

**STUDIA I RAPORTY
IUNG-PIB**

74(28)



**ROLA INNOWACJI TECHNOLOGICZNYCH
W BUDOWANIU ROLNICTWA ODPORNEGO
NA ZMIANY KLIMATU**

**DOTACJA CELOWA
2025**

Puławy 2025



INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

**STUDIA I RAPORTY
IUNG-PIB**

74(28)

**ROLA INNOWACJI TECHNOLOGICZNYCH
W BUDOWANIU ROLNICTWA ODPORNEGO
NA ZMIANY KLIMATU**

**DOTACJA CELOWA
2025**

Puławy 2025

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Dyrektor: *prof. dr hab. Mariusz Matyka*

Redakcja naukowa:

mgr inż. Tytus Berbeć

Autorzy:

*dr Adam K. Berbeć; mgr inż. Tytus Berbeć; dr hab. Magdalena Borzęcka;
dr hab. Jerzy Grabiński, prof. IUNG-PIB; dr inż. Anna Jędrejek;
dr Małgorzata Kozak; dr hab. Jerzy Kozyra, prof. IUNG-PIB; dr Anna Nieróbca;
mgr Ludwika Poręba; dr hab. Rafał Wawer, prof. IUNG-PIB; dr inż. Marta Wysińska;
dr Katarzyna Żyłowska*

Recenzenci:

*dr hab. Barbara Skowera
dr Paweł Gilewski*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Katarzyna Mikulska*
Okładka: krajobraz okolic Rogowa (fot. *dr Anna Nieróbca*)

ISBN 978-83-7562-442-7

Publikacja elektroniczna

Egzemplarz bezpłatny

Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach
tel. (81) 47 86 720
e-mail: iung@iung.pulawy.pl; <http://www.iung.pl>

STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB

**ROLA INNOWACJI TECHNOLOGICZNYCH
W BUDOWANIU ROLNICTWA ODPORNEGO
NA ZMIANY KLIMATU**

SPIS TREŚCI

Wstęp	7
1. Berbeć T. – Rys historyczny i wprowadzenie do rolnictwa 4.0	9
2. Wawer R. – Potencjał Rolnictwa 4.0 i 5.0 w adaptacji gospodarki wodnej w rolnictwie do zmian klimatu	16
3. Jędrejek A. – Satelitarne systemy obserwacji Ziemi w służbie rolnictwa 4.0	29
4. Berbeć T. – Wykorzystanie zobrazowań spektralnych w rolnictwie 4.0	41
5. Poręba L. – Wykorzystanie map cyfrowych oraz zdjęć satelitarnych do budowania rolnictwa odpornego na zmiany klimatu	81
6. Wyzińska M., Grabiński J. – Biowęgiel – perspektywy i możliwości zastosowania w nowoczesnym rolnictwie	94
7. Grabiński J., Wyzińska M. – Superabsorbenty – możliwości stosowania w nowoczesnej produkcji roślinnej	106
8. Berbeć A.K. – Autonomiczne roboty polowe jako element zrównoważonego rozwoju	114
9. Berbeć A.K. – Rolnictwo ekologiczne – miejsce wdrażania innowacji rolniczych i budowania odporności agroekosystemów	126
10. Żyłowska K., Kozyra J. – Zintegrowane monitorownie suszy na potrzeby rolnictwa – przegląd systemów i wskaźników	140
11. Nieróbca A. – Plonowanie w nowoczesnym rolnictwie w porównaniu z ubiegłym wiekiem	154
12. Kozak A. – Rozpoznanie regionalnych barier w rozwoju rolnictwa 4.0 w Polsce	173
13. Borzęcka M. – Rola narzędzi internetowych w szerzeniu wiedzy na temat biogospodarki oraz budowaniu współpracy między podmiotami... ..	195
14. Berbeć T. – Ilość śladu węglowego generowanego przez algorytmy AI i maszyny w rolnictwie cyfrowym w kontekście zmian klimatu	205
15. Berbeć T. – Wykorzystanie dronów w rolnictwie a przepisy prawne	223

Wstęp

Obecnie sektor rolny stoi w obliczu podwójnej presji, a mianowicie potrzeby zapewnienia globalnego bezpieczeństwa żywnościowego dla rosnącej populacji oraz konieczności adaptacji do gwałtownych zmian klimatu. Wyzwania te, w kontekście krajowym, są dodatkowo zaostrome przez wymogi transformacji środowiskowej (m.in. w ramach Europejskiego Zielonego Ładu) oraz rosnącą częstotliwość występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych, zwłaszcza suszy rolniczej. W odpowiedzi na te wyzwania nie tylko w Polsce, ale na całym świecie intensywnie rozwijana jest koncepcja rolnictwa 4.0 oparta na digitalizacji i precyzyjnym zarządzaniu w gospodarstwie rolnym.

Literatura naukowa obfituje w liczne publikacje na temat poszczególnych technologii, jednak charakteryzuje się ona znacznym rozproszeniem. Obecnie prowadzone doświadczenia skupiają się najczęściej na wąskich, wyspecjalizowanych dziedzinach – analizie danych teledetekcyjnych, zastosowaniu robotyki czy barierach ekonomicznych – rzadko łącząc je w spójny system. Luka badawcza, którą niniejsza monografia ma na celu wypełnić, polega na braku holistycznej, interdyscyplinarnej syntezy analizującej wzajemne powiązania i potencjalne konflikty między poszczególnymi filarami tej ewolucji. Brakuje opracowania, które łączyłoby aspekty technologiczne (drony, wykorzystanie szeroko pojętej sztucznej inteligencji, sensory, czujniki), agronomiczne (mapy glebowe, dodatki doglebowe, tzw. polepszacze), regulacyjne i społeczne, a także podejmowałoby krytyczną ocenę śladu środowiskowego wdrażania i użytkowania technologii cyfrowych. Niniejsza praca wydaje się istotna, ponieważ zmierza do wykonania analizy transformacji polskiego rolnictwa, wskazując na jej realny potencjał i wyzwania w kontekście budowania odpornego sektora rolnego.

W obliczu wyzwań, jakie stawiają przed ludzkością zmiany klimatu wpływające na światową gospodarkę, rolnictwo jako główny sektor gospodarki dotyczący bezpieczeństwa żywnościowego, ale również stabilności społecznej, znajduje się w trudnym położeniu. Postępujące procesy zmian w środowisku naturalnym, nasilające się ekstremalne zjawiska meteorologiczne, takie jak długotrwałe susze czy występowanie przymrozków i mrozów po rozpoczęciu wegetacji przez rośliny, a także rosnąca presja wykorzystywania zasobów naturalnych, wymuszają przeprowadzenie gruntownej rewizji dotychczas stosowanych modeli produkcji rolnej. Wyzwania stawiane nowoczesnemu rolnictwu wymuszają konieczność budowy odpornego, zdolnego do mitygacji, ale przede wszystkim adaptacji, a jednocześnie zrównoważonego oraz wydajnego rolnictwa. Kluczem do transformacji w rolnictwie będą takie elementy, które otwierają erę precyzji, w głównej mierze innowacje technologiczne, zwiększenie automatyzacji czy wykorzystywanie inteligentnych narzędzi do zarządzania w gospodarstwie. Połączenie tych wszystkich elementów możemy określić mianem rolnictwa 4.0. Niniejszy zeszyt stanowiący zbiór studiów i raportów to również wieloaspektowa analiza roli, jaką odgrywa wykorzystanie nowoczesnych technologii w kształtowaniu przyszłości sektora rolnego w Polsce i na świecie.

Rozwój rolnictwa na przełomie wieków był zawsze nierozzerwalnie związany z postępem technologicznym, jednak obecnie rewolucja cyfrowa wprowadzona do rolnictwa ma charakter bezprecedensowy. Przejście od mechanizacji do digitalizacji procesów produkcyjnych definiuje rolnictwo 4.0 jako system, w którym decyzje dotyczące prowadzenia gospodarstwa rolnego podejmowane są na podstawie niezwykle precyzyjnych danych pozyskiwanych i gromadzonych w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie technologii informacyjno-komunikacyjnej (ICT), internetu rzeczy (IoT), sztucznej inteligencji (AI) oraz prowadzenie zaawansowanej analityki danych, pozwala na przeprowadzenie optymalizacji każdego etapu produkcji – od pola do stołu. Wprowadzenie do nowoczesnego rolnictwa tego schematu działania ukazuje podstawy oraz potencjał transformacyjny polskiego rolnictwa. Jednakże na horyzoncie innowacji pojawia się już wykorzystanie generatywnej sztucznej inteligencji zdolnej do autonomicznego podejmowania decyzji, czyli rolnictwa 5.0, koncepcji, która kładzie jeszcze większy nacisk na zrównoważony rozwój, dobrostan człowieka i pełną synergię z ekosystemem. To właśnie potencjał rolnictwa 5.0 może okazać się kluczowy w kontekście adaptacji gospodarki wodnej w rolnictwie do zmieniającego się klimatu, co jest jednym z najpilniejszych wyzwań współczesności dotyczących głównie zatrzymania wody w glebie i tym samym zwiększenia jej dostępności dla roślin uprawnych.

Głównym celem omawianej cyfrowej transformacji jest zdolność do pozyskiwania i interpretowania informacji o stanie gleby, upraw i warunków meteorologicznych w sposób niezwykle precyzyjny. Technologie wykorzystujące zobrazowania teledetekcyjne w tej dziedzinie są niezastąpionym elementem precyzyjnej informacji. Teledetekcja satelitarna stała się potężnym narzędziem w służbie rolnictwa 4.0, umożliwiając monitorowanie kondycji upraw na dużych obszarach, precyzyjne prognozowanie finalnych plonów czy ocenę skutków wystąpienia stresów roślin, w tym stresu suszy. Rozwój cyfryzacji rolnictwa, z wykorzystaniem map satelitarnych, pozwala na tworzenie aplikacji wspierających rolników w codziennym zarządzaniu gospodarstwem rolnym. Równie dynamicznie rozwija się teledetekcja niskopułapowa wykorzystująca bezzałogowe statki powietrzne (drony) jako nośniki aparatury badawczo-pomiarowej, takiej jak sensory spektralne. Wykorzystanie widm spektralnych i ich przemyślane zestawienie pozwala na wczesne wykrywanie stresów biotycznych i abiotycznych w roślinach, zanim staną się one widoczne gołym okiem. Dzięki wykorzystaniu wskaźników spektralnych możliwe jest w sposób precyzyjny podjęcie szybkiej i celowanej interwencji. Drony rewolucjonizują nie tylko diagnostykę, ale również precyzyjną aplikację środków ochrony roślin czy nawozów. Rosnąca popularność ciężkich dronów rolniczych rodzi nowe wyzwania, zwłaszcza w sferze regulacji prawnych, w tym barier dotyczących możliwości pełnego wykorzystania potencjału dronów rolniczych.

Wykorzystanie technologii teledetekcyjnych w połączeniu z informacją pozyskaną z różnego rodzaju czujników rozmieszczonych na ziemi, np. dotyczącą właściwości fizykochemicznej gleby, zyskują pełną wartość aplikacyjną. W nowoczesnym rolnictwie nie ma miejsca na traktowanie pola jako jednorodnej powierzchni. Jest

to wyzwanie szczególne w rejonach kraju, w których występuje naturalna mozaikowość gleb będąca spuścizną po działalności lądolodu plejstocńskiego. Dzięki stworzeniu i wykorzystaniu cyfrowych map glebowych powstałych na podstawie zaawansowanych technik gleboznawczych i geomatycznych możliwe jest precyzyjne różnicowanie dawek nawozów, wody czy środków ochrony roślin zależnie od lokalnie występującej zasobności i właściwości danego podłoża. Synergiczne wykorzystanie połączenia dokładnych glebowych map cyfrowych oraz zdjęć satelitarnych staje się podstawą tworzenia rolnictwa odpornego na zmiany klimatu, zwłaszcza na suszę rolniczą. Odporność tę można dodatkowo wzmacniać poprzez bezpośrednią ingerencję w strukturę i właściwości gleby. Polepszacze gleby, ich analiza oraz perspektywy i możliwości zastosowania są przedmiotem badań wielu naukowców. Rdzenna ludność Amazonii już tysiące lat temu odkryła pozytywny wpływ biowęgla na glebę, tworząc niezwykle żyzne do dzisiaj gleby zwane Terra Preta de Indio. Dobrym przykładem może być zastosowanie współczesnego biowęgla jako dodatku doglebowego, który poprawia właściwości fizykochemiczne gleby oraz jej zdolność do retencji wody, ale także przyczynia się do sekwestracji węgla. Podobny potencjał drzemie w hydrożelach znanych również jako superabsorbenty, których zdolność do magazynowania wody oraz różnego rodzaju makro- i mikroelementów może stanowić kluczowe wsparcie dla roślin w okresach o zróżnicowanych opadach – w okresach długotrwałej suszy woda jest oddawana roślinom, natomiast w okresach o intensywnym opadzie woda ta jest magazynowana.

Niezwykle ważnym filarem rolnictwa 4.0 jest robotyzacja i automatyzacja. Wizja w pełni autonomicznych gospodarstw nie jest już tylko naukową fantazją, ale staje się coraz bardziej realna. Rolnictwo 4.0 przybliży rolę autonomicznych robotów polowych, określanych również jako drony pełzające lub drony naziemne, które mogą wykonywać takie zadania agronomiczne, jak siew, pielęgnacja, precyzyjne odchwaszczanie czy aplikowanie środków ochrony roślin na pojedyncze rośliny. Wprowadzenie do gospodarstwa maszyn automatycznych czy nawet autonomicznych to nie tylko krok w stronę optymalizacji pracy i redukcji kosztów, ale przede wszystkim ważny element zrównoważonego rozwoju pozwalający na ograniczenie degradacji środowiska glebowego i zużycia paliw kopalnych. Co istotne, wykorzystanie innowacji technologicznych nie jest zarezerwowane wyłącznie dla rolnictwa konwencjonalnego. To rolnictwo ekologiczne, z jego specyficznymi wymogami, staje się idealnym poligonem doświadczalnym dla wdrażania nowatorskich rozwiązań i budowania naturalnej odporności agroekosystemów.

Pełne zrozumienie potrzeb i obranie właściwego kierunku adaptacji rolnictwa wymaga jednak głębokiej analizy zmian klimatu oraz ich wpływu na rolnictwo. Stworzenie i wykorzystanie systemów i wskaźników służących do zintegrowanego monitorowania suszy rolniczej ma fundamentalne znaczenie dla systemów wczesnego ostrzegania przed pojawianiem się stresów czy patogenów i zarządzania kryzysowego w nowoczesnym gospodarstwie rolnym. Przewidywanie zmian klimatu oraz modelowanie w warunkach nowych scenariuszy klimatycznych staje się głównym celem agroklimatologów. Zmiany podstawowych zależności, jak wpływ terminu siewu na

ryzyko wystąpienia przymrozków czy zmiana terminu siewu w celu uniknięcia kiełkowania nasion w niedostatecznie uwilgotnionej glebie wymusza na rolnikach rewizję wieloletnich praktyk oraz nie tylko mitygację, ale przede wszystkim zaadaptowanie się do nowych realiów prowadzenia gospodarstwa. Skalę zmian, jakie zaszły w produkcji rolnej, obrazuje również porównanie historyczne zestawiające poziomy plonowania na przykładzie zbóż w nowoczesnym rolnictwie z tymi osiąganymi w ubiegłym wieku.

Wdrożenie tak zaawansowanych technologii nie jest jednak procesem łatwym, pozbawionym barier czy wyzwań. Naukowcy w swoich badaniach dokonują rozpoznania regionalnych barier w rozwoju rolnictwa 4.0, wskazując na czynniki ekonomiczne, społeczne, infrastrukturalne czy mentalne, które mogą spowalniać implementację rolnictwa precyzyjnego. Równie istotna jest efektywna dyfuzja wiedzy pomiędzy naukowcami, firmami technologicznymi a rolnikami. W erze wszechobecnej digitalizacji kluczową rolę odgrywają narzędzia internetowe, które mogą skutecznie wspierać szerzenie wiedzy na temat biogospodarki oraz ułatwiać budowanie sieci współpracy między nauką, biznesem a praktyką rolniczą. Niestety każda nowa technologia niesie za sobą określony ślad środowiskowy. Należy zatem mieć na uwadze niezwykle aktualny i rzadko poruszany temat ilości śladu węglowego generowanego przez systemy sztucznej inteligencji, które stanowią obliczeniowy filar rolnictwa cyfrowego. Jest to ważny głos w dyskusji o konieczności holistycznego spojrzenia na zrównoważony charakter wdrażanych innowacji w rolnictwie.

W zeszycie została podjęta próba ujęcia panoramicznego obrazu transformacji, jakiej doświadcza współczesne rolnictwo – od ogólnej koncepcji rolnictwa 4.0, przez szczegółowe analizy konkretnych technologii (teledetekcji, robotyki, cyfrowych map glebowych), aż po zastosowanie innowacyjnych materiałów doglebowych i agronomicznych. Podjęta została również próba wskazania aspektów problematycznych związanych z barierami wdrożeniowymi, wpływem na klimat oraz nowymi wyzwaniami prawnymi i środowiskowymi.

Kierownik zadania 1.8
mgr inż. Tytus Berbeć

Tytus Berbeć

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

RYS HISTORYCZNY I WPROWADZENIE DO ROLNICTWA 4.0*

Słowa kluczowe: rolnictwo odporne na zmiany klimatu, innowacje technologiczne, rolnictwo 4.0, rolnictwo precyzyjne, historia rolnictwa precyzyjnego, Internet Rzeczy (IoT)

Wstęp

Współczesne rolnictwo stoi przed dylematem nie tylko w skali europejskiej, ale i skali globalnej, a mianowicie, jak wyżywić nieustannie rosnącą populację świata, która do 2050 r. może osiągnąć blisko 10 mld ludzi (FAO 2017), jednocześnie mierząc się z postępującymi niekorzystnymi dla rolnictwa zmianami klimatu i koniecznością ochrony zasobów naturalnych. Nasilające się susze, gwałtowne zjawiska o charakterze burzowym z towarzyszącymi im silnymi porywami wiatru i ulewnymi opadami, fale upałów oraz zmiany w rozkładzie opadów w sezonach wegetacyjnych bezpośrednio zagrażają stabilności produkcji rolnej (IPCC 2022). Tradycyjne modele agrotechniczne, często oparte na intensywnym wykorzystaniu wody, nawozów czy środków ochrony roślin, okazują się niewystarczająco elastyczne i w dłuższej perspektywie niezrównoważone.

Odpowiedzią na te wyzwania jest konieczność budowy rolnictwa odpornego na zmiany klimatu (ang. *climate-resilient agriculture*), czyli systemu zdolnego do adaptacji oraz transformacji w obliczu presji klimatycznej, przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet zwiększeniu produktywności. Wykorzystanie innowacji technologicznych odgrywa kluczową rolę w tej transformacji.

Ogólnodostępna literatura naukowa oraz publikacje popularnonaukowe na temat technologii wykorzystywanych na różnych etapach w rolnictwie charakteryzują się znacznym rozdrobnieniem. Dostępne wyniki doświadczeń prowadzonych przez na-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

ukowców na całym świecie skupiają się najczęściej na wąskich, wyspecjalizowanych dziedzinach, takich jak: analiza danych teledetekcyjnych z podziałem na wysoką i niską teledetekcję, zastosowanie robotyki z podziałem na gospodarstwa rolne i przetwórstwo czy finalne wyniki ekonomiczne gospodarstwa, rzadko łącząc je w spójny system. Niniejszy artykuł analizuje ewolucyjną rolę innowacji technologicznych w zwiększaniu produktywności i odporności rolnictwa na przestrzeni ostatnich 50 lat. Przedstawiono rys historyczny, począwszy od rewolucji neolitycznej, przez rewolucje agrarne czy zieloną rewolucję, aż po narodziny rolnictwa precyzyjnego. W artykule skupiono się na koncepcji rolnictwa 4.0, które wykorzystując takie technologie, jak internet rzeczy (IoT), sztuczną inteligencję (AI), duże zbiory danych, tzw. big data czy robotykę, oferuje bezprecedensowe możliwości budowania systemów rolnych dostosowanych do szybko podążających zmian klimatycznych czy nawet odpornych na zmiany klimatu. W artykule omówiono kluczowe narzędzia rolnictwa 4.0 i ich praktyczne zastosowanie pod kątem optymalizacji zużycia zasobów, monitorowania stanu upraw i minimalizowania negatywnego wpływu na środowisko. Wskazano również na bariery w implementacji tych rozwiązań oraz zarysowano perspektywy dalszego rozwoju rolnictwa w kontekście globalnych wyzwań. Niniejsza praca oferuje panoramiczne spojrzenie na transformację od początków rolnictwa poprzez jego ewolucję do rolnictwa 4.0, wskazując na synergie, bariery i realny potencjał tych technologii w budowaniu wydajnego sektora rolnego zapewniającego bezpieczeństwo żywności.

Zmiany klimatu stanowią jedno z największych wyzwań dla globalnego bezpieczeństwa żywnościowego, wymuszając na sektorze rolnym fundamentalną transformację.

Ewolucja technologiczna w rolnictwie: od mechanizacji do cyfryzacji

Historia rolnictwa jest nierozdzielnie związana z historią ewolucji technologicznej. Każdy przełom cywilizacyjny był napędzany lub wspierany przez innowacje, które pozwalały na efektywniejsze pozyskiwanie żywności. Pierwszą wielką rewolucją było przejście od zbieractwa i łowiectwa do osiadłego trybu życia i uprawy roli ok. 10 000 lat p.n.e. Udomowienie zwierząt i uprawa roślin oraz wynalezienie prostych narzędzi, takich jak motyka czy sierp, stanowiło krok milowy rozwoju cywilizacyjnego. Przez całe tysiąclecia postęp w rolnictwie był powolny, oparty zarówno na lokalnych udoskonaleniach sprzętowych, jak i w sposobie gospodarowania (np. wprowadzenie płodozmianu w średniowieczu). Prawdziwy przełom rozwoju technologicznego nastąpił wraz z rewolucją przemysłową. Zastosowanie maszyny parowej i urządzeń napędzanych wodą, a następnie silnika spalinowego doprowadziło do zwiększenia produktywności gospodarstw rolnych poprzez mechanizację rolnictwa. Zwierzęta stanowiące siłę pociągową w rolnictwie zostały zastąpione przez maszyny spalinowe – popularny do dzisiaj ciągnik, czy mówiąc potocznie traktor, natomiast

maszyny rolnicze zrewolucjonizowały siew, zbiory i przetwarzanie produktów rolnych. Ten etap, nazywany jest często **rolnictwem 1.0**, czyli etapem, który skupiał się na drastycznym zwiększeniu wydajności pracy ludzkiej (Zambon i in. 2019). Wydajność pracy ludzkiej w dużym stopniu zwiększono poprzez wprowadzenie linii produkcyjnych zasilanych energią elektryczną, co było dużą, aczkolwiek często niedocenianą rewolucją. Na początku XX w. przełomem w rolnictwie było rozpoczęcie stosowania na dużą skalę nawozów sztucznych, które były pokłosiem opracowania przez Fritza Habera podstawy syntezy amoniaku, a następnie udoskonalenia procesu i wdrożenia go na skalę przemysłową przez Carla Boscha. Kolejnym krokiem milowym w rozwoju rolnictwa były przemiany jakie dokonały się po II Wojnie Światowej. W odpowiedzi na groźbę globalnego głodu rozpoczęto tzw. zieloną rewolucję, której filarami były trzy główne elementy, takie jak: wyhodowanie nowych, wysokopłennych odmian zbóż (pszenicy, ryżu, kukurydzy), masowe zastosowanie nawozów syntetycznych i upowszechnienie chemicznych środków ochrony roślin (pestycydów). Innowacje te, określane mianem **rolnictwa 2.0**, doprowadziły do znacznego wzrostu plonów i uratowały setki milionów ludzi przed niedożywieniem (Pingali 2012). Niestety wprowadzona rewolucja miała swoje wady w postaci wysokiej zależności mechanizacji od zasobów naturalnych, w tym paliw kopalnych, ale również przyczyniła się do znaczącej degradacji gleb, zanieczyszczenia wód oraz utraty bioróżnorodności. Wyzwania klimatyczne dodatkowo obnażyły słabości zielonej rewolucji, silnie uzależnionej od stabilnych dostaw wody i przewidywalnych warunków pogodowych. Pod koniec XX w., wraz z udostępnieniem ówczesznie dostępnej tylko dla wojska technologii satelitarnych (GPS) i systemów informacji geograficznej (GIS), narodziła się koncepcja rolnictwa precyzyjnego. Rewolucją w rolnictwie było wprowadzenie elektroniki, robotów oraz elementów IT do automatyzacji produkcji. Stanowiła ona fundamentalną zmianę paradygmatu: od zarządzania całym polem jako jednorodną całością, do zarządzania zmiennością w obrębie pola. Rolnicy, tworząc i wykorzystując mapy plonów, badając i analizując gleby oraz instalując różnego rodzaju sensory na polach uprawnych, mogli precyzyjnie aplikować nawozy i środki ochrony tylko tam, gdzie było to konieczne i w odpowiedniej dawce czy o odpowiednim stężeniu substancji czynnej. **Rolnictwo 3.0** to era optymalizacji i początek cyfryzacji, która położyła podwaliny pod kolejną, trwającą obecnie rewolucję (Schrijver i in. 2016).

Rolnictwo 4.0 – definicja i kluczowe technologie

Obecnie **rolnictwo 4.0**, które często określane jest mianem rolnictwa cyfrowego, rolnictwa inteligentnego (ang. *smart farming*), jest cyfrową odpowiedzią na wyzwania klimatyczne. Stanowi ono ewolucyjne rozwinięcie rolnictwa 3.0 (rolnictwa precyzyjnego), które skupiało się na optymalizacji dzięki wykorzystaniu danych pochodzących z satelitów (informacje GPS, GIS), przechodząc rewolucję do rol-

nictwa 4.0, które polega na głębokiej integracji, interoperacyjności i automatyzacji procesów na podstawie stałych przepływów danych otrzymywanych i wykorzystywanych w czasie rzeczywistym. Zatem rewolucją było wprowadzenie systemów IoT napędzanych przez rozszerzoną rzeczywistość i sztuczną inteligencję w czasie rzeczywistym. Nie polega ono jedynie na stosowaniu pojedynczych technologii, ale na ich głębokiej integracji w jeden, spójny system oparty na analizie danych. Jest to koncepcja holistycznego zarządzania gospodarstwem rolnym wykorzystująca synergę zaawansowanych technologii do monitorowania, analizy i automatyzacji procesów, oparta na gromadzeniu, przetwarzaniu i wykorzystywaniu dużych zbiorów danych w czasie rzeczywistym w celu optymalizacji produkcji, zwiększania efektywności, redukcji kosztów i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko produkcyjne (Saiz-Rubio i Rovira-Más 2020).

Fundamentem rolnictwa 4.0 są dane pochodzące z sieci połączonych ze sobą czujników glebowych, roślinnych, stacji agrometeorologicznych czy sensorów monitorujących funkcje życiowe zwierząt, zwane jako internet rzeczy (IoT). Zbiór wszystkich czujników generuje, wraz z danymi pochodzącymi z teledetekcji satelitarnej i nisko-połapowej (drony mapujące), ogromne zbiory danych. Ta koncepcja zwana jako big data wymaga zaawansowanej analizy, która często bez użycia sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego nie ma racji bytu. Ogromne zbiory danych przetwarzane są w chmurach obliczeniowych i integrowane w ramach zintegrowanych systemów zarządzania gospodarstwem (FMIS, ang. *Fuel Management Information System*), do których rolnik ma dostęp przez technologie mobilne. W zarządzaniu gospodarstwem rolnym kluczowe stają się również systemy oparte na systemach informacji przestrzennej (GIS, ang. *Geographic Information Systems*), które pozwalają na tworzenie map aplikacyjnych dla nawozów czy ŚOR. Tak zintegrowany system pozwala rolnikowi na lepszą koordynację zarządzania gospodarstwem i wejście na nowy poziom automatyzacji i robotyzacji, gdzie autonomiczne maszyny i drony wykonują precyzyjne zadania na podstawie cyfrowych map i analizy ogromnych zbiorów danych.

