kierunku oprysku.



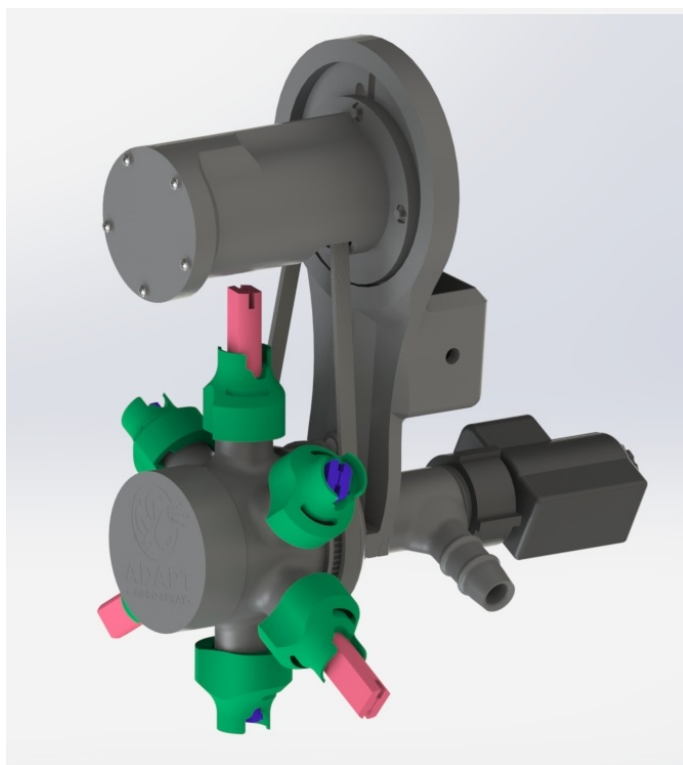
Rysunek 4.3: Model CAD 3D głowicy rozpylacza pracującego w rzędzie: po lewej w całości, po prawej w przekroju. 1 – głowica rewolwerowa, 2 – silnik DC z przekładnią ślimakową, 3 – silnik DC z enkoderem, 4 – łożyska, 5 – pasek zębaty, 6 – elektrozawór, 7 – przyłącze wodne

Ze względu na złożoność konstrukcji oraz konieczność szybkiego wprowadzania zmian projektowych zdecydowano się na zastosowanie druku 3D do wykonywania elementów. Pierwsze prototypy drukowano z wykorzystaniem materiału PLA, który jest łatwy w druku, lecz charakteryzuje się niższą wytrzymałością mechaniczną w porównaniu do tworzywa ASA. Sprawdzone i zaakceptowane elementy wykonywano już z tworzywa ASA o wyższych wła-

ściwościach mechanicznych i lepszej odporności na czynniki środowiskowe. Ze względu na technologię druku 3D projektowane elementy zawierały zaokrąglone krawędzie, dodatkowe wsporniki oraz pogrubione ścianki w celu zwiększenia wytrzymałości lub uproszczenia procesu druku 3D. Początkowe wydruki wykazywały problem z przesiąkaniem cieczy przez strukturę materiału, jednak zwiększenie wewnętrznego wypełnienia do 100% skutecznie wyeliminowało ten problem.

Druk 3D z wykorzystaniem tworzywa ASA nie jest rozwiązaniem docelowym, ponieważ sprawia trudności w zachowaniu precyzyjnych wymiarów, potrzebnych szczególnie w przypadku pasowania elementów. Finalne komponenty powinny być produkowane metodą wtrysku tworzyw sztucznych ze względu na możliwość produkcji seryjnej przy zachowaniu odpowiednich wymiarów.

Drugą projektowaną i drukowanym zespołem rozpylającym była wersja przeznaczona do współpracy z zespołem ruchu pracującym w międzyszęści (Rys. 4.4). W tym przypadku zdecydowano się uprościć wcześniejszą konstrukcję poprzez eliminację zmian w płaszczyznach, przy jednoczesnym zachowaniu jak największej liczby już zaprojektowanych elementów. Przeprojektowano jedynie jeden komponent, dostosowując go do mocowania w układzie kartezyjskim. Zachowano wymienne rozpylacze oraz elektrozawór umożliwiający realizację oprysku przerywanego.



Rysunek 4.4: Model CAD 3D głowicy rozpylacza pracującego w międzyszęści

Projektowana powyżej głowica rozpylacza, przeznaczona do pracy w międzyrzędziach, stanowi integralny element zespołu współpracującego z układem kartezjańskim, który umożliwia precyzyjne pozycjonowanie rozpylacza niezależnie od pozostałych ruchów platformy roboczej. Zdecydowano się na zastosowanie mechanizmu typu T-bot z dwoma silnikami (Rys. 4.5) i jednym paskiem napędowym ze względu na minimalną masę osi pionowej, możliwość stosowania silników o wyższych momentach oraz łatwe zmiany wymiarów działania osi.

W konstrukcji wykorzystano dostępne na rynku standardowe elementy aluminiowe wraz z akcesoriami montażowymi typu „v-slot”, upraszczając proces produkcyjny. Napęd oparto na dwóch silnikach krokowych zamontowanych symetrycznie po obu stronach poziomego profilu aluminiowego. Oba silniki są połączone za pomocą jednego paska, który oplata za pomocą rolek cały zespół. W momencie, kiedy silniki obracają się w tę samą stronę, następuje ruch osi w prawo lub lewo. Natomiast kiedy obracają się w przeciwnym kierunku, następuje ruch osi w górę lub w dół. Ruch dwóch osi jednocześnie można uzyskać poprzez różnicę prędkości pomiędzy silnikami oraz kierunkami obrotów.



Rysunek 4.5: Model CAD 3D układu pracującego w międzyrzędziu. 1 – silnik krokowy, 2 – oś pozioma, 3 – wózek, 4 – oś pionowa

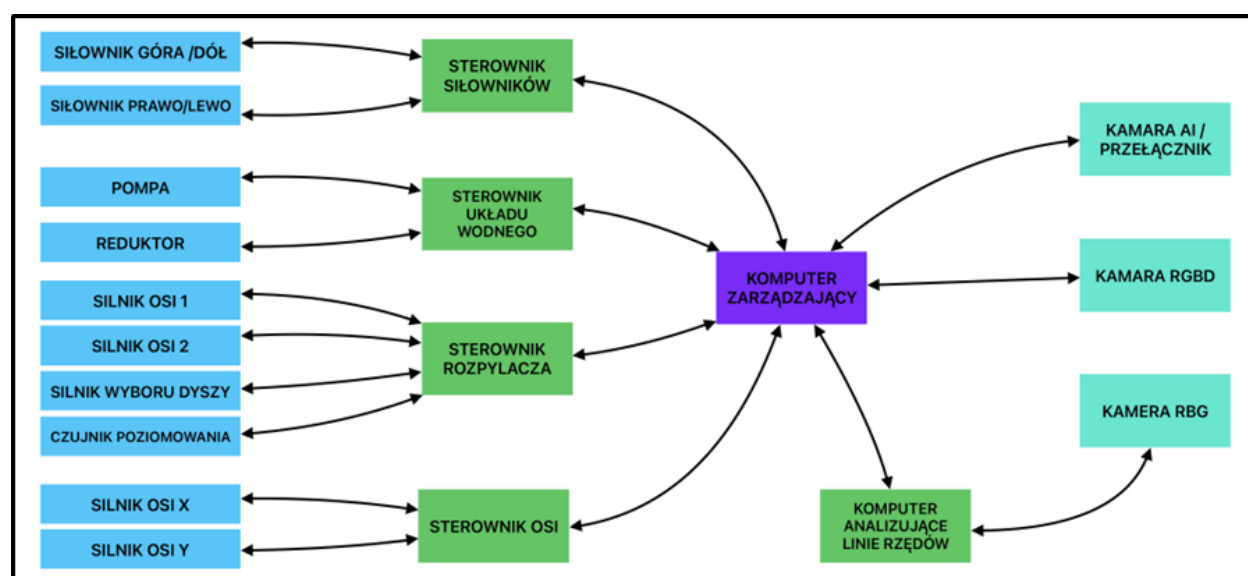
Zaprojektowano również modułową ramę nośną (Rys. 4.6) o wysokości 1170 mm, szerokości 1507 mm i długości 1572 mm, stanowiącą integralny element modelu badawczego, umożliwiającą montaż głowic rozpylaczy oraz systemów wizyjnych wykorzystywanych do identyfikacji i pozycjonowania roślin oraz chwastów. Konstrukcja ramy została opracowana z uwzględnieniem kompatybilności z trzypunktowym układem zawieszenia standardowego ciągnika rolniczego oraz z możliwością integracji z autonomicznym robotem polowym. Całość została wspawana ze stalowych profili konstrukcyjnych oraz wyposażona w elektryczne siłowniki liniowe umożliwiające precyzyjną regulację wysokości położenia głowic opryskowych względem upraw o skoku działania 500 mm, a także w dodatkowy siłownik odpowiedzialny za dynamiczne utrzymywanie pozycji głowicy nad rzędem roślin o skoku działania 300 mm. Dodatkowo przewidziano miejsce na montaż kompaktowego zbiornika o pojemności 60 l na ciecz roboczą oraz układów pomocniczych, takich jak pompy, przewody i zawory sterujące. Całość konstrukcji została zoptymalizowana do jednorzędowego układu uprawy, w szczególności kukurydzy sadzonej szerokokorzędowo, w odległości między rzędami 75 cm. Zastosowanie pojedynczego narzędzia roboczego pozwala na prowadzenie badań z zachowaniem pełnej kontroli nad parametrami oprysku i pozycjonowaniem głowic. Natomiast zaprojektowana stalowa rama pozwala na łatwe zmiany ustawień lub wprowadzanie modyfikacji.



Rysunek 4.6: Model CAD 3D ramy nośnej

4.3 Elektronika sterująca, elementy pomiarowe i wykonawcze w konstrukcji

Przed przystąpieniem do projektowania płytek PCB wykonano schemat blokowy ogólnego połączenia (Rys. 4.7). Zdecydowano się na zastosowanie koncepcji modułowej ze względu na elastyczność takiej koncepcji, co pozwala na łatwe konfigurowanie oraz skalowanie systemu poprzez dodanie kolejnych sekcji. Każdy moduł w systemie jest niezależnie sterowany, umożliwiając efektywną rozbudowę modelu bez konieczności modyfikacji całej struktury. Poszczególne moduły wyposażono w dedykowane sterowniki, które zarządzają elementami wykonawczymi, siłownikami czy silnikami elektrycznymi oraz czujnikami niezbędnymi do prawidłowej pracy.



Rysunek 4.7: Ogólny schemat blokowy (układ elektryczny)

Zaprojektowane moduły wykonawcze komunikują się z przypisanymi kamerami lub czujnikami analizującymi pole uprawne. Na podstawie wysyłanych wiadomości moduły wykonawcze dokonują odpowiednich korekt ruchu, umożliwiając precyzyjne działanie maszyny w zależności od zmieniających się warunków zewnętrznych. W porównaniu do tradycyjnego podejścia z jednym centralnym sterownikiem, rozproszenie funkcji sterowania na kilka mniejszych jednostek pozwala na bardziej elastyczne zarządzanie poszczególnymi elementami. Dzięki temu każdy moduł sterujący może być niezależnie rozwijany i optymalizowany, znacząco upraszczając analizę kodu, identyfikowanie problemów oraz wdrażanie nowych funkcjonalności. W przypadku awarii jednego z modułów inne elementy mogą nadal działać. Minimalizuje to ryzyko zatrzymania całego systemu sterowania. Taki podział odpowiedzialności na mniejsze

jednostki pozwala również na łatwiejsze skalowanie projektu, ponieważ nowe moduły mogą być dodawane bez potrzeby gruntownych zmian w architekturze całego systemu.

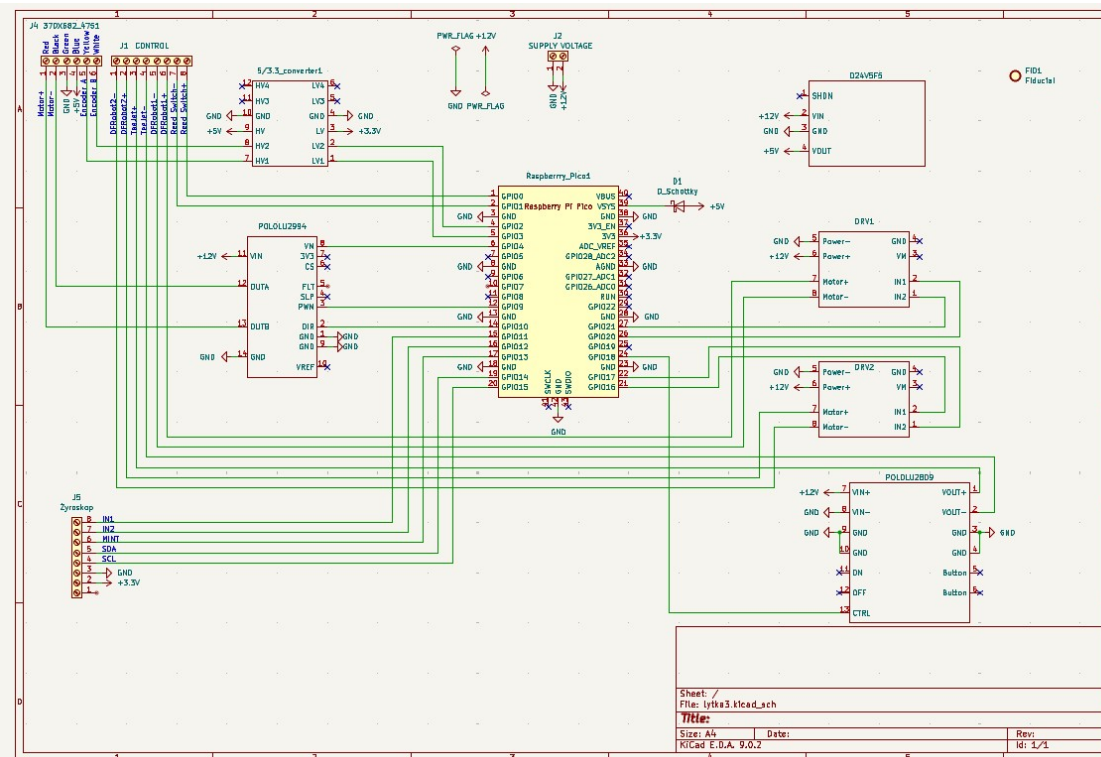
W ramach przyjętej koncepcji realizacji konstrukcji modułowej zaprojektowano płytki PCB pełniące funkcję niezależnych urządzeń elektronicznych do sterowania ruchem poszczególnych modułów. W celu przyspieszenia prac projektowych oraz ograniczenia ryzyka wystąpienia potencjalnych problemów podjęto decyzję o wykorzystaniu gotowych płytek elektronicznych w postaci np. sterowników silników. Schematy takich płytek elektronicznych posłużą w przyszłości jako baza do opracowania autorskich, pełnowartościowych układów PCB, składających się wyłącznie z pojedynczych komponentów. Wprowadzono także elementy standaryzacji – każda płytka modułowa ma wymiary 100×100 mm, a za główną jednostkę sterującą przyjęto moduł Raspberry Pi Pico ze względu na niski koszt zakupu, rozbudowaną dokumentację oraz wydajny procesor. Dla całej maszyny wykonano 5 sztuk różnego typu płytek PCB sterujących siłownikami, rozpylaczami, pompami oraz pozycjonowaniem osi.

Raspberry Pi Pico jest niskokosztową płytką z autorskim mikrokontrolerem RP2040, opracowaną przez fundację Raspberry Pi. Układ wyposażony jest w dwurdzeniowy procesor ARM Cortex M0+ o taktowaniu zegara sięgającym 133 MHz, 264 kB pamięci SRAM oraz 2 MB wbudowanej pamięci flash. Płytkę dysponuje 26 programowalnymi wejściami/wyjściami GPIO cyfrowymi lub analogowymi, z których część może pełnić funkcje interfejsów komunikacyjnych SPI, I²C czy UART. Raspberry Pi Pico można programować w językach C/C++ oraz MicroPython.

Prace nad projektem płytki PCB rozpoczęto od identyfikacji kluczowych elementów wykonawczych, których parametry znamionowe, takie jak prąd i napięcie, zostały określone na podstawie kart katalogowych. Kolejnym krokiem było zdefiniowanie niezbędnych czujników, które umożliwią precyzyjną współpracę z elementami wykonawczymi, zapewniając poprawne funkcjonowanie całego systemu. Na tej podstawie opracowano schemat elektryczny (Rys. 4.8) ilustrujący połączenie poszczególnych sygnałów, będący pierwszym krokiem w projektowaniu płytki PCB. Projekt całej płytki wykonano z wykorzystaniem oprogramowania KiCad.

Uwzględniając zasilanie z akumulatora pojazdu, powszechnie stosowanym w maszynach rolniczych napięciem nominalnym jest 12 V. Źródłem energii w tego typu pojazdach mobilnych jest akumulator, ładowany przez alternator zamontowany na silniku spalinowym. W związku z tym podjęto decyzję o zaprojektowaniu płytek, które pozwalają na pracę w szerokim zakresie napięć od 9 do 15 V. Napięcie na poziomie 9 V występuje w sytuacji, gdy akumulator jest rozładowany i nie jest wówczas ładowany, natomiast wartości rzędu 14–15 V obserwuje się podczas procesu ładowania poprzez alternator. W celu dostosowania napięcia do wymagań poszczególnych podzespołów stosowano przetwornice obniżające (ang. step-down)

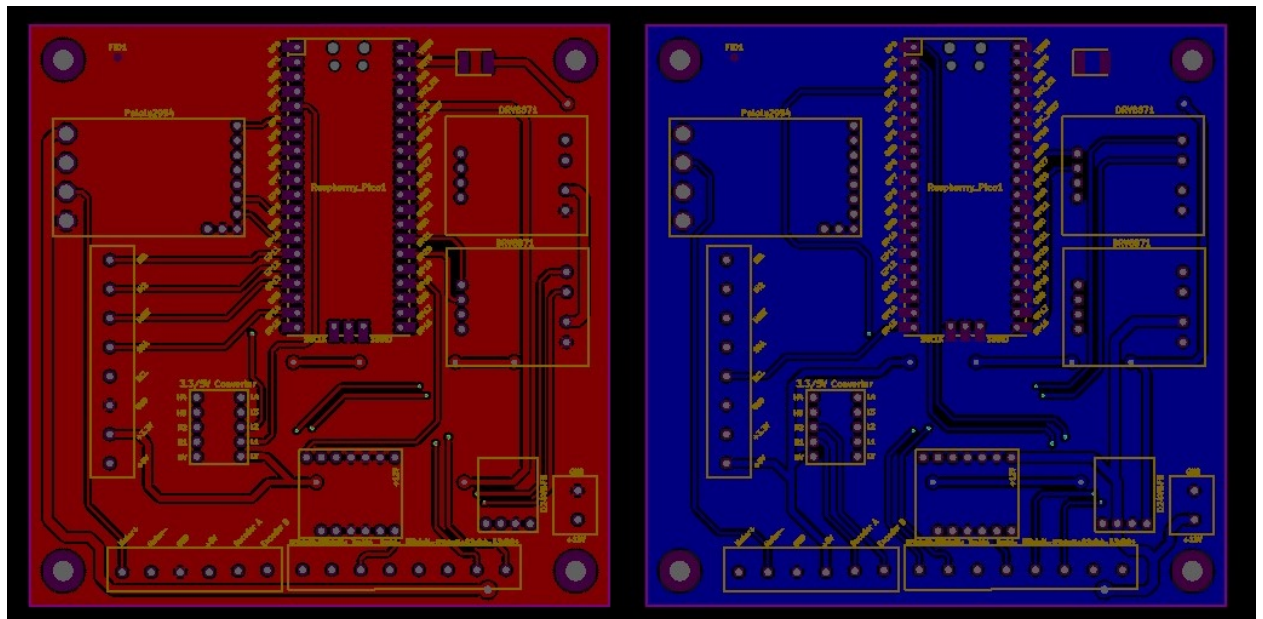
lub podwyższające (ang. step-up) napięcie. Ustandaryzowanie zakresu napięcia wejściowego do płytek PCB umożliwiło znaczne uproszczenie sekcji dystrybucji zasilania. Całość systemu zasilana jest za pomocą jednej wtyczki połączonej z instalacją pojazdu, a rozprowadzanie napięcia do poszczególnych płytek odbywa się poprzez skrzynkę bezpiecznikową.



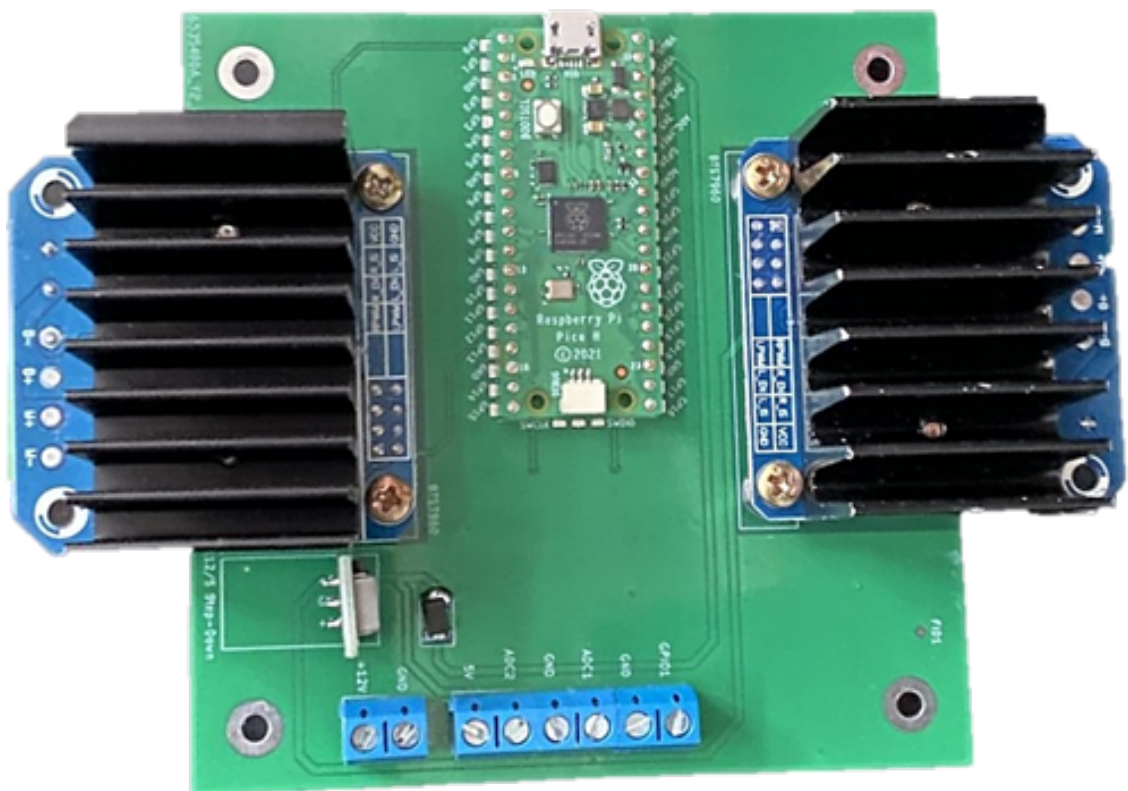
Rysunek 4.8: Schemat elektryczny wykonany w programie KiCad

Opracowany schemat połączeń posłużył jako podstawa do projektowania tras ścieżek na płycie drukowanej (Rys. 4.9). Ścieżki prowadzono zgodnie z ogólnie przyjętymi dobrymi praktykami oraz zgodnie z możliwościami produkcyjnymi firmy zewnętrznej, która wykonywała płytki PCB. Wykonane płytki PCB poddano etapowi lutowania oraz sprawdzenia elektrycznego. Po pomyślnej weryfikacji funkcjonalnej nastąpiło podłączenie elementów wykonawczych i czujników, a także opracowanie prostych programów testujących poprawność działania systemu. Wszelkie napotkane nieprawidłowości i problemy zostały usunięte. Testy funkcjonalne objęły kalibrację czujników, weryfikację komunikacji z modułami peryferyjnymi oraz ocenę czasów odpowiedzi układu.

Finalnie, po pozytywnej kontroli jakości, gotowe płytki PCB (Rys. 4.10) umieszczono w obudowach o stopniu ochrony IP65, zapewniającymi wodoodporność, i zamocowano do konstrukcji nośnej. Do każdej z puszek zostały doprowadzone właściwe przewody od elementów wykonawczych oraz czujników. Przewody, które nie są odporne na działanie warunków atmosferycznych, zostały dodatkowo zabezpieczone karbowaną rurą elektroinstalacyjną.



Rysunek 4.9: Rozmieszczone elementy elektroniczne oraz poprowadzone ścieżki, wykonane w programie KiCad



Rysunek 4.10: Gotowa płytk sterownicza do kontroli siłowników

Wszystkie zaprojektowane elementy pomiarowe i wykonawcze zintegrowano na ramie nośnej wykonanej zgodnie z dokumentacją konstrukcyjną (Rys. 4.11). Zamontowano kompletny układ wodny, obejmujący filtry, pompy, odcinki elastycznych przewodów oraz zawory odcinające

i regulacyjne. Połączenia wykonano przewodami o średnicach dobranych do projektowych natężeń przepływu, przy zachowaniu kierunków przepływu. Węzły hydrauliczne uszczelniono zgodnie z dobrymi praktykami montażowymi.

Część zasilającą zrealizowano w postaci skrzynki rozdzielczej, w której każdy obwód urządzeń pomiarowych i wykonawczych zabezpieczono indywidualnymi bezpiecznikami dobranymi do obciążenia. Okablowanie poprowadzono w wydzielonych wiązkach, wewnątrz karbowanych rur elektroinstalacyjnych. Po zakończeniu montażu zweryfikowano poprawność połączeń mechanicznych, hydraulicznych i elektrycznych, przygotowując układ do procedury uruchomieniowej.

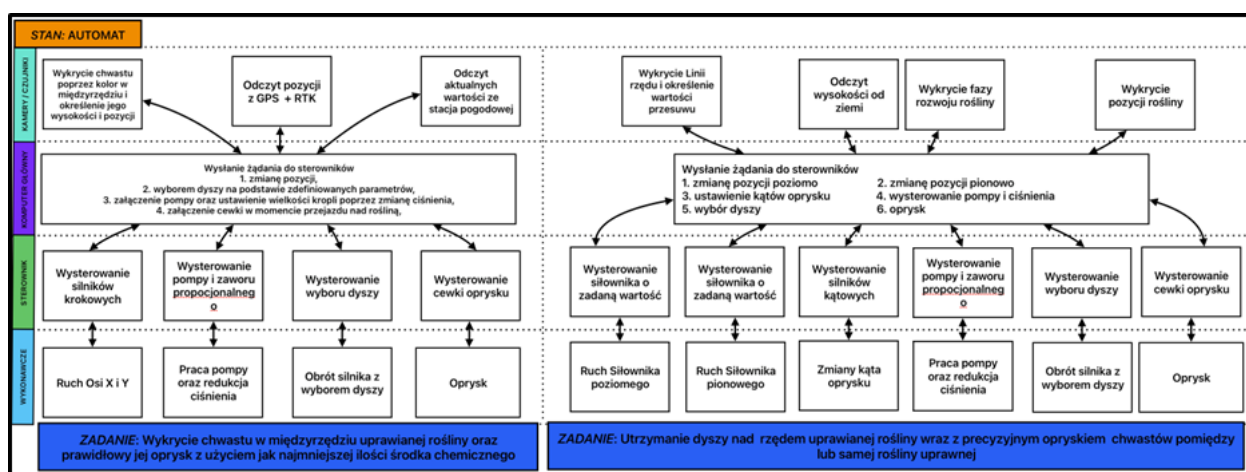


Rysunek 4.11: Model badawczy zbudowany w ramach pracy doktorskiej

4.4 Algorytmy sterujące i rozwiązania wizyjne

W każdym z zaprojektowanych modułów zaimplementowano własny, wewnętrzny algorytm sterowania. Algorytmy oparto na maszynie stanów — jest to model programowania opisujący zachowanie systemu jako zbiór określonych stanów oraz reguł przejść pomiędzy nimi, wywołanych przez zdarzenia lub spełnienie określonych warunków (Rys. 4.12). W każdym momencie pracy program sterujący znajduje się w jednym, ściśle określonym stanie, który definiuje jego bieżące właściwości oraz dostępne działania.

Aktualne informacje o stanie pracy i parametrach eksploatacyjnych są przekazywane za pośrednictwem interfejsu USB, w przyszłych zmianach przez magistralę CAN do komputera zarządzającego. Sprawuje on nadzór nad poszczególnymi modułami oraz podejmuje decyzje dotyczące trybów ich pracy. Ponadto w obrębie komputera sterującego zaimplementowano zaawansowane algorytmy wizyjne, które wspomagają procesy decyzyjne. Najbardziej rozbudowanym komponentem systemu jest monitor stanu operacyjnego całego urządzenia, zwłaszcza w pełnej konfiguracji z zainstalowanymi wszystkimi modułami.



Rysunek 4.12: Schemat działania dla stanu automatycznego

Pierwszym systemem wizyjnym, który można zintegrować z konstrukcją opracowaną w ramach niniejszej pracy doktorskiej, jest układ do wykrywania rzędów roślin uprawnych (Rys. 4.13). Zadaniem układu jest wykrycie na obrazie z kamery rzędów oraz określenie odchylenia od wyznaczonej trajektorii, w tym wypadku środka międzyrzędzia. W Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym opracowano rozwiązanie oparte na detekcji koloru dwóch sąsiadujących rzędów. Kamera została umieszczona dokładnie na środku międzyrzędzia, a każde wychylenie w lewo lub w prawo generuje wartość odchyłki wyrażonej w jednostce odległości, która trafia do siłownika korygującego poprzeczne położenie.

Algorytm bazujący na kolorze wymaga znacznie mniejszej mocy obliczeniowej niż systemy

oparte na sieciach neuronowych, lecz traci skuteczność przy silnym zachwaszczeniu, zwłaszcza gdy chwasty mają barwę taką samą jak rośliny uprawne. Rozwiązanie sprawdza się w pielnikach mechanicznych pracujących z prędkościami powyżej 10 km h^{-1} , gdzie wężykowanie ciągnika, czyli jazda od jednej do drugiej krawędzi międzyrzędzia, mogłoby uszkodzić rośliny. Poprzeczna korekta realizowana przez siłownik utrzymuje sekcję roboczą w środku międzyrzędzia. W ramach realizowanego doktoratu taki system wizyjny stabilizuje położenie rozpylacza, utrzymując go idealnie nad środkiem rzędu mimo wężykowania pojazdu. Pozwala to prowadzić oprysk w możliwie najwęższym pasie, ograniczając straty cieczy roboczej i minimalizując negatywny wpływ na środowisko.

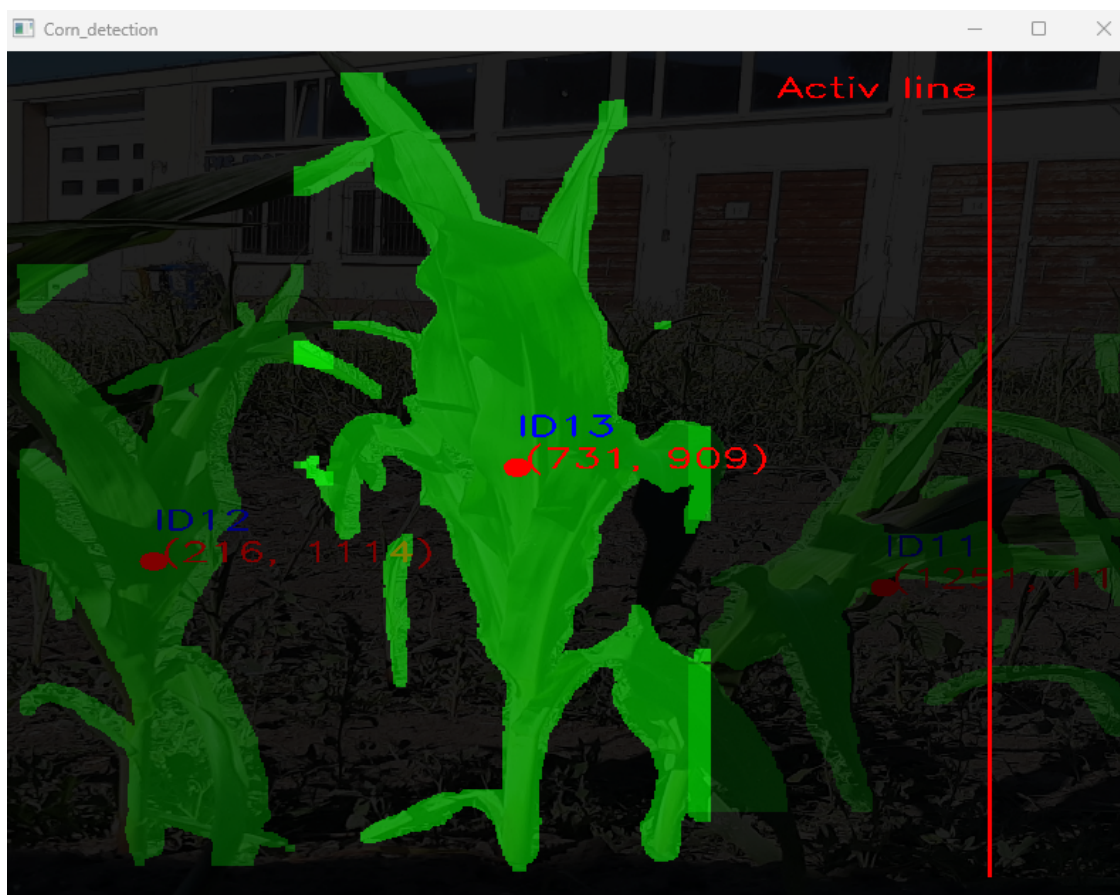


Rysunek 4.13: Widok ekranu z działającego oprogramowania analizującego rzędy roślin

Drugim rozwiązaniem wizyjnym, którego integrację podjęto, jest system detekcji rośliny uprawnej (Rys. 4.14), oparty na algorytmach głębokiego uczenia. Algorytm wytrenowano na podstawie zbioru danych, w którym znajdują się zdjęcia roślin w różnych warunkach oświetleniowych i atmosferycznych, oraz oznaczono każdą roślinę uprawną, w tym wypadku kukurydzę. W prezentowanym przypadku wykorzystano rozwiązanie firmy Ultralytics, bazujące na bibliotece YOLOv8.

System wizyjny wykorzystuje kamerę RGB ustawioną bocznie względem osi poruszającego się pojazdu, co daje możliwość wykrycia każdej rośliny w rzędzie. Wykryta roślina uprawna poddawana jest segmentacji, z których następnie wyznaczany jest środek geometryczny. Na końcu poruszającej się rośliny na obrazie znajduje się pionowa linia, która powoduje wysłanie komendy załączającej elektrozawór w momencie przejścia przez nią środka danej rośliny. Aby kompensować opóźnienia wynikające z przetwarzania sygnałów, komunikacji i czasów otwarcia elektrozaworu, kamera musi być zamontowana w określonej odległości

przed rozpylaczem. Dodatkowo, dla zapewnienia wysokiej skuteczności działania, niezbędne jest precyzyjne monitorowanie przebytej odległości oraz prędkości pojazdu, pozwalając na rzeczywiste przewidywanie odległości od kolejnych roślin.

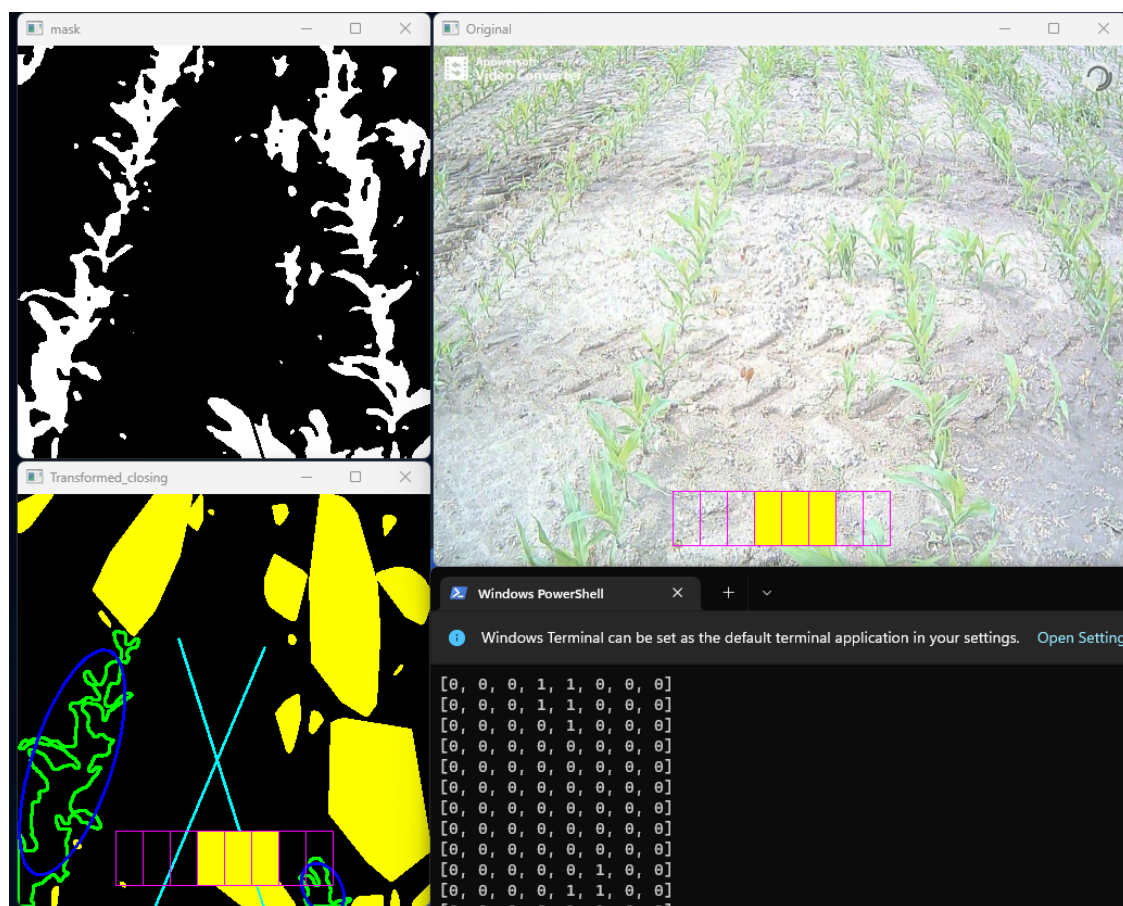


Rysunek 4.14: Widok ekranu z działającego oprogramowania analizującego międzyrzędzie

Trzecim rozwiązaniem, które poddano wstępnym próbom integracyjnym, jest oparte na detekcji roślin w przestrzeni międzyrzędzia przy użyciu analizy barwy (Rys. 4.15). Rozwiązanie wykorzystuje kamerę RGB zamontowaną pomiędzy rzędami roślin na wysokości, na której obraz obejmuje całe międzyrzędzie oraz rzędy rośliny uprawnej. W pierwszym etapie algorytm, na podstawie obrazu z kamery RGB, identyfikuje linie rzędów uprawnych, pozwala to na precyzyjne określenie szerokości międzyrzędzia oraz eliminację błędnych klasyfikacji rośliny uprawnej jako chwast. Wyznaczenie obszaru wykluczenia następuje poprzez wykrycie wszystkich zielonych punktów obrazu w międzyrzędziu. Dla uproszczenia procesu przestrzeń podzielono na osiem segmentów w dolnej części kadru, gdy wykryty chwast pojawi się w danym segmencie, segment jest aktywowany, a odpowiednia informacja przekazywana jest do elementu wykonawczego, który powoduje przejazd rozpylacza do odpowiedniego fragmentu.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wybrane rozwiązania, z którymi podjęto próbę integracji. Dzięki modułowej budowie zaprojektowanej konstrukcji i jej możliwościom rucho-

wym istnieje możliwość zastosowania znacznie szerszego spektrum systemów wspomagających, w tym zaawansowanych układów wizyjnych. Możliwe jest wykorzystanie kamer multispektralnych do wykrywania objawów chorób roślin albo sygnalizacji obecności szkodników, prowadząc przy tym oprysk selektywny. Dodatkowo możliwa byłaby współpraca z kamerami pomiarem głębi, dzięki czemu możliwe byłoby utrzymywanie stałej wysokości rozpylacza nad łanem uprawianej rośliny niezależnie od zmieniającej się wysokości. Zaprojektowane rozwiązanie w swoim założeniu ma stać się platformą wykonawczą dla najnowszych rozwiązań ograniczających zużycie środków ochrony roślin bądź zwiększających ich skuteczność.



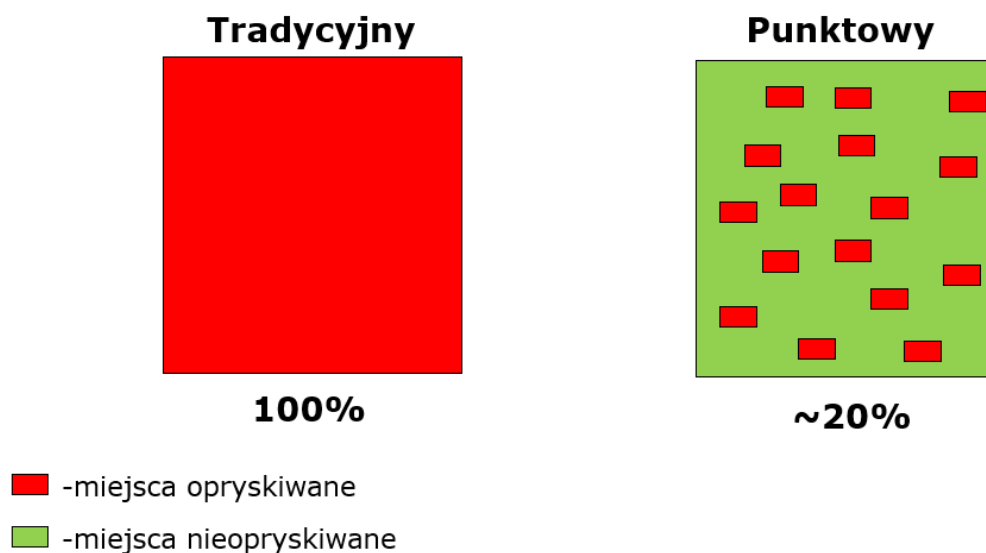
Rysunek 4.15: Widok ekranu z działającego oprogramowania wykrywającego roślinę uprawną

Używanie systemów wspomagających oprysk ma kluczowe znaczenie dla ograniczenia zużycia środków ochrony roślin. Oprysk całopowierzchniowy, choć przy prawidłowej aplikacji bywa bardzo skuteczny, nieuchronnie obejmuje również miejsca i rośliny, które nie wymagają zabiegu. W efekcie rośnie koszt zabiegu oraz obciążenie środowiska.

Zastosowanie systemów wizyjnych współpracujących z mechatronicznymi rozpylaczami pozwala kierować środek dokładnie tam, gdzie jest to wymagane. Systemy wizyjne identyfikujące np. chwasty oraz sterowane elektronicznie sekcje otwierają się tylko nad wykrytym obszarem. W przypadku herbicydów tzw. oprysk selektywny (spot spraying) (Rys. 4.16)

może znacząco ograniczyć zużycie środka, w sprzyjających warunkach nawet do około 80%. Rzeczywista skala oszczędności zależy jednak od stopnia i rozmieszczenia zachwaszczenia — im mniejszy udział powierzchni faktycznie porośniętej chwastami, tym większa potencjalna redukcja dawek [102, 118].

Oprysk tylko w miejscu wystąpienia chwastu

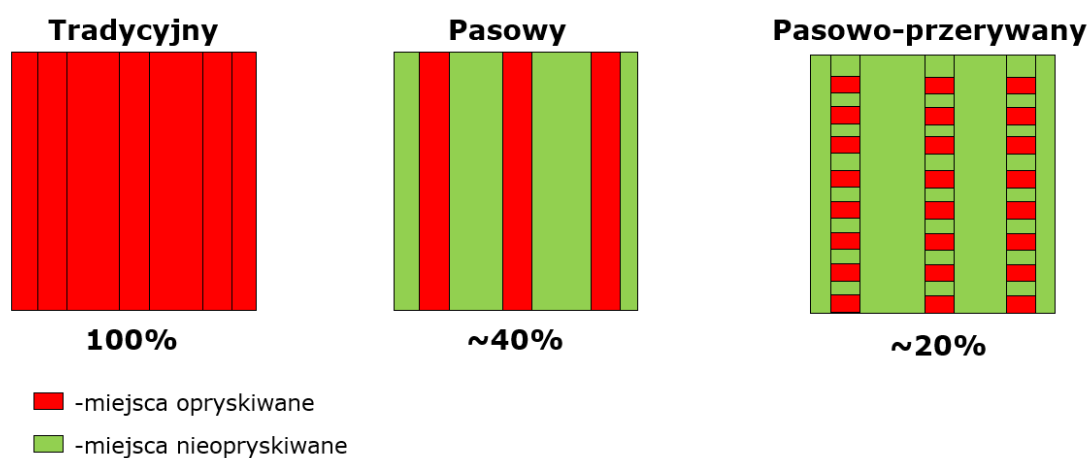


Rysunek 4.16: Oszczędności herbicydu wynikające z używania systemów wizyjnych w przypadku kukurydzy uprawianej na ziarno

W przypadku stosowania systemów wizyjnych przy opryskach bezpośrednio na roślinę uprawną możliwe jest prowadzenie zabiegów pasowych lub pasowo-przerywanych (Rys. 4.17). Oprysk pasowy polega na podawaniu środka w wąskich pasach nad rzędem roślin, utrzymując rozpylacze nad rzędem niezależnie od ruchów bocznych pojazdu. W porównaniu z opryskiem całopowierzchniowym często pozwala zużyć istotnie mniej preparatu, nawet o około połowę. Zależy to między innymi od szerokości i rozstawy rzędów. Im szersze międzyrzędzia, tym większa część powierzchni pozostaje nieopryskana, a więc i oszczędności są większe. Oprysk pasowo-przerywany to oprysk pasowy, w którym dodatkowo przerywa się podawanie cieczy pomiędzy kolejnymi roślinami w rzędzie. System wizyjny lokalizuje rośliny, a sterowanie elektroniczne włącza rozpylacz tylko nad nimi. Taki tryb zwykle przynosi dodatkowe oszczędności względem oprysku pasowego ciągłego, proporcjonalne do długości przerw między roślinami [119–121]. Kolejnym etapem rozwoju jest aplikacja selektywna na poziomie pojedynczej rośliny. Zaimplementowane algorytmy wizyjne wykrywają objawy porażenia lub obecność szkodników i uruchamiają oprysk wyłącznie nad roślinami, na których zidentyfikowano nieprawidłowości. Dzięki temu środek trafia tam, gdzie jest potrzebny, co ogranicza zużycie preparatu i wpływ

na środowisko [122].

Na przykładzie kukurydzy uprawianej na ziarno:



Rysunek 4.17: Oszczędności pestycydów wynikające z używania systemów wizyjnych w przypadku kukurydzy uprawianej na ziarno

Aby w pełni wykorzystać potencjał systemów wizyjnych, kluczowe są precyzyjne pozycjonowanie i synchronizacja układu mechatronicznego (z wykorzystaniem m.in. enkoderów i systemów pozycjonowania GNSS/RTK) oraz kompensacja opóźnień między kamerą a rozpylaczem. Niezbędna jest również staranna kalibracja dawek, prędkości przepływu i reakcji zaworów, tak aby krótkie impulsy były równomierne [118]. Kolejnym ważnym elementem jest zapewnienie właściwych warunków obrazowania, między innymi oświetlenie, czysta optyka oraz regularna walidacja algorytmów pod kątem fałszywych trafień i pominięć [123].

5. Wyniki i analiza badań

5.1 Badanie laboratoryjne - równomierność oprysku

Podczas prowadzenia badań wykorzystywano urządzenie do badania równomierności oprysku (Rys. 5.1), które jest autorską konstrukcją Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym. Urządzenie o wymiarach stołu 250 cm szerokości i 200 cm długości składa się z ruchomej ramy górnej zdolnej do przemieszczeń w płaszczyznach poziomej i pionowej w zakresie 140 cm w poziomie i 120 cm w pionie, na której montowane są rozpylacze. Ciecz robocza doprowadzana jest do badanych rozpylaczy poprzez układ hydrauliczny składający się z elektrycznej pompy, zespołu filtrów oraz reduktora ciśnienia.



Rysunek 5.1: Urządzenie do badania równomierności oprysku

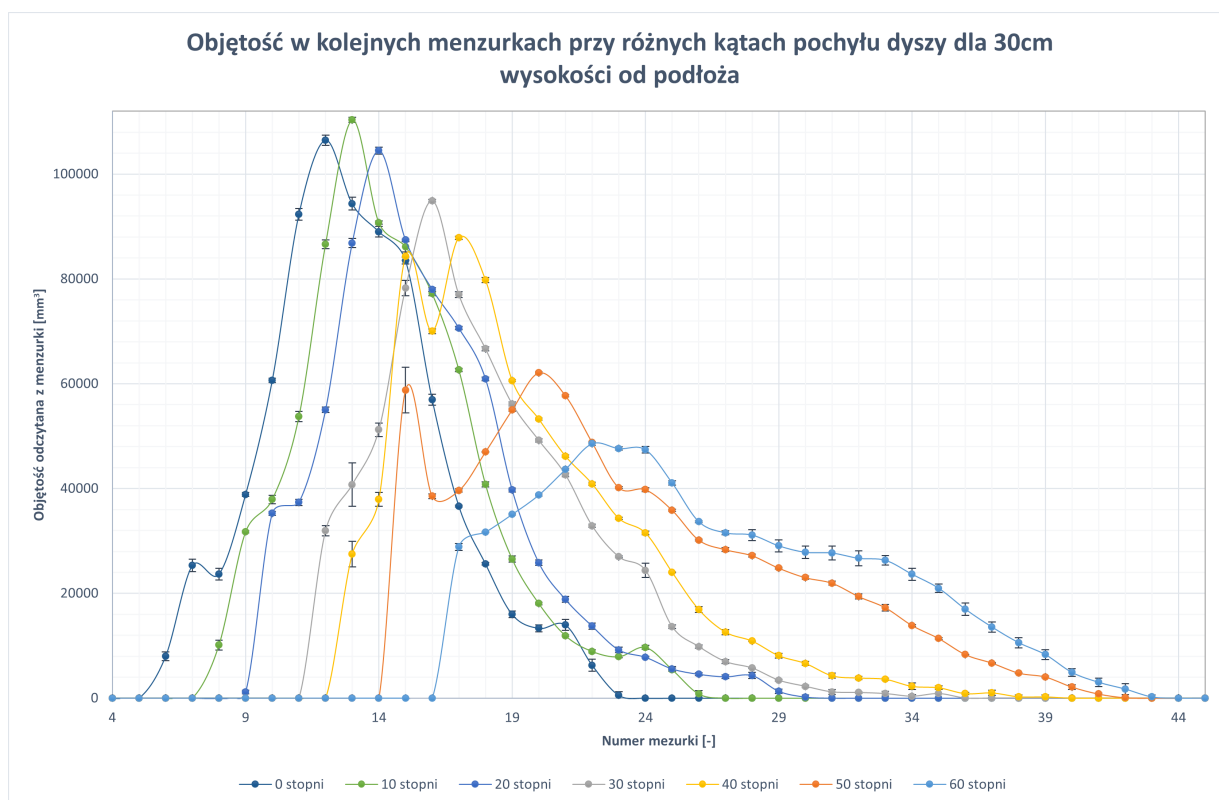
Oprysk odbywa się nad wyprofilowanym stołem rowkowym, który grawitacyjnie doprowadzają ciecz opryskową do menzurki. Po uruchomieniu badania menzurki umieszczone na osi obrotowej zbliżają się do stołu rowkowego i po zadanim czasie wracają do pionu. Następnie objętość zgromadzonej cieczy rejestrowana jest równocześnie w kolejno dwóch menzurkach za pomocą pary czujników ultradźwiękowych zamontowanych na wspólnym wózku linowym. Po odczycie menzurki obracają się o kąt większy niż 90 stopni od pozycji wyjściowej,

a woda zostaje grawitacyjnie odprowadzona do rynny i zawracana do zbiornika zasilającego, ograniczając zużycie do minimum wykorzystując wodę ponownie. Dane eksperymentalne są automatycznie zapisywane w arkuszu programu Microsoft Excel, obejmując zarówno surowe wyniki oraz generowany na ich podstawie raport podsumowujący.

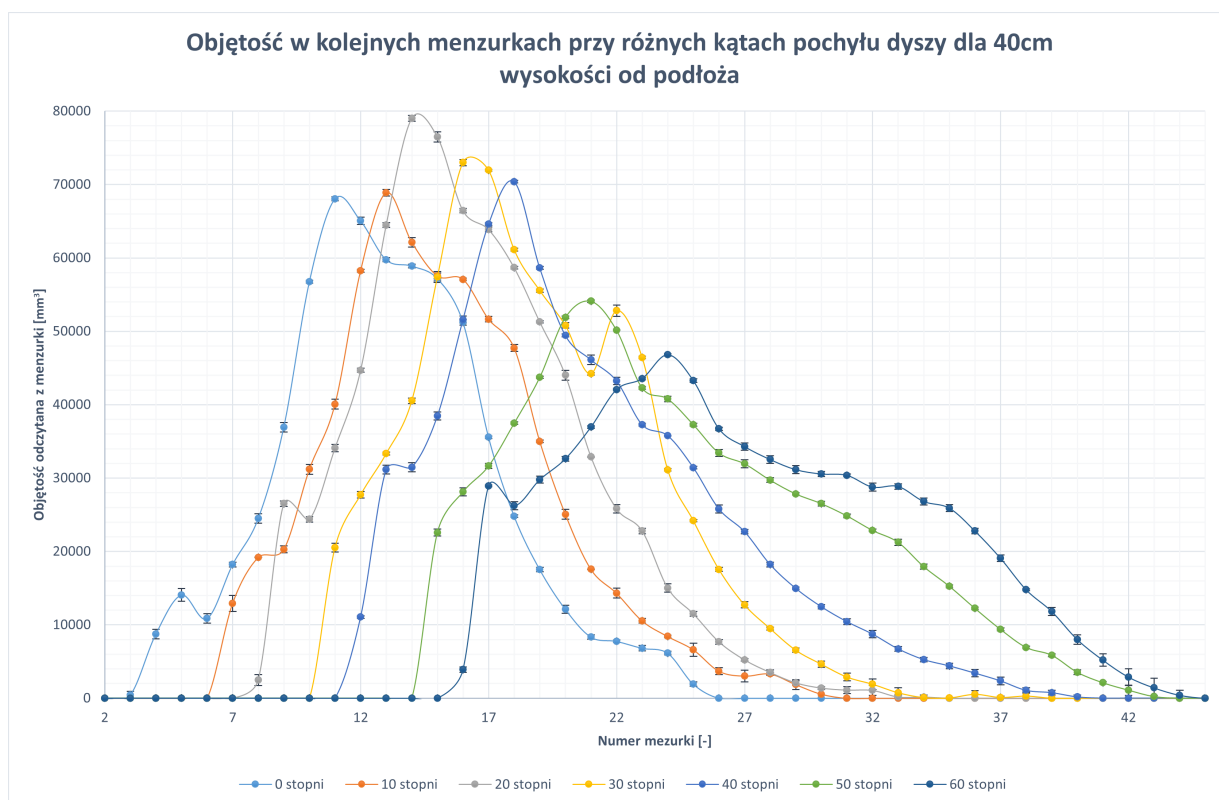
W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej opracowano mechatroniczny rozpylacz o zmiennej charakterystyce oprysku, który poprzez regulację kątów ustawienia rozpylaczy wraz z systemami wspomagającymi dąży do minimalizacji zużycia środków ochrony roślin. W celu oceny wpływu orientacji rozpylaczy na równomierność oprysku, wykorzystano stół rowkowy, na którym przeprowadzono badania dla różnych wartości kątów. Próby laboratoryjne polegały na stopniowym odchyleniu rozpylacza co 10° względem położenia referencyjnego czyli 0° rozpylacza ustawionego pionowo. Badania były realizowane przy stałym ciśnieniu roboczym 2 bar oraz trzech wysokościach instalacji rozpylacza nad stołem rowkowym. Dla każdego ustawienia wysokości i kąta próbę powtarzano trzykrotnie. Badania zostały przeprowadzone w zamkniętej hali z wyłączonym systemem wentylacji, tak aby ograniczyć ruch powietrza, który mógłby wpłynąć na wyniki pomiaru. Uzyskane wyniki pozwoliły na ilościową ocenę zmian w równomierności oprysku w funkcji zmian kąta oraz wysokości nad powierzchnią docelową. Dodatkowo zebrane dane umożliwiły analizę asymetrii rozkładu, wartości maksymalnej oraz szerokości strefy oprysku.

Wykres (Rys. 5.2, 5.3, 5.4) przedstawia wyniki eksperymentu przeprowadzonego na stole rowkowym. Rozpylacz umieszczono odpowiednio 30, 40, 50 cm nad powierzchnią stołu i odchylano w prawą stronę od pozycji referencyjnej o kolejne kąty pochylenia w przedziale od 0° do 60° . Zaprezentowano poprzeczny rozkład strumienia dla tych ustawień, opisany objętościami cieczy zebranymi w kolejnych menzurkach. Wraz ze wzrostem kąta nachylenia rozpylacza woda pojawia się w coraz bardziej oddalonych menzurkach. Efekt ten jest zgodny z oczekiwaniami, gdzie wprowadzenie składowej poziomej poprzez pochylenie rozpylacza do prędkości wylotowej cieczy przesunęła miejsce opadu strumienia w kierunku odchylenia rozpylacza.

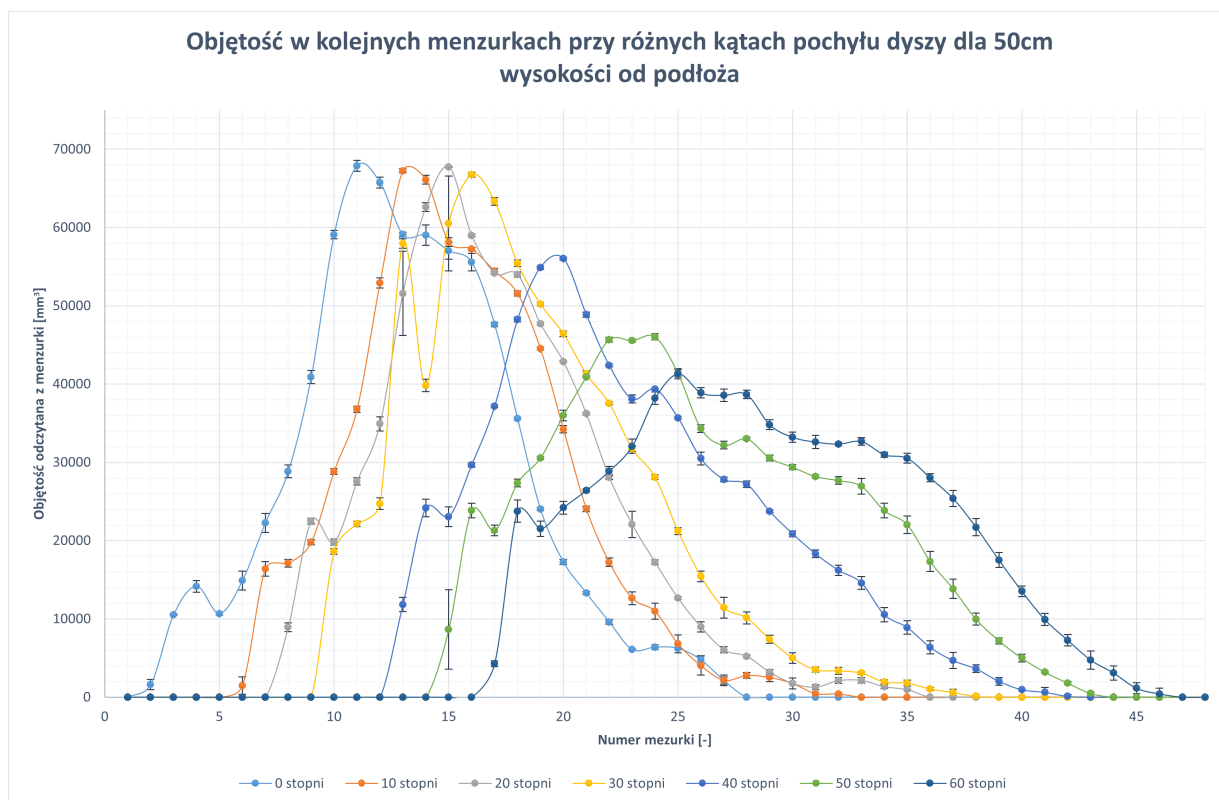
Zebrane dane poddano szczegółowej analizie, na podstawie której określono zmienność wybranych parametrów. Na pierwszym wykresie szczegółowym (Rys. 5.5) przedstawiono zależność szerokości oprysku od kąta pochylenia. Widoczny jest liniowy wzrost szerokości wraz ze zwiększaniem kąta pochylenia. Wynika to z faktu, że krople po jednej stronie lecą dłużej ze względu na pojawienie się składowej poziomej prędkości, natomiast po przeciwległej stronie trajektoria lotu kropli jest krótsza. Linie trendu dla 30 cm wysokości charakteryzują się większą dynamiką zmian niż w przypadku pozostałych wysokości.



Rysunek 5.2: Wykres przedstawiający wynik pomiaru rozkładu poprzecznego w zależności od kąta pochylenia dla 30 cm wysokości rozpylacza



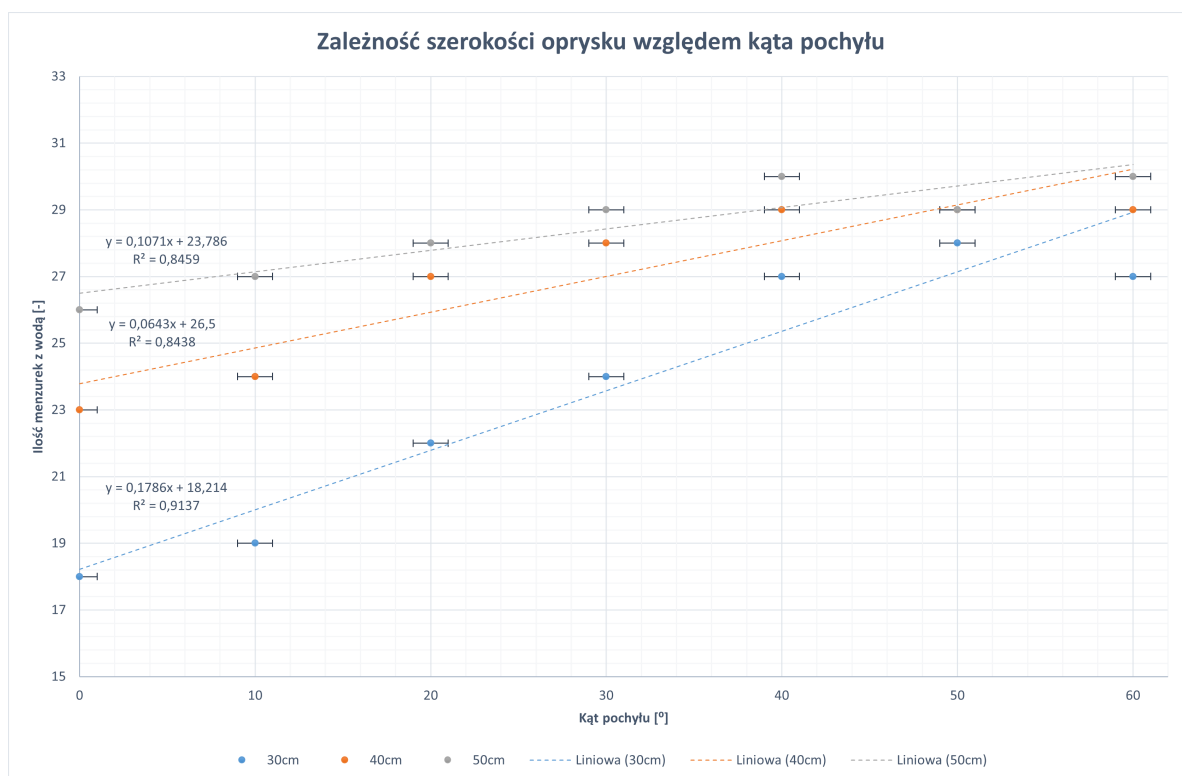
Rysunek 5.3: Wykres przedstawiający wynik pomiaru rozkładu poprzecznego w zależności od kąta pochylenia dla 40 cm wysokości rozpylacza



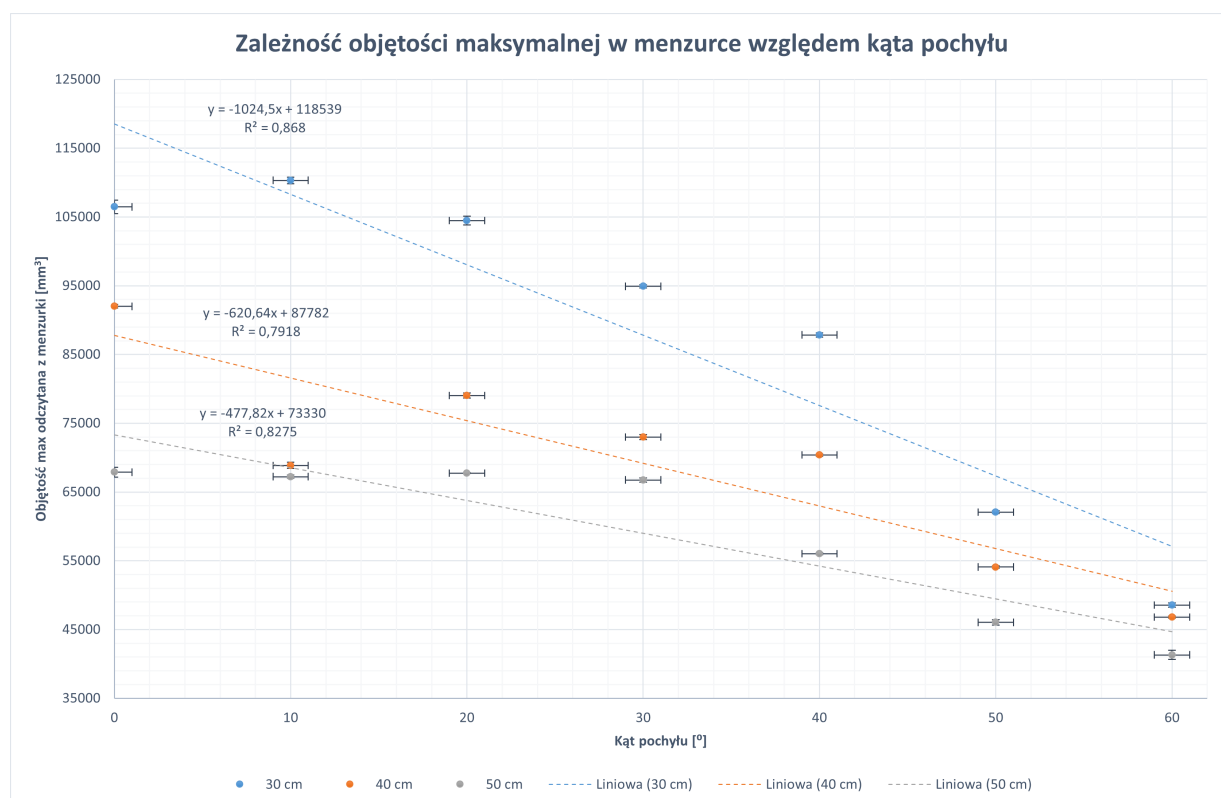
Rysunek 5.4: Wykres przedstawiający wynik pomiaru rozkładu poprzecznego w zależności od kąta pochylenia dla 50 cm wysokości rozpylacza

Drugi wykres szczegółowy (Rys. 5.6) ilustruje zmiany objętości cieczy w menzurce o największej pojemności w zależności od kąta pochylenia. Dla wszystkich badanych wysokości obserwuje się spadek objętości wraz ze wzrostem kąta pochylenia. W przypadku wysokości 30 cm linia trendu wskazuje na wyraźnie większą dynamikę zmian w porównaniu z wysokościami 40 cm i 50 cm. Spadek związany jest z zwiększeniem szerokości oprysku i podziałem objętości cieczy na większą ilość menzurzek.

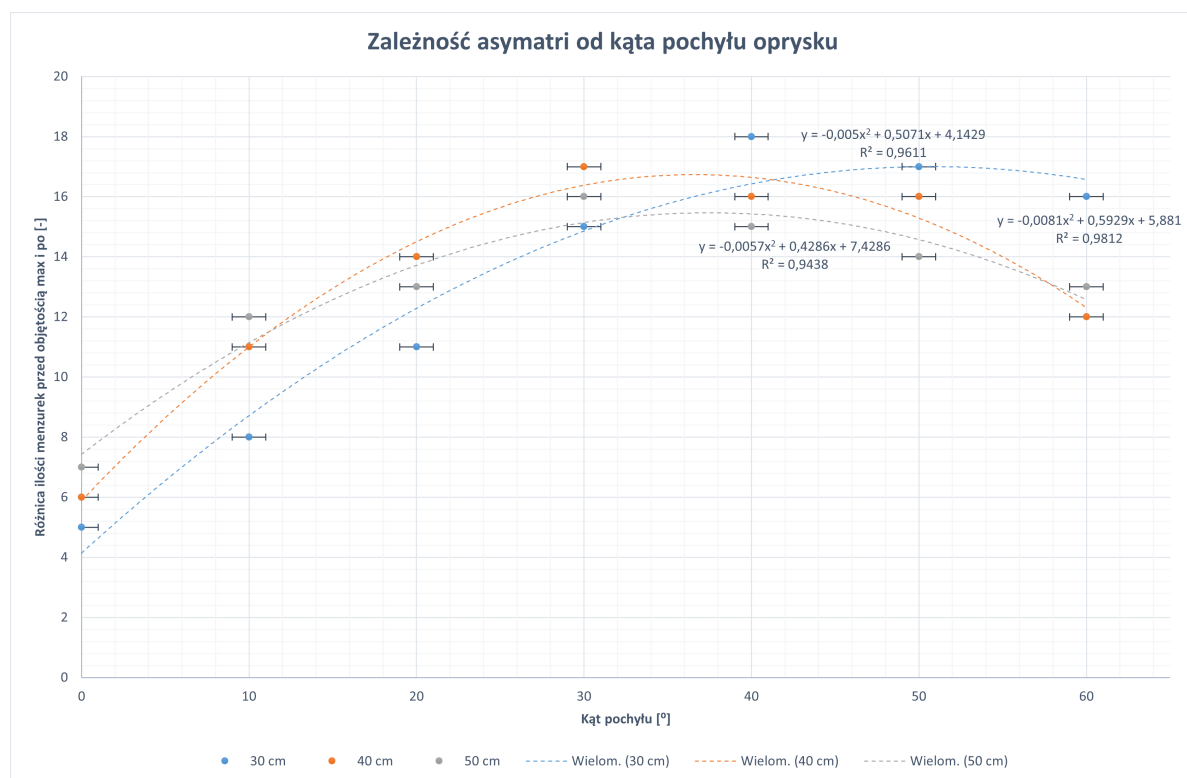
Ostatni szczegółowy wykres (Rys. 5.7) ilustruje zmiany asymetrii, definiowanej jako różnica liczby menzurzek zawierających wodę przed oraz po menzurce o maksymalnej objętości. W początkowej fazie obserwuje się wzrost wartości asymetrii, natomiast w zakresie kątów 30–40° następuje jej spadek, prowadzący do wyrównania liczby menzurzek po obu stronach menzurki o największej objętości. Linia trendu dla wysokości 30 cm wskazuje na łagodniejszy charakter tego spadku w porównaniu z bardziej stromym obniżeniem obserwowanym dla wysokości 40 cm i 50 cm. W analizowanym przypadku linia trendu odpowiada funkcji kwadratowej.