Ewolucja do rolnictwa 4.0 w dużej części przyczynia się do budowania odporności i adaptacji do zmian klimatu. Rolnictwo 4.0 można zdefiniować jako podejście, w którym dane stają się kluczowym zasobem, a technologie cyfrowe narzędziem do ich efektywnego wykorzystania, prowadząc do inteligentniejszej, bardziej zrównoważonej i wydajnej produkcji rolnej. Integracja powyższych technologii w produkcji rolniczej tworzy potężne narzędzia do mitygacji i adaptacji do zmian klimatu. Czujniki wilgotności gleby połączone z precyzyjnymi prognozami pogody i danymi o zapotrzebowaniu roślin pozwalają na uruchamianie systemów nawadniających tylko wtedy, gdy jest to absolutnie konieczne i dostarczanie dokładnie takiej ilości wody, jakiej potrzebuje roślina. To są kluczowe narzędzia w regionach zagrożonych suszą. Drony mogą identyfikować wycieki w systemach irygacyjnych, a analiza danych pozwala na tworzenie map zapotrzebowania wodnego dla poszczególnych części pola. Kolejnym przykładem

może być analiza danych z czujników glebowych i obrazów teledetekcyjnych, która pozwala na stosowanie nawozów w zmiennych dawkach (VRT, ang. *Variable Rate Technology*), co nie tylko obniża koszty i chroni wody gruntowe, ale także zmniejsza emisję podtlenku azotu (N_2O), silnego gazu cieplarnianego powstającego z nadmiaru nawozów azotowych, tym samym prowadząc do zrównoważonej gospodarki rolnej. Ponadto algorytmy AI, analizując dane mikroklimatyczne, wilgotność liści i historyczne dane o występowaniu chorób, mogą z dużym wyprzedzeniem prognozować ryzyko infekcji grzybowych. Pozwala to na prewencyjne, celowane zastosowanie środków ochrony roślin zamiast oprysków kalendarzowych, redukując zużycie środków ochrony roślin i ich negatywnego wpływu na środowisko. Badania prowadzone przez naukowców (w tym biotechnologów, agrometeorologów i gleboznawców) umożliwiają analizę wydajności różnych odmian roślin w konkretnych warunkach glebowo-klimatycznych na przestrzeni lat. Pozwala to na świadomy dobór odmian najlepiej przystosowanych do lokalnych, zmieniających się warunków, np. bardziej odpornych na wysoką temperaturę czy deficyty wody. Automatyzacja i robotyka, poprzez optymalizację tras przejazdu maszyn, zmniejszają zużycie paliwa i emisję CO_2 . Rolnictwo precyzyjne, promując techniki uprawy bezorkowej lub uproszczonej (wspierane przez precyzyjny siew i zarządzanie resztkami późniejszymi), przyczynia się do sekwestracji węgla w glebie.

Pomimo ogromnego potencjału szeroka implementacja rolnictwa 4.0 napotyka na liczne bariery, z którymi musi zmierzyć się rolnik. Do barier można zaliczyć wysokie koszty inwestycyjne w zakupie nowoczesnych maszyn, sensorów i oprogramowania stanowiącego podstawę nowoczesnego zarządzania gospodarstwem rolnym. Efektywne wykorzystanie zaawansowanych technologii wymaga pozyskania nowych umiejętności cyfrowych i analitycznych, których często brakuje w środowiskach wiejskich. Brak dostępu do szybkiego i stabilnego Internetu na wielu obszarach wiejskich uniemożliwia korzystanie z rozwiązań opartych na chmurze i przesyłaniu danych w czasie rzeczywistym, co jest konieczne do sprawnego zarządzania gospodarstwem. Kolejną barierą może być brak standaryzacji i interoperacyjności. Maszyny i oprogramowanie dostarczane przez różnych producentów często nie są ze sobą kompatybilne, co utrudnia tworzenie zintegrowanych systemów (Puri i in. 2017, Kamilaris i Prenafeta-Boldú 2018).

Perspektywy rozwoju nowoczesnego sektora rolnego są jednak obiecujące. Zwiększona dostępność i spadające ceny sensorów, czujników, rozwój modeli biznesowych opartych na usługach (np. FaaS, ang. *Farming as a Service*), a także programy wsparcia publicznego mogą przyspieszyć wdrażanie tych technologii do gospodarstw rolnych, zwiększając tym samym konkurencyjność. Kluczowa będzie integracja rolnictwa 4.0 z zasadami agroekologii, aby technologia służyła nie tylko optymalizacji, ale także wspieraniu naturalnych procesów w ekosystemie, takich jak poprawa bioróżnorodności i zdrowia gleby.

Patrząc w przyszłość, na horyzoncie innowacji wyłania się już koncepcja **rolnictwa 5.0**, która stanowi kolejny krok po digitalizacji. Wyraźnym znakiem rozpoznawczym, czyli rewolucją pomiędzy rolnictwem 4.0 a rolnictwem 5.0 będzie wykorzystanie generatywnej sztucznej inteligencji do świadomego podejmowania decyzji skupiona na pojedynczych roślinach. Ten nadchodzący paradygmat kładzie jeszcze silniejszy nacisk na zrównoważony rozwój, dobrostan człowieka i pełną synergię z ekosystemem. To właśnie potencjał rolnictwa 5.0 może okazać się kluczowy w adaptacji do najpilniejszych wyzwań klimatycznych, zwłaszcza w kontekście efektywnego zarządzania zasobami wodnymi i zwiększania retencji wody w glebie dla roślin uprawnych. Zatem przyszłość, która nas czeka można zdefiniować jako: rolnictwo 5.0 to rzetelna informacja i świadome jej wykorzystanie przez generatywną sztuczną inteligencję na poziomie pojedynczej rośliny.

Podsumowanie

Historia rolnictwa pokazuje, że innowacje technologiczne zawsze były kluczowym czynnikiem pozwalającym sprostać rosnącym wyzwaniom. Od prostych narzędzi, przez mechanizację i chemię rolną, dotarliśmy do progu czwartej rewolucji rolniczej. Rolnictwo 4.0 oparte na danych, łączności i inteligentnej automatyzacji, oferuje zestaw narzędzi, który może fundamentalnie zmienić sposób, w jaki produkujemy żywność i zwiększyć świadomość konsumenta poprzez jej paszportyzację.

W kontekście zmian klimatu nie jest to już tylko opcja, ale konieczność. Zdolność do precyzyjnego zarządzania zasobami, adaptacji w czasie rzeczywistym i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko czyni z rolnictwa 4.0 główną ścieżkę w kierunku budowy systemów rolnych, które będą jednocześnie produktywne, zrównoważone i odporne na zmiany klimatu, w tym na elementy niosące te zmiany, takie jak zwiększona presja szkodników, patogenów itp. Pokonanie barier wdrożeniowych i zapewnienie sprawiedliwego dostępu do tych technologii będzie jednym z najważniejszych zadań dla naukowców, decydentów i samego sektora rolnego w nadchodzących dekadach.

Literatura

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).: The future of food and agriculture: trends and challenges. Rome: FAO, 2017.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2022.
3. Puri V., Nayyar A., Raja L.: Agriculture drones: A modern era of breakthrough in precision agriculture. Journal of Statistics and Management Systems, 2017, **20(4)**: 507-518; DOI:10.1080/09720510.2017.1395171

-
4. K a m i l a r i s A., Prenafeta-Boldú F.X.: Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, **147**: 70-90; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
 5. P i n g a l i P.L.: Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(31): 12302-12308; DOI:10.1073/pnas.0912953109
 6. S a i z-Rubio V., Rovira-Más F.: From smart farming towards Agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 2020, **10(2)**, 207; DOI:10.3390/agronomy10020207
 7. S c h r i j v e r R., Poppe K.J., Daheim C.: Precision agriculture and the future of farming in Europe Scientific Foresight Study IP/G/STOA/FWC/2013-1/Lot7/SC5. European Parliament, 2016, pp. 42; DOI: 10.2861/020809
 8. Z a m b o n i L., Cecchini M., Egidi G., Saporito M.G., Colantoni A.: Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes MDPI*, 2019, **7(1)**, 36; <https://doi.org/10.3390/pr7010036>
-

Adres do korespondencji:

mgr inż. Tytus Berbeć
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 758
e-mail: tberbec@iung.pulawy.pl

AUTOR

Tytus Berbeć

ORCID

0000-0001-5183-5807

Rafał Wawer

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

**POTENCJAŁ ROLNICTWA 4.0 i 5.0 W ADAPTACJI GOSPODARKI WODNEJ
W ROLNICTWIE DO ZMIANY KLIMATU***

Słowa kluczowe: rolnictwo 4.0 i 5.0, gospodarka wodna, racjonalne gospodarowanie wodą, innowacje technologiczne, zmiany klimatu

Wstęp

W ostatnich latach obserwujemy postępującą zmianę klimatu, która w Polsce objawia się nie tylko wzrostem średniej temperatury i zwiększeniem zmienności warunków termicznych, ale i dużymi zmianami w dystrybucji opadów w ciągu roku (Kozyra i in. 2009).

Zagrożenia dla rolnictwa wynikające ze zmieniającego się klimatu są wielorakie i oddziałują z różną intensywnością w różnych krajobrazach i strefach klimatycznych Polski.

Najbardziej widoczne i niosące duże straty, zwłaszcza lokalnie, są ekstremalne zjawiska pogodowe. Zmiana klimatu zwiększa częstotliwość i intensywność ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak: susze, powodzie, burze czy gradobicia. W Polsce susze rolnicze w latach 2015, 2018 i 2019 znacząco obniżyły plony zbóż, warzyw i roślin pastewnych. Według raportu Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa (IUNG 2018) susza w 2018 r. dotknęła ponad 60% powierzchni upraw w Polsce, powodując straty w plonach rzędu 20–30% w niektórych regionach. Powodzie, takie jak te w 2010 r., niszczą uprawy i infrastrukturę rolną, co dodatkowo obciąża gospodarstwa.

Zmiana klimatu powoduje również zmiany w rozkładzie opadów i dostępności wody. Prowadzi do nierównomiernego rozkładu opadów – okresy intensywnych

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 9.0. pt. „Wsparcie działań MRiRW w obszarze cyfryzacji, innowacji cyfrowych i innowacyjnych technologii w rolnictwie, m in. Internetu rzeczy (IoT), sztucznej inteligencji (AI) i rolnictwa 4.0” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

deszczów przeplatają się z długotrwałymi suszami. W Polsce obserwuje się spadek dostępności wody dla rolnictwa, szczególnie w okresie wegetacji roślin uprawnych, tj. od kwietnia do września. Badania wskazują, że w ciągu ostatnich 30 lat liczba dni z opadami poniżej 1 mm wzrosła w wielu regionach Polski, co ogranicza podaż wody dla upraw (Kundzewicz i in. 2017). Niedobory wody dotyczą szczególnie gleb lekkich, o małej lub średniej retencyjności, których udział w Polsce szacuje się na 63%.

Ze zjawiskami ekstremalnymi i pewną polaryzacją opadów z kumulacją w okresie chłodnym i nawałnymi opadami w lecie obserwujemy nasiloną erozję gleby i degradację zasobów naturalnych. Intensywne opady i susze przyczyniają się do erozji gleby, szczególnie na terenach pagórkowatych, takich jak Wyżyna Lubelska czy Pogórze Karpackie. Według raportu Europejskiej Agencji Środowiska (EEA 2020) zmiana klimatu przyspiesza degradację gleb w Europie Środkowej, co zmniejsza ich zdolność do magazynowania wody i składników odżywczych. W Polsce problem ten dotyczy szczególnie gleb piaszczystych, które tracą próchnicę w wyniku susz.

Nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym ocieplającemu się globalnie klimatowi jest wzrost temperatury i jego wpływ na wegetację. Średnia temperatura w Polsce wzrosła o ok. 1,7°C od lat 50. XX w., co wpływa na długość sezonu wegetacyjnego, ale także na ryzyko stresu cieplnego dla roślin. Wyższe temperatury mogą przyspieszyć rozwój niektórych upraw (np. kukurydzy), ale jednocześnie zwiększają ryzyko uszkodzenia roślin przez fale upałów. Badania wskazują, że wzrost temperatury o 1°C może obniżyć plony pszenicy o 5–10% w warunkach braku odpowiedniego nawadniania (Asseng i in. 2015). Ponadto wcześniejsze kwitnienie roślin zwiększa ryzyko uszkodzeń przez wiosenne przymrozki.

Przesuwanie się granic stref klimatycznych, odpowiadających często zasięgom występowania siedlisk przyrodniczych oraz gatunków roślin i zwierząt, powoduje rozprzestrzenianie się szkodników i chorób. Ciepleszy klimat sprzyja rozwojowi nowych gatunków szkodników i patogenów. W Polsce odnotowano pojawienie się gatunków inwazyjnych, takich jak omacnica prosowianka, która wcześniej występowała tylko w cieplejszych regionach (Bereś 2015). Wzrost temperatury sprzyja także rozwojowi chorób grzybowych, takich jak rdza czy fuzarioza, co zwiększa zapotrzebowanie na środki ochrony roślin i podnosi koszty produkcji.

Oprócz negatywnego wpływu na produkcję roślinną i jakość gleby zmiana klimatu wpływa także na sektor hodowlany. Wysoka temperatura powoduje stres cieplny u zwierząt, co obniża ich produktywność (np. wydajność mleczną krów o 10–20% w okresach upałów) oraz zwiększa ryzyko chorób (Nardone i in. 2010). Niedobory pasz wynikające z susz rolniczych dodatkowo podnoszą koszty produkcji.

Ekonomiczne i społeczne konsekwencje ocieplenia klimatu to przede wszystkim zwiększenie niepewności ekonomicznej rolników. Straty w plonach i wzrost kosztów produkcji (np. na ochronę roślin) mogą obniżyć rentowność gospodarstw. Raport Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi (2021) wskazuje, że małe i średnie gospodarstwa

w Polsce są szczególnie narażone na skutki zmiany klimatu z powodu ograniczonych zasobów finansowych na adaptację.

Strategie adaptacyjne skupiają się przede wszystkim na:

- wprowadzeniu odmian roślin odpornych na suszę i wysoką temperaturę;
- rozwoju systemów nawadniania i retencji wody;
- dywersyfikacji upraw w celu zmniejszenia ryzyka strat;
- stosowaniu praktyk rolnictwa regeneracyjnego, które poprawiają jakość gleby.

Listę tę należałoby uzupełnić o stosowanie technologii rolnictwa precyzyjnego (rolnictwo 3.0) (Zhu 2011), inteligentnego (rolnictwo 4.0) (Kordowska i in. 2023) i autonomicznego (rolnictwo 5.0), przyjmując ten uproszczony podział semantyczny uwzględniający ewolucję technologii cyfrowych opierających się na zasadzie wprowadzonej przez rolnictwo precyzyjne – środki produkcji w ilości tylko tyle ile trzeba, gdzie trzeba i kiedy trzeba (Wawer 2023). Według Mesías-Ruiz i in. (2023) w kontekście społeczeństwa 5.0 określają rolnictwo 5.0 jako: „ewolucja w kierunku wysoce zautomatyzowanego i inteligentnego rolnictwa, które integruje technologie, takie jak sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe, big data i IoT, aby zwiększyć precyzję ochrony upraw, poprawić efektywność i zapewnić zrównoważony rozwój. Kluczowym elementem jest optymalizacja procesów, takich jak wykrywanie szkodników czy zarządzanie nawadnianiem, przy użyciu zaawansowanych algorytmów i urządzeń brzegowych”.

Technologie rolnictwa 4.0 i 5.0

Rozwiązania rolnictwa 5.0 można podzielić pod względem funkcjonalnym na kilka grup, analogicznie do rolnictwa 4.0, idąc za listą sporządzoną przez autora na użytek Rozporządzenia MRiRW z dnia 17.07.2023 w sprawie szczegółowego przeznaczenia, warunków i trybu udzielania wsparcia w zakresie rolnictwa 4.0 w ramach Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności (Dz.U. z 2023 r. poz. 1389):

1. Czujniki i sensory przetwarzające wielkość mierzoną (wilgotność powietrzna lub gleby, temperaturę, ciśnienie, lokalizację GPS itd.) na sygnał elektryczny, który może być przesyłany i odczytywany przez urządzenia, które na podstawie pomiaru dają bezpośrednio informacje rolnikowi (np. jaka jest wilgotność lub ile trzeba wody do nawodnienia) albo automatycznie ustawia urządzenia – np. dawkovanie wody, czy nawozów. Dane z czujników mogą być też wysyłane do systemu zarządzania gospodarstwem i ten daje informację rolnikowi lub steruje automatycznie urządzeniami:
 - a. Czujniki meteorologiczne: wilgotność i temperatura powietrzna, ciśnienie atmosferyczne, kierunek i prędkość wiatru, usłonecznienie. Są to, m.in.: automatyczne stacje pogodowe z transmisją GPRS, LoRaWAN lub inną; zdalne czujniki wilgotności i temperatury powietrza z transmisją radiową krótkiego

zasięgu (np. sieci WSN zbudowane na protokole ZigBee), dalekiego zasięgu LoRaWAN lub do sieci GSM via GPRS. Dane z tych czujników są używane w praktyce do:

- określania parowania wody z gleby i roślin (ewapotranspiracja ET0), aby ustalić odpowiednią dawkę nawodnienia dziennego (niedoskonała metoda);
 - określania optymalnych terminów zabiegów ochrony roślin – wilgotność i prędkość wiatru;
 - ostrzegania o przymrozkach.
- b. Czujniki wilgotności gleby: najczęściej spotykane czujniki do pomiaru wilgotności gleby to czujniki mierzące stałą dielektryczną typu FDT oraz wakuometry mierzące ciśnienie ssące gleby, które jest ściśle związane z niedoborem wody. Niestety ze względu na to, że każdy gatunek gleby ma swoją charakterystykę, samego pomiaru FDR nie można przekształcić na obliczenie braków wody w glebie – do tego potrzebna jest informacja o gatunku gleby. Sensory podciśnieniowe (wakuometry, tensometry) mierzą bezpośrednio niedobory wody, ale są niestety podatne na rozszczelnienie. Przykłady: pojemnościowe FDR lub TDR z komunikacją radiową; tensometry cyfrowe z komunikacją radiową; czujniki opornościowe – tanie, ale ich dokładność zależy od pH, dlatego nie zaleca się ich stosowania w nawadnianiu precyzyjnym.
- c. Czujniki lokalizacji: przeważnie w formie modułów GPS. Dane o lokalizacji stosowane są we wspieraniu ruchu maszyn kierowanych przez człowieka po ścieżkach, w autonomicznych maszynach poruszających się po ścieżkach, w rolnictwie precyzyjnym – dawkovanie nawozu lub wody na podstawie mapy zasobności pola. Stosowane są również do lokalizacji zwierząt w stadzie. Służą do zarządzania flotą maszyn w dużych gospodarstwach oraz spółdzielniach, gdzie maszyny są współdzielone. Przykłady: czujniki oparte na GPS lub GPS ze wspomaganie RTK/RTN, umożliwiające przejazd nadzorowany po ścieżkach (asysta dla operatora traktora); systemy autonomicznego sterowania pojazdem po zadanych ścieżkach na podstawie GPS/RTK.
- d. Czujniki umieszczone na ciele zwierząt hodowlanych: lokalizacja, temperatura, biosensory wykrywające nieprawidłowości w składzie krwi (przeciwciała);
- e. Czujniki jakości wody: proste niespecyficzne: przewodność elektryczna (świadczy o zawartości jonów: nawozy, zasolenie), mętność; elektrodowe specyficzne zawartość tlenu rozpuszczonego, azotany, pH itd. Sensory elektrodowe specyficzne wymagają niestety okresowej kalibracji w roztworach wzorcowych.
- f. Biosensory – czujniki z elementem czułym na materiał biologiczny: przeciwciała, enzymy, hormony itd. Przykładem mogą tu być czujniki chorób ryb w hodowlach morskich; czujniki wykrywające antygeny wybranych patogenów w hodowlach akwakulturowych; czujniki wykrywające antygeny patogenów w intensywnym chowie zwierząt; czujniki wykrywające zarodniki patogenów roślin uprawnych oraz feromony szkodników.

- g. Czujniki optyczne – czujniki oparte na matrycach fotoczułych w różnych zakresach częstotliwości światła: widzialne, podczerwień, promieniowanie termalne itd. Zastosowanie od teledetekcji po wykrywanie zwierząt z gorączką w hodowlach zamkniętych. Teledetekcja: od satelitów przez drony po skanery powierzchniowe do gleby (przyziemne, dotykowe). Wyposażone w sztuczną inteligencję mogą służyć do wykrywania obecności i identyfikacji obiektów, np. drapieżników, złodzieja itd.
Przykłady: czujniki nadziemne NDVI połączone w sieć WSN (beprzewodową sieć czujników); czujniki termalne wykrywające zwierzęta z gorączką w hodowlach zamkniętych; czujniki do identyfikacji i wykrywania chorób i szkodników; kamery multispektralne do dronów rozpoznawczych, umożliwiające monitoring stanu pól.
 - h. Czujniki operacyjne do maszyn – najczęściej zintegrowane w systemie obsługi maszyny. W starszych maszynach można dokupić czujniki do: pomiaru zużycia paliwa, lokalizacji, parametrów pracy, mapowania plonu, mapowania właściwości gleby (np. pomiar EC na bronie), mapowania rozsiewu/rozrzutu/oprysku itd.
Przykłady: czujki umożliwiające cyfryzację parku maszynowego wyposażone w komunikację zdalną lub przewodową ModBus; pomiar zużycia paliwa; czujnik NDVI wraz z systemem sterującym rozsiewaczem VRA (zmiennodawkującym).
2. Systemy wspierania decyzji; systemy komputerowe, stacjonarne lub on-line, które na podstawie pomiarów różnych parametrów wykonywanych za pomocą czujników lub importowanych z baz danych w Internecie, dają rolnikowi informację niezbędną do podejmowania decyzji, co do stosowania praktyk i zabiegów. Systemy te mogą również wykonywać automatycznie zadania, np. kontrolę nawadniania. Do automatyzacji potrzebne są elementy wykonawcze, np. zawory. Systemy DSS w produkcji roślinnej na poziomie pola można podzielić pod względem realizowanych funkcji:
- a. Wspieranie nawadniania: systemy DSS wspomagają rolnika, dając informację kiedy i ile nawadniać, aby otrzymać: maksymalny plon, maksymalny zysk lub uratować plantację przed suszą przy niedoborach wody. Zakres i cel DSS zależą od producenta. Przykłady: systemy wyposażone w beprzewodową sieć czujników wilgotności gleby WSN, podające bieżącą wilgotność, bieżący stres wodny, prognozę opadu, dawkę nawodnienia dopasowaną do rośliny i gleby. Opcjonalnie wyposażone w sterowanie zaworami – bądź automatyczne bądź nadzorowane. Aby ten system mógł pracować, należy wykonać strefowanie pól pod względem glebowym.
 - b. Wspieranie nawożenia: system działa w różnych zakresach czasowych; długoterminowo – system opracowuje plan nawożenia wraz z planem jego wykonania w optymalnych terminach i dawkach, bazując na mapie zasobności gleby i informacji o wymogach rośliny uprawnej oraz danych z czujników;

- krótkoterminowo – system na podstawie zdjęć satelitarnych lub lotniczych wylicza wskaźniki wigoru (NDVI lub inny) i zaleca dawki nawożenia na bieżąco;
 - w czasie rzeczywistym (NRT) – system dobiera dawkowanie w rozsiewaczu lub opryskiwaczu na podstawie czujnika NDVI zamontowanego z przodu zestawu roboczego, sterując dawkowaniem nawozu wg odczytów z czujnika. Przykłady: systemy bazujące na analizie gleby (zasobność), strefowaniu (teledetekcja satelitarna lub lotnicza, poparta badaniami gleb) oraz danych o potrzebach pokarmowych odmian roślin uprawnych. Monitoring bieżący NDVI i innych parametrów uprawy pozwala na optymalny dobór terminów by zminimalizować straty
- c. Wspieranie ochrony roślin: systemy te można podzielić na prewencyjne lub doraźne. Systemy prewencyjne korzystają z bazy danych chorób, zawierających charakterystyki patogenów, środki aktywne, optymalne terminy, w tym interpretację danych meteo itd. Systemy doraźne posiadają zaawansowane narzędzia rozpoznawania obrazu i identyfikacji chorób/szkodników. Identyfikują zagrożenia i mogą sterować aplikacją środków aktywnych, dobierając dawki do potrzeb i ograniczając zabiegi do niezbędnego minimum. Najnowsze systemy wykorzystują roboty do mechanicznego usuwania chwastów lub szkodników.
3. Systemy zarządzania gospodarstwem – są to systemy przeznaczone do kompleksowego zarządzania w gospodarstwie (FMS). Zawierają najczęściej moduły: magazynowe do nawozów i ŚOR; inwentaryzacji i rejestracji czasu pracy maszyn; mapowe do kartowania pól; rolnictwa precyzyjnego obsługujące tworzenie map zawartości składników odżywczych czy stref nawodnieniowych, czasu pracy i zadaniowanie pracowników, czujniki systemu wspierania decyzji; zarządzanie aktuatorami (urządzenia wykonawcze np. zawory do wody czy fertygacji, siłowniki zastawek, przenośniki taśmowe itd.). Mogą też zawierać moduły automatycznego przygotowywania raportów: ślad węglowy, ślad wodny, paszport żywnościowy, zużycie wody na tonę plonu itd. Systemy zarządzania gospodarstwem mogą też być wyposażone w moduły analizy danych z gospodarstwa, np. pracochłonności i kosztu zabiegów. Moduły te ułatwiają efektywne doradztwo i podejmowanie decyzji, aby polepszyć ekonomikę produkcji, czy dobrać właściwie inwestycje w maszyny i budynki. Najbardziej zaawansowane systemy umożliwiają programowanie urządzeń autonomicznych – od systemów nawodnień po roboty polowe. Przykłady narzędzi dostępnych na rynku: eAgronom, Agrivi, Farm360, FarmCloud.
4. Roboty i coboty – urządzenia sterowane zdalnie lub całkowicie autonomiczne, realizujące zadania po zaprogramowaniu przez użytkownika lub odpowiednio skonfigurowany system DSS lub FMS. Na świecie najczęściej spotykane roboty to maszyny do autonomicznej uprawy (traktory z zestawami uprawowymi sterowane za pomocą GPS i bezprzewodowej komunikacji z systemem sterującym/

programatorem), siewu i opryskiwania (samobieżne zestawy z lub bez traktora), roboty do ochrony roślin – automatyczne wykrywanie chwastów lub szkodników i mechaniczna (cięcie lub wypalenie) ich eliminacja lub usunięcie porażonych roślin. Inną gałęzią robotyki rolniczej są maszyny robotyczne do zbioru owoców, samodzielnie rozpoznające stadium dojrzałości owoców na roślinie i wybiórczo zbierających tylko te o odpowiedniej dojrzałości. Przykłady: ROBOTTI do siewu i rozsiewania; CASE IH, JD 8R – ciągniki autonomiczne; Dino do odchwaszczania upraw warzywniczych.

5. Inne technologie:

- a. Zdalne systemy wykonawcze – systemy wykonujące pracę, sterowane przez operatora lub automatycznie przez DSS lub FMS. Przykładem mogą tu być zawory w nawodnieniach, zastawki na sieci melioracyjnej sterowanej na podstawie pomiaru wilgotności pól, działka soniczne do rozpędzania chmur, wiatraki przeciwmrozowe, zamgławiacze itd.
- b. Drony rozpoznawcze – drony wyposażone w kamery specjalistyczne stosowane do: mapowania wigoru roślin, co daje informacje o stanie łanu/plantacji i lokalizacji, gdzie występują niedobory wody lub składników; wykrywania ognisk chorób lub ekspansji szkodników czy szkód łowieckich.
- c. Drony wykonawcze – drony realizujące aplikację środków czynnych lub nawozów według zasad rolnictwa precyzyjnego, tj. tylko tam, gdzie trzeba i tylko tyle, ile niezbędne. Mogą one operować autonomicznie na podstawie map utworzonych np. przez drony obserwacyjne lub bezpośrednio na podstawie obserwacji własnej. Są to drony do precyzyjnej aplikacji pestycydów.
- d. Systemy ulepszające starsze rozwiązania – systemy umożliwiające zastosowanie najnowszych technologii na starszych maszynach. Dobrym przykładem są tu sterowniki GPS do traktorów, sterowniki zaworów itd.

Podsumowując, rolnictwo 4.0, znane również jako rolnictwo precyzyjne lub cyfrowe, stanowi nowoczesny paradygmat oparty na integracji zaawansowanych technologii, takich jak internet rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI), big data, drony, robotyka, teledetekcja satelitarna oraz systemy GIS (ang. *Geographic Information Systems*). Technologie te umożliwiają rolnikom zbieranie i analizę danych w czasie rzeczywistym, co pozwala na optymalizację zasobów, zwiększenie efektywności produkcji oraz budowanie odporności na skutki zmiany klimatu.

W Polsce, gdzie zmiany klimatu manifestują się poprzez coraz częstsze susze, fale upałów, pojawianie się nowych szkodników oraz anomalie pogodowe zaburzające dotychczasowe terminarze zabiegów nawożenia, technologie rolnictwa 4.0 oferują konkretne rozwiązania adaptacyjne. Obejmują one minimalizację strat, promocję zrównoważonego rozwoju, redukcję emisji gazów cieplarnianych i poprawę bezpieczeństwa żywnościowego (Islam i Karim 2023).

Technologie cyfrowe jako narzędzie do adaptacji rolnictwa do zmiany klimatu

Rolnictwo jest sektorem szczególnie wrażliwym na zmiany klimatu, ale ma potencjał do łagodzenia ich skutków poprzez wdrożenie cyfrowych innowacji. Precyzyjne rolnictwo może zmniejszyć zużycie wody o 20–50%, pestycydów o 30–50% oraz nawozów o 15–25%, co bezpośrednio wspiera adaptację do ekstremalnych warunków pogodowych (Tembhurne i in. 2025). Poniżej przedstawiono szczegółowy opis możliwości zastosowania tych technologii w adaptacji do kluczowych wyzwań klimatycznych w Polsce, z odniesieniami do literatury naukowej.

1. Adaptacja do susz – susze rolnicze, które w Polsce w latach 2015–2020 spowodowały straty w plonach rzędu 20–40% (IUNG 2018), są jednym z głównych zagrożeń wynikających ze zmiany klimatu. Technologie rolnictwa 4.0 umożliwiają precyzyjne zarządzanie zasobami wodnymi, co jest kluczowe dla minimalizacji skutków niedoborów wody.
 - a. Systemy nawadniania oparte na IoT i czujnikach: czujniki glebowe i meteorologiczne IoT monitorują wilgotność gleby, temperaturę i opady w czasie rzeczywistym, umożliwiając automatyczne dostosowanie nawadniania. Systemy nawadniania kropłowego zintegrowane z AI mogą zmniejszyć zużycie wody o 30–60% w uprawach intensywnych, takich jak warzywa czy kukurydza, co jest szczególnie istotne w centralnej Polsce, gdzie gleby lekkie są podatne na susze (Chukwu 2023). Badania IUNG-PIB w ramach projektu ENORASIS wskazały na możliwość osiągnięcia redukcji zużycia wody o 65% w ziemniaku w porównaniu z nawadnianiem opartym na maksymalnym parowaniu terenowym w uprawie ziemniaka i/aż 10-krotne zmniejszenie zużycia wody na plantacji maliny wczesnej w porównaniu ze standardowo stosowaną przez rolników strategią nawadniania do pełnej pojemności wodnej gleby (Wawer 2023). Na Cyprze system IoT4Potato, wykorzystujący czujniki gajatrone, zoptymalizował nawadnianie, redukując zapotrzebowanie na wodę o 22% (Adamides i in. 2020).
 - b. Teledetekcja i drony – drony wyposażone w kamery multispektralne oraz satelity, takie jak Sentinel-1 i Sentinel-2, dostarczają danych o wskaźnikach NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*), co pozwala na identyfikację obszarów dotkniętych suszą i precyzyjne nawadnianie. Badania wskazują, że te technologie zwiększają efektywność wodną o 20–40%, minimalizując straty plonów w okresach suchych (Adamides i in. 2020). GIS i remote sensing wspierają mapowanie wilgotności gleby, co ułatwia prognozowanie susz i adaptację upraw w Polsce (Grigorieva i in. 2023).
 - c. Modele predykcyjne AI – sztuczna inteligencja analizuje dane historyczne i pogodowe, przewidując ryzyko suszy i optymalizując harmonogramy nawadniania. W Korei Południowej model smart farm RDA integruje AI z IoT, poprawiając odporność na susze poprzez precyzyjne zarządzanie wodą (Jang i in. 2024). Te rozwiązania promują również zrównoważone praktyki, takie

jak alternate wetting and drying, które zmniejszają zużycie wody o 30–60% (Chukwu 2023).

2. Adaptacja do fal upałów – fale upałów, które w Polsce stają się coraz częstsze w wyniku wzrostu średniej temperatury o 1,7°C od lat 50. XX wieku (Kundzewicz i in. 2017), powodują stres cieplny u roślin i zwierząt, obniżając plony o 10–20% i produktywność hodowli. Rolnictwo 4.0 oferuje narzędzia do monitorowania i łagodzenia tych efektów.
 - a. Monitorowanie mikroklimatu z IoT – czujniki IoT w szklarniach i na polach mierzą temperaturę, wilgotność i nasłonecznienie, umożliwiając automatyczne sterowanie systemami chłodzącymi lub zacieniającymi. W zamkniętych systemach, takich jak hydroponika czy farmy wertykalne, technologie te redukują zużycie wody o 50% i minimalizują stres cieplny (Grigorieva i in. 2023). GIS i uczenie maszynowe wspierają ocenę przydatności gruntów pod uprawy odporne na wysokie temperatury, co jest szczególnie istotne w regionach południowej Polski (Chukwu 2023).
 - b. Selekcja odmian odpornych z AI – algorytmy AI analizują dane genetyczne i klimatyczne, wspierając hodowlę odmian odpornych na upały (heat-tolerant varieties). W Japonii i Afryce Południowej cyfrowe narzędzia pomagają w wyborze odmian o niższych wymaganiach chłodu, co jest adaptacją do fal upałów (Teklu i in. 2023). W hodowli zwierząt czujniki IoT monitorują stres cieplny u bydła, dostosowując systemy chłodzenia i poprawiając wydajność mleczną o 15–20% (Chukwu 2023).
3. Adaptacja do nowych szkodników – zmiana klimatu sprzyja rozprzestrzenianiu się w Polsce nowych szkodników, takich jak omacnica prosowianka (Bereś 2015). Technologie rolnictwa 4.0 umożliwiają wczesne ich wykrywanie i precyzyjne zwalczanie, minimalizując wpływ na środowisko.

Drony i teledetekcja do monitoringu:

 - a. Drony z kamerami multispektralnymi i termowizyjnymi wykrywają stres roślinny wywołany przez szkodniki na wczesnym etapie. Na Cyprze dane z satelitów Sentinel-2 wspierają prognozowanie chorób, takich jak *Phytophthora infestans*, co pozwala na szybką reakcję (Adamides i in. 2020). Technologie te redukują użycie pestycydów o 30–50% poprzez precyzyjne aplikowanie środków ochrony roślin (ang. *targeted application*) (Tembhurne i in. 2025).
 - b. AI w ochronie roślin – uczenie maszynowe analizuje obrazy z dronów i dane środowiskowe, przewidując infestacje szkodników. W Chinach prognozy pest outbreak oparte na AI informują rolników w czasie rzeczywistym, zwiększając skuteczność ochrony roślin o 90% w porównaniu z tradycyjnymi metodami (Teklu i in. 2023). Autonomiczne roboty do mechanicznego zwalczania

- szkodników, takich jak chwasty, minimalizują użycie chemikaliów, promując zrównoważone praktyki (Chukwu 2023).
- c. Integrated Pest Management (IPM) z IoT – systemy IoT integrują dane pogodowe i biologiczne, wspierając IPM. Przykłady z Nepalu pokazują, że cyfrowe narzędzia zwiększają odporność na szkodniki poprzez hodowlę odmian odpornych (ang. *resistant varieties*) (Teklu i in. 2023). Korzyści obejmują niższe koszty i mniejszy wpływ na środowisko (Jang i in. 2024).
4. Adaptacja do zmiennych terminów nawożenia – zmienne warunki klimatyczne, takie jak nieregularne opady i zmiany temperatury, wpływają na zmiany terminów nawożenia, zwiększając ryzyko strat składników odżywczych. Rolnictwo 4.0 oferuje rozwiązania do precyzyjnego zarządzania nawożeniem.
- a. Variable Rate Technology (VRT): systemy VRT oparte na GPS i GIS umożliwiają zmienne dawki nawozów w zależności od warunków glebowych i potrzeb roślin. Narzędzia takie jak Nutrient Expert zwiększają efektywność azotu o 10–15% (Chukwu 2023). W Szkocji cyfrowe monitorowanie gleby optymalizuje nawożenie w warunkach zmiennej pogody, co jest istotne również dla Polski, gdzie opady są coraz bardziej nieprzewidywalne (Teklu i in. 2023).
 - b. Czujniki – czujniki liściowe (np. *Leaf Color Chart*) i teledetekcja mierzą potrzeby roślin w składniki odżywcze, umożliwiając precyzyjne terminy nawożenia. W Grecji zwiększone nawożenie azotowe jest dostosowywane cyfrowo do warunków suszy, co minimalizuje straty składników odżywczych (Teklu i in. 2023). Fertygacja ze wsparciem IoT redukuje odpływ nawozów, obniżając emisje N_2O o 5–35% (Zhang i in. 2025).
 - c. Predykcja AI – algorytmy AI analizują dane pogodowe i glebowe, optymalizując harmonogramy nawożenia. W Rosji platformy cyfrowe wspierają redukcję syntetycznych nawozów, zwiększając efektywność wykorzystania azotu (NUE) o 30–50% (Teklu i in. 2023).

Rolnictwo 4.0 integruje powyższe technologie w kompleksowe platformy zarządzania, takie jak *gaiasense* na Cyprze czy koreański model *smart farm*, które zwiększają odporność gospodarstw na zmiany klimatu (Jang i in. 2024). W Polsce systemy zarządzania gospodarstwem FMS, takie jak: *eAgronom*, *Farm360* czy *FarmCloud*; również umożliwiają agregację danych i generowanie informacji niezbędnych do podejmowania decyzji w warunkach zmieniającego się klimatu. Korzyści ekologiczne obejmują redukcję emisji CO_2 o 10–20%, poprawę żyzności gleby oraz zwiększenie dochodów rolników dzięki optymalizacji zasobów (Islam i Karim 2023). W Polsce programy takie jak Strategia zrównoważonego rozwoju wsi, rolnictwa i rybactwa 2030 promują cyfryzację, wspierając wdrożenie technologii rolnictwa 4.0 (Kordowska i in. 2023). Strategia Europejskiego Zielonego Ładu i jej mechanizm

„od pola do stołu” polegający de facto na paszportyzacji żywności może być oparty w całości na cyfrowych narzędziach współpracujących z systemami doradczymi na polu, w transporcie oraz przetwórstwie.

Wyzwania i ograniczenia

Wdrożenie rolnictwa 4.0 w Polsce napotyka bariery, takie jak wysokie koszty technologii, brak kompetencji cyfrowych wśród rolników oraz ograniczone finansowanie badań i rozwoju (B+R). Małe i średnie gospodarstwa, dominujące w Polsce, borykają się z trudnościami finansowymi przy inwestycjach w technologie precyzyjne (Kordowska i in. 2023). Dodatkowo starsi rolnicy mogą mieć trudności z adaptacją do nowych technologii z powodu braku wykształcenia cyfrowego (Saiz-Rubio i Rovira-Más 2020, Kordowska i in. 2023).

Przyszłość rolnictwa 4.0 w Polsce zależy od wsparcia finansowego i edukacyjnego. Rozbudowany system państwowego doradztwa rolniczego ma teoretycznie duży potencjał w szerokim propagowaniu technologii cyfrowych, jednak jest on przeciążony doradztwem niezwiązanym bezpośrednio z technologią. Doradztwo współpracuje ściśle z instytucjami badawczo-rozwojowymi podległymi MRiRW, które opracowują bezpieczne i wydajne technologie oraz wdrożenia, co obniża ryzyko dla samych rolników. Kaskadowy system testowania i wdrażania innowacji w rolnictwie od instytucji naukowych przez doradców do rolników, sprawdzał się przez dekady. W obecnym czasie dostęp do najnowszych technologii jest utrudniony dla instytucji badawczych, ze względu na koszty samych innowacji, jak i konieczność zatrudniania wysokiej klasy specjalistów w zakresie automatyzacji i informatyki, dla których warunki zatrudnienia w instytutach nie są wystarczająco atrakcyjne. Powoduje to istotną lukę w wiedzy. Pojawiające się innowacje nie są testowane w warunkach eksperymentalnych, co uniemożliwia ich obiektywną ocenę i przydatność dla rolnictwa w warunkach polskich. Wojewódzkie ODR-y na własną rękę starają się o urządzenia rolnictwa 4.0, ale testy i doświadczenia prowadzone są w niewystarczającym zakresie, nierzadko jako doświadczenie demonstracyjne, a nie ścisłe. W efekcie rolnik jako użytkownik końcowy często zdany jest wyłącznie na materiały reklamowe producenta bądź opinię przedstawiciela handlowego. Powoduje to obiektywnie wzrost ryzyka inwestycyjnego dla rolników. Nietrafione inwestycje są ukazywane w mediach społecznościowych jako przykład wątpliwej użyteczności technologii cyfrowych, opóźniając ich adaptację i upowszechnienie tych, które mają potencjał zwiększenia konkurencyjności polskiej produkcji rolniczej.

Raport NCBR dotyczący wdrażania technologii rolnictwa 4.0 (Kordowska i in. 2023) wskazuje na programy unijne, takie jak Plan Strategiczny dla Wspólnej Polityki Rolnej 2023–2027 oraz krajowe inicjatywy promujące cyfryzację i adaptację do zmian klimatu jako istotne mechanizmy instytucjonalne rozwoju tych technologii

w Polsce i UE. Polskie instytucje naukowe oraz firmy biorą udział w wielu projektach badawczo-rozwojowych. Powstają startup'y, finansowane są innowacje. Efekt tych działań jest jednak wciąż zbyt mało widoczny w przysłowiowym polu, szczególnie z logo polskiej firmy. Aby zmienić ten stan rzeczy, rekomendacje zawarte w raporcie obejmują: zwiększenie finansowania na B+R w sektorze rolnym, tworzenie farm demonstracyjnych pokazujących korzyści technologii rolnictwa 4.0 oraz szkolenia dla rolników w zakresie kompetencji cyfrowych, aby zwiększyć adaptację technologii.

Literatura

1. Adamides G., Kalatzis N., Adamides A., Marianos N., Chatzipapadopoulos F., Giannakopoulou, M., Papadavid G., Vassiliou V., Neocleous D.: Smart Farming Techniques for Climate Change Adaptation in Cyprus. *Atmosphere*, 2020, **11**, 557; <https://doi.org/10.3390/atmos11060557>
2. Asseng S. i in.: Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 2015, **5**(2): 143-147.
3. Beres P.: Omacnica prosowianka – nowe zagrożenie dla upraw kukurydzy w Polsce. *Progress in Plant Protection*, 2015, **55**(3): 231-238.
4. Chukwu O.: Adaption of smart applications in agriculture to enhance production. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2023, **12**: 36-44; DOI: 10.1016/j.aiia.2024.02.003
5. EEA 2020. Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe. European Environment Agency Report; <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-adaptation-in-the-agriculture>
6. Grigorieva E., Loubimtseva E., Urazmetova A.: Adaptation of Agriculture to Climate Change: A Scoping Review. *Climate*, 2023, **11**(10), 202; DOI: 10.3390/cli11100202
7. Islam M.A., Karim M.A.: The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability*, 2023, **15**(6), 5325; DOI: 10.3390/su15065325
8. IUNG 2018. Raport o stanie suszy rolniczej w Polsce 2018. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach; <http://www.iung.pl>
9. Jang S.S., Lee J.Y., Kim H.S.: Effects of changes in climatic means, variability, and agro-technologies. *ScienceDirect*, 2024; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192324001234>
10. Kordowska M., Baranowski M., Pisarek J., Wawer R., Czech T.: Rolnictwo 4.0. Identyfikacja trendów technologicznych, NCBR, 2023, ss. 91; <https://www.gov.pl/web/ncbr/rolnictwo-40-identyfikacja-trendow-technologicznych>
11. Kozyra J., Doroszewski A., Nieróbca A.: Zmiany klimatyczne i ich przewidywany wpływ na rolnictwo w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2009, **24**: 243-258
12. Kundzewicz Z.W., Pińskwar I., Brakenridge G.R.: Climate change impacts on water resources in Poland. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, **62**(10): 1611-1624. Dostęp: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667.2017.1368469>
13. Mesa-Ruiz G.A., Pérez-Ortiz M., Dorado J., de Castro A.I., Peña J.M.: Boosting precision crop protection towards agriculture 5.0 via machine learning and emerging technologies: A contextual review. *Frontiers in Plant Science*, 2023, **14**, 1144512.
14. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi (2021). Strategia zrównoważonego rozwoju wsi, rolnictwa i rybactwa 2030.
15. Nardone A. et al.: Effects of climate change on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 2010, **130**(1-3): 57-69.

16. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 17.07.2023 r. w sprawie szczegółowego przeznaczenia, warunków i trybu udzielania wsparcia w zakresie rolnictwa 4.0 w ramach Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności (Dz.U. z 2023 r. poz. 1389).
17. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F.: From smart farming towards Agriculture 5.0: A review on crop data management. *MDPI Agronomy*, 2020, **10(2)**, 207; <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/20>
18. Teklu M.G., Kiflu A., Tigabu E.A.: Effect of climate smart agriculture innovations on climate resilience among smallholder farmers: Empirical evidence from South-Eastern Ethiopia. *Sustainability*, 2023, **15(5)**, 4331; DOI: 10.3390/su15054331
19. Temburne J.V. et al.: Deep learning-based classification, detection, and segmentation of tomato plant diseases. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2025, **12**: 131-149; DOI: 10.1016/j.aiia.2024.03.005
20. Wawer R.: Rolnictwo 4.0. Precyzyjne nawadnianie. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2023, **71**: 177-197; <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2023.71.09>
21. Wawer R., Kolasieńska K., (red): Kodeks dobrych praktyk wodnych w rolnictwie. Wyd. MRiRW., 2021, ss. 216; <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/kodeks-dobrych-praktyk-wodnych-w-rolnictwie>
22. Zhang X., Zhang Y., Li J.: Enhancing precision agriculture for climate change mitigation. *MDPI Agriculture*, 2025, **15(3)**, 412; <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/3/412>
23. Zhu X.: Technologies for climate change adaptation – Agriculture Sector. ResearchGate, 2011, pp. 218; <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/1026421>

Adres do korespondencji:

dr hab. Rafał Wawer, prof. IUNG-PIB
Zakład Gleboznawstwa i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 773
e-mail: Rafał.Wawer@iung.pulawy.pl

AUTOR
Rafał Wawer

ORCID
0000-0001-9266-9577

Anna Jędrejek

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

SATELITARNE SYSTEMY OBSERWACJI ZIEMI W SŁUŻBIE ROLNICTWA 4.0*

Słowa kluczowe: dane satelitarne, zdalny monitoring przestrzeni rolniczej, sensory, e-rolnictwo, Sentinel

Wstęp

Źródłem obserwacji kosmicznych są satelity znajdujące się na okołoziemskiej orbicie, które wyposażone są w sensory różnego typu. Dostarczają one informacji, które wykorzystywane są do monitoringu powierzchni i atmosfery Ziemi, z różną rozdzielczością przestrzenną i czasową. Satelity umożliwiają również nawigację poprzez określanie lokalizacji obiektów.

Pierwszym cywilnym sztucznym satelitą zaprojektowanym w celu dostarczania informacji o pokryciu Ziemi był Landsat-1, który został wyniesiony na orbitę w lipcu 1972 r. Wyposażony był w dwa sensory: RBV (ang. *Return Beam Vidicon*) oraz MSS (ang. *Multi-Spectral Scanner*) i dostarczał zdjęć z rozdzielczością odpowiednio: 80 m i 60 m. Za jego pomocą udało się zmapować ok. 75% powierzchni Ziemi (USGS 2023). Zobrazowania te znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, m.in.: rolnictwie, leśnictwie, geologii, hydrologii, geografii, kartografii, oceanografii i meteorologii. Satelita Landsat-1 zapoczątkowała amerykański program cywilnych misji kosmicznych Landsat, który prowadzony jest przez Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) we współpracy z amerykańską agencją naukowo-badawczą United States Geological Survey (USGS). Na przestrzeni ok. 50 lat funkcjonowania programu konstelacja Landsat składała się z 8 satelitów (Landsat Satellites 2024). Dzięki ciągłemu postępowi technicznemu możliwe jest budowanie urządzeń cechujących się zarówno większą precyzją (wyższą rozdziel-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

czością fotografowania), jak i większą szybkością przesyłania danych. Dlatego wraz z każdym kolejnym satelitą parametry wykonywanych zobrazowań były coraz lepsze, wzrastała rozdzielczość i liczba kanałów spektralnych. W 2008 r. twórcy projektu podjęli decyzję o bezpłatnym udostępnieniu całego archiwum i nowo powstających zobrazowań Landsat, co przyczyniło się do rozwijania nowych usług, narzędzi i aplikacji w różnych dziedzinach nauki (Zhu i in. 2019). Aktualnie działającymi sensorami, które dostarczają danych są Landsat-8 i Landsat-9. Konfiguracja tych dwóch satelitów pozwala na zobrazowanie całej powierzchni Ziemi co 8 dni.

Do niedawna prowadzenie badań w rolnictwie z zastosowaniem teledetekcji satelitarnej było bardzo kosztowne, ponieważ sceny satelitarne o większej rozdzielczości przestrzennej i czasowej niż te oferowane w programie Landsat były dostępne jedynie komercyjnie. Dopiero realizacja programu Copernicus, zainicjowanego przez Komisję Europejską (KE) we współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną (ang. *European Space Agency*, ESA), Europejską Organizacją Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych (ang. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*, EUMETSAT), Europejskim Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF), agencjami UE oraz instytutem badawczym Mercator Océan – uruchomiła rodzinę misji kosmicznych Sentinel. To diametralnie zmieniło możliwości zastosowania danych satelitarnych w systemach monitoringu Ziemi. Zobrazowania wytworzone w ramach programu są udostępniane nieodpłatnie wszystkim zainteresowanym (20 lat programu Copernicus 2024), a do analizy i przetwarzania zdjęć stworzono darmowe (typu open-source) oprogramowanie SNAP (ang. *ESA's Sentinel Applications Platform*), przez co wszyscy chętni mają możliwość eksplorowania danych dostarczanych przez satelity teledetekcyjne. Aby jeszcze bardziej ułatwić korzystanie z danych, Komisja Europejska sfinansowała powstanie pięciu platform DIAS (ang. *Copernicus Data and Information Access Services*), których zadaniem jest dostarczanie użytkownikom stałego dostępu do danych i produktów programu Copernicus oraz skalowalnej chmury obliczeniowej z usługami i narzędziami do ich przetwarzania (DIAS comparison 2024). O ile dostęp do danych jest bezpłatny, to korzystanie z bardziej zaawansowanych usług jest już płatne, przez co używanie platform DIAS jest stosunkowo mało popularnym rozwiązaniem. Misje Sentinel-1 i Sentinel-2 dostarczają zobrazowań z największą rozdzielczością. Satelity radarowe misji Sentinel-1 są wyposażone w radar z syntetyzowaną aperturą rejestrującą w paśmie C (SAR-C), pozwalają na obserwację naszego globu niezależnie od pogody zarówno w dzień, jak i w nocy, w rozdzielczości od 5 do 25 m. Satelity wielospektralne Sentinel-2 dostarczają wysoko rozdzielczych zobrazowań optycznych wykonanych przy użyciu 13-kanałowego czujnika MSI (ang. *MultiSpectral Instrument*), umożliwiających obserwację powierzchni Ziemi z rozdzielczością zaczynającą się od 10 m. Pary tych satelitów pozwalają na obserwację Ziemi z rewizytą ok. 5–6 dni (na terenie Europy).

Innym ważnym źródłem danych wykorzystywanych w badaniach środowiskowych są satelity meteorologiczne używane głównie do monitorowania pogody. Historia eksploatacji tego typu sensorów sięga lat 60. Na przestrzeni lat podlegały one ciągłej modyfikacji – zwiększano ich rozdzielczość przestrzenną, czasową, spektralną i radiometryczną. Stanowią istotną część systemu obserwacyjno-pomiarowego, m.in. w meteorologii i hydrologii, dostarczając informacji o atmosferze (np. zachmurzeniu, opadach, temperaturze powietrza) i powierzchni ziemi (np. temperaturze powierzchni ziemi, pokrywie śnieżnej, wilgotności gleby). Do rejestracji założonych parametrów wykorzystuje się, w zależności od sensora, różne długości promieniowania elektromagnetycznego, od nadfioletu poprzez podczerwień do mikrofalowego. Dane pochodzące z satelitów meteorologicznych odgrywają bardzo istotną rolę w nowoczesnym rolnictwie. Z ich wykorzystaniem wykonywane są prognozy krótkoterminowe, a dane historyczne służą do analizy trendów zmian klimatycznych i zagrożeń.

Również prywatny sektor dostarczający komercyjnych zobrazowań satelitarnych rozwija się bardzo dynamicznie. Postęp techniczny pozwolił na zminiaturyzowanie sensorów, tym samym obniżył się koszt ich produkcji, dając początek nowej erze obserwacji Ziemi za pomocą tzw. nanosatelitów. Dostarczają one zdjęcia wykonane z bardzo dużą szczegółowością i krótkim czasem rewizyty obserwowanego miejsca.

Zastosowanie danych satelitarnych w rolnictwie

Teledetekcja i nawigacja satelitarna dały w latach 90. ubiegłego wieku możliwość szybkiego rozwoju rolnictwa 3.0. Technologie te były wykorzystywane w nowoczesnych maszynach rolniczych do optymalizacji procesów produkcji roślinnej i zwierzęcej. Połączenie danych pochodzących z czujników zamontowanych na sprzętach rolniczych, systemu pozycjonowania oraz satelitów pozwoliły na stworzenie nowej koncepcji rolnictwa precyzyjnego (Samborski i in. 2018), którego celem było obniżenie kosztów produkcji, zwiększenie produkcji żywności przy równoczesnym zmniejszeniu wpływu na środowisko. Pole produkcyjne/uprawne przestało być homogeniczną strukturą, a techniki rolnictwa precyzyjnego umożliwiły jego podział na strefy o zróżnicowanej produktywności, które zależą od wielu czynników (np. uziarnienia gleby, zawartości próchnicy, pH).