Rysunek 5.5: Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności szerokości oprysku względem kąta pochylenia rozpylacza



Rysunek 5.6: Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności objętości maksymalnej w menzurce względem kąta pochylenia rozpylacza



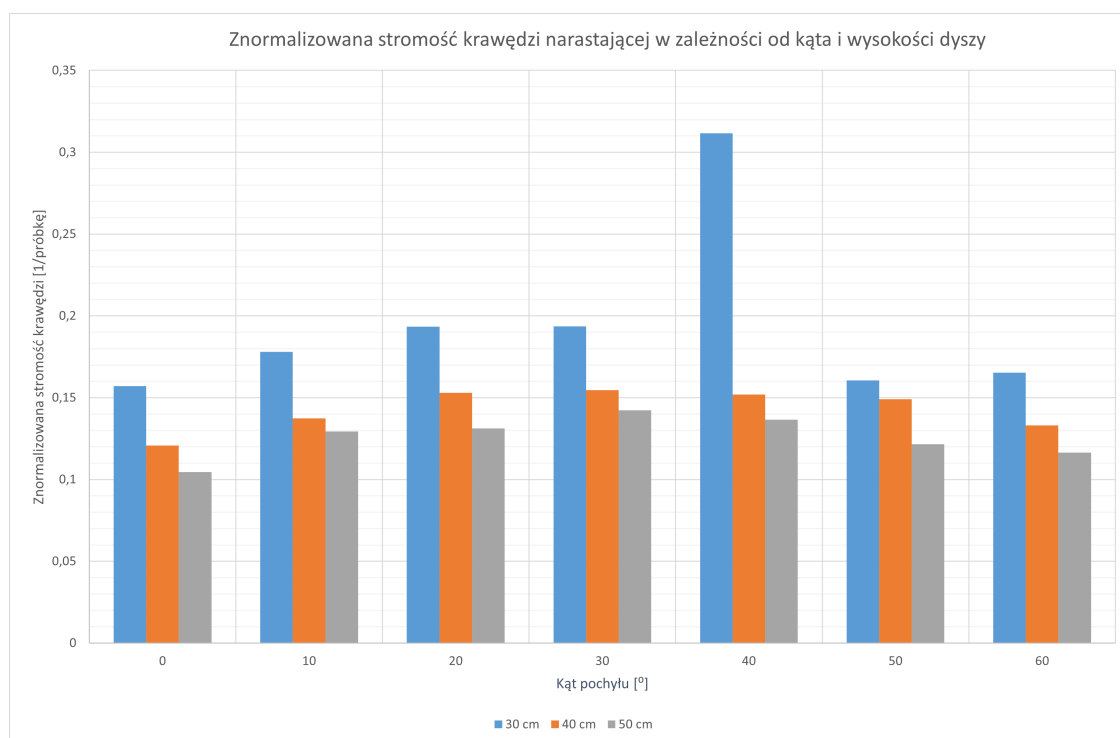
Rysunek 5.7: Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności asymetrii względem kąta pochylenia rozpylacza

Zebrane wyniki badań przeanalizowano pod kątem stromości narastania i opadania. Ze względu na niesymetryczny rozkład cieczy zdecydowano się przedstawić pod postaciami dwóch jednostronnych współczynników stromości: SL (5.1) i SR (5.2). Dla rozróżnienia, SL zdefiniowano jako znormalizowany wskaźnik stromości krawędzi narastającej, natomiast SR jako znormalizowany wskaźnik stromości krawędzi opadającej. Najpierw wyznacza się wartość maksymalną (maksimum). Następnie po obu stronach piku wskazuje się dwa charakterystyczne punkty: miejsce, w którym profil osiąga 10% maksimum, oraz miejsce, w którym przekracza 90% maksimum. Zdecydowano się stosować znormalizowane wskaźniki, definiowane jako stosunek wartości 0,8 (wynikającej z przedziału od 10% do 90% maksimum) do różnicy między punktami charakterystycznymi. Zaletami wskaźnika znormalizowanego jest niezależność od wysokości piku i można je bezpośrednio porównywać między różnymi ustawieniami oraz wysokościami rozpylaczy. Wyższe wartości wskaźnika oznaczają bardziej strome krawędzie, a rozbieżność między SL i SR odzwierciedla asymetrię [124].

$$SL = \frac{0,8}{x_{L90} - x_{L10}}, \quad (5.1)$$

$$SR = \frac{0,8}{x_{R90} - x_{R10}}, \quad (5.2)$$

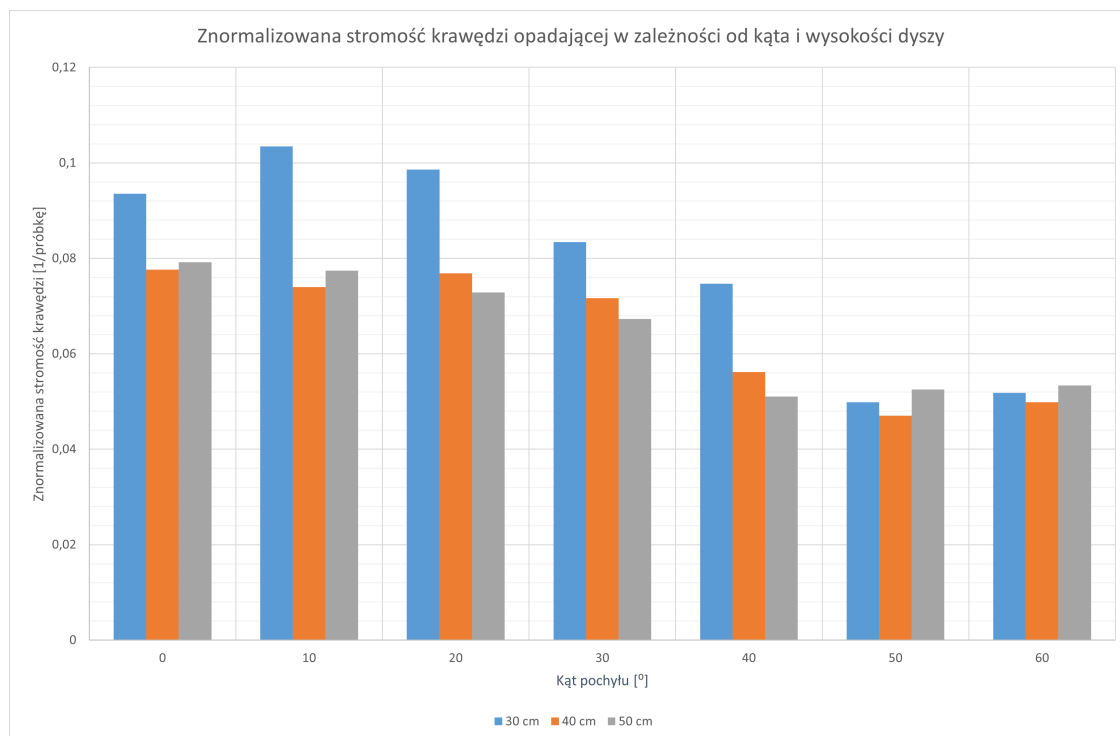
Wykres (Rys. 5.8) przedstawia znormalizowany wskaźnik stromości krawędzi narastającej SL w funkcji kąta pochylenia rozpylacza dla trzech wysokości: 30, 40 i 50 cm. Analiza wskazuje na wpływ wysokości rozpylacza, dla każdego kąta wraz ze wzrostem wysokości obserwuje się zmniejszanie stromości. Zależność od kąta jest najsilniejsza przy wysokości 30 cm, wartość SL rośnie od kątów bliskich 0° do ok. 30° , następnie osiąga wyraźne maksimum w pobliżu 40° , po czym spada do wartości rzędu 0,16 przy kątach 50 – 60° . Dla 40 cm wartości mieszczą się w wąskim przedziale około 0,12–0,155 i wykazują jedynie łagodny szczyt w zakresie 30 – 40° . Natomiast przy wysokości 50 cm przebieg jest najłagodniejszy, SL wzrasta nieznacznie do około 0,14 przy 30 – 40° , a następnie maleje do około 0,11 przy większych kątach.



Rysunek 5.8: Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi narastającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym

Wykres (Rys. 5.9) przedstawia znormalizowaną stromość krawędzi opadającej SR w funkcji kąta pochylenia rozpylacza dla trzech wysokości: 30, 40 i 50 cm. Wyniki wskazują, że podobnie jak w przypadku krawędzi narastającej, wysokość rozpylacza wpływa na wartości wskaźnika. Dla każdego kąta wraz ze wzrostem wysokości obserwuje się zmniejszanie stromości. Największe wartości występują przy wysokości 30 cm, w tym punkcie SR osiąga tam około 0,09 przy kącie 0° do ponad 0,1 w zakresie 10 – 20° , po czym systematycznie maleje, osiągając wartości rzędu 0,045–0,05 dla kątów 50 – 60° . Przy wysokości 40 cm przebieg jest bardziej wyrównany, wartości mieszczą się w przedziale około 0,045–0,078, ze słabym maksimum w zakresie 10 – 20° . Natomiast dla wysokości 50 cm zależność jest najłagodniejsza, wartości

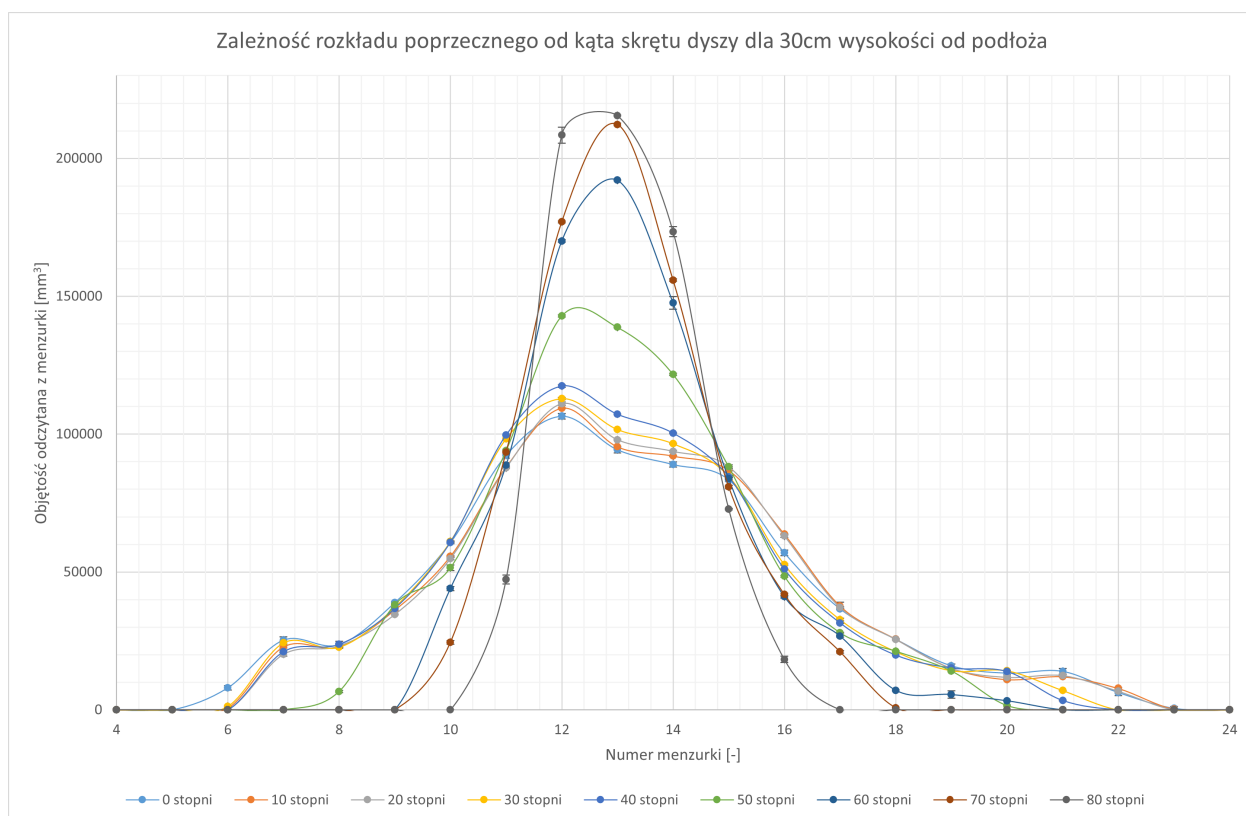
oscylują wokół 0,05–0,077, a przebieg wskazuje na niewielkie zmiany wraz ze wzrostem kąta pochylenia.



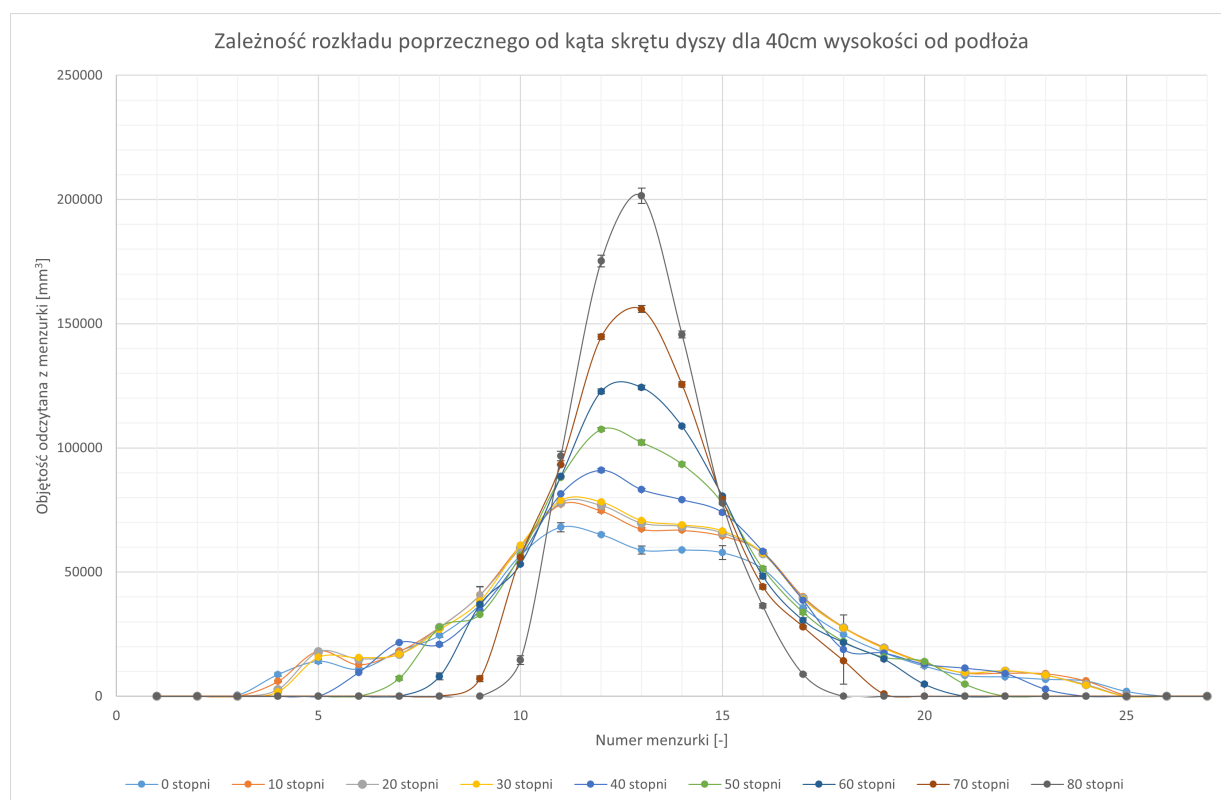
Rysunek 5.9: Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi opadającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym

Kolejnym etapem badań była analiza wpływu skręcenia rozpylacza na parametry oprysku. Skręcanie rozpylacza polega na zmianie orientacji osi wylotu cieczy opryskowej względem kierunku prostopadłego do powierzchni opryskiwanej poprzez obrócenie korpusu rozpylacza wokół własnej osi pionowej zmieniając kierunku i geometrie strumienia cieczy. Podczas badania kąt skręcenia zmieniano co 10° , w zakresie od 0° do 80° , przy trzech różnych wysokościach ustawienia rozpylacza 30 cm, 40 cm oraz 50 cm. Uzyskane wyniki umożliwiły ilościową ocenę zmian równomierności oprysku w funkcji kąta skręcenia rozpylacza oraz wysokości jej umieszczenia nad powierzchnią docelową. Zebrane dane posłużyły do analizy szerokości oprysku oraz maksymalnej objętości cieczy zarejestrowanej w pojedynczej menzurce.

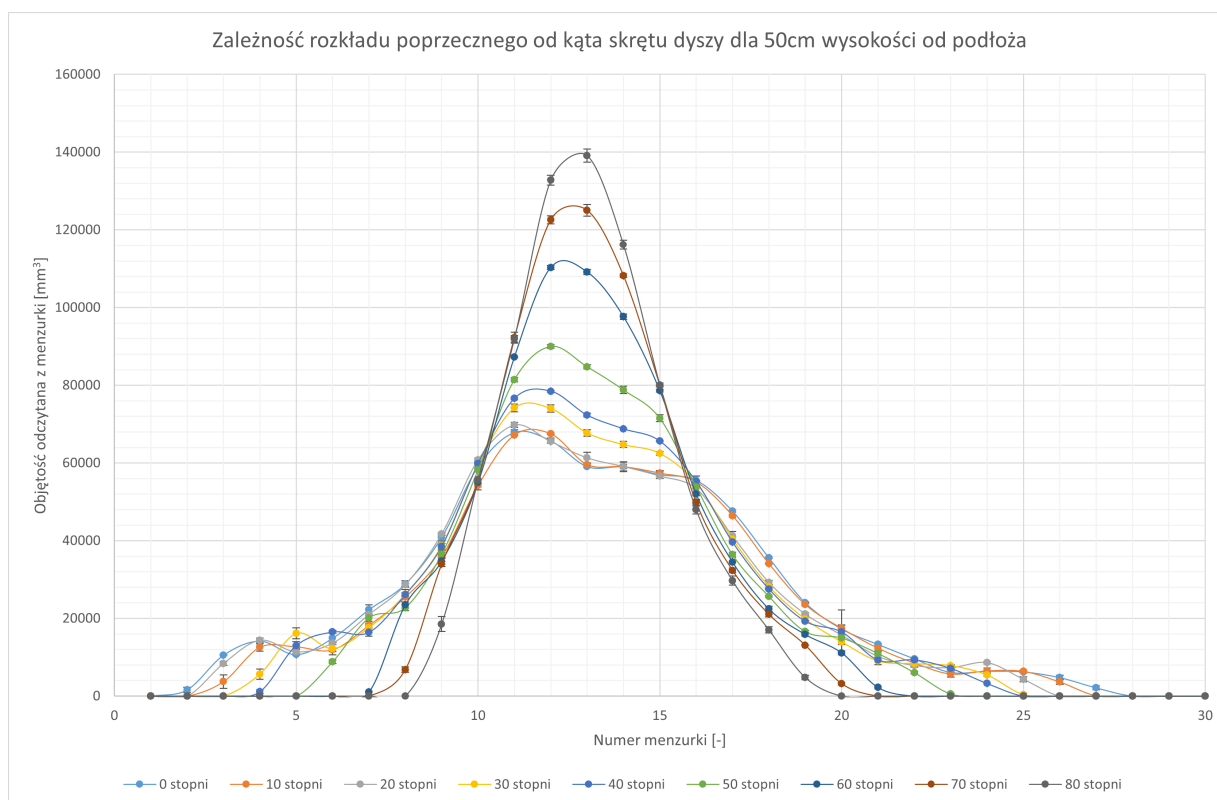
Wykres (Rys. 5.10, 5.11, 5.12) przedstawia wyniki badania przeprowadzonego na stole rowkowym, obejmującego analizę wpływu skręcenia rozpylacza na rozkład poprzeczny oprysku. Dla każdej z badanych wysokości zaobserwowano zawężanie się szerokości pasa oprysku oraz stopniowy wzrost objętości cieczy w menzurkach położonych centralnie. Ponadto wraz ze zwiększaniem kąta skręcenia rozpylacza widoczna jest tendencja do poprawy symetrycznej równomierności rozkładu. Najbardziej wyraźne zmiany parametrów oprysku występują po przekroczeniu kąta skręcenia wynoszącego 40° .



Rysunek 5.10: Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności rozkładu poprzecznego od kąta skręcenia dla 30 cm wysokości rozpylacza od podłoża



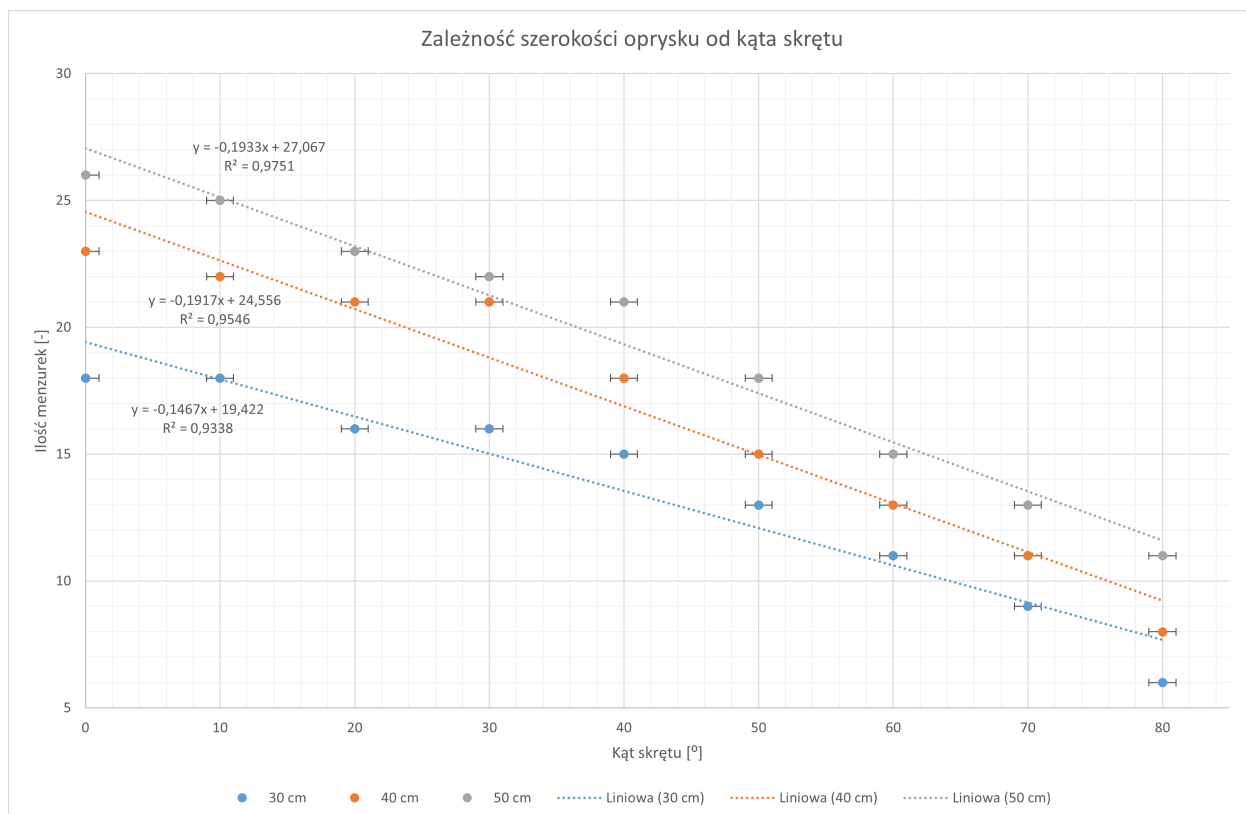
Rysunek 5.11: Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności rozkładu poprzecznego od kąta skręcenia dla 40 cm wysokości rozpylacza od podłoża



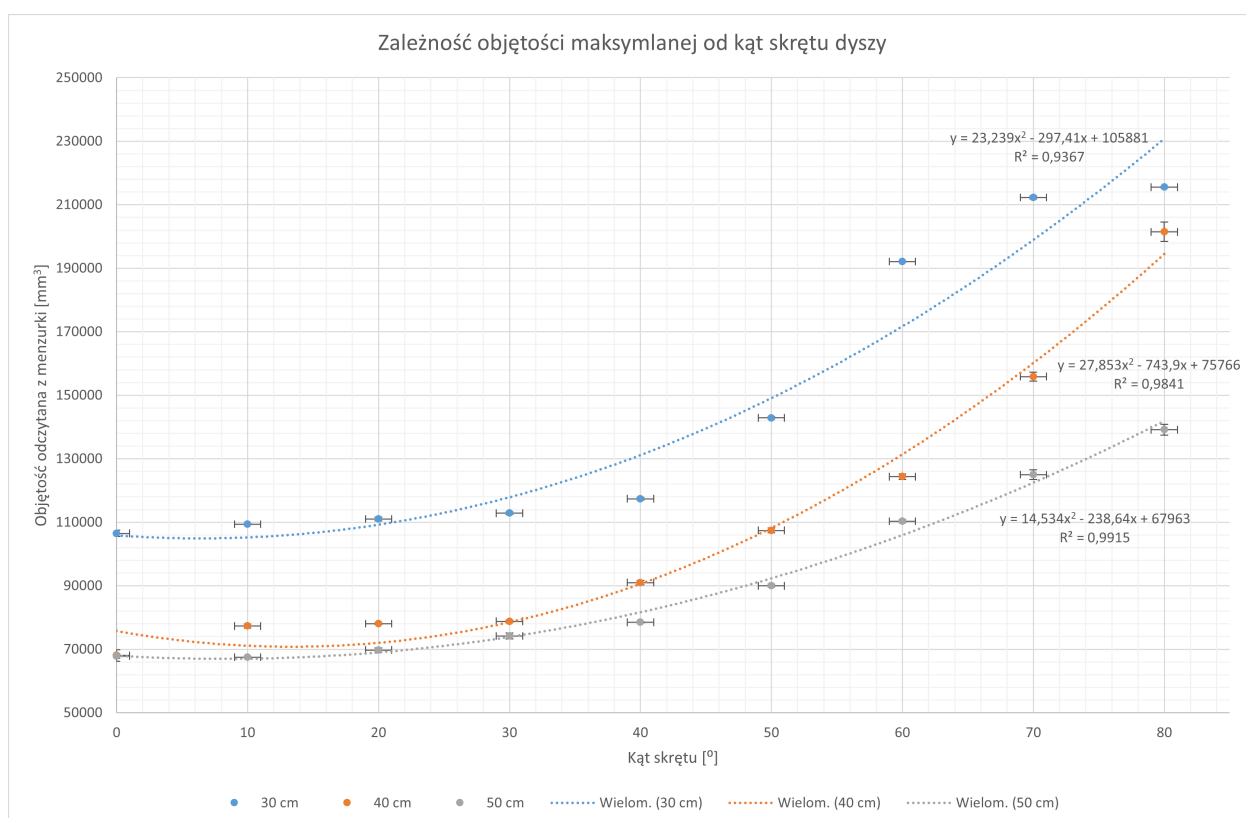
Rysunek 5.12: Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności rozkładu poprzecznego od kąta skrećenia dla 50 cm wysokości rozpylacza od podłoża

Pierwszy wykres szczegółowy (Rys. 5.13) przedstawia zależność szerokości oprysku od kąta skreńczenia rozpylacza. Zaobserwowano liniowy spadek szerokości pasa oprysku wraz ze wzrostem kąta skreńczenia. Standardowy rozpylacz szczelinowa wytwarza wachlarz cieczy o określonym kącie rozwarcia, którego szerokość w położeniu referencyjnym odpowiada szerokości pasa oprysku. Zmiana kąta ustawienia rozpylacza powoduje przestrzenne odchylenie wachlarza powodując, że część wachlarza cieczy kierowana jest przed rozpylacz, a część za nią. W efekcie następuje zmniejszenie szerokości oprysku. Wyznaczone linie trendu dla różnych wysokości przeprowadzonego badania posiadają zbliżone nachylenie.

Drugi wykres szczegółowy (Rys. 5.14) przedstawia zależność maksymalnej objętości cieczy od kąta skręcenia rozpylacza. Widoczny jest nieliniowy wzrost wartości maksymalnej wraz ze zwiększaniem kąta. W zakresie od 0° do 40° zmiany mają niewielką skalę, natomiast powyżej 40° przyrost objętości staje się wyraźny. Zaobserwowany wzrost jest bezpośrednio związany ze zmniejszaniem się szerokości pasa oprysku w miarę zwiększania kąta skręcenia. Strumień cieczy trafia do mniejszej liczby rowków stołu rowkowego, co skutkuje zwiększeniem ilości cieczy w menzurkach centralnych. Wyznaczona linia trendu ma charakter funkcji kwadratowej.



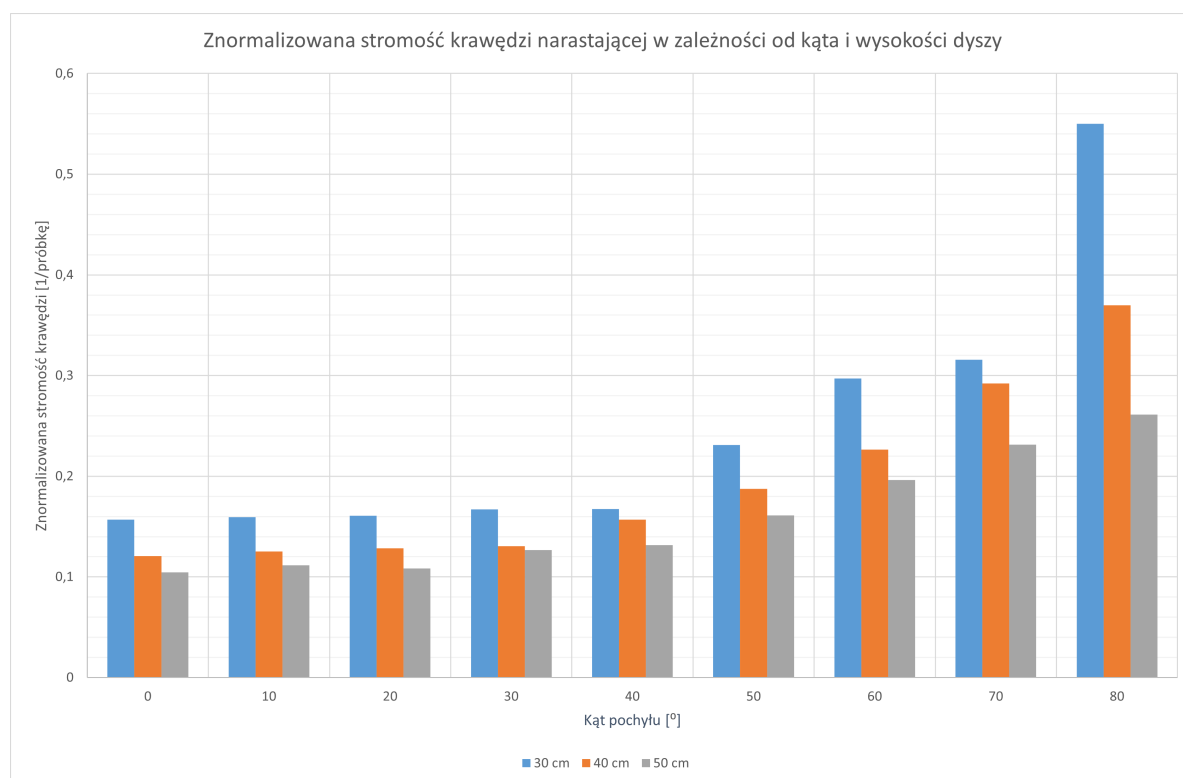
Rysunek 5.13: Wykres zależności szerokości oprysku od kąta skreślenia rozpylacza



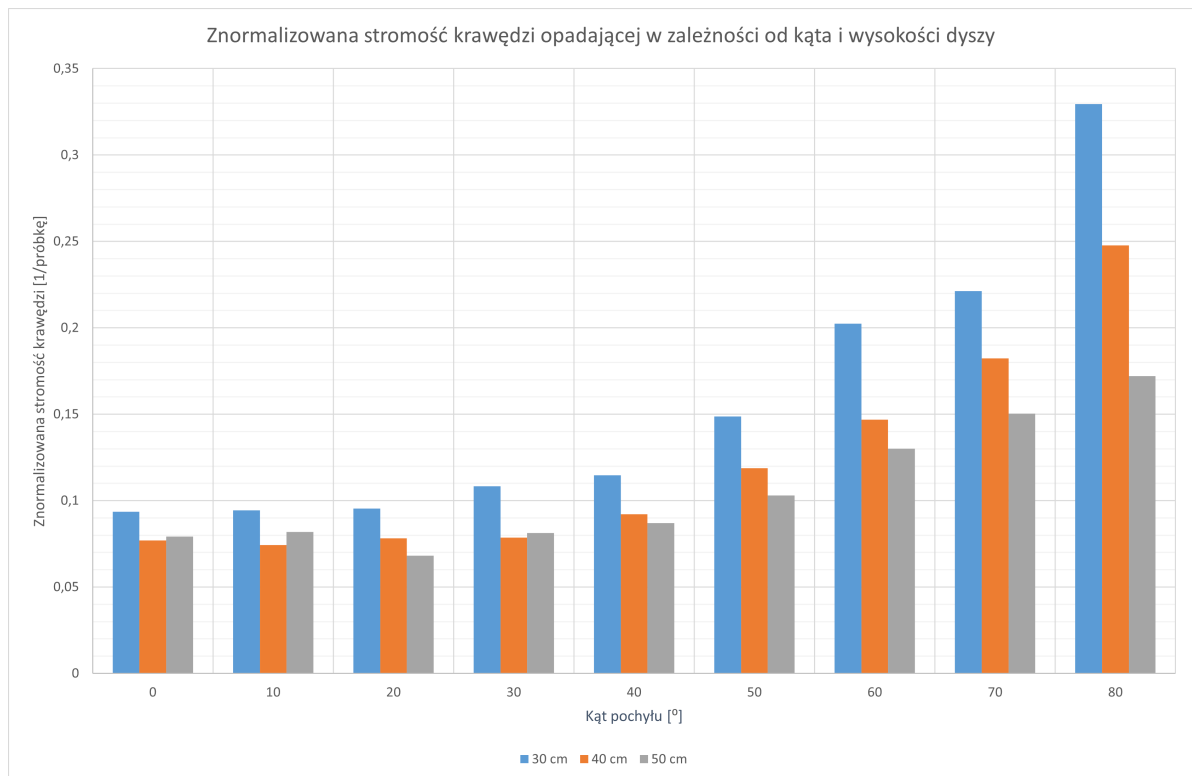
Rysunek 5.14: Wykres zależności objętości maksymalnej od kąta skreślenia rozpylacza

Wykres (Rys. 5.15) przedstawia znormalizowaną stromość krawędzi narastającej SL w funkcji kąta skreślenia rozpylacza dla trzech wysokości: 30, 40 i 50 cm. Analiza pokazuje, że wartości wskaźnika rosną wraz ze wzrostem kąta, a jednocześnie wartości są niższe przy większej wysokości rozpylacza. Dla wysokości 30 cm obserwuje się najwyższe wartości, niż w przypadku pozostałych wartości. Początkowo SL wynosi około 0,15 w zakresie 0–40°, następnie gwałtownie rośnie, osiągając około 0,3 przy 60°, 0,28–0,32 przy 70° oraz wyraźne maksimum w okolicach 0,56 przy 80°. Przy 40 cm przebieg jest podobny, lecz wartości są niższe od ok. 0,12 przy małych kątach, przez 0,18–0,22 w zakresie 50–60°, do ok. 0,37 przy 80°. Najłagodniejszy wzrost występuje dla wysokości 50 cm: wartości rosną od około 0,11 przy 0° do około 0,27 przy 80°.

Wykres (Rys. 5.16) przedstawia znormalizowaną stromość krawędzi opadającej SR w funkcji kąta pochylenia rozpylacza dla trzech wysokości: 30, 40 i 50 cm. Wyniki wskazują, że wraz ze wzrostem kąta pochylenia wartości wskaźnika systematycznie rosną. Dla wysokości 30 cm wartości początkowo wynoszą około 0,09 przy 0°, a następnie stopniowo rosną do ok. 0,15 przy 50°, 0,2 przy 60°, 0,22 przy 70° i osiągają maksimum około 0,33 przy 80°. Dla wysokości 40 cm przebieg jest podobny, lecz wartości są niższe, od około 0,08 przy małych kątach, poprzez 0,12 przy 50°, aż do około 0,25 przy 80°. Najłagodniejszy przebieg widoczny jest również dla 50 cm, wartości rosną od około 0,075 przy 0° do około 0,18 przy 80°.



Rysunek 5.15: Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi narastającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym



Rysunek 5.16: Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi opadającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym

5.2 Badanie polowe - skuteczność oprysku

Zbudowany w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej model badawczy mechatronicznego zespołu rozpylającego został zamontowany na robocie rolniczym marki Unia (Rys. 5.17) w celu przeprowadzenia badań polowych. Montaż na robocie miał na celu ukazanie, że zaprojektowane rozwiązanie może współpracować z robotami rolniczymi, które potencjalnie mogą stanowić o przyszłości rolnictwa. Spalinowy robot polowy opracowany został w ramach projektu POIR.01.01.01-00-1230/19. Konstrukcja robota umożliwia montaż dedykowanych narzędzi w przedniej, tylnej oraz środkowej części ramy, a jego głównym przeznaczeniem jest praca w uprawach rzędowych kukurydzy. Model badawczy został zaprojektowany z uwzględnieniem możliwości montażu w przedniej części robota, pozwoliło to na jednoczesne zastosowanie dwóch narzędzi modelu badawczego oraz standardowego opryskiwacza rolniczego.

Robot wyposażono w silnik spalinowy napędzający pompy hydrauliczne napędzające wszystkie koła silnikami hydraulicznymi, z indywidualną możliwością skrócenia każdego z kół. Szerokość robota jest regulowana, pozwala to na pracę w dwóch lub trzech rzędach kukurydzy. Wysokość konstrukcji również podlega regulacji, umożliwiając wykonywanie zabiegów w różnych fazach rozwojowych roślin od siewu do oprysku kukurydzy o wysokości

1 metra. Jazda automatyczna odbywa się z wykorzystaniem nawigacji satelitarnej oraz kamer zamontowanych w przedniej części pojazdu.

Zamontowany na robocie rolniczym standardowy opryskiwacz (Rys. 5.18) składa się z dwóch głównych części, regulowanej i składanej belki polowej umieszczonej z tyłu konstrukcji oraz zbiornika o pojemności 1300 litrów zlokalizowanego w części środkowej. Belka opryskiwacza stanowi zmodyfikowaną wersję modelu LUX firmy Unia, natomiast zbiornik jest przystosowaną do montażu na robocie wersją przedniego zbiornika TOP również marki Unia.