Kolejnym etapem rozwoju rolnictwa jest rolnictwo 4.0, zwane też inteligentnym rolnictwem/e-rolnictwem, w którym rozwijane są cyfrowe narzędzia teleinformatyczne do gromadzenia, przechowywania, analizy, udostępniania danych wytwarzanych w gospodarstwie oraz pochodzących z zewnętrznych źródeł (np. dane pogodowe) (Kobus-Cisowska i Dziedziński 2023, Kordowska i in. 2023). Postępująca automatyzacja procesów pomiarowych z zamontowanych czujników w gospodarstwie z wyznaczoną geolokalizacją powoduje powstawanie bardzo dużej liczby danych, które przesyłane są do chmur obliczeniowych/serwerów z wykorzystaniem internetu

rzeczy (IoT) lub sieci GSM. Następnie dane poddawane są obróbce przy użyciu dedykowanych programów komputerowych, w tym z zastosowaniem sztucznej inteligencji. Połączenie uzyskanych wyników z danymi pochodzącymi ze źródeł zewnętrznych (np. zobrażenia satelitarne, ostrzeżenia o agrofagach, dane pogodowe) daje rolnikowi pełną informację o gospodarstwie, szanse optymalizacji procesów produkcyjnych oraz umożliwia oszczędność zasobów.

Wykorzystanie zdjęć satelitarnych w rolnictwie pozwala na obserwację i monitorowanie różnych zjawisk w czasie rzeczywistym, takich jak: susza, wymarzenie, stan przezimowania, wykrywanie chorób roślin i szkodników, precyzyjne nawożenie, prognoza plonów oraz identyfikacja upraw. W zależności od rozdzielczości obrazu satelitarnego można to robić od skali globalnej do skali pola. Skuteczność monitoringu upraw rolniczych metodami teledetekcyjnymi opisano w bardzo wielu pracach naukowych i zademonstrowano w licznych projektach wdrożeniowych. Do tej pory powstało wiele naukowych opracowań i aplikacji wykorzystujących dane dostarczane przez różne satelity, w tym Sentinel-1 i Sentinel-2, ponadto ciągle prowadzone są badania analizujące potencjalne możliwości ich zastosowania. Realizowane eksperymenty dotyczą m.in. monitoringu wzrostu i rozwoju roślin uprawnych (Arslan i in. 2022, Zamani-Noor i Feistkorn 2022), klasyfikacji upraw (Asam i in. 2022, Snevajs i in. 2022), prognozy plonów (Hunt i in. 2019), możliwości oceny wpływu suszy na rośliny (Shorachi i in. 2022), wykrywania faz rozwojowych roślin (Lobert i in. 2023), możliwości określania właściwości i wilgotności gleby (Datta i in. 2021, Mirzaeitalarposhti i in. 2022), szacowania i prognozowania plonów (Řežník i in. 2020) oraz precyzyjnego nawożenia (Rokhafrouz i in. 2021, Michalski i in. b.d.). Pod względem zasięgów przestrzennych zobrażenia i analizy obejmują swymi granicami powierzchnie od całego kontynentu (Fendrich i in. 2023), przez poszczególne państwa (Htitiou i in. 2021) i regiony (Mimić i in. 2022, Jędrejek i Pudęłko 2023), aż do pojedynczych działek rolnych (Jędrejek i in. 2023). W naukach rolniczych informacje uzyskane z interpretacji zdjęć mogą również zapewnić wsparcie w zarządzaniu tym sektorem organom administracji publicznej.

e-rolnictwo

Paradygmat rolnictwo 4.0 to nowoczesne podejście do rolnictwa, które łączy tradycyjną wiedzę agronomiczną z zaawansowanymi technologiami cyfrowymi. Fundamentem e-rolnictwa są dane satelitarne, systemy pozycjonowania GNSS, sztuczna inteligencja, internet rzeczy oraz automatyzacja procesów.

Rolnictwo precyzyjne/inteligentne bez informacji satelitarnych nie mogłoby istnieć (tab. 1). Technologie te wykorzystywane są do nawigacji, ustalania lokalizacji, kartowania zróżnicowania przestrzennego działek rolnych. Aplikacje rolnictwa precyzyjnego w produkcji roślinnej różnicują pole uprawne na strefy w zależności od właściwości fizykochemicznych gleby i uzyskiwanego plonu. Aby wyznaczyć

jednolite obszary na działce rolnej, konieczne jest wykonanie wieloaspektowych analiz z wykorzystaniem danych pochodzących z różnych źródeł, tj. badania in-situ (próby glebowe, urządzenia do skanowania gleby z rejestracją współrzędnych geograficznych przy użyciu odbiornika GPS), badania zdalne (zobrazowania UAV, lotnicze, satelitarne). Na podstawie uzyskanych wyników, przy użyciu specjalistycznego oprogramowania GIS, przygotowywana jest mapa zmienności pola uprawnego, która przesyłana jest do kontrolera z odbiornikiem GPS zamontowanego na ciągnikach i maszynach rolniczych. Pozwala to rolnikowi w sposób precyzyjny wykonywać zabiegi agrotechniczne i aplikować w odpowiedniej ilości materiał siewny, nawozy i środki ochrony roślin.

W rolnictwie precyzyjnym oprócz danych z globalnych systemów nawigacji (GNSS) używanych do ustalania dokładnych aktualnych współrzędnych geograficznych, prowadzenia równoległego, wykorzystywane są również dane teledetekcyjne pochodzące z sensorów umieszczonych na satelitach, samolotach, dronach lub innych obiektach. Poprzez analizę promieniowania elektromagnetycznego emitowanego lub odbitego od ładu badanych roślin możemy prowadzić monitoring stanu kondycji i warunków wzrostu upraw w czasie całego sezonu wegetacyjnego. Bardzo ważnymi zakresami długości fal wykorzystywanymi do oceny vitalności uprawianych roślin jest czerwień i bliska podczerwień (NIR), ponieważ zdrowe rośliny silnie pochłaniają światło czerwone w procesie fotosyntezy oraz jednocześnie intensywnie odbijają promieniowanie w zakresie NIR. Stanowią one podstawę do obliczenia najlepiej opisanego w literaturze i powszechnie wykorzystywanego wskaźnika wegetacji NDVI (Tucker 1979), który pozwala monitorować kondycję upraw, gęstość i aktywność fotosyntetyczną. Wskaźniki wegetacji to bezwymiarowe miary radiometryczne, które przedstawiają matematyczne zależności między wartościami promieniowania elektromagnetycznego odbijanego przez roślinność w różnych zakresach długości fal. W bazach naukowych można znaleźć bardzo dużo opisanych i dostosowanych do różnych zastosowań wskaźników wegetacji oraz ciągle powstają nowe modyfikacje (IDB 2023). W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wybranych platform cyfrowych, narzędzi i usług wykorzystujących dane satelitarne, wspomagających rolnictwo precyzyjne.

Dane pozyskiwane z satelitów pozwalają na monitorowanie wzrostu i rozwoju roślin (rys. 1) oraz warunków pogodowych wpływających niekorzystnie na plonowanie poprzez zbieranie i analizowanie szczegółowych statystyk z obrazów satelitarnych w ciągu całego sezonu wegetacyjnego (Jędrejek i Pudęłko 2023). Dzięki danym teledetekcyjnym można określić, w jakiej fazie rozwoju znajduje się obserwowana uprawa. Wiedza o kondycji badanych roślin oparta na wskaźnikach wegetacji i innych danych pomocniczych pozwalają prognozować plony oraz wykrywać i szacować straty/szkody spowodowane niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi.

Tabela 1

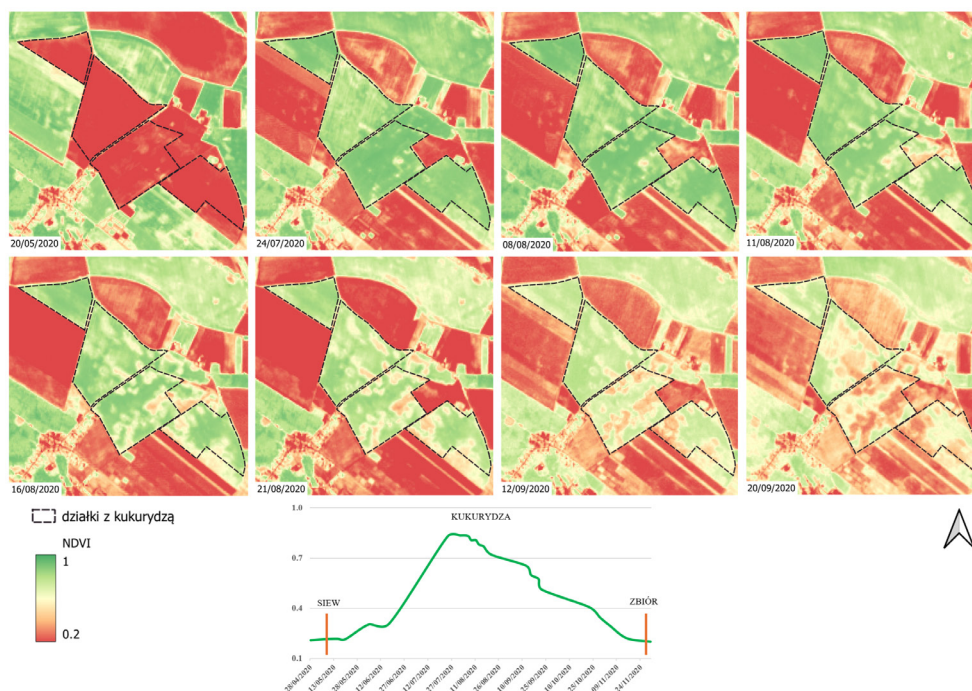
Zestawienie wybranych platform cyfrowych, narzędzi i usług wykorzystujących dane satelitarne

Nazwa serwisu	Krótki opis	Twórca/Dostawca	Słowa kluczowe
eDwin	bezpłatna internetowa platforma doradztwa i wspomagania decyzji w integrowanej ochronie roślin; w ramach platformy uruchomiono 4 e-usługi: wirtualne gospodarstwo, śledzenie pochodzenia produktów, raportowanie zagrożeń, udostępnianie danych meteorologicznych	Wielkopolski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Poznaniu oraz partnerzy z całej Polski	doradztwo rolnicze; rolnictwo precyzyjne
EO4I (Earth Observation for Agro-Insurance)	projekt finansowany przez Europejską Agencję Kosmiczną, którego celem była identyfikacja aktualnych i przyszłych potrzeb branży agroubezpieczeń oraz zbudowanie narzędzi do detekcji anomalii we wzroście roślin, szacowanie wielkości biomasy, klasyfikacji upraw	VITO Remote Sensing, GeoVille GmbH	ubezpieczenia rolnicze
System Monitorowania Obszaru	wewnętrzny system ARiMR do weryfikacji deklaracji rolników o uprawach	Agencja Modernizacji i Restrukturyzacji Rolnictwa	kontrola zasiewów
SATMIROL	zakończony projekt naukowy, którego celem było zbudowanie algorytmu do szacowania na podstawie zdjęć satelitarnych głównych upraw rolnych i ogrodnich w Polsce w latach 2019–2021	Główny Urząd Statystyczny, Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Instytut Geodezji i Kartografii	klasyfikacja upraw
FARMPORTAL	komercyjna aplikacja oferuje: kalkulator nawożenia, mapy nawożenia, stały monitoring stanu uprawianych roślin, integrację ze stacjami pogodowymi i czujnikami, alarmy pogodowe, prowadzenie i gromadzenie dokumentacji działek rolnych, rejestr zabiegów i kosztów produkcji, integracja z monitoringiem GPS	Agri Solutions Sp. z o. o.	kompleksowe zarządzanie gospodarstwem

cd. tab. 1

Nazwa serwisu	Krótki opis	Twórca/Dostawca	Słowa kluczowe
FARMTECH	komercyjny system do zarządzania działkami rolnymi w gospodarstwie; oferuje dostosowanie ilości materiału siewnego, nawozów i środków ochrony roślin do warunków panujących na polu uprawnym; firma ponadto wykonuje różnego rodzaju analizy gleby oraz oferuje doradztwo rolnicze	FarmTech Spółka z o.o.	rolnictwo precyzyjne
FERTISAT	komercyjny system do zarządzania działkami rolnymi w gospodarstwie; oferuje dostosowanie ilości materiału siewnego, nawozów i środków ochrony roślin do warunków panujących na polu uprawnym; możliwość integracji z maszynami rolniczymi wiodących marek	Wasat Sp. z o.o.	rolnictwo precyzyjne
InterSUCHO	bezpłatny system monitorujący suszę i stan wilgotności gleby w czasie rzeczywistym dla Europy Środkowej z prognozami krótkoterminowymi	Global Change Research Institute CAS, Mendel University w Brnie	susza rolnicza
IRRIGET	komercyjny system umożliwia odpowiedni dobór dawek i terminów nawadniania niezbędnych do optymalnego wzrostu uprawianych roślin	Wasat Sp. z o.o.	nawadnianie
RolnikON	komercyjny system do efektywnego zarządzania uprawą, gospodarką magazynową, hodowlą, finansami, energią i czasem użytkowników	Polski Instytut Rolnictwa sp. z o.o.	kompleksowe zarządzanie gospodarstwem
SatAgro	komercyjna platforma monitoringu satelitarnego i narzędzi rolnictwa precyzyjnego	SatAgro Sp. z o.o.	kompleksowe zarządzanie gospodarstwem
SoilEO	komercyjny system wykorzystuje zdjęciaach hiperspektralne i algorytmy sztucznej inteligencji do określania pH, zasobności gleby w magnez, potas i fosfor	QZ Solutions Sp. z o.o.	zdalne badanie gleby

Źródło: opracowanie własne



Rys. 1. Przykład serii czasowej zmian wartości wskaźnika NDVI w pełnym okresie wegetacji dla działek rolnych z kukurydzą w RZD Baborówko

Źródło: opracowanie własne

Uważa się, że na plonowanie roślin wpływa nawet kilkaset różnych, wzajemnie oddziałujących na siebie czynników. Są wśród nich m.in. czynniki agrotechniczne, siedliskowe oraz pogodowe (Kosaki i in. 1989, Hua i in. 2022). Czyli na obniżenie plonów wpływają nie tylko niekorzystne warunki meteorologiczne. Rolnik nie ma wpływu na warunki pogodowe, ale może w znacznym stopniu ograniczyć ich negatywny wpływ, stosując elementy rolnictwa 4.0, na przykład odpowiednie techniki uprawowe prowadzące do zwiększania zdolności gleby do retencji wody, a co za tym idzie polepszania plonowania. Natomiast w celu uniknięcia błędów podczas przygotowania gleby, nawożenia, siewu, doboru odmiany oraz ochrony roślin rolnik może skorzystać z wytycznych, szkoleń oraz doradztwa przygotowanego przez różne instytucje państwowe (m.in. IUNG-PIB, COBORU, ODR, IHAR-PIB), które mają za zadanie pomóc mu w codziennej pracy. Zdobyta w ten sposób wiedza wspiera rolników w identyfikacji czynników wpływających na plonowanie roślin, podnosi umiejętność szacowania szkód powstałych w wyniku różnych zjawisk atmosferycznych i korzystania z informacji dostarczanej przez zobrazowania satelitarne.

Narzędzia do wspomagania decyzji w rolnictwie

Dane satelitarne w połączeniu z danymi meteorologicznymi i glebowymi oraz modelami deterministycznymi i sztucznej inteligencji mogą posłużyć do zbudowania zestawu narzędzi do wsparcia decyzji w rolnictwie dla administracji publicznej. Program ESA Copernicus, a szczególnie bezpłatne zobrażenia Sentinel-1 i Sentinel-2 umożliwiają prowadzenie zdalnej obserwacji Polski z dużą rozdzielczością przestrzenną i czasową. Dokładając do tego wiedzę rolniczą zgromadzoną w instytutach rolniczych i ośrodkach doradztwa rolniczego, unikalne bazy danych in-situ – istnieje możliwość zbudowania obiektywnych narzędzi, które będą wspomagać organy administracji w prowadzeniu i monitorowaniu wspólnej polityki rolnej, szacowaniu i monitoringu wielkości produkcji roślinnej i zwierzęcej, ocenie szkód w uprawach rolnych powstałych na skutek niekorzystnych zjawisk atmosferycznych (Jędrejek i in. 2022). Dzięki połączeniu technik satelitarnych i obliczeniowych, zgromadzonych baz danych i wiedzy agronomicznej można utworzyć centralny, nieodpłatny system przestrzennej informacji i monitoringu działek rolnych dostępny dla producentów rolnych oraz administracji publicznej. Metody teledetekcji mogą być wykorzystywane jako system wspomagania decyzji administracyjnej w celu określenia bezpośredniego wpływu niekorzystnych warunków pogodowych na pola producentów, a także jako narzędzie do oceny efektów wprowadzanych zabiegów agrotechnicznych (Michalski i in. b.d.).

W Agencji Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa (ARiMR) były prowadzone pilotażowe prace nad wykorzystaniem danych satelitarnych do prowadzenia tzw. kontroli na miejscu, czyli sprawdzania deklaracji rolnika o uprawach na działkach rolnych z faktycznym stanem. Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/2116 z dnia 2 grudnia 2021 r. w sprawie finansowania wspólnej polityki rolnej, zarządzania nią i monitorowania jej oraz uchylenia rozporządzenia (UE) nr 1306/2013 (Dz.Urz. UE L 435 z 06.12.2021, z późn. zm) zobowiązało od początku 2023 r. wszystkie rolnicze agencje płatnicze, w tym ARiMR, do wdrożenia Systemu Monitorowania Obszaru (AMS, ang. *Area Monitoring System*) (tab. 1). Ma to usprawnić kontrolę administracyjną płatności obszarowych oraz zapobiec wyłudzeniom unijnych dopłat (AMS 2025).

Podsumowanie

Technologie cyfrowe umożliwiają rolnikom na całym świecie lepsze poznanie współzależności czynników wpływających na plonowanie roślin, tym samym poprawienie wydajności prowadzonych gospodarstw. Pełnią ważną rolę w racjonalnym wykorzystaniu materiału siewnego, środków ochrony roślin, nawozów oraz nawodnienia, wspierają tym samym bardziej zrównoważone zarządzanie zasobami. Cyfrowe rolnictwo bazuje na integracji danych pozyskiwanych z obserwacji satelitar-

nych, danych pogodowych, danych glebowych i danych pochodzących z czujników naziemnych (np. sondy wilgotności gleby), szybkim przetwarzaniu i udostępnianiu rolnikowi powstałej informacji. Na jej podstawie producent rolny może zdecydować o wykonaniu odpowiednich zabiegów agrotechnicznych. Teledetekcja satelitarna, systemy GNSS, IoT i AI stanowią cztery wzajemnie powiązane filary rolnictwa 4.0. Teledetekcja satelitarna dostarcza danych przestrzennych, czujniki IoT generują szczegółowe dane punktowe, systemy GNSS zapewniają dokładną geolokalizację prowadzonych obserwacji i zabiegów agrotechnicznych, a algorytmy AI wspomagają integrację oraz interpretację wszystkich źródeł danych oraz tworzenie różnego rodzaju modeli. Synergia tych czterech elementów buduje spójny, cyfrowy ekosystem umożliwiający precyzyjne, inteligentne i zrównoważone zarządzanie produkcją rolną.

Wdrożenie rozwiązań technologii satelitarnych wykorzystywanych w rolnictwie 4.0 do zarządzania gospodarstwem staje się coraz bardziej powszechne, jednak duża konkurencja wśród dostawców systemów/aplikacji nie sprawia, że te rozwiązania stają się tańsze. W większości są to systemy komercyjne z podobną funkcjonalnością różniące się często jedynie interfejsem użytkownika. Dają możliwość łączenia danych satelitarnych, meteorologicznych oraz dodatkowych danych o gospodarstwie na potrzeby e-rolnictwa. Pozwalają monitorować zabiegi agrotechniczne oraz rozwój uprawianych roślin w całym sezonie wegetacyjnym, a także budować historię uprawianych działek, w tym monitorować uzyskiwane zbiory. Korzystanie z cyfrowych technologii rolnictwa 4.0 pozwala na racjonalne/zrównoważone wykorzystanie zasobów oraz zmniejszenie wpływu rolnictwa na środowisko i zmiany klimatu.

Cyfrowa transformacja rolnictwa została już rozpoczęta i jest nieunikniona, ale ciągle jest brak regulacji zarówno krajowych, jak i unijnych, które jasno określałyby statut łańcuchów wartości dużych zbiorów danych rejestrowanych w gospodarstwach przez różnego rodzaju zainstalowane czujniki i przetwarzanych w chmurach obliczeniowych (Kosior 2020). Producenci maszyn rolniczych i środków produkcji sprzedają swoje produkty w pakiecie z narzędziami informatycznymi, które mają na celu wspierać rolników w podejmowaniu decyzji dotyczących prowadzonego gospodarstwa. Powstające informacje rolnicze w sposób niejasny są udostępniane, gromadzone, przetwarzane przez dostawców technologii rolniczych i cyfrowych, tworząc wspólne bazy danych wykorzystywane do różnych celów, m.in. do budowania dedykowanych, kompleksowych usług serwisowych i cyfrowych, które uzależniają rolnika od jednego dostawcy. Rolnicy obawiają się, że dane, które powstają w ich gospodarstwach mogą być użyte w niewłaściwy sposób, w tym wykorzystane przez konkurencję.

Literatura

1. AMS – System Monitorowania Obszaru – nowe narzędzie cyfrowe ARiMR – Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa – Portal Gov.pl Available; <https://www.gov.pl/web/arimr/ams---systemu-monitorowania-obszaru--nowe-narzedzie-internetowe-arimr> (accessed on 12 June 2025).

2. Asam S., Gessner U., Almengor González R., Wenzl M., Kriese J., Kuenzer C.: Mapping crop types of Germany by combining temporal statistical metrics of Sentinel-1 and Sentinel-2 time series with LPIS Data. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 2981; DOI:10.3390/rs14132981.
3. Arslan İ., Topakcı M., Demir N.: Monitoring maize growth and calculating plant heights with Synthetic Aperture Radar (SAR) and Optical Satellite Images. *Agriculture*, 2022, **12**, 800; DOI:10.3390/agriculture12060800.
4. Datta S., Das P., Dutta D., Giri R.K.: Estimation of surface moisture content using Sentinel-1 C-Band SAR Data Through Machine Learning Models. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, **49**: 887-896, DOI: 10.1007/s12524-020-01261-x.
5. DIAS Comparison Available; <https://earsc.org/dias-comparison/> (accessed on 13 June 2024).
6. Fendrich A.N., Matthews F., Van Eynde E., Carozzi M., Li Z., d'Andrimont R., Lugato E., Martin P., Ciais P., Panagos P.: From regional to parcel scale: A high-resolution map of cover crops across Europe combining satellite data with statistical surveys. *Science of The Total Environment*, 2023, **873**, 162300; DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.162300.
7. Htitiou A., Boudhar A., Chehbouni A., Benabdelouahab T.: National-scale cropland mapping based on phenological metrics, environmental covariates, and machine learning on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2021, **13**, 4378; DOI:10.3390/rs13214378.
8. Hua S., Dal-Bianco M., Chen Z.H.: Editorial: Crop yield and quality response to the interaction between environment and genetic factors. *Frontiers in Genetics*, 2022, **13**.
9. Hunt M.L., Blackburn G.A., Carrasco L., Redhead J.W., Rowland C.S.: High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **233**, 111410; DOI: 10.1016/j.rse.2019.111410.
10. IDB – Index DataBase; <https://www.indexdatabase.de/> (accessed on 22 December 2023).
11. Jędrejek A., Pudełko R.: Exploring the potential use of Sentinel-1 and 2 Satellite imagery for monitoring winter wheat growth under agricultural drought conditions in North-Western Poland. *Agriculture* 2023, **13**, 1798; DOI: 10.3390/agriculture13091798.
12. Jędrejek A., Jadczyśzyn J., Pudełko R.: Increasing accuracy of the soil-agricultural map by Sentinel-2 images analysis – case study of maize cultivation under drought conditions. *Remote Sensing*, 2023, **15**, 1281; DOI: 10.3390/rs15051281.
13. Jędrejek A., Koza P., Doroszewski A., Pudełko R.: Agricultural drought monitoring system in Poland–Farmers' assessments vs. monitoring results (2021). *Agriculture*, 2022, **12**, 536; DOI: 10.3390/agriculture12040536.
14. Kobus-Cisowska J., Dziedziński M.: Możliwości i wyzwania zastosowania cyfryzacji w rozwoju zrównoważonego, inteligentnego rolnictwa na przykładzie produkcji roślinnej. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 2023, **112**: 28-41.
15. Kordowska M., Baranowski M., Pisarek J., Ziemacki Z., Wawer R., Czech T.: *Rolnictwo 4.0. Identyfikacja trendów technologicznych*. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Warszawa 2023, ss. 91.
16. Kosaki T., Wasano K., Juo A.S.R.: Multivariate statistical analysis of yield-determining factors. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1989, **35**: 597-607; DOI: 10.1080/00380768.1989.10434795.
17. Kosior K.: Łącuch wartości dużych zbiorów danych (big data) w rolnictwie – problemy i wyzwania regulacyjne. *Studia BAS*, 2020, s. 101-125.
18. Landsat Satellites; <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> (accessed on 13 June 2024).
19. Lobert F., Löw J., Schwieder M., Gocht A., Schlund M., Hostert P., Erasmí S.: A deep learning approach for deriving winter wheat phenology from optical and SAR time series at field level. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **298**, 113800; DOI: 10.1016/j.rse.2023.113800.
20. Michalski M., Turoś P., Buszke B., Rybicki M., Stankiewicz M.: Wykorzystanie syntezy danych satelitarnych Sentinel-1 i Sentinel-2 do opracowania map zmiennego nawożenia azotem rzepaku ozimego. *Roczniki Geomatyki*, 2023, t. 21, **1(100)**: 31-47.

21. Mimić G., Živaljević B., Blagojević D., Pejak B., Brdar S.: Quantifying the effects of drought using the crop moisture stress as an indicator of maize and sunflower yield reduction in Serbia. *Atmosphere*, 2022, **13**, 1880; DOI: 10.3390/atmos13111880.
22. Mirzaei Talarposhti R., Shafizadeh-Moghadam H., Taghizadeh-Mehrjardi R., Demyan M.S.: Digital soil texture mapping and spatial transferability of machine learning models using Sentinel-1, Sentinel-2, and terrain-derived covariates. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 5909; DOI: 10.3390/rs14235909.
23. Rokhafrouz M., Latifi H., Abkar A.A., Wojciechowski T., Czechowski M., Naieni A.S., Maghsoudi Y., Niedbała G.: Simplified and hybrid remote sensing-based delineation of management zones for nitrogen variable rate application in wheat. *Agriculture*, 2021, **11**, 1104; DOI: 10.3390/agriculture11111104.
24. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/2116 z dnia 2 grudnia 2021 r. w sprawie finansowania wspólnej polityki rolnej, zarządzania nią i monitorowania jej oraz uchylenia rozporządzenia (UE) nr 1306/2013 (Dz.Urz. UE L 435 z 06.12.2021, z późn. zm.).
25. Řezník T., Pavelka T., Herman L., Lukas V., Širůček P., Leitgeb Š., Leitner F.: Prediction of yield productivity zones from Landsat 8 and Sentinel-2A/B and their evaluation using farm machinery measurements. *Remote Sensing*, 2020, **12**, 1917; DOI:10.3390/rs12121917.
26. Samborski S., Dobers E., Gnatowski T., Gozdowski D., Jerzy K., Elliot S., Nieróbca A., Rafał P., Stępień M., Szatyłowicz J.: *Rolnictwo Precyzyjne*. Wyd. PWN, 2018, ss. 522.
27. Shorachi M., Kumar V., Steele-Dunne S.C.: Sentinel-1 SAR backscatter response to agricultural drought in the Netherlands. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 2435; DOI:10.3390/rs14102435.
28. Snevajs H., Charvat K., Onckelet V., Kvapil J., Zadrazil F., Kubickova H., Seidllova J., Batrlova I.: Crop detection using time series of Sentinel-2 and Sentinel-1 and existing land parcel information systems. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 1095; DOI:10.3390/rs14051095.
29. Tucker C.J.: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, **8**: 127-150; DOI:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
30. USGS Landsat 1; <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-1> (accessed on 4 August 2023).
31. Zamani-Noor N., Feistkorn D.: Monitoring growth status of winter oilseed rape by NDVI and NDYI derived from UAV-Based Red-Green-Blue Imagery. *Agronomy*, 2022, **12**, 2212; DOI: 10.3390/agronomy12092212.
32. Zhu Z., Wulder M.A., Roy D.P., Woodcock C.E., Hansen M.C., Radeloff V.C., Healey S.P., Schaaf C., Hostert P., Strobl P. et al.: Benefits of the free and open landsat Data Policy. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **224**: 382-385; DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.016.
33. 20 Lat Programu Copernicus; https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Poland/20_lat_programu_Copernicus (accessed on 12 June 2024).

Adres do korespondencji:

dr inż. Anna Jędrejek
Zakład Geomatyki
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 899

e-mail: Anna.Jedrejek@iung.pulawy.pl

Tytus Berbeć

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WYKORZYSTANIE ZOBRAZOWAŃ SPEKTRALNYCH W ROLNICTWIE 4.0*

Słowa kluczowe: rolnictwo precyzyjne, teledetekcja, dron (BSP), kamera multispektralna, NDVI, uczenie maszynowe, ocena kondycji upraw, szacowanie szkód

Wstęp

Dynamiczny rozwój rolnictwa precyzyjnego wymaga wdrażania zaawansowanych technologii do monitorowania stanu upraw w czasie rzeczywistym. Bezzałogowe statki powietrzne (BSP) wyposażone w sensory spektralne stają się kluczowym narzędziem, oferując zobrażenia o wysokiej rozdzielczości oraz niezbędne dane oceny kondycji roślin. Celem pracy była ocena skuteczności zintegrowanej metodyki, łączącej teledetekcję niskopułapową z algorytmami uczenia maszynowego, w celu oceny faz fenologicznych i ogólnej kondycji pszenicy ozimej, ilościowego oszacowania szkód wyrządzonych przez zwierzęta w rzepaku oraz detekcji porażenia pszenicy przez fuzariozę kłosów.

Nowoczesne rolnictwo stoi przed trudnymi wyzwaniami, takimi jak potrzeba zwiększenia produkcji żywności, adaptacja do zmian klimatu oraz presja społeczeństwa na ograniczanie negatywnego wpływu na środowisko. W odpowiedzi na stawiane wyzwania, technologia rolnictwa precyzyjnego zyskuje na znaczeniu jako model zarządzania oparty na gromadzeniu, przetwarzaniu i analizie danych w celu optymalizacji produkcji roślinnej poprzez podejmowanie właściwych decyzji agronomicznych. Jedną z kluczowych technologii napędzających rozwój rolnictwa 4.0 są bezzałogowe statki powietrzne (BSP, ang. UAV), które stały się wszechstronnymi platformami do pozyskiwania danych o wysokiej rozdzielczości czasowej i przestrzennej.

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

W przeszłości monitorowanie upraw z powietrza opierało się na zobrażowaniach satelitarnych lub lotniczych. Pomimo ich dużej wartości metody te charakteryzują się ograniczeniami związanymi z wysokim kosztem wprowadzenia do użytku, stosunkowo niską rozdzielczością przestrzenną czy dużą zależnością od terminów przelotów i zmiennością warunków atmosferycznych, głównie zachmurzenia czy nagromadzenia aerozolu w powietrzu. BSP oferują w tym zakresie znaczącą przewagę, umożliwiając elastyczne planowanie misji oraz pozyskiwanie danych ze znacznie większą dokładnością. Drony są również tańsze w eksploatacji w porównaniu z tradycyjnymi metodami in-situ opartymi na pobieraniu prób. Drony mogą być wyposażone w szeroką gamę sensorów, w tym kamery działające w zakresie światła widzialnego (RGB) oraz kamery multispektralne rejestrujące odbicie w pasmach niewidocznych dla ludzkiego oka, takich jak np. kanał czerwonej krawędzi (tzw. red edge) czy bliska podczerwień (NIR).

Dane pozyskane z nalogów BSP mogą być integrowane z systemami informacji geograficznej (GIS). Połączenie informacji o stanie roślinności z danymi glebowymi pozwala na tworzenie spersonalizowanych map aplikacyjnych dla nawozów czy środków ochrony roślin, uwzględniając specyficzną zmienność warunków siedliskowych na danym polu. Centralnym elementem tej technologii jest analiza odbicia spektralnego roślin. Rośliny zdrowe, o wysokiej aktywności fotosyntetycznej i dobrym zaopatrzeniu w wodę intensywnie absorbują światło w zakresie czerwonym i odbijają je w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR). Rośliny znajdujące się w stanie stresu (spowodowanego np. niedoborem wody, atakiem patogenów czy deficytem makro- i mikroelementów) wykazują odmienną sygnaturę spektralną. Różnice te są kwantyfikowane za pomocą wskaźników wegetacyjnych, z których najpopularniejszym jest znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (NDVI). Analiza map NDVI pozwala na precyzyjne lokalizowanie obszarów problemowych na polu, często zanim symptomy stresu staną się widoczne gołym okiem. Ma to kluczowe znaczenie m.in. w monitorowaniu suszy rolniczej czy ocenie ogólnego stanu kondycji roślin.

Wyniki i dyskusja

W doświadczeniu dotyczącym przeprowadzenia dokładnej analizy materiału fotogrametrycznego pod kątem oceny ogólnej kondycji roślin, wystąpienia szkodników, chorób roślin z wykorzystaniem uczenia maszynowego do oceny zasięgu wystąpienia szkody w uprawie wykorzystano dwa rodzaje dronów z zamontowanymi kamerami spektralnymi.

Do analizy niewielkich obszarów upraw wykorzystano drona o konstrukcji multiwiralnikowej z zamontowaną kamerą wielospektralną (rys. 1).



Rys. 1 Dron o konstrukcji multiwirnikowej firmy DJI model Matrice 600 Pro z zamontowaną kamerą wielospektralną Micasence RedEdge-M

Fot. Tytus Berbec

Wykorzystany nośnik to zaawansowany dron zaprojektowany z myślą o użytkownikach potrzebujących nośnika, do którego można podłączyć aparaturę badawczą o różnych parametrach. Jest to bardzo solidna platforma o wysokiej wydajności, modularności i niezawodności. Dzięki modułowej budowie model ten można łatwo konfigurować i dostosowywać do różnego typu zadań. Wyposażony w bardzo wydajny system napędowy składający się z sześciu silników, które zapewniają dużą siłę nośną, umożliwiając transport ciężkiej aparatury badawczej (np. wykorzystanej w doświadczeniu kamery wielospektralnej o wysokiej rozdzielczości). W dronie zastosowano zaawansowany system kontroli lotu składający się z kontrolera z możliwością programowania misji, zapewniając stabilność, wysoką precyzję lotu nawet w trudnych warunkach pogodowych. Dzięki wyposażeniu drona w różne czujniki i sensory możliwe było bezpieczne wykonywanie misji w trudnych warunkach terenowych. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry fizyczne i konstrukcyjne platformy bezzałogowej. Jest to sześciowirnikowa konstrukcja (heksakopter) o znacznym rozstawie osi (1133 mm), co zapewnia stabilność w locie. Kluczową cechą jest składana konstrukcja ramion, co znacząco ułatwia transport (redukcja wymiarów z 1668 mm do 640 mm). Maksymalna masa startowa (MTOW) wynosząca 15,1 kg, przy masie własnej ok. 9,1–9,6 kg, pozwala na udźwig ładunku (aparatury badawczej) rzędu 5,5–6,0 kg. Platforma jest kompatybilna z szeroką gamą profesjonalnych sensorów (seria Zenmuse), a standardowo wysuwane podwozie zapewnia swobodny obrót kamery w zakresie 360°.

Tabela 1

Charakterystyka konstrukcyjna i parametry fizyczne drona

Cecha	Specyfikacja
Konstrukcja	
Diagonalny rozstaw osi	1133 mm
Wymiary drona (rozłożony)	1668 mm × 1518 mm × 759 mm
Wymiary drona (złożony)	640 mm × 582 mm × 623 mm
Wymiary drona (całkowicie złożony)	620 mm × 320 mm × 505 mm
Ilość pakietów baterii	6
Waga drona (z bateriami TB47S)	9,1 kg
Waga drona (z bateriami TB48S)	9,6 kg
Maksymalna masa startowa	15,1 kg
Napęd	
Model silnika	DJI 6010
Model śmigieł	DJI 2170
Inne	
Możliwość integracji (Gimbal)	Zenmuse X3; seria X5; XT; Ronin-MX; seria Z15 (Z15-A7, Z15-BMPCC, Z15-5D III, Z15-GH4)
Wysuwane podwozie	standard
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C

Źródło: oficjalna strona producenta <https://www.dji.com/pl/support/product/matrice600-pro>

Tabela 2 zestawia kluczowe osiągi lotnicze oraz specyfikację systemów awioniki i kontroli. Platforma wyposażona jest w zaawansowany kontroler lotu A3 PRO zapewniający wysoką precyzję pozycjonowania ($\pm 0,5$ m w pionie i $\pm 1,5$ m w poziomie w trybie GPS). Maksymalna prędkość lotu poziomego ($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) oraz odporność na wiatr (do $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) umożliwiają prowadzenie badań w zmiennych warunkach pogodowych. Najważniejszym parametrem operacyjnym jest maksymalny czas lotu, który jest silnie zależny od obciążenia i typu baterii – waha się od 16–18 min (z ładunkiem 5,5–6 kg) do 35–40 min (bez ładunku). System sterowania (nadajnik) zapewnia duży zasięg transmisji (do 5 km) oraz porty wyjściowe wideo (HDMI, SDI), kluczowe dla podglądu na żywo.

Tabela 2

Parametry lotu i systemy sterowania platformy

Cecha	Specyfikacja
Osiągi i parametry lotu	
Dokładność pozycjonowania (Tryb P, z GPS)	w pionie: $\pm 0,5$ m, w poziomie: $\pm 1,5$ m
Maksymalna prędkość kątowna	przechył (Pitch): $300^{\circ}/s$, Obrót (Yaw): $150^{\circ} \cdot s^{-1}$
Maksymalny kąt przechyłu	25°
Maksymalna prędkość wznoszenia	$5 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalna prędkość opadania	$3 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalna prędkość wiatru	$8 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalna wysokość lotu (n.p.m.)	2500 m
Prędkość maksymalna (bez wiatru)	$18 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalny czas lotu (z bateriami TB47S)*	bez ładunku: 35 min; 6 kg ładunku: 16 min
Maksymalny czas lotu (z bateriami TB48S)**	bez ładunku: 40 min; 5,5 kg ładunku: 18 min
System kontroli lotu	
Model	A3 PRO
Nadajnik (kontroler)	
Częstotliwość operacyjna	920,6 MHz–928 MHz (Japonia); 5,725 GHz–5,825 GHz; 2,400 GHz–2,483 GHz
Maksymalny zasięg transmisji (bez zakłóceń)	zgodność z FCC: 5 km; Zgodność z CE: 3,5 km
EIRP (moc nadawania)	10 dBm @ 900 M; 13 dBm @ 5,8 G; 20 dBm @ 2,4 G
Port wyjściowy wideo	HDMI, SDI, USB
Tryb podwójnego operatora	sterowanie Master-Slave
Obsługa urządzeń mobilnych	telefon i tablet (max szerokość 170 mm)
Pobór mocy	9 W
Wbudowana bateria	6000 mAh, 2S LiPo
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C

*TB47S – podstawowa bateria montowana do BSP; **TB48S – akcesoryjna bateria o zwiększonej pojemności, z którą współpracuje platforma BSP

Źródło: oficjalna strona producenta: <https://www.dji.com/pl/support/product/matrice600-pro>

W tabeli 3 przedstawiono charakterystykę komponentów systemu zasilania, który jest kluczowy dla czasu i bezpieczeństwa operacji lotniczych. System opiera się na sześciu pakietach baterii (LiPo 6S), co zapewnia redundancję zasilania. Dostępne są dwa warianty baterii: TB47S (4500 mAh/99,9 Wh) oraz TB48S (5700 mAh/129,96 Wh). Bateria TB48S, choć cięższa (680 g vs 595 g), oferuje większą pojemność i moc, co przekłada się na dłuższy czas lotu, szczególnie przy pełnym obciążeniu (jak wykazano w tab. 2). Oba typy baterii posiadają system inteligentnego zarządzania (BMS) oraz szeroki zakres temperatur pracy.

Tabela 3

Parametry lotu i systemy sterowania platformy

Cecha	Specyfikacja
Ładowarka	
Model	A14-100P1A
Wyjście napięcia	26,3 V
Moc	100 W
Inteligentna Bateria (model TB47S)	
Pojemność	4500 mAh
Napięcie	22,2 V
Typ	LiPo 6S
Moc	99,9 Wh
Waga	595 g
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C
Temperatura przechowywania	poniżej 3 miesięcy: od -20°C do 45°C; powyżej 3 miesięcy: od 22°C do 28°C
Temperatura ładowania	od 5° do 40°C
Maksymalna moc ładowania	180 W
Inteligentna Bateria (model TB48S)	
Pojemność	5700 mAh
Napięcie	22,8 V
Typ	LiPo 6S
Moc	129,96 Wh
Waga netto	680 g

cd. tab. 3

Cecha	Specyfikacja
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C
Temperatura przechowywania	poniżej 3 miesięcy: od -20°C do 45°C ; powyżej 3 miesięcy: od 22°C do 28°C
Temperatura ładowania	od 5°C do 40°C
Maksymalna moc ładowania	180 W

Źródło: oficjalna strona producenta: <https://www.dji.com/pl/support/product/matrice600-pro>

Do multiwornikowca opisanego powyżej podczepiono kamerę multispektralną firmy Micasense model RedEdge-M (rys. 2).



Rys. 2. Kamera multispektralna wykorzystana w doświadczeniu

Źródło: <https://i.ytimg.com/vi/ovAaM0iqeUE/hq720.jpg?sqp=-oaymwEhCK4FEIIDSFryq4qpAxMIA-RUAAAAAGAEIAADIQj0AgKJD&rs=AO4CLAJ8XCE3IrLokR7yVny0uMv5ma8qg>

Jest to zaawansowana kamera multispektralna zaprojektowana specjalnie do zastosowań w rolnictwie precyzyjnym. Dzięki zdolności rejestrowania światła odbitego w różnych, niewidocznych dla ludzkiego oka zakresach spektralnych, umożliwia szczegółową analizę stanu roślin i gleby. Kamera multispektralna rejestruje obraz w kilku wąskich pasmach spektralnych, które są szczególnie istotne dla obserwatora badającego zmiany w roślinach. Dzięki temu można uzyskać szereg istotnych informacji dotyczących zdrowotności roślin, pomagających we wczesnym wykrywaniu chorób, stresu wodnego, czy niedoborów składników odżywczych. Ponadto analiza refleksyjności może pomóc w ocenie tempa wzrostu roślin (odczytaniu fazy rozwojowej roślin). Dokładna analiza widm spektralnych daje również możliwość analizy stanu gleby, w tym uwilgotnienia roślin i gleby oraz składników organicznych zawartych

w glebie. Na podstawie zobrazowań spektralnych możliwe było również prognozowanie plonów.

W tabeli 4 przedstawiono kluczowe parametry techniczne wykorzystywanego sensora multispektralnego. Cechami kwalifikującymi go do zastosowań na bezzałogowych statkach powietrznych (BSP) są przede wszystkim niska masa (170 g wraz z czujnikiem światła padającego DLS) oraz niewielki pobór mocy (nominalnie 4 W). Sensor rejestruje obraz w pięciu wąskich pasmach spektralnych (niebieskim, zielonym, czerwonym, czerwonej krawędzi, bliskiej podczerwieni). Obecność kanałów red edge (środek 717 nm) i bliskiej podczerwieni (środek 840 nm) ma fundamentalne znaczenie dla teledetekcji rolniczej, umożliwiając kalkulację zaawansowanych wskaźników wegetacyjnych (np. NDVI, NDRE), które są czułe na zawartość chlorofilu i stan zdrowotny roślin. Urządzenie zapewnia wysoką rozdzielczość przestrzenną (GSD 8,2 cm·px⁻¹ przy locie na wysokości 120 m AGL). Szybkość akwizycji (1 zobrazowanie·s⁻¹) oraz zapis danych w 12-bitowym formacie RAW gwarantują wysoką rozdzielczość radiometryczną niezbędną do precyzyjnej analizy subtelnych różnic w odbiciu spektralnym monitorowanych upraw.

Tabela 4

Opis parametrów technicznych kamery Micasense RedEdge-M

Waga	170 g (Including DLS)
Wymiary	9,4 cm × 6,3 cm × 4,6 cm (3,7" × 2,5" × 1,8")
Zasilanie	4,2 V–15,8 V, 4 W nominal, 8 W peak
Kanały spektralne	kanały spektralne: niebieski, zielony, czerwony, kanał czerwonej krawędzi (ang. <i>red edge</i>), bliska podczerwień
Rozdzielczość poszczególnych kanałów Ground Sample Distance (GSD):	8,2 cm·px ⁻¹ (per band) at 120 m (400 ft.) AGL
Częstotliwość pracy kanałów	1 zobrazowanie na sekundę (wszystkie kanały), 12-bit RAW
Długość fal poszczególnych zakresów spektralnych	niebieski (centrum kanału 475 nm ± 20 nm), zielony (centrum kanału 560 nm ± 20 nm), czerwony (centrum kanału 668 nm ± 10 nm), czerwona krawędź (centrum kanału 717 nm ± 10 nm), bliska podczerwień (centrum kanału 840 nm ± 40 nm)

Źródło: https://support.micasense.com/hc/en-us/article_attachments/115004168274

Wykorzystując kamerę wielospektralną o parametrach technicznych opisanych w tabeli 4, możliwe było dokonanie analizy potrzeb roślin, dzięki czemu można było w sposób precyzyjny dozować nawozy (zmniejszenie nakładów na nawozy zwiększa ekonomikę gospodarstwa i przyczynia się do ochrony środowiska). Zastosowanie

kamery umożliwiało wychwycenie problemów pojawiających się w uprawie oraz podjęcie szybkich działań mających na celu niezwłoczną ich eliminację lub zminimalizowanie negatywnego działania.

Do mapowania dużych obszarów wykorzystano drona o konstrukcji płatownca z zamontowaną kamerą multispektralną firmy Micasense model Altum-PT (rys. 3)



Rys. 3. Dron o konstrukcji płatownca firmy BZB UAS model ecoSKY 2.0

Źródło: <https://www.bzbuas.com/pl>

Dron o konstrukcji płatownca firmy BZB UAS model ecoSKY 2.0 to bezzałogowy statek powietrzny, który swoją konstrukcją przypomina samolot. Dzięki aerodynamicznemu kształtowi i większej nośności w porównaniu z multirotorami jest w stanie pokonać znacznie dłuższe dystanse, co czyni go doskonałym narzędziem w monitorowaniu dużych obszarów rolnych. Model ecoSKY jest jednym z pierwszych samolotów pionowego startu i lądowania (VTOL) polskiej produkcji. W całości został wykonany z zaawansowanych materiałów kompozytowych i wyposażony w najnowocześniejszą technologię komponentów elektronicznych. Napędzany jest czterema silnikami elektrycznymi w układzie poziomym, które pozwalają samolotowi pionowo startować i lądować, co czyni go niezwykle użytecznym narzędziem na obszarach rolnych oraz w jeden silnik w układzie pionowym służący do napędzania maszyny w czasie lotu poziomego. Podczas lotu poziomego silniki poziome są nieużywane, ustawione w tzw. chorągiewkę, co pozwala oszczędzić duże ilości energii i zmaksymalizować długość lotu na jednym pakiecie nawet do 180 min. Prędkość przelotowa samolotu o rozpiętości skrzydeł ponad 3 metrów wynosi $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ok. $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), natomiast prędkość maksymalna, do której można rozpędzić bezzałogowy samolot to $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). W tabeli 5 przedstawiono specyfikację techniczną platformy bezzałogowej typu VTOL (płatownca pionowego startu i lądowania). Jest to konstrukcja hybrydowa łącząca elastyczność operacyjną wielowirnikowca (pionowy start i lądowanie) z wydajnością lotu płatownca (przejście w lot poziomy po osiągnięciu wysokości docelowej). Kluczowym parametrem definiującym potencjał tej platformy do zastosowań w rolnictwie precyzyjnym na dużą skalę jest minimalny czas lotu wynoszący 120 min z ładunkiem o masie 1400 g. Tak długa wytrzymałość lotu pozwala na efektywne mapowanie rozległych arealów (setek hektarów) podczas jednej misji. Platforma jest przeznaczona do przenoszenia zaawan-

sowanych sensorów multispektralnych, co potwierdza wymagana kompatybilność z sensorem ALTUM-PT. Wysokie parametry operacyjne, takie jak odporność na wiatr w locie poziomym (do $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz prędkość przelotowa $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wskazują na przystosowanie do pracy w realnych warunkach polowych. Zdolność do planowania misji autonomicznych na podstawie plików wektorowych (SHP) oraz opcjonalna telemetria przez sieć GSM (bez limitu zasięgu) podkreślają profesjonalny i w pełni autonomiczny charakter systemu.

Tabela 5

Parametry techniczne drona o konstrukcji płatowca ecoSKY 2.0

Parametry drona	Opis
Procedura startu i lądowania	pionowo
Po osiągnięciu wysokości docelowej BSP	przejście w lot poziomy
Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP)	napędzany wyłącznie silnikami elektrycznymi
Minimalna ładowność	co najmniej 1400 g
Minimalny czas unoszenia się w powietrzu	z ładunkiem nie mniej niż 120 min
Zakres pracy BSP w temperaturach	$0\text{--}40^{\circ}\text{C}$
Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP) o maksymalnej masie startowej (MTOM)	16 kg
Funkcja powrotu BSP do punktu startu (Return To Home) w przypadku utraty sygnału między nadajnikiem a odbiornikiem bądź inną przyczyną niezależną od operatora, na żądanie pilota w każdej fazie lotu	TAK
Minimalna prędkość przelotowa	$22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)
Odporność na wiatr podczas startu i lądowania	$5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Odporność na wiatr podczas lotu poziomego	$14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Zasięg danych telemetrycznych	20 km lub przy użyciu danych GSM bez limitu km
Bezzałogowy statek powietrzny kamera	wyposażony w kamerę RGB służącą do przesyłania obrazu
Bezzałogowy statek powietrzny adaptacja innej aparatury	podłączenie i obsługa sensora ALTUM-PT (kompatybilny z danym urządzeniem w celu zbierania danych podczas wykonywania lotów autonomicznych)

cd. tab. 5

Parametry drona	Opis
Stopień ochrony	co najmniej ochrona przez pyłem, co najmniej ochrona przed bryzgami wody z dowolnego kierunku
Zestaw akumulatorów	2 sztuki (akumulator lub kilka akumulatorów, wykonanie jednego pełnego lotu o długości przynajmniej 120 min
Zestaw wyposażony w ładowarkę	ładowanie 2 baterii w tym samym czasie „jednocześnie” (kompatybilna z dostarczonymi zestawami baterii)
Zestaw BSP aparatura sterująca	zdolny do przeprowadzenia lotu sterowanego za pomocą aparatury sterującej (nadajnika) przez pilota oraz lotów autonomicznych
Aparatura sterująca	zapewnia możliwość planowania automatycznych lotów na podstawie pliku wektorowego o rozszerzeniu .SHP (wgranego do aparatury)
Zestaw BSP	zdolny do przeprowadzenia lotu autonomicznego (zaprogramowanego i wgranego przez oprogramowanie dedykowane do planowania misji fotogrametrycznych)
2. Opracowanie własnej ortofotomapy	tak
3. Nadanie prawidłowej georeferencji	
4. Edycja ortofotomapy, praca z fotopunktami i punktami kontrolnymi, edycja mozaikowania	
5. Eksport produktów przetwarzania do zewnętrznych programów	
6. Generowanie i opracowywanie mapy warstwicznej	

Źródło: <https://www.bzbuas.com/pl>

Do drona o konstrukcji płatownia podczepiono kamerę multispektralną firmy Micasense model Altum-PT (rys. 4).



Rys. 4. Kamera multispektralna wykorzystana w doświadczeniu

Źródło: <https://navigate.pl/produkt/micasense-altum-pt/>

Kamera wykorzystana do wykonywania zobrażeń dużych obszarów rolnych model Altum-PT marki Micasense to innowacyjny zestaw sensorów przeznaczonych dla rolnictwa precyzyjnego. Kamera ta pozwoliła na uzyskanie dokładnego odwzorowania cech morfologicznych roślin oraz temperatury powierzchni czynnej roślin. Kamera składa się z 7 sensorów – niebieskiego, zielonego, czerwonego, czerwonej krawędzi (red edge) bliskiej podczerwieni (near IR), kanału LWIR (obraz termalny Long-Wave Infrared) oraz kanału panchromatycznego. Kanał LWIR to wysokiej rozdzielczości sensor pozwalający ze znaczną dokładnością ocenić jędrność aparatu asymilacyjnego oraz zaopatrzenie siedliska w wodę. Pozwala również na ocenę rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni czynnej w uprawach. Kanał panchromatyczny natomiast rejestruje całość promieniowania z zakresu widzialnego, co pozwala na wyostrażanie obrazów spektralnych (zwiększenie rozdzielczości). Zastosowanie w kamerze migawki globalnej sprawiło, że otrzymany obraz z wszystkich kanałów spektralnych jest wolny od zniekształceń, co pozwoliło na bezbłędne połączenie wszystkich pasm spektralnych w czytelną ortomozaikę. W tabeli 6 przedstawiono specyfikację techniczną zaawansowanego sensora Altum-PT. Jest to zintegrowana (hybrydowa) jednostka pomiarowa, która wyróżnia się jednoczesną akwizycją danych z trzech różnych typów sensorów: kamery multispektralnej (5 kanałów), kamery panchromatycznej (12 MP) oraz kalibrowanego radiometrycznie sensora termowizyjnego LWIR. Taka konfiguracja jest kluczowa dla zaawansowanej teledetekcji rolniczej. Pięć kanałów spektralnych (w tym kluczowe dla oceny kondycji roślin red edge

i near IR) o rozdzielczości 3.2 MP pozwala na precyzyjne obliczanie wskaźników vegetacyjnych. Jednoczesne pozyskiwanie danych z kanału termowizyjnego (LWIR) umożliwia ocenę stresu wodnego roślin i niedoborów wody w glebie (np. poprzez mapowanie temperatury łanu). Unikalną cechą tego modelu, kluczową dla badań, jest kanał panchromatyczny o bardzo wysokiej rozdzielczości (12 MP). Pozwala on na zastosowanie techniki pansharpeningu (wyostrzania), która łączy wysoką rozdzielczość przestrzenną obrazu panchromatycznego z informacją spektralną z pozostałych kanałów. Umożliwia to osiągnięcie wynikowej rozdzielczości terenowej (GSD) na poziomie zaledwie $2,49 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$ (przy locie na 120 m AGL), co jest wartością ponad dwukrotnie lepszą niż standardowe GSD kanałów spektralnych ($5,28 \text{ cm/piksel}$). Tak wysoka rozdzielczość pozwala na identyfikację bardzo małych obiektów, wczesnych objawów chorobowych czy precyzyjną analizę struktury łanu. Sensor charakteryzuje się również wysoką szybkością akwizycji ($2 \text{ klatki} \cdot \text{s}^{-1}$) z zapisem na szybkich nośnikach CFexpress oraz stopniem ochrony IP4X, co kwalifikuje go do profesjonalnych zastosowań w zmiennych warunkach polowych.