Rysunek 5.17: Robota polowy firmy Unia z zamontowanym modelem badawczym

Regulowana belka jest składana w układzie „X”, wyposażono ją w 30 rozpylaczy rozmieszczonych co 37,5 cm, podzielonych na pięć sekcji. Pracą pomp oraz poszczególnych sekcji steruje komputer pokładowy współpracujący w standardzie ISOBUS z systemem nawigacji rolniczej, umożliwia to automatyczną kontrolę sekcji opryskiwacza oraz precyzyjne dozowanie cieczy roboczej.

Podczas realizacji badań z wykorzystaniem opryskiwacza standardowego, ze względu na ograniczoną powierzchnię poletka doświadczalnego będącego w dyspozycji Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego, nie było możliwe zastosowanie pełnej szerokości roboczej belki opryskiwacza. Z tego względu, w trakcie pomiarów wykorzystywano wyłącznie jedną, prawą sekcję obejmującą sześć rozpylaczy. Sterownik opryskiwacza skonfigurowano w taki sposób, aby obsługiwał tylko jedną wybraną sekcję.



Rysunek 5.18: Robot z zamontowanym standardowym opryskiwaczem rolniczym przystosowany do montażu na robocie rolniczym

Badania przeprowadzono na poletku doświadczalnym (Rys. 5.19) o wymiarach 35 m × 6 m, na którym wysiano kukurydzę rzędowo przy użyciu siewnika precyzyjnego. Rozstaw między rzędami wynosił 75 cm, natomiast zakładany odstęp pomiędzy sąsiednimi roślinami w rzędzie wynosił 15 cm. Badania przeprowadzono na jednym z rzędów, na którym średnia wysokość roślin wynosiła ok. 85 cm.

Na poletku zainstalowano dodatkowo stację pogodową Seedstudio SenseCAP S5700. Urządzenie umożliwia pomiar kluczowych parametrów środowiskowych, takich jak: temperatura powietrza, wilgotność względna, ciśnienie barometryczne, natężenie promieniowania świetlnego, intensywność opadów oraz prędkość i kierunek wiatru. Dzięki specjalnie zaprojektowanej obudowie o stopniu ochrony IP66 stacja jest odporna na pył i wodę, a jej zakres temperatury pracy wynosi od -40°C do 85°C .

Wzdłuż badanego rzędu pomiędzy roślinami rozmieszczono w trzech punktach uchwyty na papierki wodoczułe. Pierwszy punkt pomiarowy zlokalizowano w odległości 5 m od początku rzędu, na wysokości 50 cm nad powierzchnią gruntu. Drugi punkt umieszczono w odległości 6 m od pierwszego, na wysokości 30 cm, natomiast trzeci punkt znajdował się 6 m od drugiego, na wysokości 10 cm. W każdym punkcie zastosowano na potrzeby badania zaprojektowany i wydrukowany na drukarce 3D uchwyt (Rys. 5.20), na którym zamocowano trzy papierki wodoczułe ustawione pod różnymi kątami. Przyjęto, że kąt 0° odpowiada położeniu pionowemu papierka. Pierwszy papierek ustawiono poprzecznie do

kierunku jazdy, poziomo czyli pod kątem 90° , natomiast dwa kolejne ustawiono pod kątem 45° , jeden poprzecznie, a drugi wzdłużnie do kierunku jazdy robota. Ustawienie w taki sposób pozwala na analizę wpływu orientacji papierków wodoczułych na równomierność.



Rysunek 5.19: Poletko doświadczalne na terenie Łukasiewicz-PIT

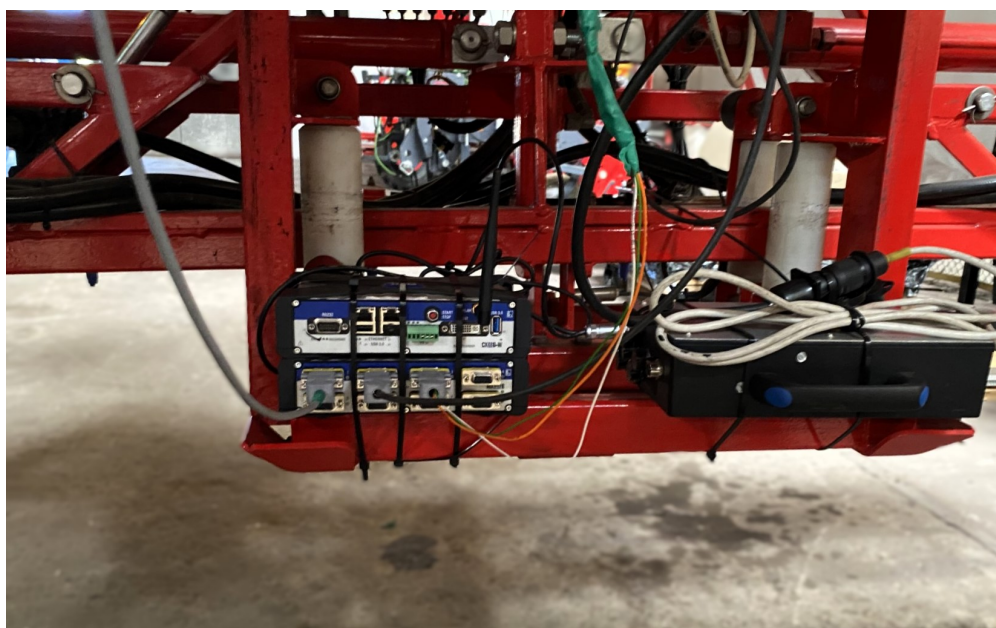


Rysunek 5.20: Uchwyt na papierki wodoczułe zamontowane w rzędzie kukurydzy

W badaniach wykorzystano również profesjonalną aparaturę pomiarową firmy HBM, model QuantumX MX840B (Rys. 5.21). Jest to ośmiokanałowy, uniwersalny wzmacniacz pomiarowy, obsługujący 17 różnych technologii pomiarowych. Urządzenie wyposażone jest w 24-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy o częstotliwości próbkowania 40 kS/s na kanał, z możliwością aktywacji filtrów dolnoprzepustowych oraz górnoprzepustowych. Moduł wspiera także popularne standardy komunikacyjne, w tym magistralę CAN.

W skład stanowiska pomiarowego wchodziła również jednostka rejestrująca HBM QuantumX CX22B-W, pełniąca funkcję urządzenia do rejestracji sygnałów i akwizycji danych jednej podstawie czasowej. Zastosowanie tego modułu umożliwiło szybką, wstępną weryfikację poprawności działania czujników oraz ocenę jakości pozyskiwanych danych pomiarowych.

W obu badaniach do systemu pomiarowego HBM podłączono przetwornik ciśnienia firmy Turck, model PT10R-1004-I2-H1143, z wyjściem prądowym i zakresem pomiarowym od 0 do 10 bar. Urządzenie charakteryzuje się dokładnością LHR (ang. Linearized Hysteresis and Repeatability) na poziomie $\pm 0,3\%$ i zostało zaprojektowane z myślą o zastosowaniach w urządzeniach mobilnych.



Rysunek 5.21: Zamontowana na robocie rolniczym aparatura pomiarowa HBM

Drugim czujnikiem podłączonym do aparatury był przepływomierz firmy Arag, model H119533, o zakresie pomiarowym od 0,5 do 10 L min⁻¹ oraz wyjściu impulsowym generującym 6000 impulsów na litr. Jest to standardowy typ przepływomierza stosowany w opryskiwaczach rolniczych. W badaniach został on zamontowany w sposób umożliwiający pomiar przepływu bezpośrednio w danej sekcji roboczej. Ostatnim elementem układu pomiarowego było podłączenie do magistrali CAN, z której rejestrowano dane z systemu nawigacji rolniczej firmy

Topcon model X25 o dokładności pozycjonowania 2,5 cm, obejmujące prędkość jazdy oraz przebyty dystans.

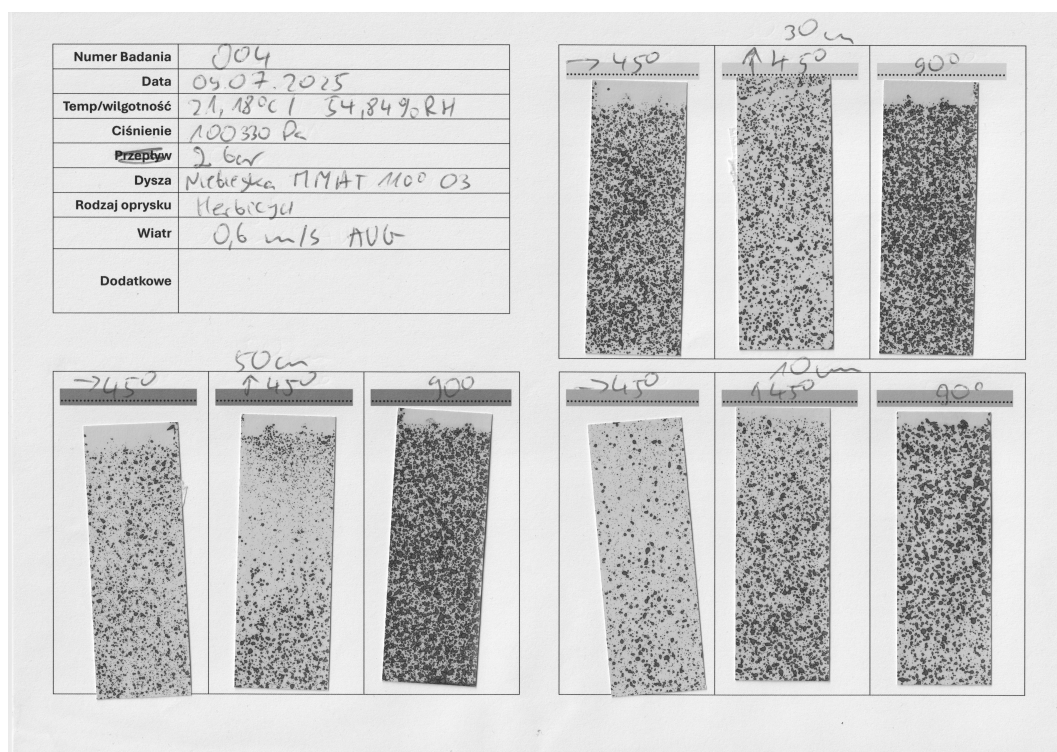
Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym z nich wykonano oprysk przy użyciu standardowego opryskiwacza polowego, wyposażonego w standardowe, niebieskie rozpylacze firmy MMAT o kącie oprysku 110° . Belkę opryskiwacza ustawiono w odległości około 30 cm nad wierzchołkami roślin. Drugi etap obejmował badania opracowanego mechatronicznego rozpylacza z wykorzystaniem tego samego rodzaju rozpylaczy, ale z ustawieniami poprawiającymi skuteczność oprysku. Badany rozpylacz był odsunięty od rzędów ok. 15 cm oraz obrócony o kąt 40° w stronę rośliny uprawnej prowadząc oprysk od boku. W obydwóch przypadkach symulowano prowadzenie oprysku herbicydem. Sterownik opryskiwacza skonfigurowano tak, aby utrzymywał ciśnienie robocze na poziomie 2 barów. Jednakże, pomimo prób kalibracji, nie udało się uzyskać jego stabilizacji i obserwowano wahania wartości ciśnienia w trakcie pracy.

Pomiary wykonano dla dwóch prędkości roboczych: $0,5 \text{ m s}^{-1}$ oraz 1 m s^{-1} , przy czym każdy przejazd powtarzano trzykrotnie. W każdym punkcie pomiarowym zamontowano trzy papierki wodoczułe, oznacza to, że w jednym przejeździe uzyskiwano łącznie dziewięć papierków przeznaczonych do analizy. Po zakończeniu każdego przejazdu oczekiwano około 10 minut, aby umożliwić całkowite wyschnięcie papierków. Następnie delikatnie zdejmowano papierki i naklejały na kartę pomiarową (Rys. 5.22), na której zapisano bieżące warunki pogodowe oraz szczegółowy opis lokalizacji każdego papierka w trakcie oprysku.

Metoda oceny jakości oprysku z wykorzystaniem papierów wodoczułych nie jest rozwiązaniem idealnym, jednak umożliwia prowadzenie badań na rzeczywistych polach uprawnych, w naturalnych warunkach pogodowych. Papiery wskaźnikowe mają żółte tło i w kontakcie z wodą zabarwiają się na niebiesko, podczas badań zastosowano papierki firmy TeeJet. Ze względu na ryzyko fałszywego zabarwienia pomiary należy prowadzić przy względnej wilgotności powietrza poniżej 85%, gdyż przekroczenie wartości papierki mogą ulec całkowitemu zabarwieniu bez bezpośredniego kontaktu z cieczą [125]. Minimalny rozmiar kropli możliwy do wiarygodnej wizualizacji wynosi około $50 \mu\text{m}$ [126], natomiast przy pokryciu powierzchni papieru przekraczającym 20% może dochodzić do nakładania się plam po kroplach [127]. Średnica plamy powstającej po uderzeniu kropli na papierze wodoczułym jest około dwukrotnie większa od rzeczywistej średnicy kropli, wartość ta zależy między innymi od napięcia powierzchniowego cieczy, rozmiaru kropli oraz aktualnych warunków pogodowych [128].

Teoretycznie idealny, w praktyce nieosiągalny zapis na papierze wodoczułym to taki, w którym wszystkie utrwalone krople mają jednakową średnicę i są rozmieszczone równomiernie, w równych odstępach, tworząc siatkę [129]. Łączne pokrycie powierzchni nie powinno prze-

kraczać 20%, aby zminimalizować ryzyko nakładania się plam [127]. Wzorzec idealny zakłada również brak rozbryzgów w chwili uderzenia kropli o papier [130] oraz brak zmienności między kartami, niezależnie od położenia w łanie. Opis ten ma charakter normatywny — stanowi punkt odniesienia do oceny jakości oprysku — lecz ze względu na losowy charakter procesu rozpylania i zmienne warunki pogodowe na polu [131] uprawnym pozostaje konstruktem teoretycznym, nieosiągalnym w warunkach rzeczywistych.

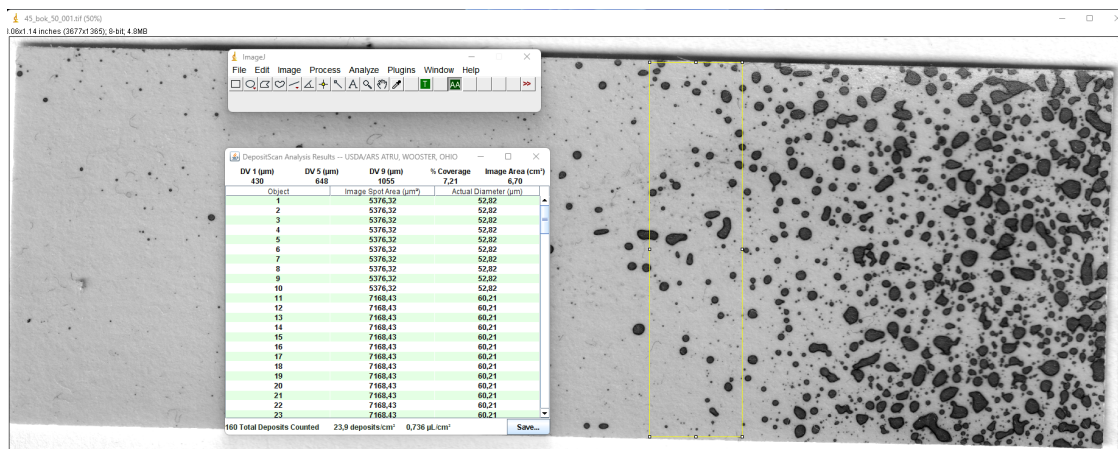


Rysunek 5.22: Karta pomiarowa z naklejonymi papierkami wodorzułymi po przeprowadzonym przejeździe

Zebrane papierki w ciągu 2 h od zakończenia badań zeskanowano za pomocą skanera Canon LiDE 400 o rozdzielczości skanowania na poziomie 4800 dpi. Obraz skanowano w odcieniach szerokości po jednym papierku w formacie pliku TIFF. Skanowanie kolorowe całości karty pomiarowej było niemożliwe ze względu na bezstratny format i duża rozdzielczość powodując znaczący wzrost wagi pliku, który ciężko było przeanalizować w programach.

Każdy zeskanowany papierek został przeanalizowany w programie DepositScan. Jest to zestaw wtyczek zaimplementowany w programie ImageJ (Rys. 5.23) opracowany przez USDA-ARS (ang. United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service) do szybkiej, terenowej oceny rozkładu kropli oprysku z wykorzystaniem papierków wodorzułych. Po zeskanowaniu kart program oblicza takie jak pokrycie (%), zagęszczenie kropli (kropla cm^{-2}) oraz charakterystykę rozkładu wielkości kropli (DV0,1, DV0,5, DV0,9). Przy rozdzielczości skanowania 2400 dpi minimalna wykrywalna średnica kropli wynosi ok. 17 μm .

Oprogramowanie umożliwia ustawienie progu segmentacji automatycznie lub ręcznie oraz generuje tabele z wynikami [127].



Rysunek 5.23: Program ImageJ ze skryptami do analizy papierków wodoczułych

Średnie wartości zarejestrowane aparaturą HBM dla poszczególnych przejazdów zestawiono w Tabeli 5.1. Przy nastawie ciśnienia 2 bar średnia z sześciu przejazdów wyniosła 2,125 bar. Odchylenia względem wartości zadanej mieściły się w przedziale od -0,03 do +0,24 bar, stanowi to przy największym odchyleniu 12% wartości zadanej. W przypadku prędkości jazdy, w trzech pierwszych przejazdach przy założeniu $0,5 \text{ m s}^{-1}$ uzyskano odpowiednio +0,08 i +0,02 m s^{-1} , stanowi to przy największym odchyleniu 16% wartości zadanej. Natomiast w kolejnych trzech przejazdach przy założeniu 1 m s^{-1} odchylenie wyniosło odpowiednio +0,04, -0,03 i -0,05 m s^{-1} , stanowi to przy największym odchyleniu 5% wartości zadanej. Zależność kinematyczna pomiędzy drogą, czasem i prędkością została zachowana, a prędkości obliczone z ilorazu drogi i czasu różniły się od wartości zmierzonych o mniej niż 1% wynikające w zaokrąglenia.

Tabela 5.1: Dane pomiarowe dla opryskiwacza standardowego

Numer pomiaru	001	002	003	004	005	006
Ciśnienie [bar]	2,21	2,18	2,17	1,97	2,24	1,98
Przepływ [L min^{-1}]	0,96	0,92	0,98	0,90	0,98	0,95
Zużycie 6 rozpylaczy[l]	3,38	3,67	3,97	2,19	2,30	2,39
Prędkość [m s^{-1}]	0,58	0,50	0,52	1,04	0,97	0,95
Droga [m]	20,28	20,15	21,1	25,34	22,86	24,06
Czas [s]	35,06	39,97	40,69	24,32	23,45	25,21

Dla rozwiązania projektowanego zarejestrowano dane zaprezentowano w Tabeli 5.2. Przy nastawie ciśnienia 2 bar odchylenia względem wartości zadanej mieściły się w przedziale +0,26 do +0,38 bar, odpowiada to 13–19% wartości zadanej. W przypadku prędkości jazdy,

w trzech pierwszych przejazdach przy założeniu $0,5 \text{ m/s}$ uzyskano odpowiednio $+0,22$, $+0,11$, $-0,02 \text{ m s}^{-1}$, przy największym odchyleniu stanowi 44% wartości zadanej. W kolejnych trzech przejazdach przy założeniu 1 m s^{-1} odchylenie wyniosły $+0,08$, $-0,12$, $-0,01 \text{ m s}^{-1}$, a największe odchylenie stanowiło 12% wartości zadanej. Zależność kinematyczna pomiędzy drogą, czasem i prędkością została zachowana: prędkości obliczone z ilorazu drogi i czasu różniły się od wartości zmierzonych o mniej niż 2,5%.

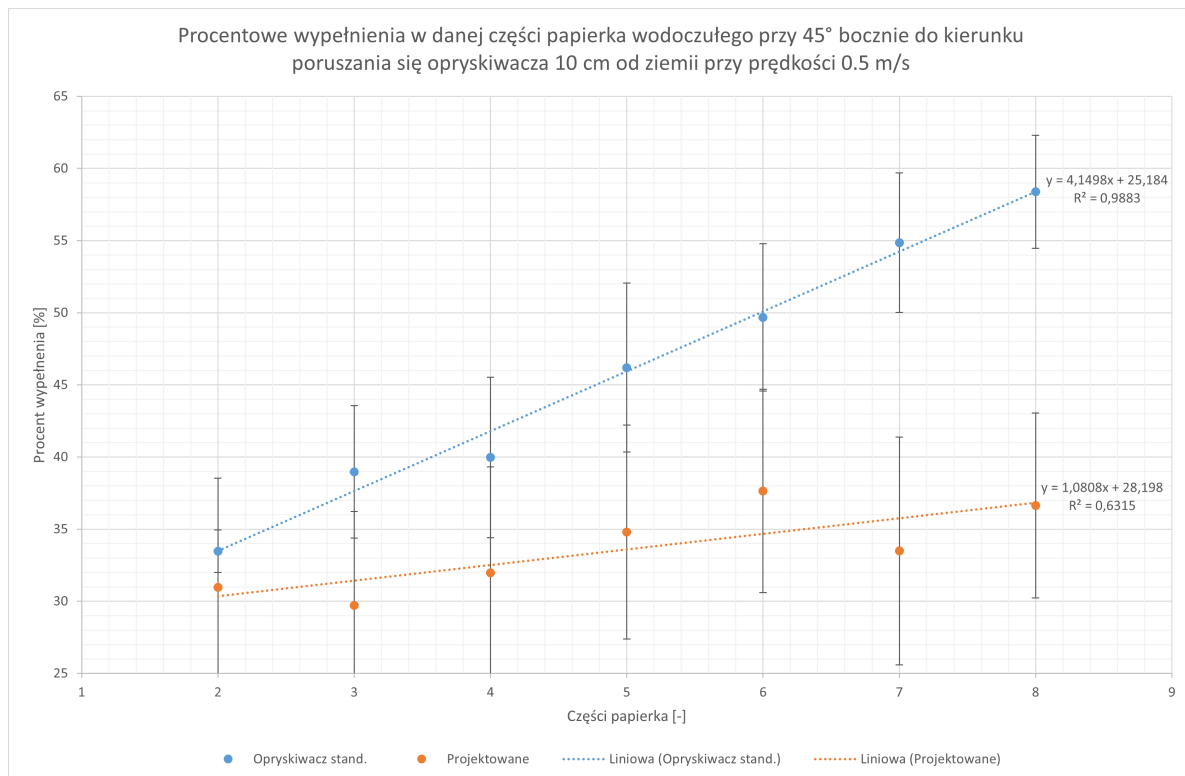
Tabela 5.2: Dane pomiarowe dla rozwiązania projektowanego

Numer pomiaru	007	008	009	010	011	012
Ciśnienie [bar]	2,29	2,31	2,38	2,26	2,30	2,34
Przepływ [L min^{-1}]	1,29	1,4	1,61	1,8	1,38	1,7
Zużycie 1 rozpylacz[l]	0,66	0,89	1,26	0,65	0,59	0,69
Prędkość [m s^{-1}]	0,72	0,61	0,48	1,08	0,88	0,99
Droga [m]	22,07	22,81	22,77	23,6	22,63	23,42
Czas [s]	30,82	38,31	47,09	21,5	25,6	24,2

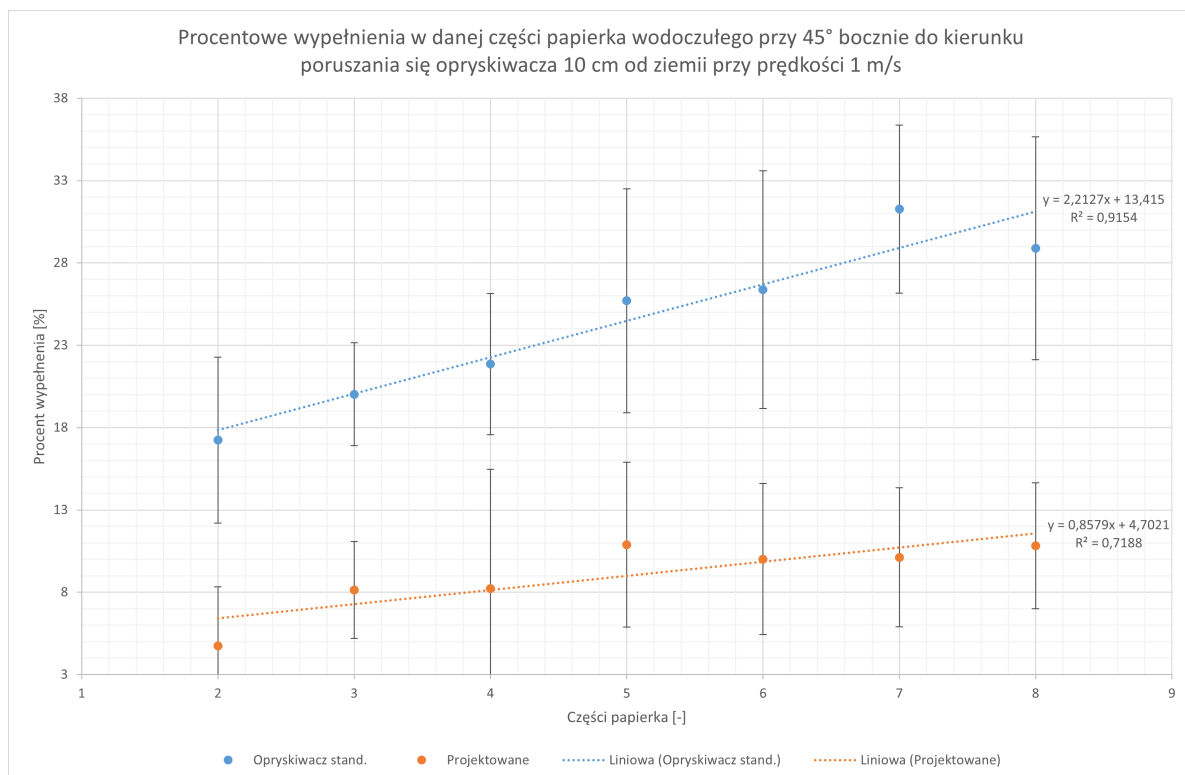
Zeskanowany papierek wodoczuły podzielono w programie DepositScan na osiem sekcji. Każdą z nich poddano analizie, a uzyskane wartości procentowego pokrycia zestawiono w tabeli. Dane z poszczególnych powtórzeń uśredniono i przedstawiono w formie graficznej. Celem badania było wykazanie, że zastosowanie rozwiązania projektowanego poprawia równomierność pokrycia papieru wodoczułego w porównaniu z rozwiązaniem standardowym, a tym samym zapewnia wyższą skuteczność.

Podczas analizy zauważono, że pierwsza część papierków często nie była prawidłowo pokryta ze względu na element mocujący. Z tego powodu zdecydowano się pominąć tę sekcję w dalszych obliczeniach. Każde ustawienie papierka analizowano w trzech powtórzeniach, które następnie uśredniono arytmetycznie. Przykładowe wartości średnie dla ustawienia papierka umieszczonego 10 cm nad ziemią, bocznie do kierunku jazdy robota, pod kątem 45° względem pionu, przedstawiono na wykresie przy średniej prędkości jazdy $0,5 \text{ m s}^{-1}$ (Rys. 5.24) oraz przy średniej prędkości 1 m s^{-1} (Rys. 5.25). Zdecydowano się nie prezentować każdego przypadku oddzielnie, lecz poszukać sposobu grupowego zestawienia wyników w celu ułatwienia porównań i analiz.

Przy prędkości $0,5 \text{ m s}^{-1}$ opryskiwacz standardowy uzyskał większe wartości pokrycia, które systematycznie rosły z każdą częścią papierka – od około 33% do ponad 55%. Zależność dobrze opisuje linię trendu o wysokim współczynniku dopasowania $R^2=0,99$. W przypadku rozwiązania projektowanego wartości były niższe – od około 30% do ponad 36% i rosły znacznie wolniej niż w przypadku rozwiązania standardowego. W tym wypadku linia trendu jest dopasowana mniej precyzyjnie o współczynniku dopasowania $R^2=0,63$.



Rysunek 5.24: Procentowe wypełnienie w danych częściach papierka wodoczułego przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$



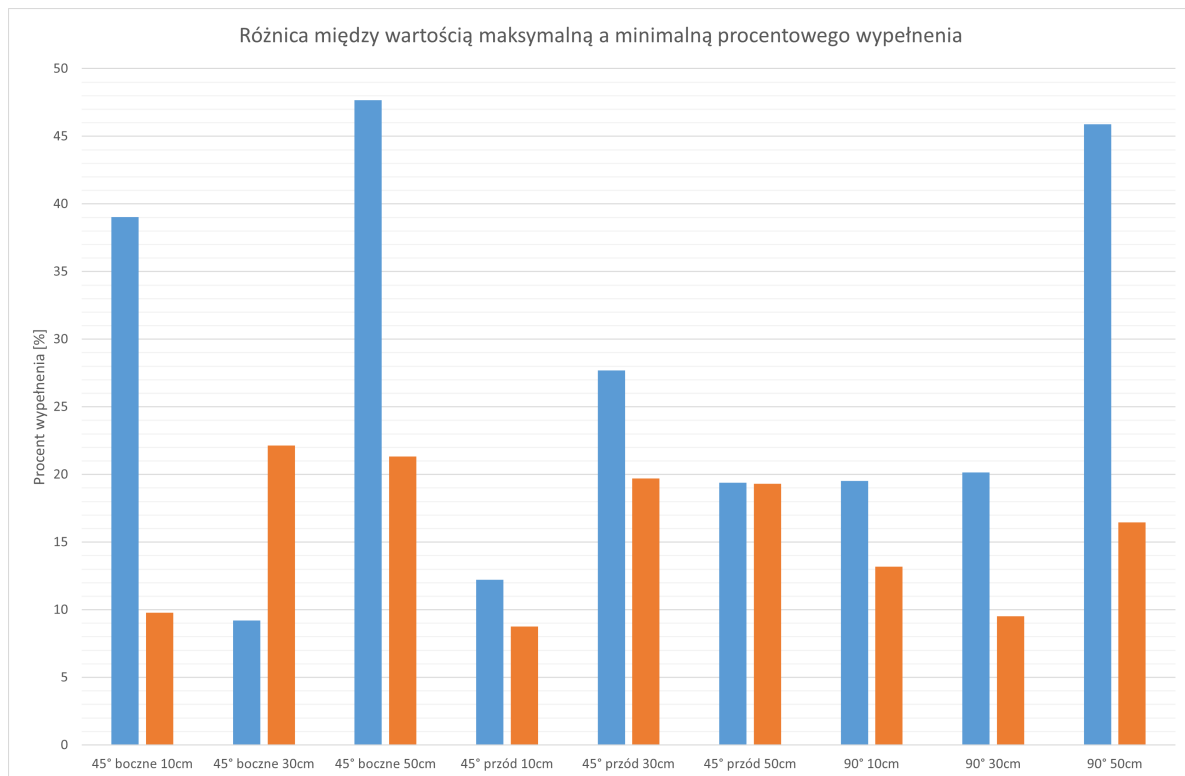
Rysunek 5.25: Procentowe wypełnienie w danych częściach papierka wodoczułego przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}

Przy prędkości 1 m s^{-1} wartości procentowe były ogólnie niższe w obu wariantach, co jest naturalnym zjawiskiem, ze względu na krótszy czas przebywania rozpylaczy nad papierkiem wodoczułym. Standardowy opryskiwacz osiągał poziom od około 18% do około 30%, a przy wysokim współczynniku dopasowania sięgającym $R^2=0,92$. W rozwiązaniu projektowanym procentowe pokrycie było wyraźnie niższe, mieszcząc się w granicach od 4 do około 10%, współczynnik dopasowania dla linii trendu był umiarkowany wynoszący $R^2=0,72$.

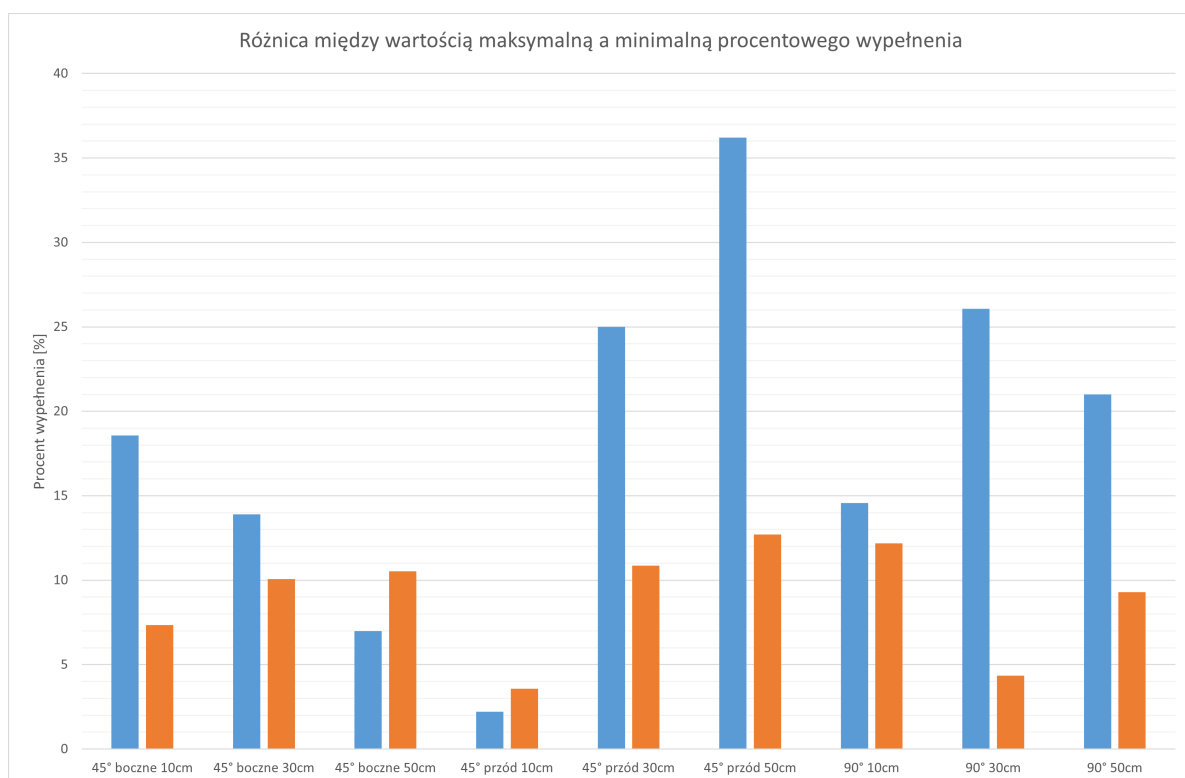
Wykres 5.26 i 5.27 przedstawiają różnice pomiędzy wartościami maksymalnymi i minimalnymi średnimi procentowymi wypełnieniami papierków wodoczułych dla różnych ustawień przy przejeździe opryskiwacza z dwoma prędkościami. Analiza pokazuje, że opryskiwacz standardowy charakteryzuje się większym zróżnicowaniem wyników, świadczy to o mniejszej równomierności pokrycia wzdłuż papierka. W wielu przypadkach, zwłaszcza przy ustawieniach 45° od pionu z przodem do kierunku jazdy na wysokości od ziemi 50 cm oraz 90° od pionu na wysokości 50 cm, różnice te przekraczały 35–45%. Porównując rozwiązania, projektowane osiągało zdecydowanie niższe wartości różnic w granicach 10–20% niż opryskiwacz standardowy. Wskazuje na bardziej stabilne i równomierne rozprowadzanie cieczy. Tendencja ta utrzymywała się niezależnie od warunków pracy, zarówno przy mniejszej prędkości oprysku ($0,5 \text{ m s}^{-1}$), jak i przy większej (1 m s^{-1}). Wraz ze wzrostem prędkości różnice dla opryskiwacza standardowego rosły, potwierdzając pogorszenie równomierności jego działania, podczas gdy rozwiązanie projektowane zachowywało stosunkowo stabilne wartości. Otrzymane wyniki wskazują więc, że choć standardowy opryskiwacz uzyskuje wyższe wartości pokrycia, to projektowane rozwiązanie zapewnia znacznie lepszą powtarzalność i równomierność oprysku.

Oprócz wykresów przedstawionych powyżej, dane zaprezentowano także w postaci wykresów pudełkowych dla średnich wartości w poszczególnych częściach papierka. Wykresy pudełkowe (ang. box-and-whisker) służą do syntetycznego opisu i porównywania rozkładów wyników w wielu grupach jednocześnie i są bardziej informacyjne niż same słupki ze średnią i błędem standardowym.

Wykres pudełkowy składa się między innymi z dużego prostokąta zwanego pudełkiem, którego dolna i górna krawędź wyznaczają odpowiednio pierwszy i trzeci kwartył (Q1 i Q3). Wysokość pudełka jest równa rozstępowi międzykwartylowemu ($IQR = Q3 - Q1$), im wyższy prostokąt, tym większa zmienność wyników w danej konfiguracji. Pozioma kreska wewnątrz pudełka to mediana (50. percentyl), czyli wartość środkowa rozkładu, a jej przesunięcie ku górnej lub dolnej krawędzi sygnalizuje asymetrię. Krzyżyk oznacza średnią arytmetyczną, wrażliwą na wartości skrajne, różnica położenia między krzyżykiem a medianą wskazuje na skośność i potencjalny wpływ obserwacji odstających.