Tabela 6

Główne parametry techniczne kamery multispektralnej Altum-PT

Parametry techniczne	Altum-PT
Waga	577 g
Wymiary	$11,0 \times 8,0 \times 6,9 \text{ cm}$
Zasilanie	7,0 V–25,2 V
Moc	5,5/7,0/10 W (czuwanie, średnia, pik)
Kanały spektralne	niebieski (centrum kanału 475 nm, szerokość kanału 32 nm), zielony (centrum kanału 560 nm, szerokość kanału 27 nm), czerwony (centrum kanału 668 nm, szerokość kanału 14 nm), czerwona krawędź (centrum kanału 717 nm, szerokość kanału 12 nm), bliska podczerwień (centrum kanału 842 nm, szerokość kanału 57 nm)
Kanał termalny LWIR	FLIR LWIR termalny podczerwony 7,5–135 μm o kalibracji radiometrycznej
Rozdzielczość kanałów	2064×1544 (3.2 MP kanały spektralne), 4112×3008 (12 MP kanał panchromatyczny), 320×256 termalny podczerwony
Multispec GSD @120m (kanał spektralny)	$5,28 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$
Panchro & Pansharpened GSD @120m	$2,49 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$
Termalny GSD @120m	$33,5 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$

cd. tab. 6

Parametry techniczne	Altum-PT
Czas zapisu (wszystkie kanały, RAW, DNG format)	zapis 2 klatki na sekundę w formacie raw DNG
Pole widzenia	50° HFOV × 38° VFOV (MS), 46° HFOV × 35° VFOV (PAN), 48° × 40° (LWIR)
Pamięć	CFexpress Card
Odporność IP	IP4X
Interfejs	3 konfigurowalne piny GPIO (ang. <i>General Purpose Input/Output</i>): do wyboru wejście wyzwalające (trigger), wejście PPS, wyjście PPS oraz sygnały początku ramki (top of frame); wirtualny przycisk hosta. Port USB 2.0 do obsługi WiFi. Port szeregowy. Ethernet 10/100/1000; pamięć masowa na kartach CFexpress

Źródło: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/4419868608407-Altum-PT-Integration-Guide>

Dobór aparatury badawczej został podyktowany koniecznością wdrożenia wieloskalowej strategii akwizycji danych umożliwiającej zarówno efektywne mapowanie rozległych obszarów rolnych (pola towarowe), jak i prowadzenie precyzyjnych, punktowych nalotów na wyznaczonych poletkach badawczych w mikroskali (mikropoletka).

Uzasadniając wybór bezzałogowych platform przyjęto system z wykorzystaniem dwóch platform, aby zoptymalizować przebieg doświadczeń. Wybór płatowca pionowego startu i lądowania (VTOL) był podyktowany wymogiem efektywności operacyjnej na dużych wysokościach mogących skanować duży obszar. Kluczowym parametrem był długi czas lotu wynoszący ponad 120 min przy zachowaniu ładowności 1400 g, co pozwalało na mapowanie setek hektarów gruntów ornych podczas jednego przelotu. Wysoka prędkość przelotowa wynosząca niemal 80 km·h⁻¹ oraz znacząca odporność na wiatr (w porywach do 14 m·s⁻¹) gwarantowały możliwość prowadzenia badań w realnych warunkach polowych. Zdolność do planowania misji na podstawie plików wektorowych z rozszerzeniem SHP oraz opcjonalna telemetria GSM czyniły z wykorzystanego płatowca podstawowe narzędzie do strategicznego monitoringu całych gospodarstw, w tym rolniczych zakładów doświadczalnych, których powierzchnie często wynosiły od 200 do nawet 1500 ha.

Wybór heksakoptera podyktowany był koniecznością posiadania platformy o wysokiej stabilności i dużym udźwigu, o ładowności wynoszącej ponad 5 kg. Chociaż czas lotu z ładunkiem był znacznie krótszy w porównaniu z płatowcem (16–18 minut), platforma ta była niezbędna do przenoszenia ciężkich, zaawansowanych sensorów wielospektralnych (jak Altum-PT). Jej zdolność do zawisu oraz wysuwane

podwozie umożliwiając prowadzenie elastycznych, niskopułapowych nalogów spektralnych, akwizycję danych z różnych kątów oraz inspekcję stref problematycznych wykrytych podczas nalogów strategicznych. Dobór sensorów spektralnych wykonano pod kątem zróżnicowania celów badawczych – od standardowej oceny wegetacji po zaawansowaną diagnostykę stresu suszy w roślinach. Sensor Altum-PT był wybrany jako kluczowy, hybrydowy sensor badawczy. Jego wybór uzasadniony był obecnością sensorów termowizyjnego (LWIR), panchromatycznego i RedEdge. Posiadanie kalibrowanego radiometrycznego kanału termalnego było niezbędne do naukowej oceny stresu wodnego, umożliwiając mapowanie temperatury łanu, co jest bezpośrednio powiązane z transpiracją i otwarciem aparatów szparkowych. Wykorzystanie sensora panchromatycznego umożliwiło zastosowanie techniki pansharpeningu, co skutkowało wysoką rozdzielczością przestrzenną (GSD) na poziomie ok. $2,5 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$ (z wysokości ok. 120 m AGL). Taka rozdzielczość była wymagana do wczesnej detekcji objawów chorobowych oraz precyzyjnej analizy morfologicznej nawet pojedynczych roślin. Wysoka rozdzielczość radiometryczna przesądziła o wyborze całej kamery. Sensor ten gwarantował pozyskanie danych o wysokiej czułości, niezbędnych do subtelnej analizy różnic w odbiciu spektralnym. Z kolei obecność sensora RedEdge-M jako standardowego sensora referencyjnego (workhorse) w projekcie była priorytetem. Jego wybór uzasadniony był niską masą oraz obecnością pięciu kluczowych z punktu widzenia badań rolniczych pasm spektralnych (w tym Red Edge i NIR). Kanały te były fundamentem dla kalkulacji podstawowych wskaźników wegetacyjnych (np. NDVI, NDRE) służących do oceny biomasy i zawartości chlorofilu. Niska waga i niewielkie rozmiary czyni go idealnym wyborem dla platformy płatowca EcoSKY 2.0, gdzie priorytetem była maksymalizacja czasu lotu i zmieszczenie aparatury pomiarowej we wnętrzu kadłuba statku powietrznego. Zastosowany system dwuplatformowy i dwusensorowy pozwolił na wdrożenie metodologii „zoom-in/zoom-out”. Platforma płatowca wyposażonego w lekki sensor służyła do szybkiej identyfikacji anomalii na dużym obszarze, natomiast platforma wielowirnikowa wyposażona w zaawansowany sensor hybrydowy była wykorzystywana do precyzyjnej, niskopułapowej diagnostyki zidentyfikowanych stref, dostarczając danych termalnych i obrazów o ultrawysokiej rozdzielczości do diagnostyki poziomu pojedynczej rośliny.

Dzięki zastosowaniu kamer spektralnych, możliwe było uzyskanie opracowań dotyczących:

- a) map pokrycia terenu przez rośliny,
- b) map zawartości barwników roślinnych,
- c) map stanu zdrowotnego i fazy rozwojowej roślin,
- d) map indeksów wegetacyjnych (NDVI, NDRE, MCARI, SAVI i in.),
- e) map rozkładu temperatury powierzchni czynnej,
- f) map wilgotności wierzchniej warstwy gleby,
- g) ortofotomozaiki.

Dzięki dostarczeniu wysokiej rozdzielczości danych spektralnych możliwe było obliczenie indeksów wegetacyjnych. Metoda ta pozwoliła na obrazowanie środowiska rolniczego – dotyczącego obliczania różnego rodzaju indeksów u roślin uprawnych oraz analizę uwilgotnienia gleby. Nowoczesna technologia obrazowań multispektralnych pozwoliła na uzyskanie analizy w bardzo krótkim czasie, dzięki uzyskaniu indeksu takiego jak NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*), na podstawie którego możliwe było zaobserwowanie zmian zachodzących w uprawach rolnych. Ponadto z wysokości przelotowej bezzałogowego statku powietrznego możliwe było obserwowanie różnic w odżywieniu roślin wynikających ze zmienności gleb, monitorowanie stanu zdrowia roślin, określanie szkód wyrządzonych przez agrofagi, grzyby, straty łowickie itp.

Dokonano zobrazowania różnic stanu zdrowia roślin (wywołanych głównie niedoborem wody w środowisku glebowym) dzięki zestawieniu proporcji światła odbitego od roślin i przechwyconego w pasmach: czerwonym, zielonym, niebieskim oraz w bliskiej podczerwieni. Na podstawie odbicia światła rośliny dobrze zaopatrzone w składniki pokarmowe i wodę różniły się w stosunku do roślin niedostatecznie odżywionych lub chorych. Rośliny zdrowe, dobrze zaopatrzone w wodę i składniki odżywcze odbijały światło zielone oraz światło bliskiej podczerwieni (NIR, ang. *Near-infrared*) w większym stopniu niż rośliny słabiej odżywione czy chore.

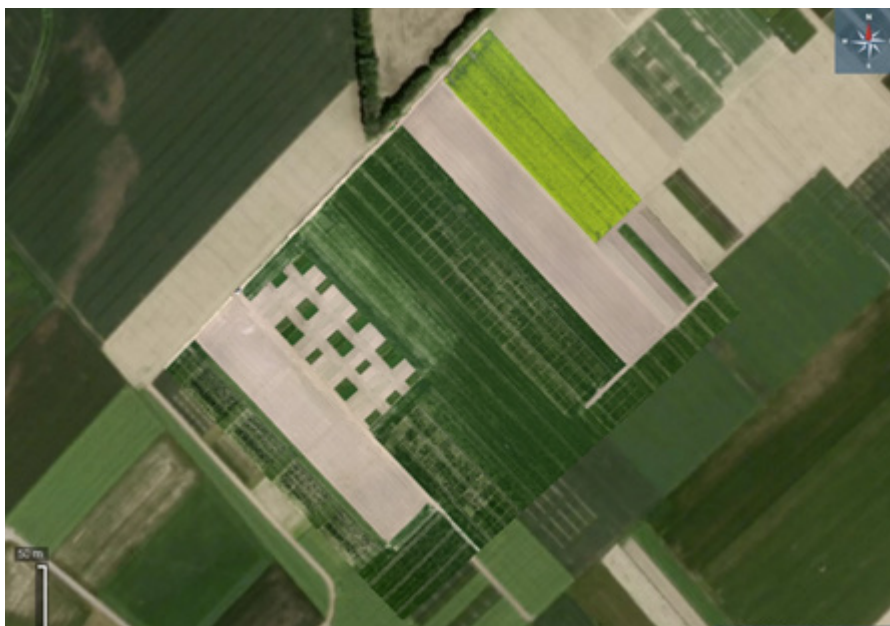
Ocena faz fenologicznych i ogólnej kondycji roślin z elementami uczenia maszynowego

Do oceny zdrowotności roślin wykorzystano wskaźnik NDVI pozyskany z niskopułapowych obrazowań środowiska rolniczego z wykorzystaniem pasm spektralnych.

Teledetekcja niskopułapowa pozwoliła m.in. na bardziej precyzyjne wyznaczenie zdrowotności roślin w obrębie danego pola bądź uprawy w porównaniu z metodami tradycyjnymi – kosztownymi, opartymi na pomiarach punktowych. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej kombinacji charakterystyk spektralnych możliwe było obliczenie wybranych wskaźników, umożliwiając ilościową i jakościową analizę stanu roślinności, na podstawie których zaobserwowano zmiany zachodzące w uprawach.

Do walidacji oceny faz fenologicznych oraz ogólnej kondycji roślin wykorzystano zobrazowania pola w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie wykonane w trzech terminach: w kwietniu, maju oraz lipcu, ukazane na rysunkach 5–7. Zobrazowania w każdym z 3 terminów wykonano z wykorzystaniem 8 pasm spektralnych (parametry techniczne obrazowań umieszczono w tab. 7–9).

Zobrazowania zostały wykonane z wysokości 100 m AGL i połączone z ok. 20000 zdjęć w jedną ortofotomapę dla każdego z trzech terminów. Na podstawie ortofotomap zostały wygenerowane mapy refleksyjności.



Rys. 5. Ortofotomapa pól wykonana 29 kwietnia 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

Tabela 7

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 29 kwietnia 2024 roku

Czas	29.04.2024; godz. 13:15
Pozycja (WGS84)	51,3488235; 21,6633996
Obszar	8,802 ha
Wielkość piksela	2,209 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Ortofotomapa pól wykonana 20 maja 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 20 maja 2024 roku

Czas	20.05.2024; godz. 11:01
Pozycja (WGS84)	51,3492206; 21,6647263
Obszar	13,067 ha
Wielkość piksela	2,244 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Ortofotomapa pól wykonana 11 lipca 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

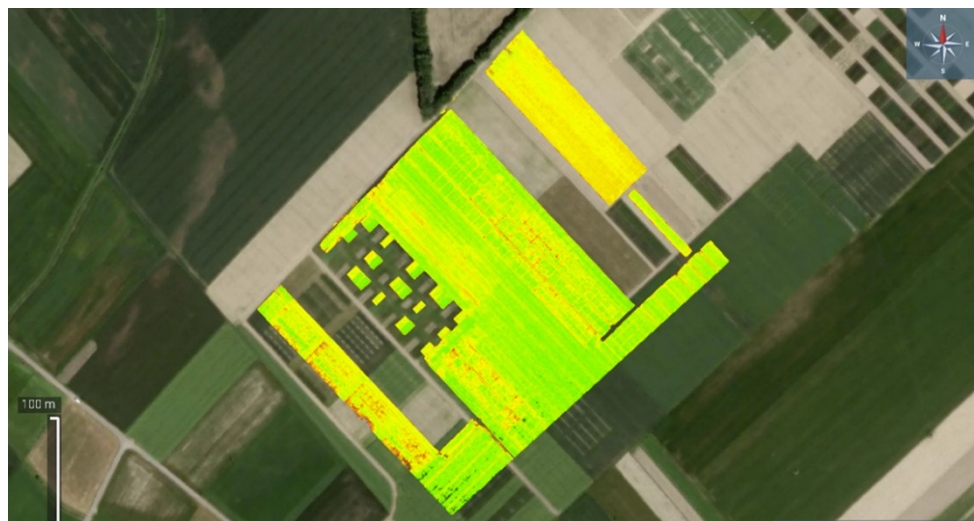
Tabela 9

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 11 lipca 2024 roku

Czas	11.07.2024; godz. 10:12
Pozycja (WGS84)	51,3488633; 21,6643870
Obszar	17,069 ha
Wielkość piksela	2,224 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne

Pierwszym z walidowanych pól pod kątem ogólnej oceny kondycji roślin i określenia fazy fenologicznej było zobrazowanie pola pszenicy w formie ortofotomapy (rys. 8) o parametrach technicznych (tab. 7) wykonane w dniu 29 kwietnia.



Rys. 8. Obraz NDVI pól wykonany 29 kwietnia 2024 roku w RZD Grabów
Źródło: opracowanie własne

W celu określenia poszczególnych faz fenologicznych oraz oceny ogólnej kondycji roślin wykorzystano wyniki wskaźnika NDVI (tab. 10.). Podczas oceny pominięto pola przygotowane do uprawy (odkrytą glebę).

Tabela 10
Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 29 kwietnia 2024 roku

Źródła warstwy

Pozyskanie	4/29/24 1:15:18 PM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3488235; 21,6633996 (WGS84)
Powierzchnia	~8,787 ha
Piksel terenowy	2,209 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

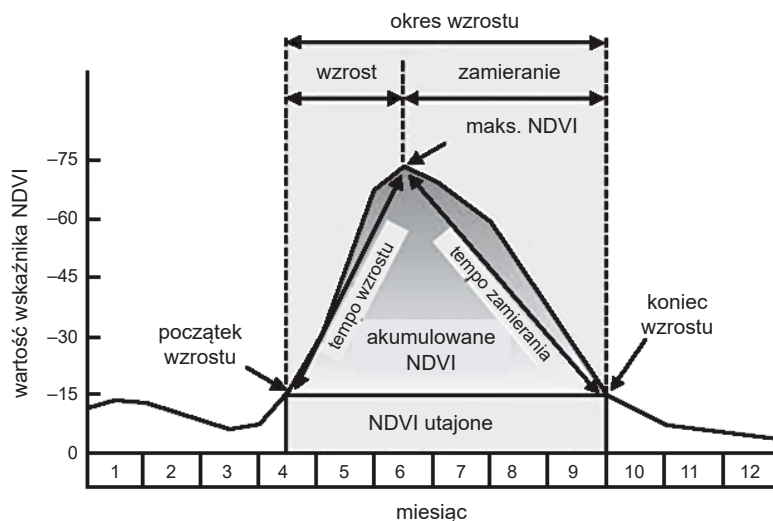
Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,423
Wybrana wartość maksymalna:	0,938
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	8,787 ha
Średnia indeksu:	0,567
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,327
Średnia indeksu (widoczne):	0,789
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,118

Źródło: opracowanie własne

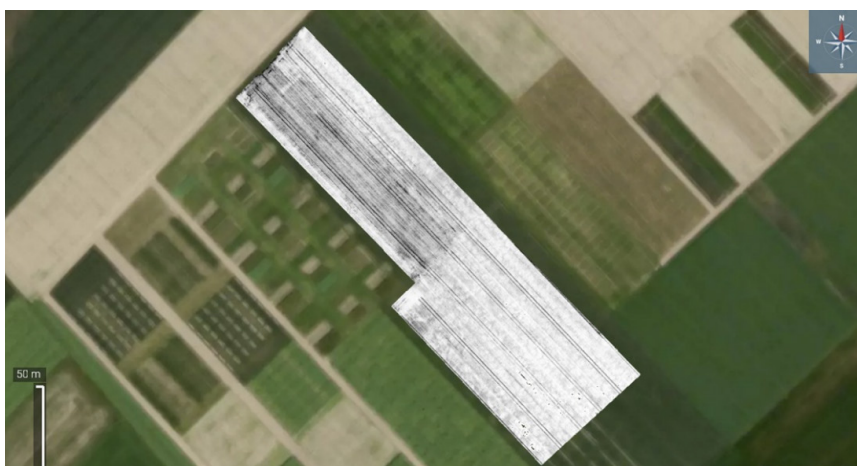
Dzięki zastosowaniu technik opartych na podstawie refleksyjności oraz klucza do określania poszczególnych faz fenologicznych, możliwe było określenie fazy fenologicznej danej uprawy (rys. 9).



Rys. 9. Histogram rozwoju faz fenologicznych upraw

Źródło: sat4envi.imgw.pl POLSA

Wyszczególniony obraz spektralny pola pszenicy dał możliwość zagłębienia się w struktury komórkowe roślin (rys. 10) i na podstawie odbicia spektralnego ukazanego w tabeli 11 określono fazę fenologiczną badanej uprawy.



Rys. 10. Obraz odbicia spektralnego wskaźnika NDVI kluczowego do określenia fazy fenologicznej

Źródło: opracowanie własne

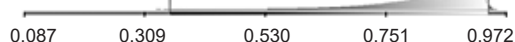
Tabela 11

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania wskaźnika NDVI
z dnia 29 kwietnia 2024 r.

Źródła warstwy

Pozyskanie	4/29/24 1:15:18 PM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3486668; 21,6633029 (WGS84)
Powierzchnia	~1,598 ha
Piksel terenowy	2,209 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

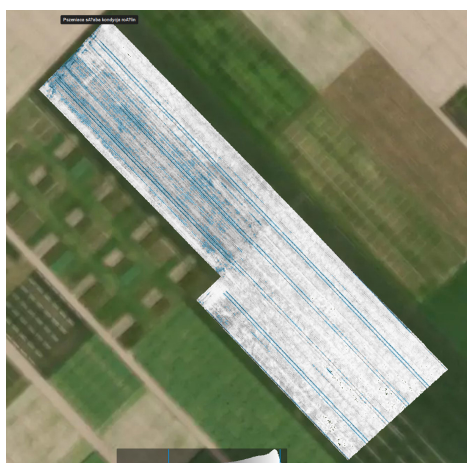
Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,355
Wybrana wartość maksymalna:	0,939
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	1,598 ha
Średnia indeksu:	0,833
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,102
Średnia indeksu (widoczne):	0,834
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,095

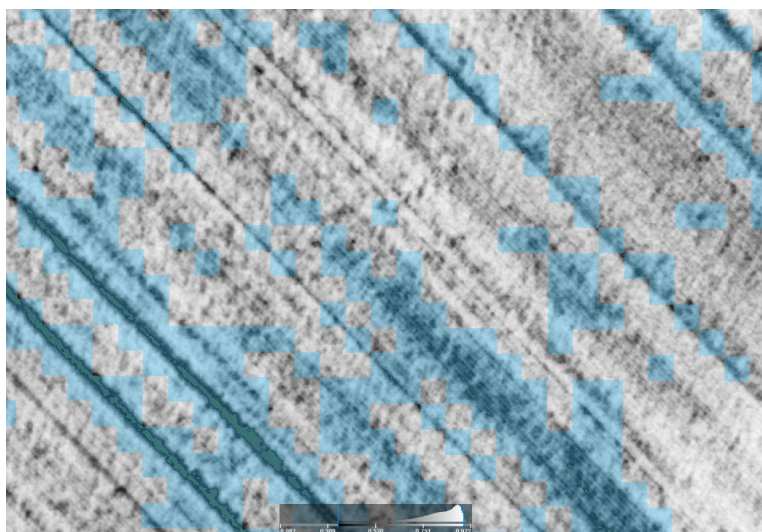
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie klucza oraz po analizie wykonanych zobrazowań spektralnych określono fazę fenologiczną pszenicy na 30-32 w skali BBCH (ang. *Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt und Chemische Industrie*). Następnie dokonano oceny ogólnej kondycji roślin, wykorzystując uczenie maszynowe. W tym celu na zobrazowanej mapie poligonu pszenicy (rys. 11) zaznaczono fragmenty pola, których średnie odbicie nie przekraczało 0,7 i mieściło się w zakresie 0–0,6 (rys. 12.), dzięki czemu uzyskano wynik roślin o dobrej i złej kondycji (rys. 13)



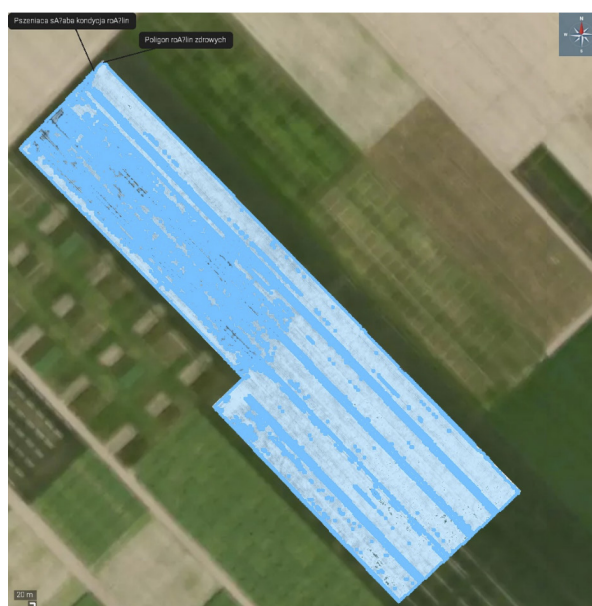
Rys. 11. Całe pole pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem udziałem roślin o złej kondycji (wartości NDVI < 0,2)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 12. Wybrany przybliżony fragment pola pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem udziałem roślin o złej kondycji (wartości NDVI < 0,2)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 13. Wynik udziału roślin pszenicy o złej oraz dobrej kondycji

Źródło: opracowanie własne

Dzięki zestawieniu obrazów pasm spektralnych wyznaczony został areał upraw o udziale roślin zdrowych oraz znacznie mniejszym udziale roślin o słabej i złej kondycji (tab. 12).

Tabela 12

Udział powierzchni z rozróżnieniem na rośliny zdrowe i o złej kondycji

Nazwa	Typ	Wielkość areалу (ha)	kolor
Udział roślin zdrowych	obszar	1,187	niebieski jasny
Udział roślin o złej kondycji	obszar	0,235	niebieski ciemny

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie specjalistycznego oprogramowania do oceny odbicia została wygenerowana mapa z podziałem na siedem stref (od bardzo dobrej do złej kondycji zdrowotnej roślin), na podstawie której, wygenerowano mapę dotyczącą potrzeb zasilenia roślin azotem (rys. 14). Można ją było zaimplementować do opryskiwaczy lub rozsiewaczy wyposażonych w instrumenty z możliwością zastosowania zmiennych parametrów nawożenia (odłączane sekcje dyszy opryskiwaczy, system rozsiewu granicznego czy przełączanie sekcji szerokości rozsiewania).

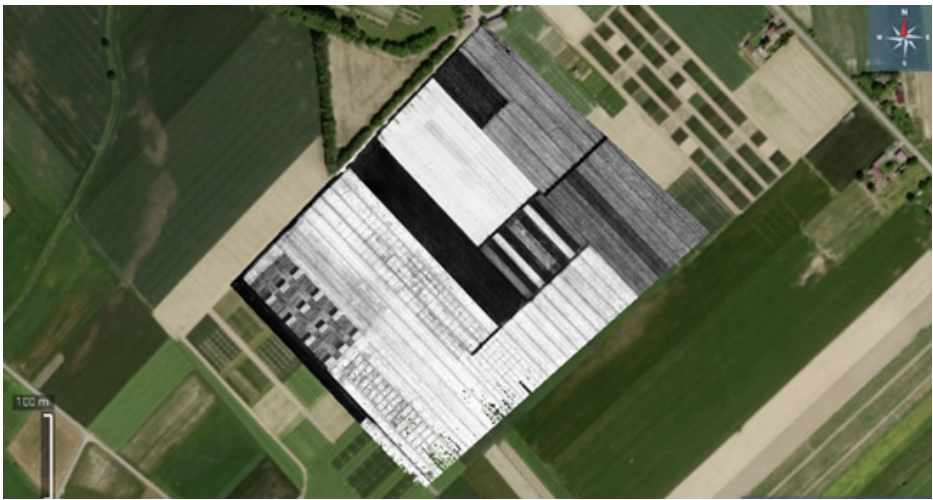


Rys. 14. Wygenerowana mapa pola pszenicy z rozróżnieniem siedmiu stref dotyczących potrzeb nawozowych

Źródło: opracowanie własne

Podobną ocenę wykonano dla zobrażeń sporządzonych w terminie majowym i lipcowym.

Kolejnym z walidowanych pól pod kątem oceny ogólnej kondycji roślin i określenia fazy fenologicznej było pole pszenicy, którego zobrazowanie zostało wykonane w dniu 20 maja (rys. 15).



Rys. 15. Obraz NDVI pól wykonany 20 maja 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

W celu dokonania określenia poszczególnych faz fenologicznych oraz oceny ogólnej kondycji roślin wykorzystano wyniki wskaźnika NDVI (tab. 13).

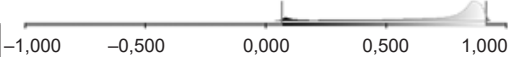
Tabela 13

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 20 maja 2024 roku

Źródła warstwy

Pozyskanie	5/20/24 11:01:03 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3492206; 21,6647263 (WGS84)
Powierzchnia	~13,047 ha
Piksel terenowy	2,244 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

Wyrównanie histogramu:	wylączone
Wybrana wartość minimalna:	0,068
Wybrana wartość maksymalna:	0,915
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	13,047 ha
Średnia indeksu:	0,593
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,284
Średnia indeksu (widoczne):	0,590
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,280

Źródło: opracowanie własne

Wyszczególniony obraz spektralny pola pszenicy dał możliwość zagłębienia się w obraz refleksyjności (rys. 16) i na podstawie odbicia spektralnego ukazanego w tabeli 14 określono fazę fenologiczną badanej uprawy.



Rys. 16. Obraz odbicia spektralnego wskaźnika NDVI kluczowego do określenia fazy fenologicznej

Źródło: opracowanie własne

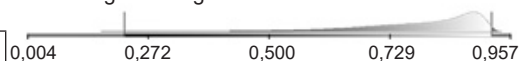
Tabela 14

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania wskaźnika NDVI z dnia 20 maja 2024 r.

Źródła warstwy

Pozyskanie	5/20/24 11:01:03 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3485631; 21,6633703 (WGS84)
Powierzchnia	~1,752 ha
Piksel terenowy	2,244 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,228
Wybrana wartość maksymalna:	0,921
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	1,752 ha
Średnia indeksu:	0,790
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,128
Średnia indeksu (widoczne):	0,791
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,124

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie klucza oraz po analizie wykonanych zobrazowań spektralnych określono fazę fenologiczną pszenicy na 51-52 w skali BBCH (pobierano próbki odbicia spektralnego ze zróżnicowanych miejsc i na podstawie średniej refleksyjności stworzono klucz fotointerpretacyjny oraz określono fazę fenologiczną).

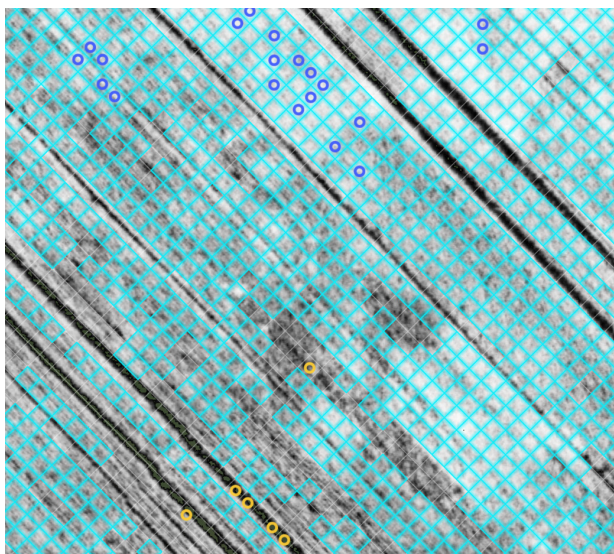
Następnie dokonano oceny ogólnej kondycji roślin, wykorzystując uczenie maszynowe.

W tym celu na zobrazowanej mapie poligonu pszenicy (rys. 17) zaznaczono fragmenty upraw, których średnie odbicie nie przekraczało 0,7 i mieściło się w zakresie 0–0,6 (rys. 18.), dzięki czemu uzyskano mapę rozkładu przestrzennego roślin o dobrej i złej kondycji (rys. 19).



Rys. 17. Całe pole pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem udziałem roślin o dobrej kondycji (wartości NDVI < 0,2)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 18. Wybrany przybliżony fragment pola pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem kwadratów udziałem roślin o dobrej kondycji (wartości NDVI $< 0,2$)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 19. Wynik udziału roślin pszenicy o złej oraz dobrej kondycji

Źródło: opracowanie własne

Dzięki zestawieniu obrazów pasm spektralnych został wyznaczony areal upraw o udziale roślin zdrowych oraz znacznie mniejszym udziale roślin o słabej i złej kondycji (tab. 15).

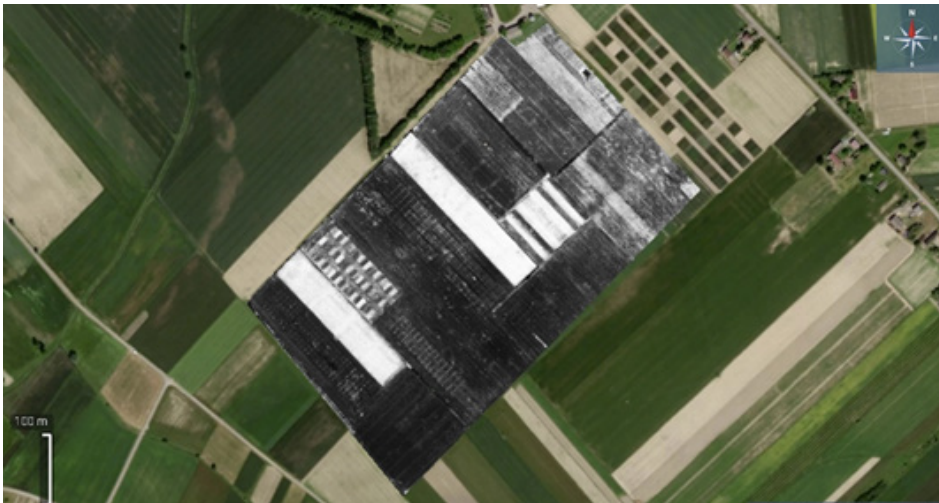
Tabela 15

Udział powierzchni z rozróżnieniem na rośliny zdrowe i o złej kondycji

Nazwa	Typ	Wielkość arealu w ha	Kolor
Udział roślin zdrowych	obszar	1,417	niebieski ciemny
Udział roślin o złej kondycji	obszar	0,335	niebieski jasny

Źródło: opracowanie własne

Ostatnią ocenę sporządzono dla zobrazowań wykonanych w terminie lipcowym. Trzecim z walidowanych pól pod kątem oceny ogólnej kondycji roślin i określenia fazy fenologicznej było pole pszenicy, którego zobrazowanie zostało wykonane w dniu 11 lipca (rys. 20).



Rys. 20. Obraz NDVI pól wykonany 11 lipca 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

W celu określenia poszczególnych faz fenologicznych oraz dokonania oceny ogólnej kondycji roślin wykorzystano wyniki wskaźnika NDVI (tab. 16).

Tabela 16

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 11 lipca 2024 roku

Źródła warstwy

Pozyskanie	7/11/24 10:12:34 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3488633; 21,6643870 (WGS84)
Powierzchnia	~17,046 ha
Piksel terenowy	2,224 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

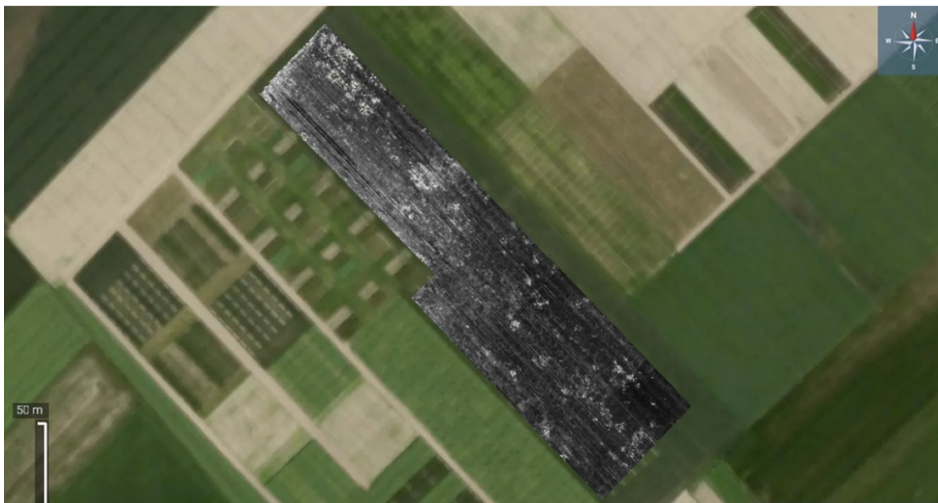
Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,080
Wybrana wartość maksymalna:	0,946
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	17,046 ha
Średnia indeksu:	0,403
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,247
Średnia indeksu (widoczne):	0,402
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,244

Źródło: opracowanie własne

Uzyskano obraz spektralny pola pszenicy (rys. 21), na podstawie którego została dokonana ocena odbicia spektralnego ukazanego w tabeli 17, dzięki czemu określono fazę fenologiczną badanej uprawy.



Rys. 21. Obraz odbicia spektralnego wskaźnika NDVI kluczowego do określenia fazy fenologicznej

Źródło: opracowanie własne

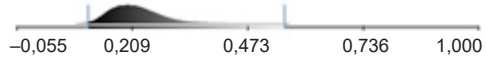
Tabela 17

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania wskaźnika NDVI z dnia 11 lipca 2024 r.

Źródła warstwy

Pozyskanie	7/11/24 10:12:34 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3485212; 21,6634486 (WGS84)
Powierzchnia	~1,777 ha
Piksel terenowy	2,224 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,109
Wybrana wartość maksymalna:	0,557
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	1,777 ha
Średnia indeksu:	0,233
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,088
Średnia indeksu (widoczne):	0,229
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,073

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie klucza fotointerpretacyjnego oraz po analizie wykonanych zobrazowań spektralnych określono fazę fenologiczną pszenicy na 89-92 w skali BBCH (pobierano próbki odbicia spektralnego ze zróżnicowanych miejsc i na podstawie średniej z odbicia określono fazę fenologiczną).

W fazie BBCH 90 nie dokonywano ogólnej oceny kondycji roślin, ponieważ zasychały, a ich wilgotność wahała się w granicach 14–17%.

Po przeprowadzonej dogłębnej analizie uzyskanych danych można stwierdzić, że wyniki otrzymane poprzez wykonanie zobrazowań w różnych terminach tego samego obiektu uzyskane metodą teledetekcji multispektralnej w zdecydowanej większości dają możliwość swobodnej interpretacji w celu określenia fazy fenologicznej oraz oceny ogólnej kondycji roślin.

Ocena wystąpienia i oszacowania szkód wyrządzonych przez zwierzęta przy wykorzystaniu elementów uczenia maszynowego

Materiałem źródłowym do opracowania map były dane pozyskane z nalogów spektralnych uzyskane za pomocą kamery multispektralnej zamontowanej na bezzałogowym statku powietrznym. Celem badań było oszacowanie szkód wyrządzonych przez zwierzęta przy wykorzystaniu metod uczenia maszynowego. Na podstawie map spektralnych zidentyfikowano i porównano kondycję roślin uprawnych oraz tych uszkodzonych mechanicznie, uwzględniając procentowy udział zniszczeń. Badania

prorowadzone były w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie n. Wisłą na dużych polach produkcyjnych.

Na zobrazowaniu RGB (rys. 22) widoczne jest pole rzepaku z częściowo występującymi uszkodzeniami mechanicznymi.



Rys. 22. Pole rzepaku z częściowo występującymi uszkodzeniami mechanicznymi widocznymi na obrazie ortofotomapy

Źródło: opracowanie własne

W ramach badania przeprowadzono analizę pozyskanego zobrazowania z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania mającego na celu wykazać procentowy udział strat spowodowanych uszkodzeniem mechanicznym roślin rzepaku mogący przyczynić się do obniżenia plonu. W tym celu wskazano miejsca o zwiększonym udziale uszkodzonych roślin. W ramach badania przeprowadzono naukę maszynową, dzięki której nauczono maszynę rozpoznawać miejsca występowania uszkodzeń. Algorytm uczenia maszynowego po analizie danych wejściowych wprowadzonych pod nadzorem (klasyfikacja uczenia maszynowego pod nadzorem) dokonał obliczeń i wskazał wszystkie uszkodzenia na badanym poligonie według ortofotomapy (rys. 23) i uzupełnionym o uszkodzenia według indeksu MCARI (rys. 24) o parametrach technicznych zobrazowania (tab 18).



Rys. 23. Pole rzepaku z częściowo występującymi uszkodzeniami mechanicznymi wskazanymi przez uczenie maszynowe na obrazie RGB

Źródło: opracowanie własne



Rys. 24. Pole rzepaku z uzupełnieniem uszkodzeń sklasyfikowanych przez uczenie maszynowe na obrazie MCARI

Źródło: opracowanie własne

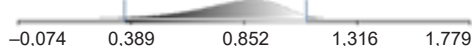
Tabela 18

Parametry techniczne zobrazowania MCARI

Źródła warstwy

Pozyskanie	5/20/24 11:01:03 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3501337; 21,6645372 (WGS84)
Powierzchnia	~1,431 ha
Piksel terenowy	2,244 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,363
Wybrana wartość maksymalna:	1,108
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	1,431 ha
Średnia indeksu:	0,864
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,158
Średnia indeksu (widoczne):	0,863
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,146

Źródło: opracowanie własne

Z przeprowadzonego doświadczenia wynika, że udział uszkodzeń mechanicznych na badanym polu wyrażony za pomocą kwadratów o specyficznym odbiciu spektralnym wyniósł ok. 1,46 % co znacząco nie wpłynęło na ogólny plon rzepaku. W tabeli 19 przedstawiono powierzchniowy udział uszkodzeń mechanicznych rzepaku wynoszący 209 m² z 14310 m².

Tabela 19

Udział uszkodzeń mechanicznych rzepaku na badanym poligonie

Nazwa	Typ	Wielkość areалу	Kolor
Uszkodzenia mechaniczne	obszar	209,880 m ²	niebieski jasny

Źródło: opracowanie własne

Uczenie maszynowe to dziedzina sztucznej inteligencji, która zrewolucjonizowała rozpoznawanie strat łowieckich na podstawie oznakowania charakterystycznych danych. Algorytm uczenia maszynowego (ML) został przetestowany na dużych zbiorach danych zawierających obrazy różnych rodzajów uszkodzeń roślin spowodowanych dziką zwierzyną, klasyfikując cechy tych uszkodzeń na typ uszkodzenia, stopień uszkodzenia oraz cechy charakterystyczne uszkodzenia dla danego gatunku zwierząt. Dzięki zastosowaniu tego typu rozwiązań możliwe będzie coraz dokładniejsze szacowanie strat łowieckich i ich klasyfikowanie bez konieczności analizy in-situ.

Ocena wystąpienia i oszacowania szkody spowodowanej chorobami roślin przy wykorzystaniu elementów uczenia maszynowego

Materiałem źródłowym do opracowania map były dane pozyskane z naltów spektralnych, uzyskane za pomocą kamery multispektralnej zamontowanej na bezzałogowym statku powietrznym. Celem prowadzonych badań dotyczących oceny wystąpienia i oszacowania szkody spowodowanej przez choroby roślin, uwzględniając czynnik procentowego udziału choroby na polu produkcyjnym (procentowy udział wystąpienia choroby) i bazując na elementach uczenia maszynowego, było porównanie kondycji roślin uprawnych obejmujących czynnik chorobowy. Do badań wykorzystano mapy obrazowań spektralnych uzyskanych z naltów spektralnych. Badania prowadzone były w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie n. Wisłą na dużych polach produkcyjnych.

Na obrazowaniu RGB przedstawionym na rysunku 25, o parametrach obrazowania ukazanych w tabeli 20, widoczne jest pole pszenicy gotowej do zbioru z częściowo występującym zachwaszczeniem (przebijający się kolor zielony).



Rys. 25. Obraz RGB pola pszenicy ozimej do zbioru wykonany w lipcu 2024 roku w RZD Grabów
Źródło: opracowanie własne

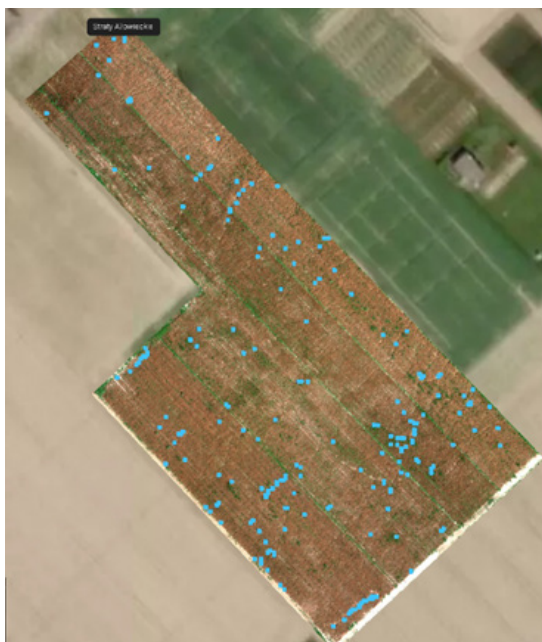
Tabela 20

Parametry wykonanego zobrazowania

Czas	7,11.2024; godz. 10:12
Pozycja (WGS84)	51,3506020; 21,6656451
Obszar	1,041 ha
Wielkość piksela	2,224 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne

W ramach działania przeprowadzono doświadczenie z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania mającego na celu wykazanie procentowego udziału ziarniaków porażonych fuzariozą kłosów mogącą przyczynić się do obniżenia jakości ziarna (zmniejszenie zawartości białka i glutenu) oraz wskazanie miejsca o zwiększonym udziale porażenia fuzariozą kłosów. W ramach badania przeprowadzono naukę maszynową, dzięki której nauczono maszynę rozpoznawać miejsca występowania fuzariozy. Maszyna dokonała obliczeń i wskazała wszystkie siedliska na badanym poligonie (rys. 26).



Rys. 26. Obraz RGB pola pszenicy ozimej do zbioru wykonany w lipcu 2024 roku w RZD Grabów
Źródło: opracowanie własne

Z przeprowadzonego doświadczenia wynika, że udział fuzariozy na badanym polu wyrażony za pomocą roślin o specyficznym odbiciu spektralnym wyniósł ok. 0,68%, co nie wpłynęło znacząco na ogólną jakość zebranego ziarna. W tabeli 21 przedstawiono powierzchniowy udział porażonego ziarna wynoszący 71 m² z 10410 m².

Tabela 21

Parametry dotyczące udziału porażenia fuzariozą

Nazwa	Typ	Wielkość areалу	Kolor	
Porażenie fuzariozą	obszar	71,280 m ²	niebieski jasny	

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzone doświadczenie wykazało, że zestawienie pasm czerwonego (o długości fali 690–740 nm) i bliskiej podczerwieni (o długości fali 740–1000 nm) daje możliwość identyfikacji różnicy w odbiciu w celu odróżnienia pszenicy porażonej fuzariozą kłosów od części zdrowych roślin.

W niniejszych badaniach wykazano, że analiza szeregów czasowych map wskaźnika NDVI, wygenerowanych z danych multispektralnych, pozwala na skuteczne śledzenie rozwoju pszenicy ozimej i określenie jej kluczowych faz fenologicznych w skali BBCH. Obserwowana dynamika zmian wartości NDVI – od niższych wskaźników we wczesnych fazach rozwoju, przez maksimum w okresie pełni wegetacji, po spadek w fazie dojrzewania – jest zgodna z ogólnym modelem rozwoju upraw zbożowych opisywanym w literaturze światowej (Aasen i in. 2018). Badania potwierdzają, że wskaźniki wegetacyjne, takie jak NDVI, są czułe na zmiany w aktywności fotosyntetycznej i biomasy roślin, co pozwala na monitorowanie ich rozwoju fenologicznego (Elsayed i in. 2018, Aierken i in. 2024). Zastosowanie platform bezzałogowych (UAV) pozwoliło na uzyskanie danych o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (do wielkości piksela wynoszącego kilka centymetrów kwadratowych), co stanowi znaczącą przewagę nad obrazowaniami satelitarnymi, których rozdzielczość jest często zbyt niska do precyzyjnej oceny niewielkich pól letek doświadczalnych lub wczesnego wykrywania ognisk chorobowych (Mahlein i in. 2016). Możliwość elastycznego planowania misji i pozyskiwania danych w kluczowych momentach wzrostu, niezależnie od cykli satelitarnych, dodatkowo podnosi wartość tej technologii. Precyzyjne określenie fazy rozwojowej rośliny jest kluczowe dla terminowego stosowania nawozów czy środków ochrony roślin, a wyniki te potwierdzają, że teledetekcja niskopułapowa jest efektywnym, nieniszczącym narzędziem wspierającym takie decyzje (Chivasa i in. 2020). Tradycyjne metody oceny kondycji upraw na podstawie danych teledetekcyjnych często opierają się na arbitralnym progowaniu wartości wskaźników wegetacyjnych. W niniejszej pracy

zastosowano podejście oparte na uczeniu maszynowym (klasyfikacja pod nadzorem) do rozróżnienia stref o dobrej i złej kondycji oraz do identyfikacji uszkodzeń mechanicznych i porażenia przez choroby. Takie podejście pozwala na bardziej obiektywną i powtarzalną analizę. Liczne badania potwierdzają, że algorytmy ML, takie jak Random Forest (identyfikowany jako najpopularniejszy) czy sztuczne sieci neuronowe, są wysoce skuteczne w analizie danych multispektralnych z UAV do przewidywania kluczowych cech fenotypowych, takich jak biomasa czy zawartość azotu. Integracja UAV z zaawansowanymi modelami uczenia maszynowego umożliwia wczesną detekcję problemów na polu, często na wiele dni przed pojawieniem się widocznych symptomów, co pozwala na celowane interwencje oraz redukcję zużycia pestycydów i nawozów (Manfreda i in. 2018, Weiss i in. 2020, Sankey i in. 2021). Zastosowanie algorytmu, który po wstępnym nauczaniu przez człowieka na wskazanych przez operatora próbkach sam dokonuje klasyfikacji całego poligonu, znacząco przyspiesza proces analizy i otwiera drogę do automatyzacji oceny stanu zdrowotnego wielkoobszarowych upraw. Kluczowym wynikiem pracy jest ilościowe oszacowanie strat. Wykazano, że szkody wyrządzone przez zwierzęta na polu rzepaku wyniosły 1,46%, natomiast areał pszenicy porażonej fuzariozą kłosów oszacowano na 0,68%. Dane te mają ogromne znaczenie praktyczne, stanowiąc obiektywny materiał dowodowy, np. w procedurach odszkodowawczych. W literaturze podkreśla się, że tradycyjne metody szacowania strat łowieckich są często subiektywne i czasochłonne. Zastosowanie UAV i analizy obrazu (np. poprzez analizę wysokości upraw z cyfrowych modeli powierzchni lub klasyfikację obrazów RGB) pozwala na szybkie i precyzyjne mapowanie całego dotkniętego obszaru z dokładnością sięgającą nawet 99%. Podobnie w przypadku chorób, wczesna detekcja ognisk porażenia, jak w przypadku fuzariozy, jest kluczowa dla ograniczenia rozprzestrzeniania się patogenu. Wykorzystanie w badaniach pasm w zakresie czerwieni i bliskiej podczerwieni do identyfikacji różnic w odbiciu spektralnym między zdrową a chorą tkanką jest podejściem szeroko opisywanym jako skuteczne. Badania wskazują, że analiza spektralna, często łączona z analizą tekstury obrazu, pozwala na wykrywanie fuzariozy kłosów z wysoką dokładnością. Na krzywą odbicia spektralnego, a co za tym idzie na wyniki analizy, wpływ ma wiele czynników zewnętrznych, takich jak: warunki oświetleniowe, stan atmosfery, wilgotność czy wiek i ułożenie liści. Jest to jedno z największych wyzwań w teledetekcji, a brak standaryzowanego przepływu pracy jest jedną z głównych barier w szerszym komercyjnym zastosowaniu UAV w rolnictwie. Dlatego tak istotne jest rygorystyczne przestrzeganie procedur metodycznych, które w niniejszej pracy zostały zaimplementowane. Wykonanie kalibracji radiometrycznej przy użyciu płytki o znanej refleksyjności przed i po locie jest absolutnym standardem pozwalającym na normalizację danych i ich porównywalność w czasie. Podobnie zastosowanie naziemnych punktów kontrolnych (fotopunktów) i zaawansowanych procesów fotogrametrycznych, jak aerotriangulacja, gwarantuje wysoką dokładność geometryczną finalnych produktów,

takich jak ortofotomapa. Świadomość tych czynników i stosowanie odpowiednich środków zaradczych odróżnia pomiary amatorskie od wiarygodnych danych o charakterze naukowym (Zhang i in. 2018 i 2022).

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Teledetekcja niskopułapowa, oparta na danych z kamer multispektralnych, jest precyzyjnym i skutecznym narzędziem do monitorowania dynamiki rozwoju upraw w czasie rzeczywistym, co udowodniono poprzez poprawne określenie faz fenologicznych pszenicy ozimej w skali BBCH w trzech kluczowych terminach wegetacji.
2. Algorytmy uczenia maszynowego w trybie klasyfikacji pod nadzorem stanowią obiektywną i powtarzalną metodę analizy danych spektralnych, umożliwiając automatyczną identyfikację i ilościowe określenie obszarów upraw o zróżnicowanej kondycji zdrowotnej.
3. Zaproponowana metodyka pozwala na precyzyjne oszacowanie strat w uprawach, co wykazano na przykładzie szkód wyrządzonych przez zwierzęta w rzepaku (oszacowane na 1,46% powierzchni) oraz porażenia pszenicy przez fuzariozę kłosów (oszacowane na 0,68% powierzchni).
4. Dane o zróżnicowaniu kondycji roślin w obrębie pola mogą być bezpośrednio wykorzystane do generowania map aplikacyjnych, wspierając wdrażanie technologii zmiennego dawkowania (VRA) nawozów lub środków ochrony roślin, co jest fundamentem rolnictwa 4.0.
5. Wiarygodność i powtarzalność wyników uzyskanych metodami teledetekcyjnymi jest ściśle uzależniona od rygorystycznego przestrzegania procedur fotogrametrycznych i radiometrycznych, w tym planowania misji, zakładania osnowy oraz kalibracji sensorów.