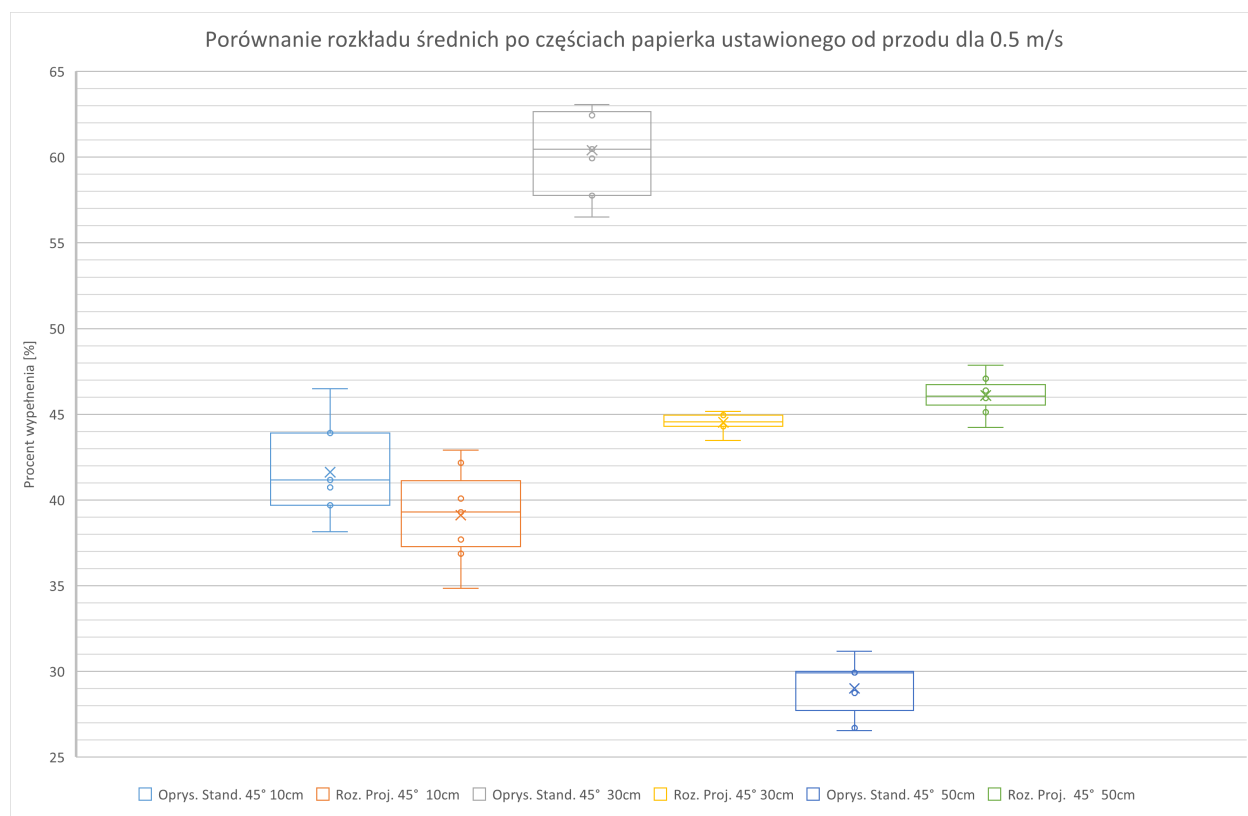
Rysunek 5.26: Różnica między wartością maksymalnymi i minimalnymi procentowego wypełnienia przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$



Rysunek 5.27: Różnica między wartością maksymalnymi i minimalnymi procentowego wypełnienia przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}

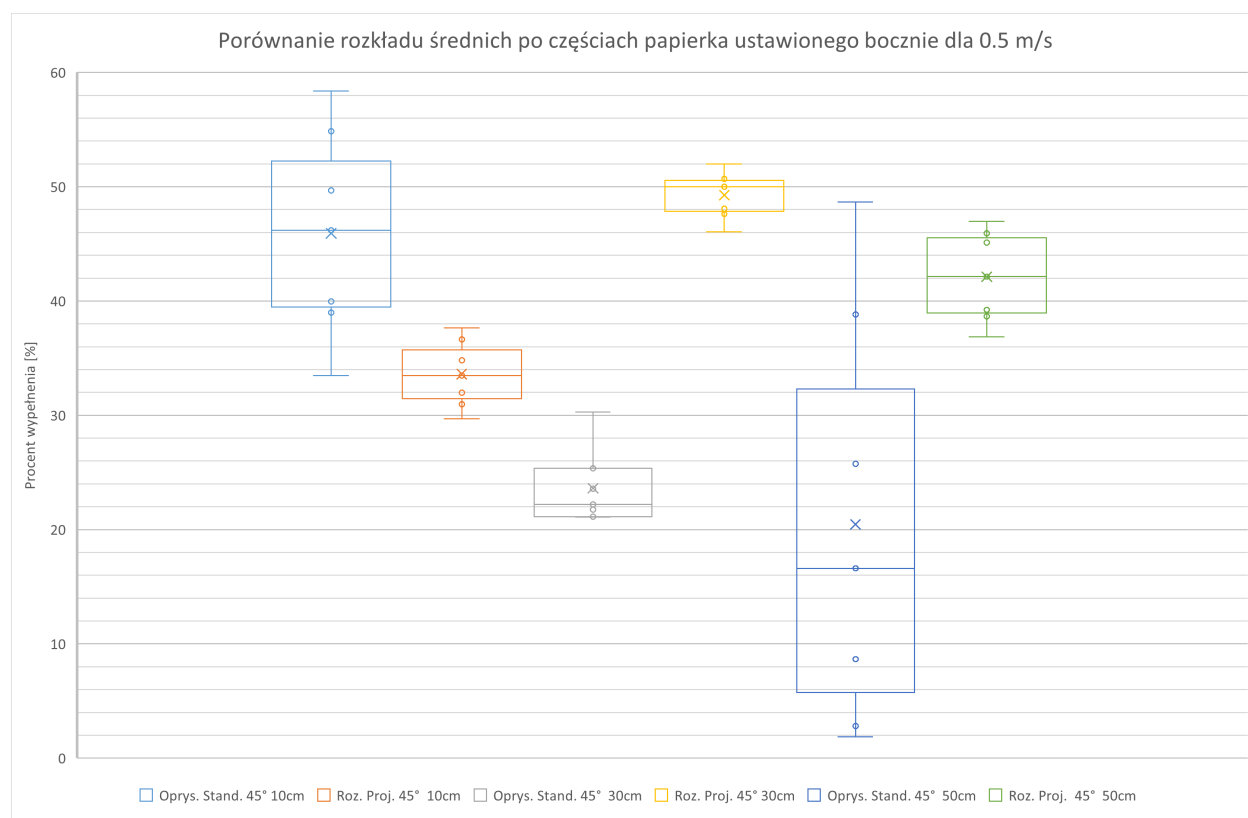
Pionowe linie wychodzące z pudełka nazywane są jako "wąsy", które pokazują zasięg wartości nieuznanych za odstające. Pojedyncze punkty umieszczone wewnątrz i na zewnątrz pudełka odpowiadają poszczególnym pomiarom. Punkty leżące poza zasięgiem wąsów są, zgodnie z regułą Tukeya, traktowane jako obserwacje odstające, tzn. znajdują się dalej niż $1,5 \times \text{IQR}$ od najbliższego kwartylu. Wąsy sięgają do najbardziej skrajnych obserwacji, które nie spełniają tego kryterium. Dzięki takiej konwencji wykresy pudełkowe umożliwiają przejrzyste i obiektywne porównanie rozkładów wyników, poziomu i stabilności pokrycia między wariantami doświadczenia przedstawionymi na osiach wykresów [132].

Analizując wykresy dla prędkości jazdy $0,5 \text{ m s}^{-1}$, przy ustawieniu papierka przodem do kierunku jazdy (Rys. 5.28), można zauważyć, że opryskiwacz standardowy osiąga wyższe mediany pokrycia na wysokościach 10 i 30 cm nad poziomem gruntu. Odbywa się to jednak kosztem większej zmienności – rozkłady są mniej stabilne, mają szersze przedziały międzykwartylowe (IQR) oraz większe różnice pomiędzy wartościami minimalnymi i maksymalnymi. Na wysokości 50 cm wyższą medianę uzyskuje natomiast rozwiązanie projektowane. W całym zakresie badanych wysokości rozwiązanie projektowane charakteryzuje się bardziej zwartymi rozkładami, co świadczy o większej równomierności pokrycia powierzchni papierka.



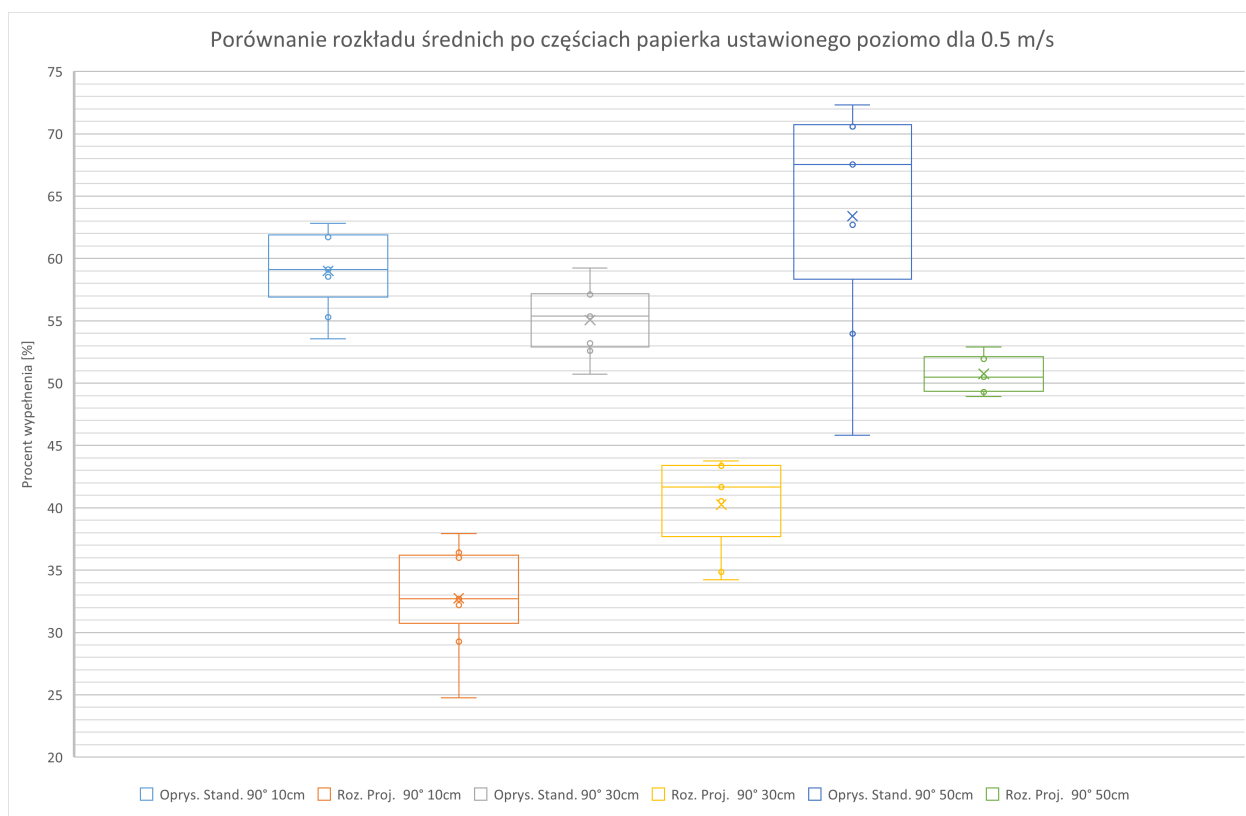
Rysunek 5.28: Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, przodem do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$

Przy prędkości $0,5 \text{ m s}^{-1}$ i ustawieniu papierka bocznie do kierunku jazdy (Rys. 5.29) widać, że wariant standardowy notuje wyższe mediany pokrycia na wszystkich analizowanych wysokościach 10, 30 i 50 cm. Jednocześnie tak jak w przypadku poprzednim zwiększa się rozrzut wyników, widoczne jest to przez zwiększanie się "pudełek" na wykresie (szerszy IQR), a różnica min-max jest większa, świadczy to o mniejszej stabilności rozkładów. Rozwiązanie projektowane utrzymuje natomiast bardziej zwarte i spójne rozkłady dla całego zakresu wysokości.



Rysunek 5.29: Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, bocznie do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$

Analizując wykresy dla prędkości jazdy $0,5 \text{ m s}^{-1}$, przy ustawieniu papierka poziomo do kierunku jazdy (Rys. 5.30), widać, że opryskiwacz standardowy osiąga wyższe mediany pokrycia na wszystkich trzech wysokościach 10, 30 oraz 50 cm. Dla konfiguracji 90° i wysokości 50 cm wartości sięgają około 68%, podczas gdy w rozwiązaniu projektowanym odpowiadające mediany dla 10 cm na ziemię wynoszą około 32% natomiast dla 30 cm wynoszą około 42%, potwierdza to tak jak poprzednio niższy poziom pokrycia. Wyższy poziom pokrycia w wariancie standardowym, zwiększa również zmienność jak w poprzednich przypadkach. Rozwiązanie projektowane daje bardziej zwarte rozkłady i mniejsze różnice skrajnych wartości.



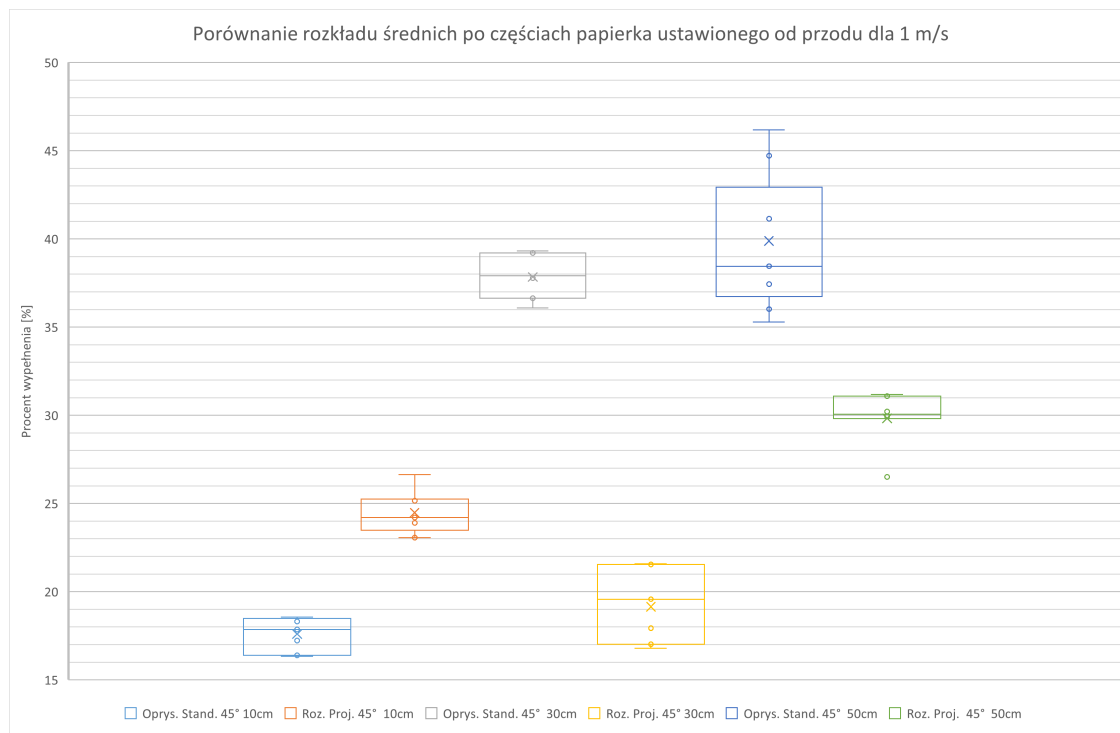
Rysunek 5.30: Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, poziomo do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$

Analizując wykresy dla prędkości jazdy 1 m s^{-1} , przy ustawieniu papierka przodem do kierunku jazdy (Rys. 5.31), można zauważyć, że opryskiwacz standardowy osiąga wyższe mediany pokrycia na wysokościach 30 i 50 cm nad poziomem ziemi, z wartością mediany około 38%. Natomiast na wysokości 10 cm mediana była niższa niż w przypadku rozwiązania projektowanego. Dla wysokości 10 i 50 cm widoczne są węższe zakresy międzykwartylowe na korzyść rozwiązania standardowego. Z kolei na wysokości 30 cm nad ziemią szersze przedziały międzykwartylowe występowały w rozwiązaniu projektowanym.

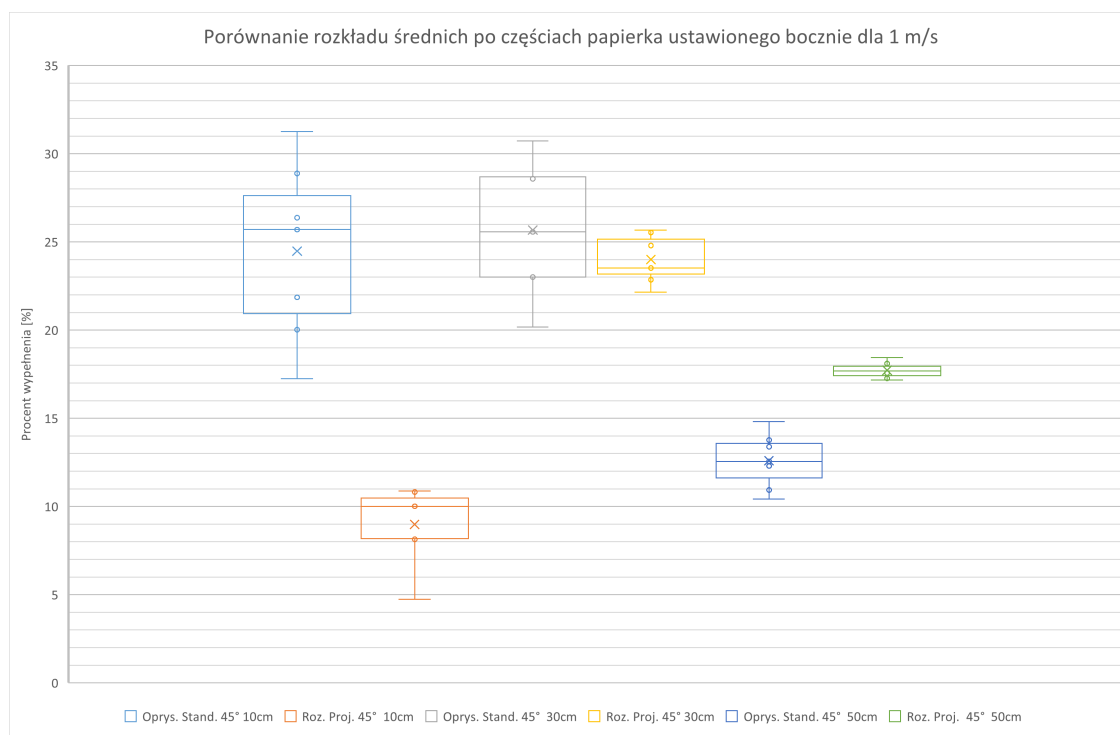
Analizując wykresy dla prędkości 1 m s^{-1} , przy ustawieniu papierka bocznie do kierunku jazdy (Rys. 5.32), widać, że opryskiwacz standardowy osiąga wyższe mediany pokrycia na wysokościach 10 i 30 cm, natomiast na 50 cm wartości median są niższe niż w rozwiązaniu projektowanym. We wszystkich wariantach ustawienia rozwiązanie projektowane cechuje się węższym przedziałem międzykwartylowym, wskazując na mniejszą zmienność wyników.

Analizując ostatnie wykresy dla prędkości 1 m s^{-1} , przy ustawieniu papierka poziomo do kierunku jazdy (Rys. 5.33), widać, że opryskiwacz standardowy osiąga wyższe mediany pokrycia na wszystkich badanych wysokościach. Na wysokości 10 cm szerszy przedział międzykwartylowy występował jednak w rozwiązaniu projektowanym. We wszystkich analizowanych wykresach przy 1 m s^{-1} obserwuje się spadek median pokrycia w większości konfiguracji,

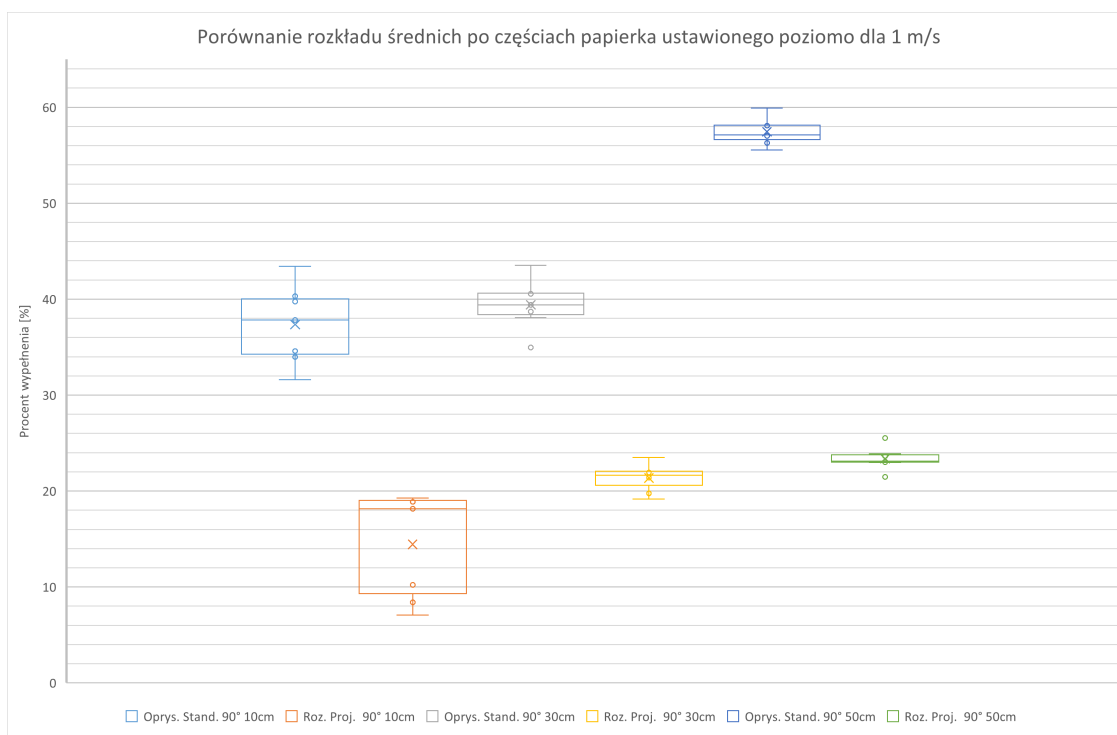
wynika to z większej prędkości przejazdu, skracającej czas ekspozycji rozpylaczy nad papierkiem.



Rysunek 5.31: Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, przodem do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}



Rysunek 5.32: Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, bocznie do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}



Rysunek 5.33: Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, poziomo do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}

5.3 Dyskusja wyników

Badania laboratoryjne (rozdz. 5.1) oraz polowe (rozdz. 5.2) uzupełniają się, wspólnie potwierdzając skuteczność opracowanego mechatronicznego rozpylacza o zmiennej charakterystyce oprysku. W warunkach laboratoryjnych korzystając ze stołu rowkowego, wykazano wpływ orientacji rozpylacza na rozkład cieczy. Zwiększenie kąta pochylenia rozpylacza powodowało liniowe poszerzenie pasa oprysku przy jednoczesnym spadku maksymalnej lokalnej dawki cieczy. Natomiast odpowiednie skrócenie rozpylacza poprawiało symetrię i równomierność rozkładu cieczy na powierzchni docelowej. Badania pokazały, że modyfikacja geometrii oprysku pozwala kształtować równomierność pokrycia.

Badanie polowe przeprowadzone w rzędowych uprawach kukurydzy potwierdziło celowość zastosowania zmiennej orientacji rozpylacza, jednocześnie ujawniając pewne różnice względem rezultatów laboratoryjnych. Zarówno dla opryskiwacza standardowego oraz rozwiązania projektowanego, zaobserwowano spodziewaną zależność. Wzrost prędkości przejazdu z $0,5$ do 1 m s^{-1} obniżał poziom pokrycia roślin ze względu na krótszy czas ekspozycji rozpylaczy nad danym obszarem w tym przypadku nad papierkami wodorozpuszczalnymi. Zaobserwowana tendencja była jednak różna dla obu technik oprysku. Opryskiwacz konwencjonalny, pracujący z belką z zamontowanymi rozpylaczami ustawionymi pionowo nad uprawą, osiągał wyższe wartości

pokrycia powierzchni, czyli średnie pokrycie papierków wodorozpuszczalnych sięgało wartości nawet 60–70% przy wolniejszym przejeździe, lecz odbywało się to kosztem mniejszej równomierności. Różnice między miejscami o minimalnym i maksymalnym pokryciu sięgały 35–45%. Rozwiązanie projektowane jako model badawczy, polegające na zmianie kąta rozpylacza o 40° i oprysku bocznym w kierunku roślin, charakteryzowało się znacznie bardziej wyrównanym naniesieniem cieczy. Rozkłady pokrycia cieczy były bardziej zwarte, o węższych przedziałach międzykwartylowych i mniejszych różnicach min–max niż w przypadku opryskiwacza standardowego. Świadczy to o stabilniejszym i równomierniejszym pokryciu roślin przez system mechatroniczny. Opisana wyżej tendencja utrzymywała się niezależnie od prędkości przejazdu, nawet przy 1 m s⁻¹ rozwiązanie projektowane zachowywało względnie jednorodne pokrycie, podczas gdy opryskiwacz tradycyjny wykazywał narastającą nierównomierność. Mimo że konwencjonalny układ dostarczał większą dawkę na jednostkę powierzchni, rozpylacz mechatroniczny zapewniał wyższą powtarzalność pokrycia.

Porównanie ilościowe wyników potwierdza właściwy kierunek zmian. Zgodnie z przyjętą tezą, rozwiązanie projektowane, układ o zmiennej charakterystyce oprysku umożliwił ograniczenie zużycia środków ochrony roślin przy jednoczesnym utrzymaniu skuteczności pokrycia powierzchni roślin. Fundamentem całej oszczędności jest jej precyzyjne ukierunkowanie na punkty docelowe oraz minimalizacja naniesienia w strefach nieproduktywnych, wynika to z selektywnej aplikacji sterowanej systemami wizyjnymi. Tym samym zaprojektowane rozwiązanie jest tak dobre, jak dobra jest jego percepcja, czyli rozpoznanie. Wpływ na to mają jakość segmentacji roślin i chwastów, odporność na zmienne oświetlenie i zacielenia, stabilność detekcji przy zmianach prędkości przejazdu czy fazy rozwojowej uprawy bezpośrednio przekładają się na lokalną decyzję o podaniu lub wstrzymaniu dawki, a w konsekwencji na łączny bilans zużytego środka ochrony roślin.

Należy podkreślić, że mimo ogólnej zgodności trendów, badania polowe ujawniły ograniczenia technologii w warunkach rzeczywistych. Po pierwsze podczas eksperymentów wystąpiły trudności ze stabilizacją ciśnienia roboczego oprysku na zadanym poziomie 2 bar zaobserwowano wahania ciśnienia w trakcie pracy. Skutkowało to miejscową zmianą wielkością kropeł oraz chwilowym odchyleniem wydatku cieczy, mogło wpłynąć to na wyniki pokrycia. Kolejnym czynnikiem jest wpływ warunków atmosferycznych podczas badań polowych. Mimo że badania prowadzono przy sprzyjającej pogodzie przy niskiej wilgotności, brak opadów, minimalny wiatr, nie da się całkowicie wyeliminować oddziaływania środowiska. Ograniczeniem badania polowego była też stosunkowo niewielka skala, testowano pojedynczy rząd kukurydzy na krótkim odcinku. Choć uzyskane wyniki są reprezentatywne jakościowo, wdrożenie technologii w pełnowymiarowym opryskiwaczu polowym będzie wymagało dalszych badań w zróżnic-

wanych warunkach z uwzględnieniem innych gatunków roślin, różne fazy wzrostu, większe prędkości jazdy, nierówny teren.

Ostateczna interpretacja wyników potwierdza postawioną tezę badawczą. Przyjęte założenia zastosowania mechatronicznego rozpylacza o regulowanej charakterystyce pozwoliły zmniejszyć dawkę środka ochrony roślin przy zachowaniu wymaganej skuteczności oprysku, rozumianej jako równomierne pokrycie całej rośliny. Wyniki zarówno z laboratorium, jak i z pola potwierdziły tezę, projektowany system zredukował zużycie cieczy roboczej, i jednocześnie zapewnił prawidłowe pokrycie. Z punktu widzenia praktyki rolniczej oznacza to realne korzyści takie jak redukcja kosztów zabiegu poprzez zmniejszenie ilości wody i środków ochrony roślin oraz ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko.

6. Koszty i analiza rynku

6.1 Identyfikacja klientów i użytkowników technologii

Centrum Nowoczesnej Mobilności, należące do Sieci Badawcza Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego (wcześniej funkcjonującego jako Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, przed połączeniem pięciu poznańskich instytutów badawczych), od lat współpracuje z czołowymi producentami maszyn rolniczych w Polsce, realizując liczne projekty badawczo-rozwojowe. Dzięki prowadzonej działalności wspiera krajowych producentów w rozszerzaniu oferty i zwiększaniu konkurencyjności względem zagranicznych firm. Dodatkowo, nowo zaprojektowane maszyny rolnicze mogą zostać poddane szczegółowym testom w akredytowanym laboratorium maszyn rolniczych lub w stacji kontroli opryskiwaczy, wyposażonej w wysokiej klasy sprzęt zgodny z wytycznymi Głównego Inspektora Ochrony Roślin i Nasiennictwa. Zapewnia to producentom pewność, że ich urządzenia spełniają najwyższe standardy jakościowe i normy techniczne [133].

Projektowany mechatroniczny rozpylacz, opracowywany w ramach doktoratu wdrożeniowego, jest skierowany przede wszystkim do czołowych polskich producentów opryskiwaczy rolniczych oraz firm współpracujących z Centrum Nowoczesnej Mobilności. Jego wdrożenie ma na celu podniesienie innowacyjności krajowych maszyn oraz dostosowanie ich do restrykcyjnych norm Unii Europejskiej w ramach strategii „Od pola do stołu”, której celem jest ograniczenie stosowania środków ochrony roślin i zwiększenie efektywności produkcji rolnej.

W Polsce nie prowadzi się ogólnodostępnych statystyk dotyczących liczby sprzedawanych opryskiwaczy rolniczych. Jednak na podstawie raportu opublikowanego w czasopiśmie ATR Express, analizującego dane sprzedażowe w ramach programu PROW 2014-2020, za liderów rynku wśród polskich producentów uznaje się następujące firmy: Krukowiak (Kujawska Fabryka Maszyn Rolniczych Sp. z o.o.), Unia Sp. z o.o., Bury Maszyny Rolnicze Sp. z o.o. [134]. Są to przedsiębiorstwa o ugruntowanej pozycji na rynku krajowym, dysponujące szerokim zapleczem technologicznym oraz doświadczeniem w produkcji maszyn rolniczych. Dzięki rozbudowanej sieci dystrybucji i obecności na rynkach zagranicznych stanowią one wiarygodnych i konkurencyjnych partnerów do współpracy.

Firma Krukowiak (Rys. 6.1) rozpoczęła swoją działalność w latach 70. XX wieku w miejscowości Redecz Krukowy. Jej założyciel, Janusz Borkowski, po powrocie z zasadniczej służby wojskowej podjął się modernizacji gospodarstwa rodziców, napotykając na brak odpowiednich maszyn rolniczych. W 1977 roku założył Zakład Rzemieślniczy, produkujący sprzęt rolniczy,

który szybko odniósł sukces dzięki skonstruowaniu zawieszanego opryskiwacza, kompatybilnego z traktorem Ursus C-330. W efekcie rosnącego popytu firma Krukowiak stała się pierwszym w Polsce prywatnym producentem opryskiwaczy rolniczych. Obecnie koncentruje się na produkcji opryskiwaczy, ale w jej ofercie znajdują się również maszyny do uprawy cebuli, ziemniaków i warzyw, które cieszą się dużym zainteresowaniem na rynku krajowym i zagranicznym [135–137].



Rysunek 6.1: Logo firmy Krukowiak (Kujawska Fabryka Maszyn Rolniczych Sp. z o.o.) [137].

Początki działalności firmy Unia (Rys. 6.2) sięgają 1882 roku, kiedy to August Ventzki rozpoczął produkcję dwuskbowego pługa. Na przestrzeni lat przedsiębiorstwo znacząco się rozwinęło, a w 1920 roku, po odzyskaniu niepodległości przez Polskę, przekształcono je w Pomorską Fabrykę Maszyn, która stała się jednym z czołowych producentów w Europie. Po nacjonalizacji w 1948 roku firma funkcjonowała jako Fabryka Narzędzi Rolniczych Unia w Grudziądzu, jednak w 1995 roku, wskutek trudności finansowych, znalazła się w stanie likwidacji. W 2006 roku Unia weszła na rynek opryskiwaczy rolniczych, przejmując firmę Pilmet Wrocław. Obecnie Unia posiada cztery zakłady produkcyjne, eksportuje 40% swoich wyrobów, a roczna produkcja sięga około 25 tysięcy maszyn, co przekłada się na przychody przekraczające 100 mln euro [76, 138]. Centrum Nowoczesnej Mobilności współpracowało z Unią przy realizacji projektu „Inteligentny robot spełniający wymogi rolnictwa precyzyjnego”, co potwierdza jej zaangażowanie w rozwój nowoczesnych technologii [139].



Rysunek 6.2: Logo firmy Unia Sp. z o.o. [138].

Bury Maszyny Rolnicze (Rys. 6.3) to stosunkowo młoda firma, założona w 1991 roku przez Wojciecha Burego. Początkowo koncentrowała się na zawieszanych opryskiwaczach polowych, jednak szybki rozwój nastąpił w 1995 roku, po zakupie zakładu w Kutnie, należącego wcześniej do Państwowego Ośrodka Maszynowego (POM). Wprowadzenie do oferty nowych maszyn, takich jak brony talerzowe oraz pierwsze opryskiwacze sadownicze, przyczyniło się do dalszej ekspansji firmy. W 2001 roku opryskiwacz Pelikan zdobył nagrodę w konkursie IBMER, co ugruntowało pozycję marki na rynku. Obecnie produkty Bury są sprzedawane nie tylko w Polsce, ale także w Niemczech, Hiszpanii i Szwajcarii, gdzie cieszą się dużym uznaniem [140].



Rysunek 6.3: Logo firmy Bury Maszyny Rolnicze Sp. z o.o. [140].

Głównymi odbiorcami projektowanego mechatronicznego rozpylacza rolniczego zamontowanego na gotowej maszynie będą gospodarstwa rolne, szczególnie te, które wdrażają zasady rolnictwa zrównoważonego. Niestety, obecne regulacje oraz systemy dofinansowań nie sprzyjają upowszechnianiu zaawansowanych technologii precyzyjnego oprysku, gdyż nadal dopuszczają aplikację środków ochrony roślin na całej powierzchni pola, niezależnie od rzeczywistego rozmieszczenia chwastów czy upraw wymagających ochrony.

Zaprojektowane rozwiązanie ma także duży potencjał wdrożeniowy w autonomicznych robotach rolniczych, które, choć operują wolniej niż tradycyjne maszyny, charakteryzują się większą precyzją oraz możliwością długotrwałej pracy. Dzięki integracji z systemami

monitorowania warunków atmosferycznych, roboty mogłyby dynamicznie dostosowywać moment aplikacji środków ochrony roślin, tymczasowo wstrzymując zabieg w przypadku niekorzystnych warunków i wznowiając go, gdy sytuacja ulegnie poprawie. Takie podejście zwiększa efektywność oprysku, ale również minimalizuje straty i wpływ na środowisko, wpisując się w globalne trendy zrównoważonego rolnictwa.

6.2 Analiza konkurencyjności i wartości rynkowej

Głównym celem Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego jest prowadzenie prac badawczo-rozwojowych oraz wspieranie producentów maszyn rolniczych w zakresie opracowywania i rozwoju nowych produktów. Instytut posiada zasoby materialne i kadrowe niezbędne do projektowania oraz wdrażania nowoczesnych i innowacyjnych prototypów maszyn rolniczych. Z uwagi na ograniczone możliwości produkcji seryjnej w ramach instytutu, analiza konkurencyjności odnosi się przede wszystkim do aspektów technologicznych i koncepcyjnych, a nie do zdolności masowej produkcji. Innowacyjny projektowany produkt, powstający w ramach programu doktoratu wdrożeniowego, będzie udostępniany producentom opryskiwaczy w formie licencji [133].

W odniesieniu do rynku systemów wspomagających oprysk, wciąż brakuje spójnych i aktualnych danych dotyczących wyłącznie tego segmentu. Dlatego wartość rynkową należy szacować w oparciu o informacje na temat liczby sprzedawanych opryskiwaczy rolniczych w Polsce i na świecie, jak również o prognozy dotyczące rozwoju całego sektora maszyn rolniczych.

W Polsce nie prowadzi się regularnych raportów sprzedaży opryskiwaczy rolniczych, dlatego dane często pochodzą z programów wsparcia, takich jak PROW 2014–2020. Najnowsze dostępne i publicznie opisywane dane pochodzą z realizacji tego programu, przedstawione na łamach czasopisma ATR Express (05/2021) (Tab. 6.1). Według raportu *"Zakupy opryskiwaczy w ramach PROW 2014–2020"*, 69,7% wszystkich zakupionych opryskiwaczy stanowiły urządzenia krajowych producentów. Największy udział w rynku mieli kolejno: Krukowiak (17,9%), Unia Sp. z o.o. (11,7%), Bury Maszyny Rolnicze (9,0%) oraz Biardzki (8,6%). Zaczepiane opryskiwacze polowe były najpopularniejsze (71,6% wszystkich zakupionych opryskiwaczy), natomiast opryskiwacze samojezdne stanowiły zaledwie 0,7% sprzedaży [134].

Według raportu Fact.MR, wartość globalnego rynku opryskiwaczy rolniczych w 2023 roku wynosiła około 2,14 mld USD, a prognozy wskazują na wzrost do 3,84 mld USD do 2033 roku, co oznacza średni roczny wzrost (CAGR) na poziomie 6%. Segment opryskiwaczy samobieżnych odnotowuje najszybszy wzrost, przewidując roczny wzrost na poziomie 7%.

Tabela 6.1: Zakup opryskiwaczy w ramach programu PROW 2014-2020 według ilości sprzedanych sztuk [134].

producent	razem		w tym			w tym		średnia (-i)	
	[szt.]	[%]	zawieszane	zaczepiane	samojezdne	polowe	sadownicze	pojemność [l]	areal gospod. [ha UR]
1 Krukowiak	1078	17,9	426	648	4	1028	50	1649	35,5
2 Unia Group	701	11,7	217	484	-	646	55	1653	35,0
3 Bury	544	9,0	107	437	-	484	60	1676	29,5
4 Biardzki	519	8,6	344	175	-	519	-	999	24,4
5 Amazone	493	8,2	105	386	2	492	1	3040	68,6
6 Woprol	220	3,7	43	177	-	217	3	1815	33,7
7 Hardi	190	3,2	26	158	6	188	2	3278	70,6
8 Agrala	177	2,9	28	149	-	8	169	1356	13,5
9 Promar	177	2,9	57	120	-	174	3	1407	29,0
10 Agrio Moderni	167	2,8	-	166	1	167	-	3549	78,9
11 Dominiak	164	2,7	-	164	-	-	164	1841	11,6
12 Kverneland	159	2,6	13	146	-	159	-	3244	74,8
13 Lemken	152	2,5	12	140	-	152	-	3581	81,1
14 Tad-Len	134	2,2	60	74	-	120	14	1246	25,2
15 Jarmet	116	1,9	90	26	-	113	3	925	22,0
16 Maschio-Gaspardo	99	1,6	24	75	-	92	7	2012	38,4
17 John Deere	94	1,6	-	89	5	94	-	3960	89,8
18 Agromechanika	81	1,3	30	51	-	74	7	1687	37,8
19 Stanimpex	63	1,0	-	63	-	63	-	2321	48,8
20 Kuhn	55	0,9	11	44	-	55	-	2755	65,6
21 Horsch	50	0,8	-	45	5	50	-	5156	120,7
22 Ricosma	46	0,8	8	38	-	-	46	1565	12,8
23 Argo Kaliński	39	0,6	3	36	-	27	12	1290	20,6
24 Agrofart	38	0,6	4	34	-	38	-	1737	31,4
25 Lisicki	38	0,6	6	32	-	3	35	1595	12,8
26 Moskit	36	0,6	1	35	-	27	9	1639	24,9
27 Lochmann	36	0,6	2	34	-	-	36	1486	12,8
28 Berthoud	34	0,6	-	30	4	34	-	3329	79,5
29 Brandi	28	0,5	-	28	-	28	-	2514	52,3
30 MGM	23	0,4	-	23	-	23	-	3013	62,5
31 SAE	20	0,3	-	20	-	-	20	1750	12,3
Pozostali (32-77)*	244	4,2	46	180	18	140	104	2055	32,5
Razem	6015	100	1663	4307	45	5215	800	1998	40,3

* Pozostali producenci: Horus, Dammann, Bigpol, Akpil, Skotarek, Tolmet, Mitterer, Wanner, Zupan, Kam-Rol, Tifone, Bargam, Toselli, Agromax, Dragone, Hydro-Masz, Polmark, Agromont, BD, Genesini, Steiner, Agro-Max Bis, Renal, Challenger, FarmGem, Agromex, KWA ZPH, Andreoli, BAB-Bamps, Boguslavskaya, Dubex, Farmer CO, Fendt, Matrot, Munchhof, Tecnomat, Demarol, Dom-Wid, Weremczuk, Agricolmeccanica, Agrifac, Caffini, Caruelle, Danfoi, Mazzotti, Micron, Nobili.

Największym segmentem pozostają opryskiwacze ciągnikowe, które stanowiły 58% globalnej sprzedaży w 2023 roku. Opryskiwacze dronowe zyskują na znaczeniu, osiągając wzrost o 9% rocznie, co wynika z rosnącego zastosowania technologii precyzyjnego rolnictwa [141].

Rynek opryskiwaczy rolniczych, mimo zmian legislacyjnych, takich jak Europejski Zielony Ład, nadal rozwija się i dostosowuje do nowych wymagań. Zmiany prawne wymuszają implementację nowoczesnych technologii precyzyjnego oprysku, które zwiększają efektywność aplikacji środków ochrony roślin oraz ograniczają ich zużycie, wpisując się to w globalne trendy zrównoważonego rolnictwa.

Najwięksi światowi producenci maszyn rolniczych, tacy jak John Deere, regularnie wprowadzają innowacyjne rozwiązania w zakresie oprysków. Przykładem jest technologia See & Spray, wykorzystująca kamery i algorytmy sztucznej inteligencji do identyfikacji chwastów w czasie rzeczywistym, pozwala to na selektywne stosowanie herbicydów i redukując ich zużycie [142].

Na rynku polskim krajowi producenci wciąż ograniczają się głównie do konwencjonalnych systemów oprysku. W celu zobrazowania różnic cenowych pomiędzy standardowymi opryskiwaczami a modelami wyposażonymi w rozbudowany system sterowania, można przyjrzeć się dwóm konkretnym modelom. Opryskiwacz Borys firmy Tolmet (szerokość belki 24 m, zbiornik 5500 l) z podstawowym sterowaniem kosztuje 55 718 zł netto [143]. Natomiast opryskiwacz Mescomp Hardy (szerokość belki 24 m, zbiornik 5500 l) wyposażony w zaawansowany system zmiennego dawkowania PWM kosztuje 264 000 zł netto [144]. Różnica cenowa jest znacząca – opryskiwacz z nowoczesnym systemem sterowania kosztuje niemal pięciokrotnie więcej niż model standardowy. Jest to efekt zastosowania zaawansowanych technologii, takich jak precyzyjne sterowanie każdym rozpylaczem, automatyczne dostosowywanie dawki do prędkości jazdy czy kompensacja na zakrętach, co pozwala na bardziej efektywne i ekonomiczne stosowanie środków ochrony roślin. W przypadku rynków zagranicznych można przedstawić przykładowe ceny rozwiązań opartych o najnowsze systemy wizyjne i AI. Systemy modernizacji opryskiwaczy serii R od 2018 roku o system See & Spray kosztuje około 25 000 USD, z czego 19 000 USD przypada na sprzęt, a 6 000 USD na instalację [142].

Przedstawione wartości obrazują wysokie koszty wdrażania nowoczesnych technologii oprysku, jednak ich zastosowanie może prowadzić do znacznych oszczędności w dłuższym okresie poprzez redukcję zużycia środków ochrony roślin i zwiększenie precyzji aplikacji. W Polsce adopcja tych technologii jest na wczesnym etapie, jednak wraz z postępującymi zmianami prawnymi i rosnącym zapotrzebowaniem na efektywne rozwiązania rolnicze można spodziewać się coraz szerszej ich dostępności.

Wprowadzane rozwiązanie może początkowo napotykać na pewne ograniczenia wynikające z wczesnego etapu rozwoju technologii. Najlepszym podejściem byłoby wyprodukowanie małej, pilotażowej serii urządzeń, które trafiłyby do wybranej grupy zaufanych rolników. W zamian za preferencyjne warunki zakupu, użytkownicy mogliby dostarczać cenne informacje zwrotne, pozwalające na doskonalenie systemu i eliminację ewentualnych wad. Takie podejście umożliwi stopniowe doskonalenie rozwiązania i przygotowanie jej do pełnoskalowej komercjalizacji. Początkowe zyski powinny być minimalne, a priorytetem – promocja technologii. Takie podejście pozwoli ograniczyć ryzyko rynkowe, uzyskać dane z eksploatacji w rzeczywistych warunkach oraz lepiej przygotować produkt do pełnoskalowej komercjalizacji.

6.3 Analiza kosztów produkcji i technologiczności konstrukcji

Koszty całego systemu zależą w dużej mierze od konkretnej konfiguracji oraz liczby sekcji zastosowanych w danym rozwiązaniu. Warto zauważyć, że na początkowych etapach produkcji, zwłaszcza przy pierwszych egzemplarzach, montaż będzie odbywał się ręcznie, co naturalnie podniesie koszty jednostkowe. Dopiero przy składaniu większej liczby sztuk oraz zamawianiu komponentów w większych ilościach możliwe będzie uzyskanie bardziej precyzyjnych danych dotyczących rzeczywistych kosztów produkcji. Wstępne szacunki, oparte na budowie modelu badawczego, nie są jeszcze w stanie w pełni odzwierciedlić kosztów finalnego, komercyjnego produktu, jednak stanowią cenną bazę do dalszych analiz i prognoz.

Warto również podkreślić, że firma wdrażająca system na rynek może wprowadzać modyfikacje, dostosowując rozwiązanie do specyficznych wymagań swoich maszyn lub wykorzystując doświadczenie zdobyte w praktyce. Takie adaptacje mogą wpływać zarówno na finalną funkcjonalność, jak i na koszty produkcji oraz wdrożenia. Aby ułatwić analizę kosztów, przygotowano zestawienie kosztów zakupu i produkcji poszczególnych modułów systemu (Tab. 6.2). Przedstawione dane opierają się na szacunkach, które uwzględniają wszystkie niezbędne komponenty elektryczne i mechaniczne, biorąc pod uwagę jednostkowe koszty produkcji. Należy jednak pamiętać, że ceny poszczególnych elementów mogą się zmieniać w zależności od liczby zamawianych sztuk, dostępności komponentów oraz kosztów związanych z montażem i testowaniem. Tak przygotowane porównanie kosztów może posłużyć jako podstawa do rozmów z potencjalnymi partnerami biznesowymi i wdrażającymi rozwiązanie na większą skalę.

Koszty w przypadku komercyjnej produkcji rozwiązania będą niższe ze względu na efekt skali, który pozwala na redukcję kosztów jednostkowych poprzez między innymi zamówienia hurtowe komponentów oraz optymalizację procesu produkcyjnego. Dodatkowo, w trakcie wdrożenia seryjnej produkcji możliwe jest wprowadzenie zmian konstrukcyjnych, które skrócą czas montażu, zmniejszą liczbę wymaganych operacji technologicznych oraz uproszą logistykę komponentów. Wprowadzenie standaryzowanych modułów pozwala na ich szybszą produkcję oraz łatwiejsze składanie końcowego produktu, eliminując czasochłonne operacje ręcznego montażu i regulacji [145].

Istotnym aspektem redukcji kosztów jest również dobór odpowiednich materiałów i technologii produkcji. Przykładem może być zastąpienie drukowanych metodą druku 3D komponentów elementami wytwarzanymi w technologii wtrysku tworzyw sztucznych. Koszt wdrożenia

Tabela 6.2: Koszty oraz czasochłonność dla poszczególnych rozwiązań.

L.P.	Rodzaj	Koszt materiałów	Zapotrzebowanie	Czasochłonność montażu i konfiguracji
1	Głowica rozpylacza	800 – 1200 zł	jeden na każde rząd	4–6 h
2	Pozycjonowanie belki w rzędach	2500 – 3000 zł	jeden na całą maszynę	2–3 h
3	Pozycjonowanie rozpylacza w międzyrzędziu	3500 – 4000 zł	jeden na każdy międzyrzędzie	4–5 h
4	Rozpoznawanie rzędów roślin	8000 – 10000 zł	jeden na każdy rząd	2–3 h
5	Rozpoznawanie rośliny uprawnej	6000 – 8000 zł	jeden na każdy rząd	2–3 h
6	Rozpoznawanie chwastów w międzyrzędziu	4000 – 5000 zł	jeden na każdy międzyrzędzie	2–3 h
Razem		24 800 – 31 200 zł		16 – 23 h

formy wtryskowej jest wyższy niż pojedynczego wydruku 3D, jednak w przypadku seryjnej produkcji cena jednostkowa elementu znacznie spada, co czyni tę metodę bardziej opłacalną w długoterminowej perspektywie.

Innym sposobem na optymalizację kosztów jest zastosowanie metod automatycznego montażu, takich jak wykorzystanie robotów montażowych czy zautomatyzowanych linii produkcyjnych. Wprowadzenie takich rozwiązań pozwala na eliminację błędów ludzkich, zwiększenie powtarzalności oraz przyspieszenie całego procesu, co w konsekwencji przekłada się na oszczędności związane z zatrudnieniem pracowników oraz redukcją strat materiałowych [145].

Technologiczność konstrukcji systemu opiera się na modułowej i elastycznej architekturze, która umożliwia łatwe skalowanie, adaptację oraz integrację z różnymi platformami. Modułowy charakter systemu oznacza, że każdy element konstrukcji – zarówno mechaniczny, jak i elektroniczny – został zaprojektowany jako odrębna jednostka, co upraszcza proces montażu i serwisowania. Dzięki temu każda sekcja może być niezależnie testowana, kalibrowana i serwisowana, co znacznie skraca czas konserwacji oraz minimalizuje ryzyko przestojów w pracy systemu. Dodatkowo dzięki implementacji teorii sterowania rozproszonego każda sekcja urządzenia może działać niezależnie, a komunikacja między modułami odbywa się w sposób zdecentralizowany. W przypadku awarii jednego z podzespołów, pozostałe moduły mogą kontynuować pracę, minimalizując ryzyko całkowitego zatrzymania systemu. Takie rozwiązanie zwiększa odporność na błędy oraz ułatwia diagnostykę i serwisowanie.

Kluczowym aspektem technologiczności jest również zastosowanie zaprojektowanych dedykowanych płytek PCB, eliminujących konieczność korzystania z uniwersalnych sterowników

zawierających niepotrzebne funkcje. Własne układy sterujące pozwalają na optymalizację zarówno kosztów produkcji w przypadku produkcji seryjnej, jak i przestrzeni wewnątrz urządzenia. Wszystkie elementy konstrukcyjne zostały wykonane z materiałów odpornych na działanie czynników atmosferycznych, takich jak wilgoć, pył czy promieniowanie UV. Szczególną uwagę poświęcono zabezpieczeniom przed drganiem, które mogłyby negatywnie wpłynąć na precyzję działania układów sterujących. Dodatkowo ergonomia konstrukcji umożliwia łatwy dostęp do elementów serwisowych, co minimalizuje czas potrzebny na konserwację oraz ewentualne naprawy.

6.4 Kryteria wyceny gotowego produktu

Kryteria wyceny produktu opracowanego w ramach doktoratu powinny uwzględniać aspekty techniczne, ekonomiczne oraz rynkowe, które determinują jego opłacalność podczas wdrożenia. Pierwszym kluczowym elementem analizy jest precyzyjne określenie kosztów produkcji. Obejmuje to zarówno koszty zakupu materiałów niezbędnych do wytworzenia jednej jednostki produktu, jak i koszty związane z montażem i kontrolą jakości. Istotnym czynnikiem wpływającym na jednostkowy koszt wytworzenia jest skala produkcji – wycena powinna uwzględniać zarówno wariant niskonakładowej produkcji pilotażowej, jak i optymalizację kosztów w przypadku produkcji masowej. W przypadku, gdy koszty wytworzenia przewyższają akceptowalny poziom cenowy dla odbiorców docelowych, konieczne jest rozważenie możliwych uproszczeń technologicznych. Optymalizacja konstrukcji oraz procesu produkcyjnego może przyczynić się do redukcji kosztów przy jednoczesnym zachowaniu kluczowych funkcjonalności produktu.

Kolejnym aspektem jest dostosowanie oferty do aktualnych uwarunkowań rynkowych, które obejmują zarówno oczekiwania konsumentów, jak i obowiązujące regulacje prawne oraz politykę państwa, w tym rodzaju dostępności dotacji czy systemów wsparcia finansowego. Poniesiony koszt dodatkowego rozwoju produktu dostosowującego się do rodzaju dotacji może wpłynąć na zwiększenie skali sprzedaży.

Ostateczna cena urządzenia, przeznaczonego do zastosowań w rolnictwie, powinna być ustalona w taki sposób, aby koszt jego zakupu przez rolnika zwrócił się w określonym okresie eksploatacji. W szczególności, w przypadku systemów precyzyjnego oprysku rolniczego, inwestycja powinna przynosić wymierne oszczędności w zakresie zużycia środków ochrony roślin. Analiza ekonomiczna powinna uwzględniać zarówno zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych, jak i potencjalne zwiększenie efektywności produkcji rolnej. Wartością graniczną, przyjętą jako optymalna dla rolników, jest okres zwrotu inwestycji nieprzekraczający trzech lat, co czyni

technologię bardziej przystępną oraz atrakcyjną rynkowo.

Zaprojektowane w ramach doktoratu wdrożeniowe rozwiązanie może zostać poddane wstępnej wycenie zgodnie z określonymi kryteriami. Koszty materiałowe oraz czasochłonność produkcji zostały przedstawione w tabeli 6.2. W kontekście aktualnej sytuacji rynkowej oraz dostępnych mechanizmów wsparcia, analizie poddano możliwość uzyskania dofinansowania w ramach programu Krajowego Planu Odbudowy (KPO) dla sektora rolnictwa 4.0. Program ten oferuje refundację kosztów kwalifikowanych na poziomie od 50% do 80%, w zależności od spełnienia określonych kryteriów. Jednym z objętych wsparciem obszarów są innowacyjne technologie, w tym autonomiczne roboty rolnicze przeznaczone do ochrony upraw.

W ramach potencjalnej współpracy możliwe jest nawiązanie partnerstwa z producentami robotów rolniczych np. FPM Agromechanika, oferującymi m.in. robot Agar, czyli kompaktowy, autonomiczny system przeznaczony do pracy w polu, którego cena katalogowa wynosi około 208 tys. zł. Integracja opracowanego w ramach doktoratu systemu opryskowego z tym robotem wymagałaby jednak dostosowania zarówno pod względem konstrukcyjnym, jak i funkcjonalnym. Ze względu na niewielkie wymiary robota, konieczne byłoby zastosowanie precyzyjnej technologii aplikacji cieczy, ponieważ ograniczona przestrzeń i ograniczony udźwig uniemożliwia montaż dużych zbiorników na środki ochrony roślin. Dodatkowo, wymiary robota pozwalają na obsługę jedynie jednego międzyrzędzia, co determinuje konieczność zastosowania precyzyjnego systemu oprysku.

Proponowany zestaw komponentów dla robota Agar obejmuje:

- Głowicę opryskową,
- Układ pozycjonowania w międzyrzędziu,
- System rozpoznawania chwastów w międzyrzędziu.

Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne oraz konieczność dostosowania systemu do specyficznych wymagań platformy autonomicznej, projekt zakłada uproszczoną wersję opryskiwacza w porównaniu do pełnowymiarowego rozwiązania stosowanego w tradycyjnych opryskiwaczach rolniczych. Dzięki temu możliwe jest znaczące obniżenie kosztów materiałowych do poziomu 8 300 – 10 200 zł oraz redukcja czasochłonności montażu do przedziału 10 – 14 godzin. Zakładając średnią stawkę godzinową pracownika na poziomie 150 zł (uwzględniając koszty pośrednie przedsiębiorstwa), koszt produkcji jednego systemu wynosi w przedziale 9 800 – 12 300 zł. Należy podkreślić, że są to wartości oszacowane dla jednostkowej produkcji, bez optymalizacji oraz seryjnej produkcji.

Obecnie brak jest oficjalnych cen rynkowych dla rozwiązań o identycznej funkcjonalności. Na podstawie analizy cen sprzedaży zbliżonych systemów precyzyjnego oprysku w rolnictwie, można szacować, że akceptowalna cena rynkowa dla oferowanego rozwiązania wynosi około 30 000 zł. Taki poziom cenowy umożliwi osiągnięcie marży na poziomie przekraczającym 200%, co czyni projekt ekonomicznie atrakcyjnym zarówno z perspektywy wdrożenia rynkowego, jak i potencjalnych inwestorów zainteresowanych komercjalizacją technologii. Oczywiście przedstawiony został optymistyczny scenariusz uwzględniający, że poniesione koszty integracji robota z systemem, przyniesie realną sprzedaż w ramach dotacji i szybki zwrot z marży.

6.5 SWOT technologii

Naukowcy i konsultanci biznesowi z Harvard Business School opracowali w latach 50. i 60. XX wieku podstawowe założenia analizy SWOT. Dzięki elastyczności i prostocie metoda ta nie wyszła z użycia od ponad 50 lat. SWOT jest akronimem od *strengths* (mocne strony), *weaknesses* (słabe strony), *opportunities* (szanse) i *threats* (zagrożenia).

Prawidłowo przeprowadzona analiza stanowi punkt wyjścia do działań mających na celu zredukowanie zagrożeń i wykorzystanie szans, a także wyeliminowanie słabych stron i wzmocnienie mocnych. W zależności od dominującego czynnika można obrać odpowiednią strategię:

- **Strategia ofensywna (maxi-maxi)** – przy dominacji szans w otoczeniu i silnych stron.
- **Strategia konserwatywna (maxi-mini)** – przy silnych stronach i jednoczesnych zagrożeniach.
- **Strategia konkurencyjna (mini-maxi)** – przy dominujących słabościach i dużych szansach.
- **Strategia defensywna (mini-mini)** – przy słabych stronach i zagrożeniach.

Analiza SWOT odnosi się do projektowanego mechatronicznego rozpylacza opryskiwacza rolniczego w ramach doktoratu wdrożeniowego [146–150].

Tabela 6.3: Średnia ważona składowych analizy SWOT

Lp.	Element	Waga	Ocena	Iloczyn
Mocne Strony (S)				
S1	Innowacyjne rozwiązanie	0,2	6	1,2
S2	Wpisanie się w aktualne trendy panujące na rynku maszyn rolniczych	0,1	8	0,8
S3	Ograniczanie ilości stosowanych środków chemicznych	0,4	8	3,2
S4	Wpisuje się w zasady rolnictwa precyzyjnego	0,3	7	2,1
Średnia ważona:				7,3
Słabe Strony (W)				
W1	Wyższe koszty (automatyka sterowania)	0,5	5	2,5
W2	Problemy z dostępnością podzespołów	0,2	9	1,8
W3	Bardziej skomplikowane diagnozowanie i naprawa	0,3	6	2,7
Średnia ważona:				7,0
Szanse (O)				
O1	Połączenie 5 Instytutów w Poznaniu w Sieć Badawczą Łukasiewicz	0,1	6	0,6
O2	Aktualny trend automatyzacji rolnictwa	0,2	6	1,2
O3	Pomoc polskim firmom w innowacjach	0,2	8	1,6
O4	Możliwość prezentacji produktu na targach rolniczych	0,1	7	0,7
O5	Ograniczenia stosowania pestycydów (regulacje UE)	0,4	9	3,6
Średnia ważona:				7,7

Zagrożenia (T)				
T1	Brak zainteresowania ze strony rolników i producentów	0,4	8	3,2
T2	Konkurencyjny produkt pojawi się szybciej na rynku	0,2	5	1,0
T3	Prawny zakaz stosowania pestycydów	0,1	7	0,7
T4	Zmiana kierunków rozwoju w rolnictwie	0,1	5	0,5
T5	Zbyt duże koszty w stosunku do zysków	0,2	7	1,4
Średnia ważona:				6,8

Średnie ważne wyliczone w tabeli 6.3 pozwala na wyznaczenie punktu A (6.3) za pomocą wzoru (6.1, 6.2). Punkt zaznaczony na układzie współrzędnym (Rys. 6.4) pozwoli na określenie strategii działania dla produktu projektowanego w ramach doktoratu wdrożeniowego:

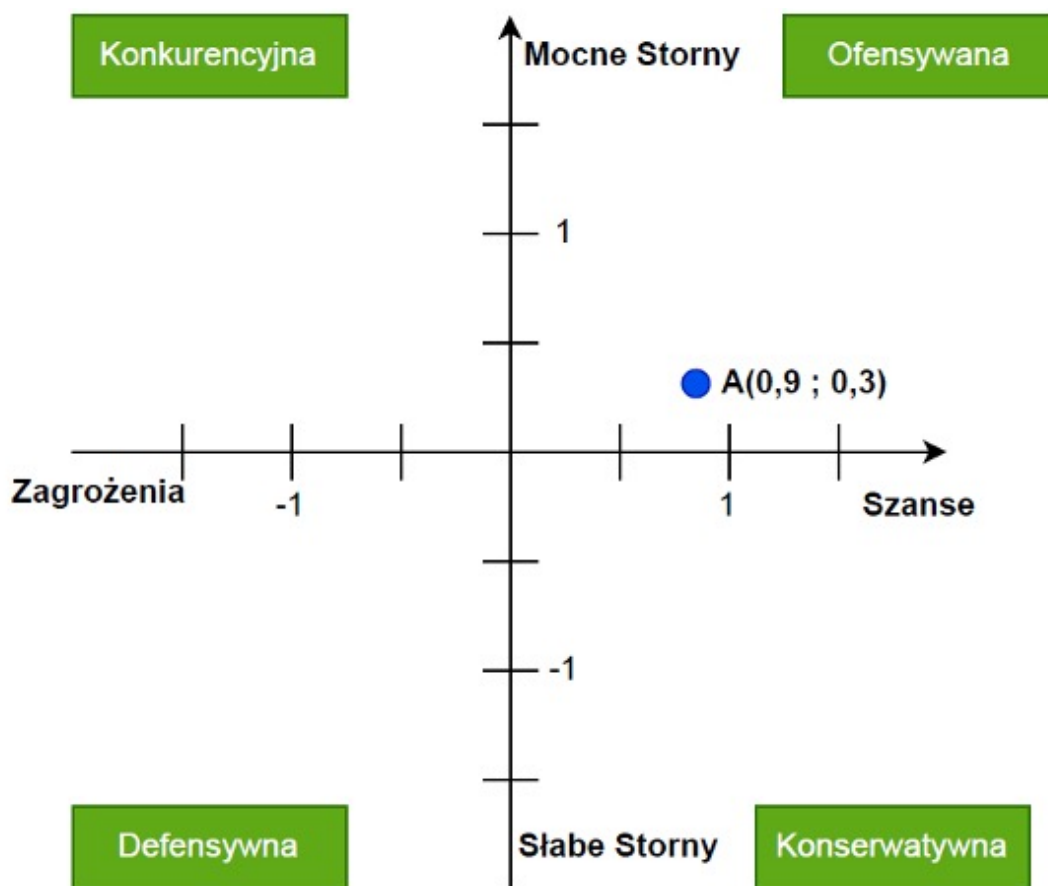
$$Y = |\text{mocne strony}| - |\text{słabe strony}| = 7.3 - 7.0 = 0.3 \quad (6.1)$$

$$X = |\text{szanse}| - |\text{zagrożenia}| = 7.7 - 6.8 = 0.9 \quad (6.2)$$

$$A(X, Y) = (0.9, 0.3) \quad (6.3)$$

Ponieważ jednocześnie dominują szanse (O) oraz mocne strony (S), określono strategię ofensywną (maxi-maxi) dla projektowanego produktu. W takiej strategii należy:

- Wzmacniać mocne strony (badania, rozwój produktu, obserwacja trendów),
- Eliminować słabe strony (np. przez system diagnostyki),
- Wykorzystywać szanse (licencje dla polskich producentów, prezentacje na targach).



Rysunek 6.4: Układ współrzędnych strategii według analizy SWOT. Opracowanie własne na podstawie [149].

Wskaźniki atrakcyjności rynkowej (AR)(6.4) i pozycji rynkowej (PR)(6.5) oraz prawdopodobieństwo sukcesu strategicznego (PSS)(6.6):

$$AR = \frac{O}{O + T} = \frac{7.7}{7.7 + 6.8} = 0.53 \quad (6.4)$$

$$PR = \frac{S}{S + W} = \frac{7.3}{7.3 + 7.0} = 0.51 \quad (6.5)$$

$$PSS = \frac{AR + PR}{2} = \frac{0.53 + 0.51}{2} = 0.52 \quad (6.6)$$

Wynik PSS przekracza minimalną wartość 0.5, co oznacza, że produkt ma szansę na osiągnięcie rynkowego sukcesu, choć jest to wartość niewiele powyżej progu, co sugeruje zachowanie ostrożności. Zaleca się wzmocnienie mocnych stron i większe wykorzystanie szans.

6.6 Możliwość wariantowości rozwiązania

Projektowane w ramach doktoratu wdrożeniowego rozwiązanie stanowi nowoczesną koncepcję oprysku na rynku technologii opryskiwania, wpisujący się w aktualny trend rolnictwa

precyzyjnego, stanowiącego część koncepcji Rolnictwa 4.0. Mając na uwadze sceptyczne i konserwatywne podejście rolników do innowacji [151], zdecydowano się na realizację doktoratu w formie modułowej. Dzięki temu każdy z modułów może stanowić osobny system, który łatwo można zintegrować z nową lub istniejącą już konstrukcją opryskiwacza, znacznie rozszerzając jego możliwości.

Poszczególne moduły nie tworzą samodzielnych, w pełni niezależnych produktów, lecz są zaprojektowane tak, by elektronika i oprogramowanie umożliwiały prostą integrację z innymi rozwiązaniami. Wybór koncepcji sterowania częściowo rozproszonego przełożył się na opracowanie odrębnej elektroniki dla każdego modułu oraz zastosowanie znanych i popularnych w rolnictwie protokołów komunikacyjnych (CANbus) do przekazywania sygnałów sterujących. Jest to o tyle istotne, że większość współczesnych maszyn rolniczych jest już przystosowana do obsługi magistrali CAN i coraz popularniejszego standardu ISOBUS [152].

W ramach systemu wyodrębniono następujące moduły:

- **Moduł ruchów poziomych i pionowych** – zapewnia utrzymanie rozpylacza w ustalonej odległości nad rzędami roślin uprawnych, zarówno w pionie, jak i w poziomie. Po odpowiednim dostosowaniu może zastąpić tradycyjne mechanizmy kontroli belki opryskiwacza, poprawiając skuteczność zabiegów w uprawach rzędowych. Na rynku spotkać można inne rozwiązania komercyjne zbliżone do tego modułu, takie jak John Deere BoomTrac Pro, Topcon Norac UC5 czy Raven AutoBoom XRT [153], które automatycznie dostosowują wysokość i nachylenie belki w trakcie oprysku. Zaprojektowany moduł wyróżnia się możliwością utrzymania rozpylacza, dzięki możliwości ruchu poziomego wzdłuż rzędu rośliny uprawnej
- **Moduł detekcji chwastów w międzyrzędziu** – umożliwia rozpoznawanie chwastów w czasie rzeczywistym i uruchamianie oprysku wyłącznie w ich miejscu występowania. Rozwiązanie działa w oparciu o detekcję koloru zielonego, działając poprawnie tylko w momencie braku widocznej rośliny uprawnej. Moduł ten można zainstalować w istniejących maszynach jako wspomaganie, aktywując rozpylacze wyłącznie nad zidentyfikowanym chwastem. Na rynku funkcjonują już podobne systemy, takie jak WEED-IT, WeedSeeker czy See & Spray[21, 107].
- **Moduł mechatronicznego rozpylacza z systemem zmian rozpylaczy i kątów oprysku** – pozwala na dobór i zmianę rozpylaczy oraz dostosowanie kąta oprysku w zależności od potrzeb. Regulacja kąta wychylenia rozpylacza może być wykorzystywany jako przeciwdziałanie wpływowi wiatru, co zapewnia większą precyzję oprysku.

Moduł ten jest unikatowy i różniący się znacznie od aktualnie stosowanych rozwiązań komercyjnych. Popularną technologią na rynku są techniki impulsowego sterowania zaworami (PWM), wykorzystywane np. w systemach Capstan Ag (PinPoint) czy TeeJet (DynaJet). Oferują one kontrolę nad wielkością kropli i intensywnością oprysku, jednak nie są łączone z możliwością modyfikacji kąta oprysku.

- **Moduł systemu ruchomego rozpylacza** – moduł ten może znaleźć zastosowanie w robotyce rolniczej, umożliwiając precyzyjne aplikowanie oprysku na chwasty poprzez integrację z zaawansowanym systemem wykrywania. Docelowo może wykorzystywać technologie sztucznej inteligencji (AI) do analizy obrazu i automatycznej identyfikacji chwastów lub chorób, co pozwala na selektywny oprysk jedynie w wybranych obszarach pola lub precyzyjnie na konkretną roślinę. Tego rodzaju funkcjonalność znacząco redukuje zużycie środków chemicznych. Chociaż pełne wdrożenie tych rozwiązań wykracza poza zakres niniejszej pracy, dalszy rozwój w tym kierunku mógłby znacząco zwiększyć efektywność i autonomię modułu.

Proponowane podejście modułowe umożliwia stopniowe wprowadzanie i testowanie kolejnych innowacji, pozwala to przełamać nieufność części rolników wobec nowych technologii. Moduły docelowo będą kompatybilne zarówno z nowymi konstrukcjami opryskiwaczy, jak i z już istniejącymi maszynami. Jest to kluczowe dla dalszego rozwoju rolnictwa precyzyjnego oraz popularyzowania idei Rolnictwa 4.0, w którym innowacyjne rozwiązania powinny być jednocześnie elastyczne i funkcjonalne, ukazując realne korzyści konserwatywnym rolnikom.

7. Potencjał wdrożeniowy

7.1 Możliwości integracji rozwiązania z istniejącymi opryskiwaczami

Najnowocześniejsze rozwiązania w maszynach rolniczych, w tym w opryskiwaczach rolniczych, napotykają na bariery wejścia na rynek w porównaniu z technologiami uznanymi za standard. Badania przeprowadzone wśród rolników uprawiających ziemię w Korei Południowej wskazują, że głównymi czynnikami hamującymi wdrażanie innowacyjnych rozwiązań są silnie ugruntowane przyzwyczajenia użytkowników, ograniczony dostęp do wiedzy technicznej oraz obawy związane z niezawodnością nowych rozwiązań i potencjalnymi kosztami ich eksploatacji [154]. Rolnicy, którzy są przyzwyczajeni do tradycyjnych metod ochrony roślin, rzadko decydują się na zaawansowane innowacyjne rozwiązania precyzyjnego oprysku, dopóki świadomie nie uznają technologii za sprawdzoną i opłacalną w dłuższej perspektywie [155].

Jednym ze sposobów zwiększenia akceptacji dla nowoczesnych rozwiązań wśród nieprzekonanych użytkowników jest integracja pojedynczych modułów innowacyjnej technologii z już eksploatowanymi, standardowymi opryskiwaczami rolniczymi. Takie podejście pozwala na minimalizację ryzyka związanego z kosztami, ponieważ bez potrzeby wymiany całej konstrukcji wdraża się tylko wybrany fragment. Etapowe wdrażanie umożliwia jednocześnie rzetelną walidację działania poszczególnych komponentów w rzeczywistych warunkach polowych oraz stopniowe budowanie zaufania do opracowanej technologii.

Wśród rolników podstawowym urządzeniem służącym do ochrony roślin jest opryskiwacz rolniczy, którego typ zależy głównie od wielkości gospodarstwa. W mniejszych gospodarstwach dominują opryskiwacze zawieszane ze względu na niewielki zbiornik oraz niski koszt zakupu montowane bezpośrednio na tylnym TUZ-ie ciągnika. W średnich gospodarstwach przeważają opryskiwacze ciągane, z belką o szerokości 12–24 metrów, natomiast w bardzo dużych gospodarstwach stosowane są opryskiwacze samojezdne, wyposażone w zaawansowane systemy rolnictwa precyzyjnego. Ze względu na wysokie koszty adaptacji nowo zaprojektowanych modułów mechatronicznych, produkcji ręcznej kilku sztuk, ich wdrożenie przynosi największe korzyści w dużych gospodarstwach, gdzie oszczędności na zużyciu środków ochrony roślin przy dużym areale mogą być największe.

Wprowadzenie nowego produktu do istniejącej konstrukcji opryskiwacza rolniczego wiąże się z koniecznością dokładnej oceny, aby zagwarantować kompatybilność, zwiększenie wydaj-

ności oraz korzyści przynoszące użytkownikom wartość dodaną. W celu osiągnięcia sukcesu w tym procesie, kluczowe jest indywidualne podejście do każdej konstrukcji opryskiwacza, biorąc pod uwagę specyfikę modułu, który ma zostać zamontowany. W pierwszym etapie analizy konieczne jest określenie kompatybilności konstrukcji z montowanymi modułami, uwzględniając wymiary, kształt i możliwości montażu.

Jednym z elementów możliwych do relatywnie łatwej adaptacji jest moduł mechatronicznego rozpylacza z systemem automatycznej zmiany rozpylaczy. Rozwiązanie to jest rozwinięciem tradycyjnych rozpylaczy montowanych na belce, wzbogaconym o zawory PWM, układ sterowania kątem oprysku w dwóch płaszczyznach oraz mechanizm pozwalający na szybką zmianę rozpylaczy w zależności od warunków pracy. Adaptacja modułu wymaga jednak modyfikacji zarówno samego modułu, jak i konstrukcji belki opryskiwacza. Nie każdy opryskiwacz będzie bowiem kompatybilny z powodu konstrukcji samej belki, jej maksymalnej nośności oraz sposobu składania. Pierwszym etapem integracji jest opracowanie elementów mocujących, pozwalających na zamontowanie mechatronicznego rozpylacza na istniejącej belce opryskiwacza bez ingerencji w główne elementy nośne belki. Równocześnie należy uwzględnić konieczność doprowadzenia zasilania elektrycznego i sygnałów sterujących oraz podłączenie cieczowe.

Szczególnie korzystny wariant zakłada zamontowanie na belce opryskiwacza i współdziałanie zaprojektowanego modułu rozpylacza z kamerami identyfikującymi chwasty w czasie rzeczywistym oraz z lokalną stacją pogodową dostarczającą bieżące dane o prędkości wiatru, temperatura czy wilgotność. Na podstawie tych informacji algorytm sterujący dobiera optymalny rozpylacz, reguluje parametry oprysku i aktywuje zabieg wyłącznie w miejscu występowania chwastów oraz w warunkach minimalizujących znoszenie cieczy roboczej. Takie rozwiązanie zmniejsza zużycie środków ochrony roślin, ogranicza presję chemiczną na uprawę i środowisko, a jednocześnie podnosi skuteczność zabiegu poprzez precyzyjne, adaptacyjne dawkowanie preparatu.

Możliwe jest również zaadaptowanie systemu wykrywania rzędów roślin do belek opryskiwaczy poprzez zastosowanie adaptera montowanego między zaczepem trójpunktowym a opryskiwaczem zawieszanym. Adapter ten składałby się z ramy nośnej oraz siłownika, który na podstawie danych z systemu wizyjnego przesuwalby opryskiwacz w taki sposób, aby rozpylacze utrzymywały pozycję nad rzędami uprawianych roślin. W zależności od szerokości międzyrzędzi, rozwiązanie wymagałoby modyfikacji belki przez odpowiednie przesunięcia rozpylaczy, dostosowując się do rozstawu rzędów uprawianej rośliny. Utrzymywanie rozpylaczy nad roślinami jest korzystne, ponieważ umożliwia stosowanie rozpylacza o wąskim kącie oprysku, pozwalając na precyzyjne aplikowanie środka tylko na uprawianą roślinę.

Podsumowując, czas poświęcony w ramach rozprawy doktorskiej na opracowanie i walidację modułowej architektury precyzyjnego oprysku jest w pełni uzasadniony. Modułowy charakter rozwiązania umożliwia etapowe testowanie poszczególnych podzespołów, ciągle udoskonalanie algorytmów sterowania oraz sukcesywne budowanie zaufania wśród użytkowników. Takie podejście obniża barierę wejścia na rynek, rolnicy mogą wdrażać innowację stopniowo, zaczynając od pojedynczych rozwiązań montowanych na własnym, już użytkowanym opryskiwaczu. Taka strategia pozwoli na szybszą komercjalizację technologii, jednocześnie dostarczając rzetelnych danych polowych niezbędnych do jej dalszego doskonalenia i skalowania.

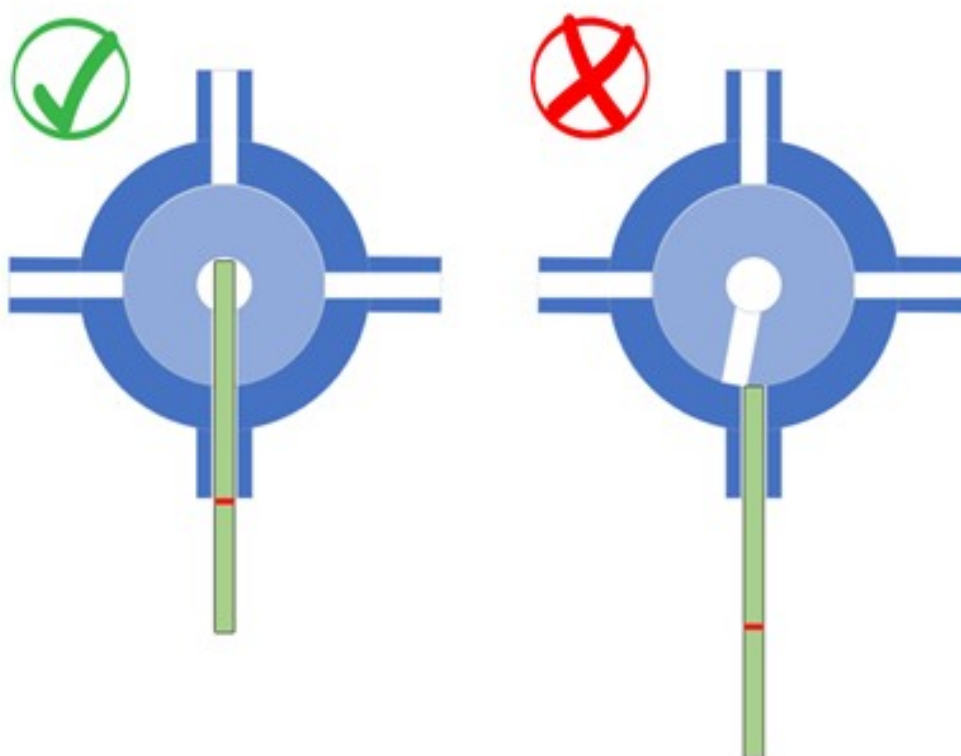
7.2 Projekty układów pomiarowych do kalibracji i kontroli

Pierwszym proponowanym układem pomiarowym jest system pomiaru dokładnego położenia otworu na wałku w stosunku do otworu mocowania rozpylacza (Rys. 7.1). W celu zapewnienia optymalnego przepływu cieczy i odpowiedniego ciśnienia, konieczne jest, aby środki obu otworów były współosiowości. W ramach tego systemu kalibracyjnego, procedura kalibracji polegałaby na wprowadzaniu wałka o precyzyjnie określonych wymiarach do otworu mocowania rozpylacza, osiągając zdefiniowaną głębokość. W sytuacji, gdyby wymagana głębokość nie została osiągnięta, świadczyłoby to o braku współosiowości otworów, wskazując na konieczność korekty. Aby dostarczyć informację o kierunku koniecznej korekty, specjalnie przygotowany stożkowa końcówka wałka posłużyłaby do ustalenia właściwego kierunku przesunięcia.

Kolejnym zaproponowanym układem pomiarowym jest mechanizm kontrolujący funkcjonowanie ruchomego zespołu rozpylającego, która ma operować w obszarze międzyrzędzi. W ramach tego rozwiązania, ruchoma taśma byłaby wyposażona w okrągłe punkty w kolorze zielonym z niewielkim elementem odblaskowym umieszczonym w ich centrum. W miejsce tradycyjnego rozpylacza, zastosowano by czujnik odbicia promieniowania świetlnego. W momencie rozpoczęcia działania układu, rozpylacz byłby naprowadzany laserowo na punkt odblaskowy. Brak trafienia rozpylacza w punkt odblaskowy sygnalizowałby potencjalne problemy z prawidłowym funkcjonowaniem systemu, zarówno w zakresie aspektów elektrycznych, programowych, jak i mechanicznych.

Trzecim proponowanym układem pomiarowym jest system utrzymania rozpylacza nad wyznaczonym rzędem. W tym przypadku również wykorzystuje się przenośnik taśmowy o niebieskim kolorze taśmy z zaznaczonymi zielonymi pasami. Na odpowiedniej wysokości nad

taśmą zostanie zamontowany czujnik detekcji barwy. W momencie, gdy śledzona zielona linia nie jest wykrywana, a zamiast tego wykrywany jest kolor niebieski, sygnalizuje to błąd w systemie, co może wymagać dostosowania parametrów, identyfikacji błędów w oprogramowaniu lub komponentach elektrycznych i konieczności ich korekty.



Rysunek 7.1: Prawidłowo i nieprawidłowo skalibrowana głowica.

7.3 Analiza zalet i wad rozwiązania

Zastosowanie zaproponowanego w pracy doktorskiej rozwiązania przekłada się na szereg korzyści, które można rozpatrywać zarówno w kontekście bezpośrednich oszczędności finansowych, długofalowego wpływu na środowisko oraz jakość produkcji rolniczej. W pierwszej kolejności należy podkreślić, że selektywne dozowanie środków ochrony roślin pozwala na ograniczenie ich zużycia. Dzięki zastosowaniu dedykowanych systemów wizyjnych ilość preparatu dostarczanego do strefy zabiegowej może być ograniczona do minimum niezbędnego do skutecznego zabiegu. Oszczędności finansowe bezpośrednio będą związane z ilością zakupowanych środków ochrony roślin i będą zależne od stopnia porażenia lub zachwaszczenia na polu.

Kolejną korzyścią jest wpływ środowiskowy na jakość gleby i zasoby wodne. Mniejsza ilość aplikowanych pestycydów oznacza, że do gleby przedostaje się potencjalnie mniej substancji aktywnych, ograniczając ryzyko kumulacji toksycznych związków w glebie oraz minimalizuje migrację chemikaliów do wód gruntowych. Poprawa stanu zdrowotnego gleby sprzyja zwiększeniu aktywności mikrobiologicznej oraz utrzymaniu optymalnej struktury polepszając warunki wzrostu roślin.

Trzecią zauważaną korzyścią jest eliminacja bezpośredniego oprysku herbicydem na rośliny uprawne. W tradycyjnych metodach aplikacji cało-powierzchniowej część cieczy roboczej osiada na liściach i łodygach rośliny uprawnej. Herbicydy projektowane są w taki sposób, aby selektywnie oddziaływać tylko na chwasty, lecz nie pozostają obojętne na roślinę uprawną, w przypadku prowadzeniu oprysku ze zbyt wysoką dawką, nieodpowiedniej fazie rozwoju lub terminie. W przypadku wystąpienia błędów w stosowaniu herbicydów, selektywne stosowanie ograniczy potencjalne straty.

Ostatnią ważną korzyścią jest aspekty związane z oszczędnością zasobów wodnych i energetycznych. Selektywny oprysk wymaga mniejszej ilości cieczy roboczej, przekłada się na oszczędności w zużywaniu wody. Mniejsza ilość wody potrzebna do prawidłowego zabiegu oznacza to mniejsze obciążenie jednostek napędowych ciągników lub robotów rolniczych w efekcie obniża się zużycie paliwa lub energii elektrycznej.

Pierwszą istotną wadą proponowanego rozwiązania mechatronicznego jest znacznie wyższy poziom złożoności konstrukcyjnej w porównaniu z rozwiązaniami standardowymi stosowanymi w rolnictwie. Złożoność przekłada się nie tylko na wyższy koszt zakupu urządzenia, lecz także na zwiększone koszty integracji, uruchomienia i szkolenia użytkowników.

Drugą wadą proponowanego rozwiązania jest zależność modułów mechatronicznych od jakości i niezawodności systemów wizyjnych. W praktyce skuteczność działania urządzenia będzie tak dobra, jak dokładność detekcji, segmentacji i śledzenia obiektów w warunkach polowych systemów wizyjnych. Pogorszenie jakości wynika ze zmiennych warunków oświetleniowych, zasłonięcia przez rośliny, zanieczyszczenia optyki przez kurz, a także zróżnicowanie odmian i faz rozwojowych upraw. Wrażliwości systemów wizyjnych może prowadzić do spadku precyzji sterowania wykonawczego oraz wzrostu liczby fałszywych działań.

Trzecią istotną wadą jest potrzeba dopasowania urządzenia do danej uprawy rzędowej i jej cech agrotechnicznych, takich jak szerokość i rozstaw rzędów. W przypadku rezygnacji z uprawy danego rodzaju rośliny, będzie wymagać przebrojenia lub zakupu nowej dopasowanej wersji urządzenia.

Ostatnią wadą są potencjalne problemy z serwisowaniem wynikające z dużej liczby elementów ruchomych. Większa liczba węzłów kinematycznych zwiększa prawdopodobieństwo

awarii, przyspiesza zużycie powodując powiększanie luzów w konsekwencji prowadząc do spadku dokładności pozycjonowania. Dodatkowo złożona konstrukcja oraz rozbudowane układy sterowania mogą utrudniać diagnozowanie usterek oraz wydłużać czas naprawy.

7.4 Możliwości adaptacji technologii poza rolnictwem

Bezpośrednie wdrożenie projektowanego urządzenia w innych sektorach niż rolnictwo, w jego obecnej postaci, nie jest możliwe. Konieczne jest wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjnych i programowych oraz dostosowanie układów sterowania do warunków eksploatacyjnych w innym środowisku pracy.

Pierwszym potencjalnym kierunkiem zastosowań, wykraczającym poza pierwotne rolnicze przeznaczenie, są miejskie służby utrzymania czystości. Zintegrowanie mechatronicznego zespołu rozpylającego z systemem wizyjnym umożliwiłoby miejscową, selektywną eliminację chwastów, na przykład pomiędzy kostek brukowych, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia środków chemicznych i minimalizacji oddziaływania na roślinność pożądaną.

Drugim potencjalnym miejscem zastosowania stanowi kolejnictwo, gdzie po modyfikacji algorytmów sterowania i wzmocnieniu podzespołów wykonawczych urządzenie mogłoby wspomagać usuwanie roślinności z podkładów kolejowych oraz skrajni toru. Należy jednak podkreślić, że implementacja w środowisku kolejowym będzie szczególnie wymagająca ze względu na duże prędkości ruchu pociągów oraz potrzebę precyzyjnej synchronizacji układu wizyjnego z pozycjonowaniem i układem wykonawczym.

Kolejnym potencjalnym użytkownikiem są służby utrzymania dróg i autostrad, gdzie rozwiązanie mogłoby być wykorzystane do precyzyjnej eliminacji chwastów wzdłuż barier energochłonnych i w pasach rozdziału, poprawiłoby to estetykę infrastruktury, widoczność oraz bezpieczeństwo, a także ograniczyło degradację nawierzchni. Rozwiązanie mogłoby przyjąć formę osobnej przyczepki doczepianej do pojazdów utrzymania dróg, wykorzystywanej przy okazji dojazdu do innych zadań serwisowych.

We wszystkich wymienionych scenariuszach wymagane będzie doprecyzowanie wymagań funkcjonalnych między innymi takie jak dokładność detekcji, szybkość reakcji, niezawodność w zmiennych warunkach pogodowych. Określone wymagania pozwolą na wprowadzenia zmian konstrukcyjnych oraz sterowniczych, walidacja bezpieczeństwa oraz zgodność z regulacjami dotyczącymi ochrony środowiska i BHP. Dopiero spełnienie tych warunków pozwoli na efektywne i odpowiedzialne wdrożenie technologii w praktyce.

8. Podsumowanie i wnioski końcowe

8.1 Wnioski dotyczące tezy pracy

Postawiona w rozprawie doktorskiej teza badawcza zakładała, że opracowany mechatroniczny rozpylacz umożliwi dostosowanie charakterystyki oprysku do rodzaju uprawianej rośliny, przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia środka ochrony roślin i zachowaniu wymaganej skuteczności zabiegu, definiowanej jako równomierne pokrycie powierzchni rośliny.

Przeprowadzone badania w pełni potwierdziły postawioną tezę. Argumentami za jej akceptacją są:

- W porównaniu ze standardowym opryskiwaczem, zastosowanie mechatronicznego rozpylacza pozwoliło zmniejszyć ilość aplikowanego środka ochrony roślin. Skala oszczędności zależy jednak od jakości działania systemów wizji maszynowej, a więc od skuteczności wykrywania oraz stopnia porażenia lub zachwaszczenia na polu.
- Rozwiązanie projektowe zapewnia bardziej jednorodne rozprowadzenie cieczy roboczej na powierzchni roślin w porównaniu z opryskiwaczem standardowym – szczególnie w przypadku szerokokorzędowej uprawy kukurydzy. Badania z użyciem papierków wodoczułych wykazały, że zmienność pokrycia wzdłuż strefy zabiegowej była wyraźnie mniejsza dla rozpylacza mechatronicznego (różnice rzędu 10–20%), niż dla rozwiązania standardowego (różnice sięgające 35–45%).
- Prototypowy mechatroniczny rozpylacz umożliwił niezależne sterowanie parametrami oprysku, modyfikując ich charakterystykę. Rozwiązanie pozwala na regulację wielkości kropli poprzez automatyczną zmianę rozpylaczy, dawki cieczy poprzez aktywną regulację ciśnienia oraz geometrii strumienia poprzez zmianę kąta rozpylania. Eksperymenty wykazały, że urządzenie potrafi precyzyjnie dawkować środki ochrony roślin, dostosowując parametry zabiegu do aktualnych warunków polowych.

8.2 Wnioski poznawcze

Przeprowadzone badania laboratoryjne i polowe dostarczyły nowych informacji oraz metod, które poszerzają stan wiedzy w zakresie technologii rozpylaczy rolniczych i mechatroniki stosowanej w rolnictwie. Do najważniejszych wniosków poznawczych należą:

- Wykazano, że zmiana orientacji rozpylacza poprzez jego pochylenie i skrócenie stanowi efektywny, niskokosztowy sposób sterowania rozkładem poprzecznym cieczy roboczej. Zaobserwowano przewidywalne trendy dotyczące szerokości pasa, wartości maksymalnych oraz asymetrii rozkładu. Wyniki zostały potwierdzone w serii powtarzalnych pomiarów na stanowisku z automatycznym rejestrowaniem danych.
- W ramach pracy zaprojektowano system integrujący wizję maszynową i sztuczną inteligencję z mechatronicznym układem rozpylającym. Umożliwia to automatyczną detekcję obiektów docelowych, takich jak rośliny uprawne, oraz dynamiczne dostosowanie parametrów rozpylania. Wykazano zasadność takiej integracji — dane z systemu wizyjnego mogą skutecznie sterować pracą rozpylacza, co poszerza wiedzę o możliwościach sprzężenia rozwiązań wizyjnych z układami aplikacyjnymi w celu realizacji precyzyjnych zabiegów.
- Rozprawa wnosi również nowe doświadczenia metodologiczne. Zastosowano podejście mechatroniczne w projektowaniu rozpylacza, łącząc komponenty mechaniczne, elektroniczne i programistyczne w jednolity system precyzyjnego rozpylania. Kompleksowe ujęcie problemu zaowocowało powstaniem innowacyjnej konstrukcji, stanowiącej przykład wykorzystania wiedzy z zakresu automatyki i robotyki w inżynierii rolniczej.

8.3 Wnioski uytylitarne

Uzyskane wyniki mają bezpośrednie przełożenie praktyczne i wskazują na szereg potencjalnych zastosowań opracowanego rozwiązania w rolnictwie. Do najważniejszych wniosków uytylitarnych należą:

- Zastosowanie mechatronicznego rozpylacza z systemami wizji maszynowej pozwala rolnikom precyzyjnie dostosować dawkę cieczy roboczej do lokalnych potrzeb uprawy. Przekłada się to na obniżenie kosztów produkcji poprzez zmniejszenie zużycia agrochemikaliów oraz ograniczenie presji środowiskowej.
- Opracowany układ rozpylający cechuje się wysoką uniwersalnością, umożliwiając realizację różnych zabiegów jednym urządzeniem. Dzięki możliwości dynamicznej zmiany charakterystyki rozpylania, rolnik może aplikować różne typy preparatów — od herbicydów po nawozy dolistne — bez konieczności wymiany sprzętu.
- Dla producentów maszyn rolniczych i usługodawców istotnym wnioskiem jest możliwość wdrożenia technologii zarówno w nowych konstrukcjach, jak i poprzez modernizację

istniejących opryskiwaczy. Minimalny wariant wdrożenia może polegać na wyposażeniu standardowego opryskiwacza w inteligentną głowicę z regulowaną orientacją rozpylacza.

- Z praktycznego punktu widzenia, wykorzystanie mechatronicznych rozpylaczy wspiera realizację założeń zrównoważonego rolnictwa. Ograniczenie zużycia środków ochrony roślin przy zachowaniu skuteczności zabiegu wpisuje się w cele Europejskiego Zielonego Ładu oraz rosnące oczekiwania społeczne dotyczące redukcji negatywnego wpływu rolnictwa na środowisko.
- Opracowany rozpylacz ma również potencjalne zastosowania wykraczające poza tradycyjne opryskiwacze zaczepiane i zawieszane. Może być z powodzeniem integrowany z autonomicznymi robotami polowymi, co stanowi istotną zaletę dla firm rozwijających technologie rolnictwa precyzyjnego.

8.4 Wnioski dotyczące dalszej pracy

Wyniki niniejszej rozprawy stanowią solidną podstawę do kontynuacji badań i prac rozwojowych. W celu pełnego wykorzystania potencjału opracowanego rozwiązania oraz poszerzenia jego zastosowań, proponuje się następujące kierunki dalszych prac:

- Dalsze badania powinny koncentrować się na rozszerzeniu funkcjonalności systemu wizji maszynowej zintegrowanego z rozpylaczem. Rekomenduje się zwiększenie liczby wykrywanych cech morfologicznych i środowiskowych, co pozwoli na jeszcze bardziej precyzyjne sterowanie rozpylaniem cieczy roboczej.
- Niezbędne jest przeprowadzenie szeroko zakrojonych testów polowych w rzeczywistych warunkach gospodarstw rolnych. Zaleca się sprawdzenie działania systemu na różnych typach upraw, przy zróżnicowanych warunkach terenowych i pogodowych, co umożliwi ocenę wpływu technologii na wskaźniki plonowania i zdrowotności roślin.
- Pomimo uzyskanych pozytywnych wyników, wskazane jest dalsze rozwijanie algorytmów sterujących pracą rozpylacza. W kolejnych iteracjach warto zaimplementować mechanizmy adaptacyjne i predykcyjne, które będą dynamicznie dostosowywać parametry rozpylania do zmieniających się warunków środowiskowych.
- Przed komercjalizacją technologii konieczne jest sprawdzenie długoterminowej wytrzymałości elementów mechatronicznych. Rekomenduje się przeprowadzenie testów

trwałościowych i niezawodnościowych prototypu, obejmujących wiele cykli pracy odpowiadających wieloletniej eksploatacji w gospodarstwie. Pozwoli to zidentyfikować potencjalne słabe punkty konstrukcji i określić wymagania dotyczące konserwacji sezonowej.

- Z punktu widzenia dalszych prac wdrożeniowych istotna będzie optymalizacja konstrukcji pod kątem produkcji seryjnej. Należy przeprojektować kluczowe elementy mechaniczne rozpylacza z uwzględnieniem technik wytwarzania masowego — przykładowo odchodząc od druku 3D na rzecz formowania wtryskowego. Dodatkowo zaleca się standaryzację modułów i połączeń, co ułatwi montaż oraz serwisowanie urządzenia.
- Ostatnim sugerowanym kierunkiem jest zbadanie możliwości zastosowania opracowanego rozpylacza poza sektorem rolnictwa konwencjonalnego — np. w robotyce komunalnej, infrastrukturze drogowej czy kolejnictwie.

8.5 Wnioski wdrożeniowe

Uzyskane wyniki wyznaczają kierunki wdrożenia opracowanego rozwiązania i pozwalają sformułować zalecenia niezbędne do jego praktycznego uruchomienia. Do najważniejszych wniosków wdrożeniowych należą:

- Rozwiązanie posiada czystość patentową i zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego RP pod numerem: P.452018.
- Minimalny wariant wdrożeniowy powinien obejmować głowicę z regulacją orientacji rozpylacza, montowaną na istniejących standardowych opryskiwaczach.
- Wariant rozszerzony wdrożenia powinien obejmować produkcję pełnoprawnego rzędowego rozpylacza rolniczego, wyposażonego we wszystkie systemy wspomagające redukcję zużycia środków ochrony roślin, przedstawione w rozprawie doktorskiej.
- Przed komercjalizacją należy formalnie zdefiniować wymagania funkcjonalne (dokładność detekcji, szybkość reakcji, odporność na warunki atmosferyczne), przeprowadzić walidację bezpieczeństwa oraz zapewnić zgodność z przepisami środowiskowymi i BHP. Ten zestaw warunków stanowi punkt odniesienia dla odpowiedzialnego wdrożenia.
- Rekomenduje się ścieżkę komercjalizacji opartą na standaryzacji modułów, przejściu z druku 3D na technologie formowania wtryskowego, przygotowaniu procedur kalibracyjnych oraz stanowisk kontrolnych dla produkcji seryjnej.

- Należy opracować program dydaktyczny i szkoleniowy, ukazujący korzyści wynikające ze stosowania zaawansowanych rozpylaczy, przekonując obecnych rolników oraz edukując przyszłych użytkowników.
- Kluczowym elementem komercjalizacji jest produkcja pełnoprawnego urządzenia demonstracyjnego, prezentującego możliwości technologii w warunkach polowych i przekonującego potencjalnych nabywców.
- Wdrożenie w sektorach pozarolniczych wymaga precyzyjnego określenia wymagań funkcjonalnych oraz wprowadzenia odpowiednich modyfikacji konstrukcyjnych, sterowniczych i w systemach wizyjnych. Opracowane w ramach rozprawy rozwiązanie stanowi solidną bazę do poszukiwania nowych obszarów zastosowania.

8.6 Podsumowanie

Celem rozprawy doktorskiej było zaprojektowanie, zbudowanie oraz przeprowadzenie badań mechatronicznego rozpylacza rolniczego o zmiennej charakterystyce rozpylania, który dzięki integracji z systemami wizji maszynowej miał umożliwić ograniczenie zużycia środków ochrony roślin przy zachowaniu wysokiej skuteczności zabiegu. W ramach pracy zrealizowano kompleksowe działania obejmujące analizę stanu techniki, sformułowanie tezy i założeń projektowych, opracowanie modelu badawczego oraz przeprowadzenie badań laboratoryjnych i polowych. Zastosowano wiedzę inżynierską łączącą mechanikę, elektronikę i informatykę, nadając pracy charakter multidyscyplinarny.

Rezultaty badań potwierdziły osiągnięcie postawionego celu. Zbudowany model badawczy spełnił założenia projektowe, umożliwiając dynamiczną zmianę parametrów rozpylania w odpowiedzi na sygnały sterujące i adaptację do zmiennych warunków polowych. Kluczowym osiągnięciem jest wykazanie, że dzięki opracowanemu rozwiązaniu można znacząco ograniczyć zużycie środków ochrony roślin w porównaniu do konwencjonalnych opryskiwaczy, bez pogorszenia jakości pokrycia roślin. Potwierdzono, że rozpylacz mechatroniczny zapewniał równomierne naniesienie cieczy roboczej, w przeciwieństwie do tradycyjnych rozwiązań, gdzie obserwowano luki i nierównomierności.

Zakres rozprawy objął nie tylko aspekty konstrukcyjno-badawcze, lecz także wdrożeniowe. Wskazano potencjalnych użytkowników, przeanalizowano konkurencyjne rozwiązania i wykazano oryginalność podejścia. Praca wypełniła zidentyfikowaną lukę w obszarze systemów aplikacji cieczy – dotychczas brakowało na rynku i w literaturze w pełni aktywnego układu rozpylającego zdolnego do bieżącej zmiany charakterystyki rozpylania, przystosowanego do

współpracy z systemami wizyjnymi. Opracowane rozwiązanie stanowi nową jakość w technologii aplikacji cieczy w rolnictwie, łącząc tradycyjne metody z układami mechatronicznymi i rozwiązaniami informatycznymi.

W kontekście rozwoju Rolnictwa 4.0 oraz rolnictwa precyzyjnego, opracowana technologia stanowi krok w kierunku cyfryzacji i automatyzacji zabiegów ochrony roślin. Rozpylacz wpisuje się w założenia nowoczesnego rolnictwa, umożliwiając precyzyjne dawkowanie środków, minimalizując ich zbędne zużycie i ograniczając negatywny wpływ na środowisko. Urządzenie opracowane w ramach rozprawy doktorskiej jest przykładem praktycznej realizacji idei zrównoważonego rolnictwa, w którym dane z sensorów i algorytmy sterowania pozwalają na optymalizację zabiegów agrotechnicznych.

Podsumowując, cele pracy zostały osiągnięte, a uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność i przewagę opracowanego rozwiązania. Rozprawa wnosi istotny wkład naukowy i aplikacyjny w dziedzinę inżynierii rolniczej. Wykazano, że mechatroniczny rozpylacz o zmiennej charakterystyce rozpylania może stać się kluczowym elementem nowej generacji opryskiwaczy, oferując większą precyzję, oszczędność i zgodność z wymaganiami współczesnego rolnictwa.

Bibliografia

- [1] M. Wiśniewska i J. Wyrwa. *Bezpieczeństwo żywności i żywnościowe w okresie pandemii: Ujęcie interdyscyplinarne*. 1 wyd. Polish Economic Society in Zielona Góra, 2022, s. 228. ISBN: 978-83-87193-10-2. DOI: doi.org/10.26366/PTE.ZG.2022.210.
- [2] W. Wrzaszcz i K. Prandecki. „Agriculture and the European Green Deal”. W: *Problems of Agricultural Economics* 365.Special Issue 4 (2020), s. 156–179. ISSN: 0044-1600. DOI: 10.30858/zer/131841.
- [3] J. Walczak i in. *Jakość żywności jako kierunek rolnictwa EU. Certyfikowane systemy produkcji żywności – szanse i ograniczenia*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Scholar, 2023. ISBN: 978-83-67450-54-6. DOI: 10.7366/9788367450546.
- [4] Faculty of Management, University of Warsaw i A. Niewiadomska. *Instrumenty prawne Wspólnej Polityki Rolnej wpływające na konkurencyjność polskiego rolnictwa*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, 2019. ISBN: 978-83-66282-14-8. DOI: 10.7172/978-83-66282-13-1.2019.6.
- [5] K. P. Pawłowski i G. Sołtysiak. „The Potential Impact of the European Green Deal on Farm Production in Poland”. W: *Sustainability* 16.24 (2024), s. 11080. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su162411080.
- [6] S. Wolfert i in. „Big Data in Smart Farming – A Review”. W: *Agricultural Systems* 153 (2017), s. 69–80. ISSN: 0308-521X. DOI: 10.1016/j.agry.2017.01.023.
- [7] F. Da Silveira, F. H. Lermen i F. G. Amaral. „An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 189 (2021), s. 106405. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106405.
- [8] Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR). *Rolnictwo 4.0 - początek rewolucji? - Narodowe Centrum Badań i Rozwoju - Portal Gov.pl*. URL: <https://www.gov.pl/web/ncbr/rolnictwo-40---poczatek-rewolucji> (term. wiz. 07.04.2025).
- [9] R. Gebbers i V. I. Adamchuk. „Precision Agriculture and Food Security”. W: *Science* 327.5967 (2010), s. 828–831. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1183899.

- [10] D. Maloku i in. „Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method”. W: *International Review of Applied Sciences and Engineering* 11.3 (2020), s. 232–242. ISSN: 2062-0810. DOI: 10.1556/1848.2020.00086.
- [11] G. Kowalska i R. Kowalski. „Pestycydy – zakres i ryzyko stosowania, korzyści i zagrożenia. Praca przeglądowa”. W: *Annales Horticulturae* 29.2 (2020), s. 5–25. ISSN: 2544-8013. DOI: 10.24326/ah.2019.2.1.
- [12] R. Meena i in. „Impact of Agrochemicals on Soil Microbiota and Management: A Review”. W: *Land* 9.2 (2020), s. 34. ISSN: 2073-445X. DOI: 10.3390/land9020034.
- [13] C.-C. Lo. „Effect of pesticides on soil microbial community”. W: *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 45.5 (2010), s. 348–359. ISSN: 0360-1234. DOI: 10.1080/03601231003799804.
- [14] M. Syafrudin i in. „Pesticides in Drinking Water—A Review”. W: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18.2 (2021), s. 468. ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph18020468.
- [15] A. Parven i in. „Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns”. W: *International Journal of Environmental Science and Technology* 22.2 (2025), s. 1181–1202. ISSN: 1735-1472. DOI: 10.1007/s13762-024-05818-y.
- [16] L. M. Guzman i in. „Impact of pesticide use on wild bee distributions across the United States”. W: *Nature Sustainability* 7.10 (2024), s. 1324–1334. ISSN: 2398-9629. DOI: 10.1038/s41893-024-01413-8.
- [17] E.-C. Oerke. „Crop losses to pests”. W: *The Journal of Agricultural Science* 144.1 (2006), s. 31–43. ISSN: 0021-8596. DOI: 10.1017/S0021859605005708.
- [18] J. Popp, K. Pető i J. Nagy. „Pesticide productivity and food security: A review”. W: *Agronomy for Sustainable Development* 33.1 (2013), s. 243–255. ISSN: 1774-0746. DOI: 10.1007/s13593-012-0105-x.
- [19] W. Zhou i in. „Integrated Pest Management: An Update on the Sustainability Approach to Crop Protection”. W: *ACS Omega* 9.40 (2024), s. 41130–41147. ISSN: 2470-1343. DOI: 10.1021/acsomega.4c06628.

- [20] J.-P. Deguine i in. „Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review”. W: *Agronomy for Sustainable Development* 41.3 (2021), s. 38. ISSN: 1774-0746. DOI: 10.1007/s13593-021-00689-w.
- [21] S. Szymczyk i in. „Innovative solutions in crop protection technology”. W: *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 67.1 (2022). ISSN: 1642-686X. DOI: 10.53502/YEMI2804.
- [22] V. Vijayakumar i in. „Smart spraying technologies for precision weed management: A review”. W: *Smart Agricultural Technology* 6 (2023), s. 100337. ISSN: 2772-3755. DOI: 10.1016/j.atech.2023.100337.
- [23] Heinrich-Böll-Stiftung, Friends of the Earth Europe i PAN Germany. *Pesticide Atlas: Facts and Figures about Toxic Chemicals in Agriculture*. Heinrich-Böll-Stiftung, 2022. ISBN: 978-9-46400747-3. URL: https://eu.boell.org/sites/default/files/2022-10/pesticideatlas2022_web_20221010.pdf (term. wiz. 30.03.2025).
- [24] L. Klerkx, E. Jakku i P. Labarthe. „A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda”. W: *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences* 90-91.1 (2019), s. 1–16. ISSN: 1573-5214. DOI: 10.1016/j.njas.2019.100315.
- [25] K. Lochan i in. „Advancements in Precision Spraying of Agricultural Robots: A Comprehensive Review”. W: *IEEE Access* 12 (2024), s. 129447–129483. ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3450904.
- [26] L. Bakker i in. „Kicking the Habit: What Makes and Breaks Farmers’ Intentions to Reduce Pesticide Use?” W: *Ecological Economics* 180 (2021), s. 106868. ISSN: 0921-8009. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2020.106868.
- [27] P. Feisthauer, M. Hartmann i J. Börner. „Behavioral factors driving farmers’ intentions to adopt spot spraying for sustainable weed control”. W: *Journal of Environmental Management* 353 (2024), s. 120218. ISSN: 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120218.
- [28] U.S. Government Accountability Office. *Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use*. GAO Report No. GAO-24-105962. U.S. Government Accountability Office, 2024. URL: <https://www.gao.gov/products/gao-24-105962> (term. wiz. 30.03.2025).

- [29] McKinsey & Company. *Agtech: Breaking down the farmer adoption dilemma*. 2020. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/agtech-breaking-down-the-farmer-adoption-dilemma> (term. wiz. 30.03.2025).
- [30] European Commission. *Wspólna polityka rolna - Komisja Europejska*. URL: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy_pl (term. wiz. 01.04.2025).
- [31] Z. Szira i in. „Regulation of Precision Farming in EU Countries”. W: *EU Agrarian Law* 13.2 (2024), s. 10–16. ISSN: 1339-9276. DOI: 10.2478/eual-2024-0007.
- [32] Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa. *I.10.4 Inwestycje przyczyniające się do ochrony środowiska i klimatu - Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa - Portal Gov.pl*. URL: <https://www.gov.pl/web/arimr/i104-inwestycje-przyczyniajace-sie-do-ochrony-srodowiska-i-klimatu-> (term. wiz. 01.04.2025).
- [33] M. Smiglak-Krajewska i J. Wojciechowska-Solis. „Environmental Awareness of Farmers vs. Agricultural Sustainability”. W: *European Research Studies Journal* 24.1 (2021), s. 161–172. ISSN: 1108-2976. DOI: 10.35808/ersj/1956.
- [34] W. Aktar, D. Sengupta i A. Chowdhury. „Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards”. W: *Interdisciplinary Toxicology* 2.1 (2009), s. 1–12. ISSN: 1337-9569. DOI: 10.2478/v10102-009-0001-7.
- [35] A. R. A. Zanin i in. „Reduction of pesticide application via real-time precision spraying”. W: *Scientific Reports* 12.1 (2022), s. 5638. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-022-09607-w.
- [36] BASF Digital Farming GmbH (xarvio). *Bosch BASF Smart Farming is now ONE SMART SPRAY*. xarvio Digital Farming Solutions. URL: <https://www.xarvio.com/content/xarvio/us/en/news/bosch-basf-smart-farming-is-now-one-smart-spray> (term. wiz. 04.04.2025).
- [37] University of Southern Queensland (UniSQ). *John Deere and UniSQ | UniSQ*. University of Southern Queensland. URL: <https://www.unisq.edu.au/study/why-unisq/unisq-stories/testimonials/john-deere> (term. wiz. 02.04.2025).
- [38] S. Christensen i in. „Site-specific weed control technologies”. W: *Weed Research* 49.3 (2009), s. 233–241. ISSN: 0043-1737. DOI: 10.1111/j.1365-3180.2009.00696.x.
- [39] A. Szewczyk. *Analiza ustawienia, parametrów i warunków pracy rozpylacza w aspekcie jakości opryskiwania upraw polowych*. Monografie / Uniwersytet Przyrodniczy we

- Wrocławiu 97. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, 2010, s. 130. ISBN: 978-83-7717-003-8.
- [40] I. Makhnenko i in. „A review of liquid sheet breakup: Perspectives from agricultural sprays”. W: *Journal of Aerosol Science* 157 (2021), s. 105805. ISSN: 0021-8502. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2021.105805.
- [41] A. Asgarian i in. „Experiments and modeling of the breakup mechanisms of an attenuating liquid sheet”. W: *International Journal of Multiphase Flow* 130 (2020), s. 103347. ISSN: 0301-9322. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103347.
- [42] A. Altieri, S. A. Cryer i L. Acharya. „Mechanisms, Experiment, and Theory of Liquid Sheet Breakup and Drop Size from Agricultural Nozzles”. W: *Atomization and Sprays* 24.8 (2014), s. 695–721. ISSN: 1044-5110. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2014008779.
- [43] S. Kooij i in. „What Determines the Drop Size in Sprays?” W: *Physical Review X* 8.3 (2018), s. 031019. ISSN: 2160-3308. DOI: 10.1103/PhysRevX.8.031019.
- [44] E. Cerruto i in. „Modelling Spray Pressure Effects on Droplet Size Distribution from Agricultural Nozzles”. W: *Applied Sciences* 11.19 (2021), s. 9283. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app11199283.
- [45] R. Sijs, S. Kooij i D. Bonn. „Droplet size from Venturi air induction spray nozzles”. W: *Experiments in Fluids* 64.2 (2023), s. 43. ISSN: 0723-4864. DOI: 10.1007/s00348-023-03582-2.
- [46] D. Nuyttens i in. „Droplet Size and Velocity Characteristics of Agricultural Sprays”. W: *Transactions of the ASABE* 52.5 (2009), s. 1471–1480. ISSN: 2151-0040. DOI: 10.13031/2013.29127.
- [47] A. H. Lefebvre i V. G. McDonell. *Atomization and Sprays*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017, s. 284. ISBN: 978-1-4987-3625-1.
- [48] R. Grisso, S. D. Askew i D. McCall. *Nozzles: Selection and Sizing*. Blacksburg, VA: Virginia Cooperative Extension, 2019. DOI: 10.21061/442-032_BSE-262P.
- [49] International Organization for Standardization. *Equipment for crop protection — Sprayer nozzles — Colour coding for identification*. Geneva, Switzerland, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/70935.html>.

- [50] R. Hołownicki i in., red. *Dobra praktyka: samodzielna kontrola opryskiwaczy polowych i sadowniczych. Cz. 1*. 2nd edition. Skierniewice: Instytut Ogrodnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, 2023, s. 88. ISBN: 978-83-67039-20-8.
- [51] International Organization for Standardization. *Crop protection equipment — Droplet-size spectra from atomizers — Measurement and classification*. Geneva, Switzerland, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/70933.html>.
- [52] S. Privitera i in. „Drop Size Measurement Techniques for Agricultural Sprays: A State-of-the-Art Review”. W: *Agronomy* 13.3 (2023), s. 678. ISSN: 2073-4395. DOI: 10.3390/agronomy13030678.
- [53] F. Whitford i in. *Agricultural Spray Nozzles: A Comprehensive Review*. Purdue Extension Publication PPP-153. West Lafayette, IN, USA, 2025. URL: https://ag.purdue.edu/departments/extension/ppp/resources/ppp-publications/_docs/ppp-153.pdf (term. wiz. 10.02.2025).
- [54] Amazone. *Precyzyjna ochrona upraw w doskonałości: AmaSelect*. 2025. URL: <https://amazone.pl/pl-pl/planowa%C4%87-gospodarowa%C4%87/praktyczna-gospodarka/precyzyjna-ochrona-upraw-w-doskona%C5%82o%C5%9Bci-amaselect> (term. wiz. 15.10.2018).
- [55] S. Villette i in. „Assessment of nozzle control strategies in weed spot spraying to reduce herbicide use and avoid under- or over-application”. W: *Biosystems Engineering* 219 (2022), s. 68–84. ISSN: 1537-5110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.04.012.
- [56] T. Wolf. *ExactApply Primer*. Sprayers101. 2018. URL: <https://sprayers101.com/exactapply-primer/>.
- [57] S. Pruszyński i B. Podgórska, red. *Poradnik ochrony roślin: zasady bezpiecznego i skutecznego stosowania metod i środków ochrony roślin: praca zbiorowa*. Poznań: Instytut Ochrony Roślin, 1994. ISBN: 978-83-901356-0-1.
- [58] P.A. Kluza i R.P.Kluza. „Samojezdne opryskiwacze polowe i ich trendy rozwojowe”. W: *Acta Scientiarum Polonorum. Technica Agraria* 16.1–2 (2017), s. 35–46. ISSN: 1644-0684. DOI: 10.24326/aspta.2017.1-2.4.
- [59] Państwowa Inspekcja Ochrony Roślin i Nasiennictwa. *Badanie opryskiwaczy - Państwowa Inspekcja Ochrony Roślin i Nasiennictwa - Portal Gov.pl*. URL: <https://www.gov.pl/web/piorin/badanie-opryskiwaczy> (term. wiz. 19.03.2025).

- [60] R. Hołownicki i in., red. *Badania sprawności technicznej sprzętu ochrony roślin: opryskiwacze polowe i sadownicze, ciągnikowe i samobieżne: instrukcja*. II, poprawione i uzupełnione. Skierniewice: Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy, 2023, s. 98. ISBN: 978-83-67039-19-2.
- [61] Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/128/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania na rzecz zrównoważonego stosowania pestycydów — tekst mający znaczenie dla EOG*. Official Journal of the European Union. 2009. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32009L0128> (term. wiz. 14.03.2025).
- [62] Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi. *ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ROLNICTWA I ROZWOJU WSI z dnia 13 grudnia 2013 r. w sprawie potwierdzania sprawności technicznej sprzętu przeznaczonego do stosowania środków ochrony roślin*. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, poz. 15. 2014. URL: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20140000015> (term. wiz. 20.02.2025).
- [63] Z. Czaczyk. „Spray Classification for Selected Flat Fan Nozzles”. W: *Journal of Plant Protection Research* 52.1 (2012), s. 27–32. ISSN: 1427-4345. DOI: 10.2478/v10045-012-0027-2.
- [64] N. De Cock i in. „Measurements of reference ISO nozzles by high-speed imaging”. W: *Crop Protection* 89 (2016), s. 105–115. ISSN: 0261-2194. DOI: 10.1016/j.cropro.2016.07.016.
- [65] Spraying Systems Co. *Fazowy Dopplerowski Analizator Cząstek PDPA*. URL: <https://www.spray.com/pl-pl/services/advanced-testing-and-modeling/instruments-and-facilities/phase-doppler-particle-analyzer-pdpa> (term. wiz. 25.03.2025).
- [66] P. A. Kluza, I. Kuna-Broniowska i S. Parafiniuk. „Modeling and Prediction of the Uniformity of Spray Liquid Coverage from Flat Fan Spray Nozzles”. W: *Sustainability* 11.23 (2019), s. 6716. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su11236716.
- [67] B. Cieniawska i in. „Matching the Liquid Atomization Model to Experimental Data Obtained from Selected Nozzles”. W: *Applied Sciences* 13.7 (2023), s. 4433. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app13074433.
- [68] M. C. Butler Ellis i in. „Wind tunnel investigation of the ability of drift-reducing nozzles to provide mitigation measures for bystander exposure to pesticides”. W:

- Biosystems Engineering* 202 (2021), s. 152–164. ISSN: 1537-5110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.12.008.
- [69] BBtechnika. *BBtechnika stół rowkowy dla SKO*. URL: <https://bbtechnika.pl/wyposazenie-sko> (term. wiz. 25.03.2025).
- [70] J. Rutkowski i in. „Technika GPS w urządzeniach mobilnych (II)”. W: *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 3 (2016). Publisher: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych.
- [71] J. D. Luck i in. „Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 70.1 (2010), s. 19–26. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2009.08.003.
- [72] J. D. Luck i in. „Reducing Pesticide Over-Application with Map-Based Automatic Boom Section Control on Agricultural Sprayers”. W: *Transactions of the ASABE* 53.3 (2010), s. 685–690. ISSN: 2151-0040. DOI: 10.13031/2013.30060.
- [73] J. Luck. *Agricultural Sprayer Automatic Section Control (ASC) Systems*. Extension Circular EC718, University of Nebraska–Lincoln Extension. Lincoln, NE, USA, 2013. URL: <https://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/ec718.pdf> (term. wiz. 11.02.2025).
- [74] A. Sharda i in. „Real-Time Nozzle Flow Uniformity When Using Automatic Section Control on Agricultural Sprayers”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 79.2 (2011), s. 169–179. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2011.09.006.
- [75] S. Virk i R. Meena. *Pulse Width Modulation Technology for Agricultural Sprayers*. Circular 1277, University of Georgia Cooperative Extension. Tifton, GA, USA, 2022. URL: <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C1277&title=pulse-width-modulation-technology-for-agricultural-sprayers>.
- [76] UNIA - *Polskie maszyny rolnicze - Prawidłowa ochrona roślin według marki UNIA*. UNIA Sp. z o.o. URL: <https://uniamachines.com/pl/aktualnosci-unii-2/262-prawidlowa-ochrona-roslin-wedlug-marki-unia> (term. wiz. 06.03.2025).
- [77] R. Meena i in. „Comparative Performance of a Sprayer Rate Controller and Pulse Width Modulation (PWM) Systems for Site-Specific Pesticide Applications”. W: *AgriEngineering* 6.3 (2024), s. 3312–3326. ISSN: 2624-7402. DOI: 10.3390/agriengineering6030189.

- [78] Q. D. Bui. „VariTarget – A New Nozzle with Variable Flow Rate and Droplet Optimization”. W: *Proc. ASABE Annual International Meeting*. Tampa, FL, USA: American Society of Agricultural i Biological Engineers, 2005. DOI: 10.13031/2013.19776.
- [79] G. C. Bora i in. „Performance of a Pulse Width Modulated (PWM) Single to Multifold Outlet System for Variable-Rate Anhydrous Ammonia Application”. W: *Transactions of the ASABE* 54.2 (2011), s. 397–402. ISSN: 2151-0040. DOI: 10.13031/2013.36441.
- [80] H. Jiang, L. Zhang i W. Shi. „Effects of Operating Parameters for Dynamic PWM Variable Spray System on Spray Distribution Uniformity”. W: *IFAC-PapersOnLine* 49.16 (2016), s. 216–220. ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.040.
- [81] S. Brodie, T. Oksanen i H. Auernhammer. „Buzzword ISOBUS”. W: *Informatik Spektrum* 46.1 (2023), s. 46–50. ISSN: 0170-6012. DOI: 10.1007/s00287-022-01518-4.
- [82] A. Olliver, N. Schlingmann i P. Van Der Vlugt. „ISOBUS Technologies – The Standard for Smart Agriculture”. W: *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies*. Red. Q. Zhang. Cham: Springer International Publishing, 2023, s. 1–18. ISBN: 978-3-030-89123-7. DOI: 10.1007/978-3-030-89123-7_117-2.
- [83] Y. Guan i in. „Review on Research and Application of Variable Rate Spray in Agriculture”. W: *Proc. 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Auckland, New Zealand: IEEE, 2015, s. 1575–1580. ISBN: 978-1-4799-8389-6. DOI: 10.1109/ICIEA.2015.7334360.
- [84] V. Sharma i in. „Variable Rate Technology and Its Application in Precision Agriculture: AE607, 1/2025”. W: *EDIS* 2025.1 (2025), s. 1–5. ISSN: 2576-0009. DOI: 10.32473/edis-ae607-2025.
- [85] H. Bolz i in. „Spray Drift-Based Pesticide Residues on Untreated Edible Crops Grown Near Agricultural Areas”. W: *Journal of Consumer Protection and Food Safety* 17.1 (2022), s. 21–31. ISSN: 1661-5751. DOI: 10.1007/s00003-021-01355-9.
- [86] T. Jomantas i in. „The Influence of Newly Developed Spray Drift Reduction Agents on Drift Mitigation by Means of Wind Tunnel and Field Evaluation Methods”. W: *Agriculture* 13.2 (2023), s. 349. ISSN: 2077-0472. DOI: 10.3390/agriculture13020349.
- [87] J. Kamionka. *Technika Ochrony Roślin*. Instytut Technologiczno – Przyrodniczy Mazowiecki Ośrodek Badawczy. 2014.

- [88] S. Wang i in. „Evaluation of Compact Air-Induction Flat Fan Nozzles for Herbicide Applications: Spray Drift and Biological Efficacy”. W: *Frontiers in Plant Science* 14 (2023), s. 1018626. ISSN: 1664-462X. DOI: 10.3389/fpls.2023.1018626.
- [89] R. Hołownicki i in. *Dobra Praktyka Ochrony Roślin*. III, uzupełnione i poprawione. Skierniewice: Instytut Ogrodnictwa, 2015, s. 95. ISBN: 978-83-89800-70-1.
- [90] G. Doruchowski, A. Godyń i R. Hołownicki. *Poradnik Dobrej Praktyki Ochrony Roślin: ochrona wód przed zanieczyszczeniami miejscowymi*. 3, uzupełnione i poprawione. Skierniewice: Instytut Ogrodnictwa, 2015, s. 95. ISBN: 978-83-89800-70-1.
- [91] P. Balsari i in. „Field-crop-sprayer potential drift measured using test bench: Effects of boom height and nozzle type”. W: *Biosystems Engineering* 154 (2017), s. 3–13. ISSN: 1537-5110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.015.
- [92] *Werking / Wingssprayer / Grensverleggend in gewasbescherming*. Wingssprayer. URL: <https://www.wingssprayer.com/hoe-werkt-het> (term. wiz. 11.03.2025).
- [93] Z. Popławski i T. Szulc. „Innowacyjne rozwiązania w technice ochrony roślin. Cz. 1. Elementy wyposażenia rolniczych opryskiwaczy polowych”. W: *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 1 (2010), s. 17–22. ISSN: 2081-6979.
- [94] Z. Wei i in. „Research Status, Methods and Prospects of Air-Assisted Spray Technology”. W: *Agronomy* 13.5 (2023), s. 1407. ISSN: 2073-4395. DOI: 10.3390/agronomy13051407.
- [95] H. Y. Jeon, A. R. Womac i J. Gunn. „Sprayer Boom Dynamic Effects on Application Uniformity”. W: *Transactions of the ASAE* 47.3 (2004), s. 647–658. ISSN: 2151-0059. DOI: 10.13031/2013.16094.
- [96] A. J. Lipiński i in. „Influence of the instability of the field crop sprayer boom on the spraying uniformity”. W: *Journal of Agriculture and Food Research* 10 (2022), s. 100432. ISSN: 2666-1543. DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100432.
- [97] A. J. Lipiński, S. M. Sobotka i S. Lipiński. „Przegląd systemów stabilizacji belek polowych opryskiwaczy”. W: *Inżynieria Rolnicza* 8.133 (2011), s. 181–187. ISSN: 1429-7264.
- [98] J. Anthonis, J. Audenaert i H. Ramon. „Design Optimisation for the Vertical Suspension of a Crop Sprayer Boom”. W: *Biosystems Engineering* 90.2 (2005), s. 153–160. ISSN: 1537-5110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.08.011.

- [99] F. Li i X. Bai. „Experimental Research on the Stability of a Spray Boom with an Active and Passive Pendulum Suspension”. W: *INMATEH Agricultural Engineering* 72.2 (2024), s. 525–534. ISSN: 2068-2239. DOI: 10.35633/inmateh-72-46.
- [100] A. Wang, W. Zhang i X. Wei. „A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 158.3 (2019), s. 226–240. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.005.
- [101] C. McCarthy, S. Rees i C. Baillie. „Machine vision-based weed spot spraying: A review and where next for sugarcane?” W: *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT 2010)*. Red. R. C. Bruce. Bundaberg, Australia, 2010, s. 424–432. ISBN: 978-1617388279.
- [102] A. Allmendinger i in. „Precision Chemical Weed Management Strategies: A Review and a Design of a New CNN-Based Modular Spot Sprayer”. W: *Agronomy* 12.7 (2022), s. 1620. ISSN: 2073-4395. DOI: 10.3390/agronomy12071620.
- [103] A. S. M. M. Hasan i in. „A Survey of Deep Learning Techniques for Weed Detection from Images”. W: *arXiv preprint arXiv:2103.01415* (2021). DOI: 10.48550/arXiv.2103.01415.
- [104] M. Rahimi Azghadi i in. „Precision robotic spot-spraying: Reducing herbicide use and enhancing environmental outcomes in sugarcane”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 235 (2025), s. 110365. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110365.
- [105] A. Da Costa Lima i K. F. Mendes. „Variable Rate Application of Herbicides for Weed Management in Pre- and Postemergence”. W: *Pests, Weeds and Diseases in Agricultural Crop and Animal Husbandry Production*. London, U.K.: IntechOpen, 2020. ISBN: 978-1-78923-827-3. DOI: 10.5772/intechopen.93558.
- [106] WEED-IT. *Weed-it Quadro Technology*. URL: <https://weed-it.com/our-technology/weed-it-quadro/> (term. wiz. 05.04.2025).
- [107] S. Szymczyk i in. „Weed control using vision systems and artificial intelligence as a new development direction for agricultural sprayers”. W: *Progress in Plant Protection* 63.4 (2023), s. 205–212. ISSN: 2084-4883. DOI: 10.14199/ppp-2023-021.
- [108] Ecorobotix. URL: <https://ecorobotix.com/> (term. wiz. 20.02.2025).
- [109] T. Anken i A. Latsch. „Characteristics of a spot sprayer for the treatment of *Rumex obtusifolius* in meadows”. W: *Agricultural Engineering* 78.3 (2023), Article 3295. DOI: 10.15150/LT.2023.3295.

- [110] S. Bykov. „World trends in the creation of robots for spraying crops”. W: *E3S Web of Conferences* 380 (2023), s. 01011. ISSN: 2267-1242. DOI: 10.1051/e3sconf/202338001011.
- [111] Greeneye Technology. URL: <https://greeneye.ag/> (term. wiz. 05.04.2025).
- [112] A. Leise i in. „Evaluating precision sprayers for targeted weed management in corn and soybean”. W: *Agrosystems, Geosciences & Environment* 8.1 (2025), e70055. ISSN: 2639-6696. DOI: 10.1002/agg2.70055.
- [113] T. Utstumo i in. „Robotic in-row weed control in vegetables”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 154 (2018), s. 36–45. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2018.08.043.
- [114] A. Upadhyay i in. „Advances in ground robotic technologies for site-specific weed management in precision agriculture: A review”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 225 (2024), s. 109363. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109363.
- [115] O. S. Daramola i in. „Effects of co-applied agrochemicals on herbicide performance: A review”. W: *Crop Protection* 174 (2023), s. 106396. ISSN: 0261-2194. DOI: 10.1016/j.cropro.2023.106396.
- [116] C. F. Creech i in. „Influence of Herbicide Active Ingredient, Nozzle Type, Orifice Size, Spray Pressure, and Carrier Volume Rate on Spray Droplet Size Characteristics”. W: *Weed Technology* 29.2 (2015), s. 298–310. ISSN: 0890-037X. DOI: 10.1614/WT-D-14-00049.1.
- [117] D. Paczyńska. *Kukurydza od zasiewu do zbioru*. Karniowice: Małopolski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, 2013, s. 26. ISBN: 978-83-60394-24-3.
- [118] D. Loddo i in. „Combination of Herbicide Band Application and Inter-Row Cultivation Provides Sustainable Weed Control in Maize”. W: *Agronomy* 10.1 (2019), s. 20. ISSN: 2073-4395. DOI: 10.3390/agronomy10010020.
- [119] V. Partel, S. C. Kakarla i Y. Ampatzidis. „Development and evaluation of a low-cost and smart technology for precision weed management utilizing artificial intelligence”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 157 (2019), s. 339–350. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.048.
- [120] N. Hussain i in. „Design and Development of a Smart Variable Rate Sprayer Using Deep Learning”. W: *Remote Sensing* 12.24 (2020), s. 4091. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs12244091.

- [121] S. Zheng i in. „Design of an Intermittent Herbicide Spray System for Open-Field Cabbage and Plant Protection Effect Experiments”. W: *Agronomy* 13.2 (2023), s. 286. ISSN: 2073-4395. DOI: 10.3390/agronomy13020286.
- [122] V. K. Tewari i in. „Image processing based real-time variable-rate chemical spraying system for disease control in paddy crop”. W: *Artificial Intelligence in Agriculture* 4 (2020), s. 21–30. ISSN: 2589-7217. DOI: 10.1016/j.aiia.2020.01.002.
- [123] Z. Wu i in. „Review of Weed Detection Methods Based on Computer Vision”. W: *Sensors* 21.11 (2021), s. 3647. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21113647.
- [124] S. Bollanti i in. „Edge steepness and plateau uniformity of a nearly flat-top-shaped laser beam”. W: *Applied Physics B: Lasers and Optics* 78.2 (2004), s. 195–198. ISSN: 0946-2171. DOI: 10.1007/s00340-003-1297-1.
- [125] D. Koo, C. A. Henderson i S. D. Askew. „Agricultural spray drone deposition, Part 1: methods for high-throughput spray pattern analysis”. W: *Weed Science* 72.6 (2024), s. 816–823. ISSN: 0043-1745. DOI: 10.1017/wsc.2024.66.
- [126] W. C. Hoffmann i A. J. Hewitt. „Comparison of three imaging systems for water-sensitive papers”. W: *Applied Engineering in Agriculture* 21.6 (2005), s. 961–964. ISSN: 1943-7838. DOI: 10.13031/2013.20026.
- [127] H. Zhu, M. Salyani i R. D. Fox. „A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 76.1 (2011), s. 38–43. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2011.01.003.
- [128] M. Cunha, C. Carvalho i A. R. S. Marcal. „Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets”. W: *Biosystems Engineering* 111.1 (2012), s. 11–23. ISSN: 1537-5110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.10.002.
- [129] M. Salyani i R. D. Fox. „Performance of Image Analysis for Assessment of Simulated Spray Droplet Distribution”. W: *Transactions of the ASAE* 37.4 (1994), s. 1083–1089. ISSN: 2151-0059. DOI: 10.13031/2013.28179.
- [130] Q. Liu i in. „The role of drop shape in impact and splash”. W: *Nature Communications* 12.1 (2021), s. 3068. ISSN: 2041-1723. DOI: 10.1038/s41467-021-23138-4.

- [131] M. Salyani i in. „Assessment of spray distribution with water-sensitive paper”. W: *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15.2 (2013), s. 101–111. ISSN: 1682-1130.
- [132] M. Krzywinski i N. Altman. „Visualizing samples with box plots”. W: *Nature Methods* 11.2 (2014), s. 119–120. ISSN: 1548-7091. DOI: 10.1038/nmeth.2813. URL: <https://www.nature.com/articles/nmeth.2813>.
- [133] *Centrum Nowoczesnej Mobilności*. Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny. URL: <https://pit.lukasiewicz.gov.pl/centrum-nowoczesnej-mobilnosci/> (term. wiz. 09.02.2025).
- [134] A. Mazalewski. „Zakupy opryskiwaczy w ramach PROW 2014-2020”. W: *Atr Express* 5 (2021).
- [135] D. Niedźwiecka. *Historia jak z Hollywood - Krukowiak obchodzi 40-lecie*. Nasza Rola. URL: <https://naszarola.pl/krukowiak-historia-jak-z-hollywood-40-lecie/> (term. wiz. 09.02.2025).
- [136] A. Arabska. *40 lat firmy Krukowiak*. Ogrodinfo.pl. URL: <https://www.ogrodinfo.pl/nawozenie-i-technika/40-lat-firmy-krukowiak/> (term. wiz. 09.02.2025).
- [137] *O firmie*. KFMR KRUKOWIAK. URL: <https://www.krukowiak.com.pl/o-firmie> (term. wiz. 09.02.2025).
- [138] *Unia (producent maszyn rolniczych)*. Page Version ID: 72761946. 2024. URL: [https://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Unia_\(producent_maszyn_rolniczych\)&oldid=72761946](https://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Unia_(producent_maszyn_rolniczych)&oldid=72761946) (term. wiz. 09.02.2025).
- [139] *Inteligentny robot spełniający wymogi rolnictwa precyzyjnego*. Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny. URL: <https://pit.lukasiewicz.gov.pl/o-projekt-nr-poir-01-01-01-00-1230-19-polski-robot/> (term. wiz. 09.02.2025).
- [140] *Bury Maszyny Rolnicze*. URL: <https://bury.com.pl/o-firmie/> (term. wiz. 20.03.2025).
- [141] *Agricultural Sprayers Market Size, Demand & Growth Drivers*. Fact.MR. URL: <https://www.factmr.com/report/3476/agricultural-sprayers-market> (term. wiz. 12.02.2025).
- [142] *See & Spray™ | Precision Ag | John Deere US*. John Deere. URL: <https://www.deere.com/en/sprayers/see-spray/> (term. wiz. 13.02.2025).

- [143] *Opryskiwacz ciągany BORYS 1500L 2000L 2500L 3000L 15m 18m 21m 24m*. BARRAS.pl. URL: <https://www.traktoryogrodowe.pl/strona-produktu/opryskiwacz-ci%C4%85gany-borys-1500l-2000l-2500l-3000l-15m-18m-21m-24m> (term. wiz. 13.02.2025).
- [144] *Najlepszy polski opryskiwacz zaczepiany Hardy – producent Mescomp*. Mescomp. URL: <https://www.mescomp.com/pl/opryskiwacze-zaczepiane/148-opryskiwacz-zaczepiany-hardy.html> (term. wiz. 13.02.2025).
- [145] D. Stadnicka, red. *Problemy w obszarach produkcyjnych: monografia. Cz. 1: Proste metody w trudnych zadaniach: studia przypadków*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2021, s. 213. ISBN: 978-83-7934-494-9.
- [146] B. Goranczewski i D. Puciato. „Zastosowanie analizy SWOT w formułowaniu strategii rozwoju turystyki na obszarach recepcyjnych”. W: *Turyzm/Tourism* 20.2 (2011), s. 47–55. ISSN: 2080-6922. DOI: 10.18778/0867-5856.20.2.03.
- [147] C. Speth. *Analiza SWOT*. 50Minutes.com, 2023. ISBN: 978-2-8086-0079-8.
- [148] N. Pahl i A. Richter. *SWOT Analysis: Idea, Methodology and a Practical Approach*. GRIN Publishing, 2009. ISBN: 978-3-640-29767-2.
- [149] M. Ingaldi. „Wykorzystanie analizy SWOT do określenia pozycji strategicznej przedsiębiorstwa poligraficznego”. W: *Quality Production Improvement* 7 (2017), s. 20–31. ISSN: 2544-2813. DOI: 10.30657/qpi.2017.07.03.
- [150] T. Sammut-Bonnici i D. Galea. „SWOT Analysis”. W: *Wiley Encyclopedia of Management*. Red. C. L. Cooper. Wiley, 2015, s. 1–8. ISBN: 978-1-119-97251-8. DOI: 10.1002/9781118785317.weom120103.
- [151] R. Fragomeli, A. Annunziata i G. Punzo. „Promoting the Transition towards Agriculture 4.0: A Systematic Literature Review on Drivers and Barriers”. W: *Sustainability* 16.6 (2024), s. 2425. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su16062425.
- [152] D. S. Paraforos, G. M. Sharipov i H. W. Griepentrog. „ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review”. W: *Computers and Electronics in Agriculture* 163 (2019), s. 104863. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104863.

- [153] T. A. Burgers, J. D. Gaard i B. J. Hyronimus. „Comparison of Three Commercial Automatic Boom Height Systems for Agricultural Sprayers”. W: *Applied Engineering in Agriculture* 37.2 (2021), s. 287–298. ISSN: 1943-7838. DOI: 10.13031/aea.14346.
- [154] J. Bang i J. W. Han. „Factors Influencing Farmers’ Motivation to Adopt Smart Farm Technology in South Korea”. W: *arXiv preprint arXiv:2504.01795* (2025). DOI: 10.48550/arXiv.2504.01795.
- [155] E. M. B. M. Karunathilake i in. „The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture”. W: *Agriculture* 13.8 (2023), s. 1593. ISSN: 2077-0472. DOI: 10.3390/agriculture13081593.

Spis rysunków

1.1	Główne technologie Rolnictwa 4.0 [8]	11
2.1	Przykładowe zużycie środków ochrony roślin na polach rolniczych w różnych krajach Europy [23]	16
2.2	Rozpylacz firmy TeeJet - widok z góry, w powiększeniu otworu wylotowego oraz widok z boku [43]	19
2.3	Korpus rozpylacza z dwoma rozpylaczami skierowanymi do przodu i do tyłu w stosunku do kierunku ruchu opryskiwacza [53]	21
2.4	Analizator cząstek fazy Dopplera PDPA [65]	25
2.5	Stół rowkowy do pomiaru jednorodności rozkładu cieczy [69]	26
2.6	Różnica stopnia nadmiernego pokrycia między ASC a INC w przypadku wyjazdu z pola o trójkątnym kształcie [76]	27
2.7	Kompensacja dawki na zakrętach przy wykorzystaniu rozpylaczy PWM [76]	29
2.8	Rozwiązanie Wingssprayer zamontowane na belce opryskiwacza rolniczego [92]	31
2.9	Rozwiązanie WEED-IT zamontowane na belce opryskiwacza [106]	34
2.10	Rozwiązanie Greeneye podczas wykonywania zabiegu [111]	36
3.1	Ogólny schemat realizacji badań i wdrożenia	41
4.1	Oprysk całopowierzchniowy kukurydzy	45
4.2	Proponowany oprysk, po lewej oprysk herbicydem, po prawej łączony oprysk herbicydem w międzyrzędziu oraz oprysk na roślinę uprawną w rzędzie	46
4.3	Model CAD 3D głowicy rozpylacza pracującego w rzędzie: po lewej w całości, po prawej w przekroju. 1 – głowica rewolwerowa, 2 – silnik DC z przekładnią ślimakową, 3 – silnik DC z enkoderem, 4 – łożyska, 5 – pasek zębaty, 6 – elektrozawór, 7 – przyłącze wodne	48
4.4	Model CAD 3D głowicy rozpylacza pracującego w międzyrzędziu	49
4.5	Model CAD 3D układu pracującego w międzyrzędziu. 1 – silnik krokowy, 2 – oś pozioma, 3 – wózek, 4 – oś pionowa	50
4.6	Model CAD 3D ramy nośnej	51
4.7	Ogólny schemat blokowy (układ elektryczny)	52
4.8	Schemat elektryczny wykonany w programie KiCad	54

4.9	Rozmieszczone elementy elektroniczne oraz poprowadzone ścieżki, wykonane w programie KiCad	55
4.10	Gotowa płytką sterowniczą do kontroli siłowników	55
4.11	Model badawczy zbudowany w ramach pracy doktorskiej	56
4.12	Schemat działania dla stanu automatycznego	57
4.13	Widok ekranu z działającego oprogramowania analizującego rzędy roślin	58
4.14	Widok ekranu z działającego oprogramowania analizującego międzyrzędzie	59
4.15	Widok ekranu z działającego oprogramowania wykrywającego roślinę uprawną	60
4.16	Oszczędności herbicydu wynikające z używania systemów wizyjnych w przypadku kukurydzy uprawianej na ziarno	61
4.17	Oszczędności pestycydów wynikające z używania systemów wizyjnych w przypadku kukurydzy uprawianej na ziarno	62
5.1	Urządzenie do badania równomierności oprysku	63
5.2	Wykres przedstawiający wynik pomiaru rozkładu poprzecznego w zależności od kąta pochylenia dla 30 cm wysokości rozpylacza	65
5.3	Wykres przedstawiający wynik pomiaru rozkładu poprzecznego w zależności od kąta pochylenia dla 40 cm wysokości rozpylacza	65
5.4	Wykres przedstawiający wynik pomiaru rozkładu poprzecznego w zależności od kąta pochylenia dla 50 cm wysokości rozpylacza	66
5.5	Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności szerokości oprysku względem kąta pochylenia rozpylacza	67
5.6	Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności objętości maksymalnej w menzurce względem kąta pochylenia rozpylacza	67
5.7	Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności asymetrii względem kąta pochylenia rozpylacza	68
5.8	Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi narastającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym	69
5.9	Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi opadającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym	70
5.10	Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności rozkładu poprzecznego od kąta skreślenia dla 30 cm wysokości rozpylacza od podłoża	71
5.11	Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności rozkładu poprzecznego od kąta skreślenia dla 40 cm wysokości rozpylacza od podłoża	71

5.12 Wykres przedstawiający wynik pomiaru zależności rozkładu poprzecznego od kąta skręcenia dla 50 cm wysokości rozpylacza od podłoża	72
5.13 Wykres zależności szerokości oprysku od kąta skręcenia rozpylacza	73
5.14 Wykres zależności objętości maksymalnej od kąta skręcenia rozpylacza	73
5.15 Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi narastającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym	74
5.16 Wykres wskaźnika znormalizowany stromości krawędzi opadającej w zależności od kąta pochylenia i wysokości rozpylacza nad stołem rowkowym	75
5.17 Robota polowy firmy Unia z zamontowanym modelem badawczym	76
5.18 Robot z zamontowanym standardowym opryskiwaczem rolniczym przystosowany do montażu na robocie rolniczym	77
5.19 Poletko doświadczalne na terenie Łukasiewicz-PIT	78
5.20 Uchwyt na papierki wodoczułe zamontowane w rzędzie kukurydzy	78
5.21 Zamontowana na robocie rolniczym aparatura pomiarowa HBM	79
5.22 Karta pomiarowa z naklejonymi papierkami wodoczułymi po przeprowadzonym przejeździe	81
5.23 Program ImageJ ze skryptami do analizy papierków wodoczułych	82
5.24 Procentowe wypełnienie w danych częściach papierka wodoczułego przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$	84
5.25 Procentowe wypełnienie w danych częściach papierka wodoczułego przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}	84
5.26 Różnica między wartością maksymalnymi i minimalnymi procentowego wypełnienia przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$	86
5.27 Różnica między wartością maksymalnymi i minimalnymi procentowego wypełnienia przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}	86
5.28 Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, przodem do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$	87
5.29 Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, bocznie do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$	88
5.30 Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, poziomo do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu $0,5 \text{ m s}^{-1}$	89
5.31 Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, przodem do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}	90
5.32 Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, bocznie do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}	90

5.33	Porównanie rozkładu średnich po częściach papierka, poziomo do kierunku jazdy przy prędkości przejazdu 1 m s^{-1}	91
6.1	Logo firmy Krukowiak (Kujawska Fabryka Maszyn Rolniczych Sp. z o.o.) [137].	95
6.2	Logo firmy Unia Sp. z o.o. [138].	96
6.3	Logo firmy Bury Maszyny Rolnicze Sp. z o.o. [140].	96
6.4	Układ współrzędnych strategii według analizy SWOT. Opracowanie własne na podstawie [149].	107
7.1	Prawidłowo i nieprawidłowo skalibrowana głowica.	113

Spis tabel

5.1	Dane pomiarowe dla opryskiwacza standardowego	82
5.2	Dane pomiarowe dla rozwiązania projektowanego	83
6.1	Zakup opryskiwaczy w ramach programu PROW 2014-2020 według ilości sprzedanych sztuk [134].	98
6.2	Koszty oraz czasochłonność dla poszczególnych rozwiązań.	101
6.3	Średnia ważona składowych analizy SWOT	105