Literatura

1. Aasen H., Honkavaara E., Lucieer A., Zarco-Tejada P.J.: Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows. *Remote Sensing*, 2018, **10**(7), 1091; DOI: 10.3390/rs10071091
2. Aierken N., Yang B., Li Y., Jiang P., Pan G., Li S.: A review of unmanned aerial vehicle based remote sensing and machine learning for cotton crop growth monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, **227**(2): 109601; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109601>
3. Chivasa W., Mutanga O., Biradar C.: UAV-based multispectral phenotyping for disease resistance to accelerate crop improvement under changing climate conditions. *Remote Sensing*, 2020, **12**(15), 2445; <https://doi.org/10.3390/rs12152445>
4. Elsayed K.M.F., Ismail T., Ouf N.S.: A review on the relevant application of machine learning in agriculture. *IJ IREEICE*, 2018, **6**(8): 1-17; DOI: 10.17148/IJIREICE.2018.681

5. Mahlein A.K.: Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 2016, **100**(2): 241-251; DOI: 10.1094/PDIS-03-15-0340-FE
 6. Manfreda S., McCabe M.F., Miller P.E., Lucas R. et al.: On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Preprints.org*, 2018; DOI: 10.20944/preprints201803.0097.v1
 7. Sankey T., Sankey T.T., Li J., Ravi S. Wang G., Caster J., Kasprak A.: Quantifying plant soil-nutrient dynamics in rangelands: Fusion of UAV hyperspectral-LiDAR, UAV multispectral-photogrammetry and ground-based LiDAR-digital photography in a shrub-encroached desert grassland. *Remote Sensing of Environment*, 2021, **253** (e1701284), 112223; <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112223>
 8. Weiss M., Jacob F., Duveiller G.: Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **236**(5), 111402; DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402
 9. Zhang H., Huang L., Huang W., Dong Y., Weng S., Zhao J., Ma H., Liu L.: Detection of wheat *Fusarium* head blight using UAV-based spectral and image feature fusion. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**, 1004427; DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1004427>
 10. Zheng H., Cheng T., Li D., Yao X.: Combining unmanned aerial vehicle (UAV)-based multispectral imagery and ground based hyperspectral data for plant nitrogen concentration estimation in rice. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, 936; DOI: 10.3389/fpls.2018.00936
-

Adres do korespondencji:

mgr inż. Tytus Berbeć
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 758
e-mail: tberbec@iung.pulawy.pl

AUTOR
Tytus Berbeć

ORCID
0000-0001-5183-5807

Ludwika Poręba

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WYKORZYSTANIE MAP CYFROWYCH ORAZ ZDJĘĆ SATELITARNYCH DO BUDOWANIA ROLNICTWA ODPORNEGO NA ZMIANY KLIMATU*

Słowa kluczowe: mapa, rolnictwo, susza, teledetekcja, zdjęcia satelitarne, zmiany klimatu

Wstęp

Historia rolnictwa sięga czasów antycznych. Do XIX w. rolnicy używali głównie domowych ręcznych narzędzi i polegał na własnej sile roboczej oraz na zwierzętach. Rewolucja przemysłowa pozwoliła wprowadzić maszyny rolnicze używane do uprawy gleby, siewu, pielienia, nawodnienia i zbiorów, co spowodowało wzrost produkcji żywności przy równoczesnym spadku pracy ręcznej. Rozwój przemysłu przyczynił się również do rozszerzenia rynku zbytu oraz stworzenia wielkoskalowej intensywnej produkcji rolniczej. Mechanizacja, nowe agronomiczne praktyki zarządzania oraz nowe syntetyczne pestycydy i nawozy zwiększyły produktywność i wydajność rolnictwa, jednak nadmierne zużycie paliw kopalnych, wody i chemikaliów spowodowało zniszczenie środowiska (Dayioğlu i Türker 2021).

W celu zmniejszenia degradacji środowiska przez rolnictwo zaczęto stosować różne technologie prowadzące do stosowania praktyk bardziej zrównoważonych przyrodniczo. Postęp w dziedzinie informatyki i elektroniki pozwolił na pojawienie się rolnictwa precyzyjnego, prowadzącego do oszczędności energii w maszynach, wody w nawadnianiu i zmniejszeniu zużycia chemikaliów na polu. Rolnictwo precyzyjne przyczyniło się do poprawy wydajności zasobów, produktywności, jakości, rentowności i zrównoważonego rozwoju produkcji rolnej poprzez gromadzenie, przetwarzanie i analizowanie danych czasowych i przestrzennych oraz łączenie ich z innymi

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

informacjami, na podstawie których rolnik może podjąć najlepszą możliwą decyzję dotyczącą konkretnego miejsca, rośliny lub zwierzęcia (Dayioğlu i Türker 2021).

Obecnie w celu poprawy produkcji rolniczej zagrożonej zmianami klimatycznymi wykorzystuje się różne technologie do budowania rolnictwa odpornego na zmiany klimatu. Jest to podejście polegające na przekształceniu, reorientacji i rozwoju systemów rolniczych na podstawie technologii cyfrowych, przyczyniające się do wzrostu globalnego bezpieczeństwa żywnościowego w ramach działań adaptacyjnych i łagodzących skutki zmian klimatu (Adamides 2020, Debangshi 2021). Praktyki rolnictwa odpornego na zmiany klimatu to między innymi: zróżnicowanie plonów, ochrona wody, zarządzanie zdrowiem gleby, zintegrowana ochrona przed szkodnikami (Sakapaji i Puthenkalam 2023). Pojęcie to jest nowe, ale mechanizm adaptacji i łagodzenia zmian środowiskowych jest obecny w naturze od zawsze. Dzisiaj zmiany klimatu postępują w takim tempie, że natura sama nie nadąży w ich łagodzeniu. Wprowadzenie zielonych technologii pozwoli naturze walczyć z antropogenicznymi zmianami klimatu (Debangshi 2021). Wśród narzędzi wykorzystywanych do budowania rolnictwa odpornego na zmiany klimatu można wymienić mapy cyfrowe i zdjęcia satelitarne.

Wpływ zmian klimatu na rolnictwo

Rolnictwo jest zarówno ofiarą, jak i czynnikiem odpowiedzialnym za zmiany klimatyczne. Do ich pogłębiania przyczynia się głównie poprzez emisję gazów cieplarnianych pochodzących z nawozów chemicznych oraz pestycydów o niskim zużyciu składników odżywczych (Debangshi 2021).

Zmiany klimatyczne w dużej mierze wpływają negatywnie na rolnictwo. Zagrożenia dla rolnictwa to między innymi wzrost temperatury, większa zawartość CO₂, zmiany w rozkładzie opadów deszczu oraz zwiększenie liczby chwastów, epidemii szkodników oraz chorób. Najbardziej zagrożone są obszary tropikalne, natomiast obszary w strefie umiarkowanej lepiej sobie radzą ze wzrostem temperatur (Debangshi 2021).

Dla rolnictwa europejskiego zmiany klimatu mogą mieć zróżnicowane skutki. Na południu Europy dochodzi do redukcji plonów oraz zmniejszenia powierzchni obszarów rolnych. Z kolei na północy kontynentu może dojść do wydłużenia okresu wegetacyjnego oraz przesunięcia upraw typowych dla południowych regionów (na przykład: kukurydza, słonecznik, soja) bardziej na północ (Fallon i Betts 2010). Wydłużenie okresu wegetacyjnego może prowadzić do wzrostu plonów dla różnych upraw i użytków zielonych. Ponadto w obszarze basenu Morza Śródziemnego może dojść do całorocznego sezonu wegetacyjnego, pozwalając na dwie uprawy w ciągu roku (Wiréhn 2018). Negatywnym skutkiem zmian klimatu dla rolnictwa w Europie jest redukcja glebowej materii organicznej (szczególnie na północy kontynentu) (Fallon i Betts 2010). Zmiany klimatyczne prowadzą również do zaburzeń w rozkładzie

opadów. Zwiększa się częstotliwość występowania susz na wiosnę oraz wzmożonych opadów latem i jesienią. Spadek opadów na południu Europy może doprowadzić do redukcji plonów oraz zwiększenia zapotrzebowania na wodę do nawadniania różnych upraw. Z kolei większa wilgotność prowadzi do zwiększenia pojawiania się chorób i szkodników (Fallon i Betts 2010, Wiréhn 2018).

Susza, monitorowanie oraz łagodzenie jej skutków, jest jednym z największych wyzwań w rolnictwie w kontekście zmian klimatycznych. Jest poważnym zagrożeniem dla współczesnego rolnictwa, ponieważ prowadzi do redukcji plonów, co z kolei przyczynia się do zaburzenia bezpieczeństwa żywnościowego. Susza oddziałuje na morfologię, zieloność, fotosyntezę, akumulację biomasy oraz ewapotranspirację upraw (Wu i in. 2023). Suszę można podzielić na cztery kategorie – meteorologiczne, rolnicze, hydrologiczne i społeczno-ekonomiczne. Susza meteorologiczna charakteryzuje się brakiem opadów lub niewystarczającą ich ilością w porównaniu z normalnymi poziomami deszczu w podobnym okresie. Szacowana jest na podstawie ilości wody w deszczomierzu. Susza rolnicza szacowana jest na podstawie braku zawartości wilgotności gleby w porównaniu z zapotrzebowaniem na wodę przez uprawy. Jej skutkiem jest spadek plonów. Z kolei susza hydrologiczna skutkuje redukcją poziomów wody w warstwach wodonośnych, rzekach oraz jeziorach. Susza społeczno-ekonomiczna występuje, gdy zapotrzebowanie na wodę przekracza jej podaż z powodu niewystarczających rezerw wody związanych z warunkami meteorologicznymi, co znacząco obniża jakość życia mieszkańców (Elair i in. 2023). Susza ma wpływ na globalny i regionalny obieg węgla oraz powoduje nieodwracalne zmiany w funkcjach ekosystemowych w ocieplającym się klimacie. Susza i ekstrema temperaturowe prowadzą do negatywnego wpływu na pochłanianie dwutlenku węgla, spowalniając wpływ nawożenia azotem na roślinność ekosystemów lądowych (Jiao i in. 2021).

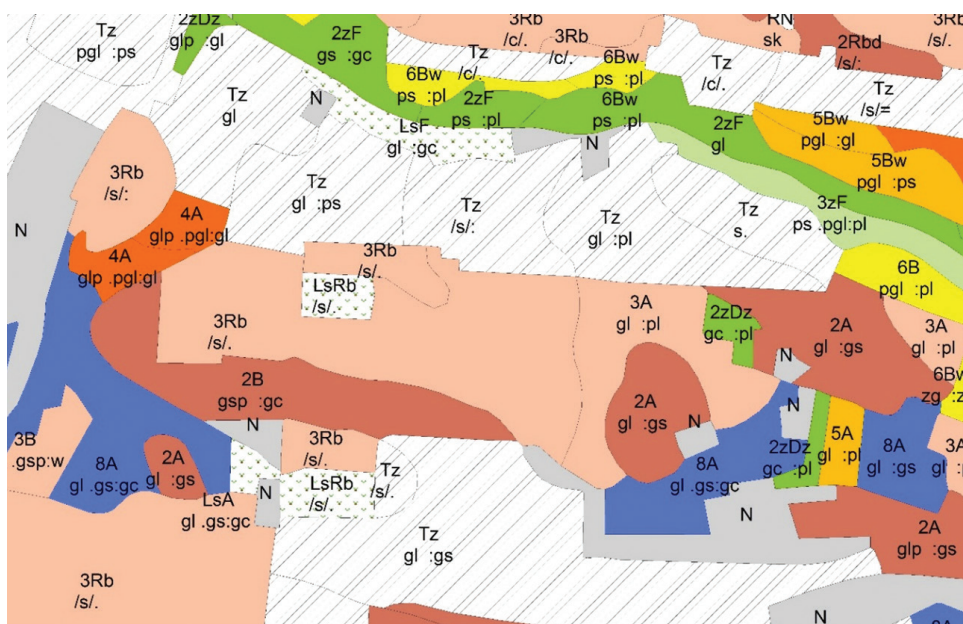
Susze to zazwyczaj wolno rozwijające się zjawiska, jednak w badaniach pojawia się pojęcie suszy błyskawicznej, która jest zjawiskiem krótkotrwałym, ale dotkliwym. Mogą one powodować poważne skutki dla środowiska i rolnictwa. Z uwagi na to, że mają nagły początek i szybką intensyfikację, mogą przynieść szczególne wyzwania związane z ich monitorowaniem, prognozowaniem i łagodzeniem skutków. Identyfikacja susz błyskawicznych ma duże znaczenie. W odróżnieniu od zwykłych susz przed ich rozwojem jest stwierdzana wysoka ewaporacja (Jiao i in. 2021).

Mapy cyfrowe w rolnictwie odpornym na zmiany klimatu

Technologie GIS zapewniają narzędzia wspierające podejmowanie decyzji dotyczących zarządzania środowiskiem i zasobami naturalnymi. W połączeniu z teledetekcją, mapowanie, modelowanie i monitorowanie zmian środowiskowych pomaga w adaptacji do zmian klimatu w sektorze rolnictwa (Haworth i in. 2018).

Duże znaczenie w budowaniu rolnictwa odpornego na zmiany klimatu ma gleba, która jest podstawowym elementem różnicującym przestrzennie retencję wodną oraz wpływ niedoboru wody na plony roślin. Zdrowa gleba jest odporna na zmiany klimatyczne, dlatego istotne jest stosowanie praktyk rolniczych jak najmniej degradujących środowisko glebowe. Dane glebowe od wielu lat są wykorzystywane w celu poprawy produktywności rolnictwa.

W Polsce powstała na przełomie lat 60. i 70. XX w., mapa glebowo-rolnicza jest podstawowym źródłem informacji o zasobach glebowych naszego kraju oraz przestrzennym zobrazowaniem produkcji rolniczej. Mapa ta została stworzona przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa na polecenie ówczesnego ministra rolnictwa. Głównym powodem jej powstania była chęć zintegrowania działań związanych z produkcją roślinną z wiedzą na temat gleb – ich przydatnością dla rolnictwa oraz rozmieszczeniem przestrzennym. Arkusze mapy sporządzono w skali ogólniejszej dla powiatów oraz bardziej szczegółowe dla poszczególnych wsi, państwowych gospodarstw rolnych i spółdzielni produkcyjnych. Mapa glebowo-rolnicza ma wiele zastosowań, które mogą być wykorzystywane do zminimalizowania negatywnych skutków środowiskowych w kontekście zmieniającego się klimatu. Informacje zawarte na mapie glebowo-rolniczej to treści typowo użytkowe dla rolnictwa – kompleks rolniczej przydatności gleby, typ i podtyp genetyczny, układ i skład granulometryczny poszczególnych warstw profilu glebowego (rys. 1). Treści przedstawione na mapie pozwalają na wykonanie wielu analiz przestrzennych i oceny siedliska glebowego pod względem potencjału produkcyjnego, stosunków wodnych, różnorodności biologicznej oraz odporności ekosystemu na procesy degradacji. Mapa zarówno w formie papierowej, jak i obecnie w formie cyfrowej, była wielokrotnie wykorzystywana do oceny potencjału żyzności gleb, regionalizacji produkcji rolniczej oraz doboru gatunków i odmian roślin uprawnych do lokalnych warunków klimatycznych, opracowania planów urządzeniowo-rolnych i planów rozwoju wsi, oceny potrzeb nawożenia i wapnowania gleb w skali gospodarstwa, oceny potrzeb i projektowania melioracji rolnych, ochrony gleb, prac scaleniowych i planowania przestrzennego oraz dostosowania narzędzi i maszyn rolniczych do ciężkości gleby. Informacje na temat składu granulometrycznego pozwoliły na opracowanie dodatkowych map – mapę podatności gleb na erozję wodną i wietrzną, mapę kategorii glebowych służących do oceny potrzeb wapnowania i nawożenia (Witek 1973, Jadczyżyn i Stuczyński 2008, Jadczyżyn i Smreczak 2017).



Źródło: opracowanie własne

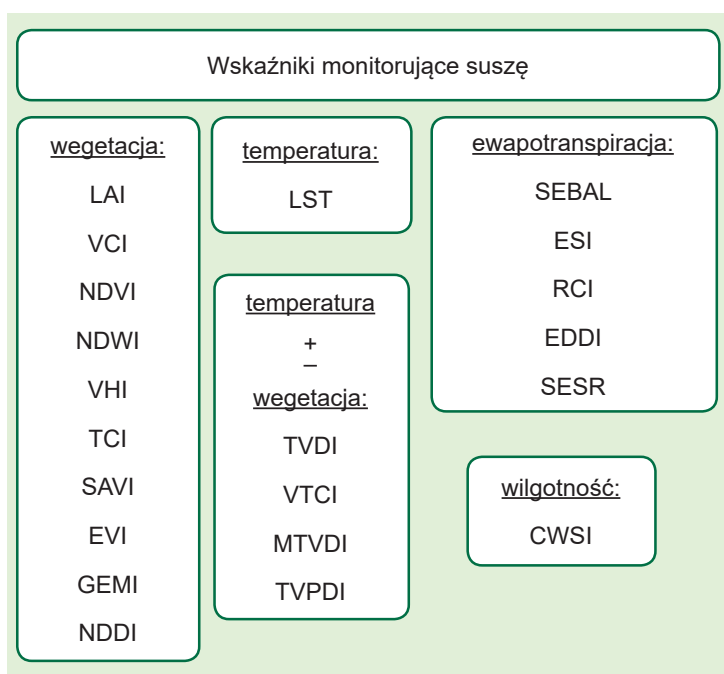
Oprócz map glebowych w rolnictwie coraz częściej wykorzystuje się mapowanie usług ekosystemowych gleb. Przy coraz częstszym niedoborze wody i występowaniu suszy na polach zdolność gleby do magazynowania i regulowania ilości wody oraz mikroklimatu jest szczególnie istotna. Równie ważna jest zdolność do produkcji żywności. Przestrzenne przedstawienie glebowych usług ekosystemowych pokazuje nie tylko, gdzie są one wytwarzane, ale również gdzie są wykorzystywane, co pozwala na efektywne dystrybuowanie zasobami (Calzolari i in. 2016, Karabulut i in. 2016).

Łączenie danych klimatycznych i glebowych w planowaniu zadań rolniczych prowadzi do zmniejszenia niepewności spowodowanej zmianami klimatu, na przykład poprzez opracowanie systemów wczesnego ostrzegania przed ekstremami pogodowymi, co pozwala rolnikom podejmować wczesne działania i efektywnie zarządzać zasobami (Adamides 2020, Boz i in. 2020).

Zdjęcia satelitarne w rolnictwie odpornym na zmiany klimatu

Do budowania rolnictwa odpornego na zmiany klimatu wykorzystywana jest również teledetekcja, czyli pozyskiwanie informacji o obiekcie lub zjawisku na odległość za pomocą przyrządów lub czujników zamontowanych na odległej platformie, na przykład satelicie, bezzałogowym pojeździe powietrznym lub dronie, w wielu skalach przestrzennych i czasowych niezależnie od granic geopolitycznych (Atzberger 2013, Adamides 2020, Karthikeyan i in. 2020). Klimat, właściwości gleby, składniki odżywcze w glebie i uprawach, objętość łąnu i biomasy, zawartość wody, choroby, chwasty, uszkodzenia spowodowane owadami oraz różnorodność upraw mają wpływ na plony i produkcję rolną. Wszystkie te czynniki rzutują na charakterystykę spektroskopową upraw, którą można oceniać za pomocą różnych czujników zdalnych (Dayioğlu i Türker 2021, Galieni i in. 2021, Abdelraouf i in. 2022). W rolnictwie teledetekcja wykorzystywana jest do szacowania plonów, mapowania pól uprawnych, monitorowania stresu oraz rozwoju fenologicznego upraw (Adamides 2020). Jest skuteczną metodą obserwacji, identyfikacji i oceny ilościowej tego, jak rośliny reagują na różne stresy, na przykład wahania temperatury, suszę, powódzie, zasolenie i infekcje (Galieni i in. 2021, Rai i in. 2023). Różne techniki teledetekcji odgrywają kluczową rolę w identyfikacji odmian upraw odpornych na susze i powódzie, które są niezbędne do zapewnienia zrównoważonych plonów w kontekście zmieniającego się klimatu (Karmakar i in. 2024). Teledetekcja pozwala na opracowanie różnych nieinwazyjnych systemów wykrywania, które dostarczają dokładnych informacji na temat zmienności przestrzennej w obrębie pól (Alvino i Marino 2017, Galieni i in. 2021). Najskuteczniejszą metodą teledetekcji są dane satelitarne (Abdelraouf i in. 2022). Zdjęcia optyczne i radarowe służą do monitorowania upraw i pozwalają określić wzrost roślin, poziom biomasy, zawartość chlorofilu, informacje strukturalne o uprawie, dostępność wody na polach oraz wilgotność upraw (Karmakar i in. 2024).

Teledetekcja zrewolucjonizowała ocenę suszy, zapewniając ciągłe dane przestrzenne i czasowe dla różnych wskaźników suszy, w tym opadów, temperatury, pokrywy roślinnej, wilgotności gleby i ewapotranspiracji (rys. 2) (Jiao i in. 2021, Elair i in. 2023). Zdjęcia satelitarne pozwalają monitorować suszę w odległych i niedostępnych obszarach, gdzie obserwacje naziemne są ograniczone lub niemożliwe, co pozwala podejmować lepsze decyzje w zakresie zarządzania suszą, na przykład: planowania upraw lub reagowania na klęski żywiołowe. Teledetekcja odgrywa również znaczącą rolę w szacowaniu i zarządzaniu pożarami, ocenianiu ryzyka powodziowego, monitorowaniu osuwisk i analizowaniu ryzyka związanego z burzami. Ponadto generuje mapy zagrożeń, które precyzyjnie identyfikują obszary ryzyka na podstawie analizy wcześniejszych katastrof, ułatwiając monitorowanie w czasie rzeczywistym i wczesne ostrzeżenie w celu złagodzenia skutków w różnych kontekstach środowiskowych (Elair i in. 2023). Zdjęcia satelitarne są wykorzystywane w rolnictwie do oszacowania plonu, przewidywania plonu oraz ubezpieczenia upraw (Roznik i in. 2022).



Rys. 2. Wskaźniki teledetekcyjne wykorzystywane do monitorowania suszy

Źródło: opracowanie własne

Zdjęcia satelitarne pozwalają określić temperaturę powierzchni ziemi (LST, ang. *Land Surface Temperature*), która jest kluczowym parametrem zintegrowanego monitorowania suszy, ponieważ zapewnia pośrednią miarę bilansu energetycznego powierzchni. Stres termiczny obliczany z LST i temperatury powietrza jest dobrym wskaźnikiem warunków suszy, który potrafi wykazać suszę już na jej wczesnym etapie (Jiao i in. 2021).

Ewaporacja jest to mechanizm łączący wodę i cykle energetyczne, dlatego stanowi ważny miernik dla monitorowania i szacowania suszy. Parowanie to połączenie szeregu procesów utraty wody od bezpośredniego parowania gleby do transpiracji pochodzącej z roślin. Szacowanie ewaporacji z danych satelitarnych jest skomplikowane, ponieważ nie jest ona bezpośrednio obserwowalna z żadnego czujnika, ale raczej wnioskowana poprzez połączenie danych meteorologicznych, promieniowania oraz roślinności. Istnieje wiele modeli i algorytmów do szacowania ewapotranspiracji z danych teledetekcyjnych (Jiao i in. 2021).

Zdjęcia satelitarne pozwalają stworzyć wysoko rozdzielcze dobowe mapy ewapotranspiracji, które wspomagają zarządzanie nawodnieniem upraw. Badania na ten temat prowadzone są od lat 80. XX w. i wykazały, że do szacowania wartości ewapotranspiracji można użyć różnych metod – bilansu wodnego, bilansu energii, modeli

bazujących na temperaturze oraz modeli bazujących na poziomie i stanie wegetacji (Alvino i Marino 2017). Jednym z modeli wykorzystujących ewapotranspirację jest SEBAL (ang. *Surface Energy Balance Model for Land*). Jest to model szacujący produktywność wodną wykorzystujący aktualną wartość ewapotranspiracji i wielkość biomasy uprawy. Do jej obliczenia potrzebne są dane satelitarne, numeryczny model terenu, użytkowanie terenu oraz dane pogodowe. Model SEBAL jest używany na całym świecie do wyznaczenia przestrzennej zmienności produktywności wody, plonu i ewapotranspiracji dla różnych upraw w różnych strefach agroekologicznych. Jego mapa dostarcza informacji, gdzie produktywność wody jest niska, dzięki czemu można lepiej planować dystrybucję wody. Pomaga to przy efektywnym zarządzaniu nawodnieniami polowymi i w procesie decyzyjnym odnośnie projektowania i konstruowania infrastruktury nawadniającej (Jindo i in. 2021).

Metody teledetekcyjne określające ewapotranspirację służą do identyfikacji zjawiska susz błyskawicznych. Wskaźnik ESI (ang. *Evaporative Stress Index*) zapewnia wczesne ostrzeżenie przed wpływem suszy na systemy rolnicze. Na jego podstawie stworzono inne wskaźniki – RCI (ang. *Rapid Change Index*), EDDI (ang. *Evaporative Demand Drought Index*), SESR (ang. *Standardized Evaporative Stress Ratio*). Do identyfikacji susz błyskawicznych używane są też inne charakterystyki suszy – nagły spadek opadów, wilgotność gleby i nienormalnie wysokie temperatury (Jiao i in. 2021).

Wilgotność gleby jest kluczową zmienną przy planowaniu rolniczym oraz zarządzaniu zasobami wodnymi. Odgrywa również ważną rolę w systemie klimatycznym, ponieważ jej deficyt może wywoływać zmiany w opadach i magazynowaniu energii w systemie gleba-roślinność-atmosfera zarówno w lokalnej, jak i regionalnej skali. Wykrywanie suszy przy użyciu wilgotności gleby przynosi korzyści nie tylko dla rolnictwa, ale również poprawia wiedzę na temat interakcji ziemia-atmosfera w prognozowaniu pogody i klimatu. Ilościowe oszacowanie wilgotności gleby pozostaje trudne, zwłaszcza pod pokrywą roślinną (Jiao i in. 2021).

Ze zdjęć satelitarnych można obliczyć wskaźnik CWSI (ang. *Crop Water Stress Index*). Wprowadzono go w latach 80. Wskaźnik ten określa stopień niedoboru wody w uprawach na podstawie temperatury powierzchni łąnu, temperatury otoczenia oraz dynamiki wody w glebie (Cetin i in. 2023). Najczęściej do określenia wskaźnika wybiera się temperatury mierzone w południe, kiedy rośliny najbardziej cierpią z powodu stresu wody (Luan i in. 2021). Uważany jest za czułe narzędzie do monitorowania i oceny stresu wodnego roślin dla szerokiej gamy upraw – bawełny, kukurydzy, pszenicy, oliwek, brzoskwini, migdałów, ziemniaka oraz fasoli. CWSI jest w stanie wykazać stres nawet do 48 godzin przed wizualnym zaobserwowaniem go na polu (Tanriverdi i in. 2017, Luan i in. 2021). Wskaźnik CWSI jest w stanie przewidzieć wydajność niektórych upraw w warunkach stresu i opracować schematy zarządzania nawadnianiem (Alvino i Marino 2017, Cetin i in. 2023). Obliczanie CWSI na podstawie metody zdalnej jest najlepszą i najszybszą metodą do monitorowania i oceny warunków upraw zarówno w okresie stresu wodnego, jak i bez stresu wodnego oraz

do planowania nawadniania. Nawadnianie jest największym konsumentem zasobów słodkiej wody, które wykorzystuje ok. 70% wód gruntowych. Użycie wskaźnika CWSI może być sposobem na oszczędzanie wody potrzebnej w nawodnieniach na obszarach szczególnie podatnych na suszę, na przykład w regionie śródziemnomorskim. Ponadto może służyć do łagodzenia szkód spowodowanych suszą zarówno na obszarach nawadnianych, jak i zasilanych deszczem. Oprócz tego wskaźnik ten może być stosowany do polityki zarządzania wodą i planowania nawodnień w skali zlewni oraz szacowania produktywności upraw w dużych systemach nawadniania (Cetin i in. 2023). Mapowanie obszarów nawadnianych jest niezbędne do osiągnięcia precyzyjnych przydziałów wody dla rolnictwa, poprawy naszej wiedzy na temat budżetu wodnego oraz ulepszania symulacji modeli uprawowych i hydrologicznych (Karthikeyan i in. 2020).

Roślinność odgrywa najbardziej aktywną rolę w modulowaniu obiegu wody i węgla w większości ekosystemów. Rośliny są dobrym miernikiem suszy, ponieważ szybko i dynamicznie odpowiadają na stres hydrologiczny i kontrolują wymianę wody i energii między ziemią i atmosferą. Uruchomienie satelity Landsat w 1972 r. rozpoczęło badania wpływu suszy na wzrost roślinności w skali lokalnej i regionalnej. Dalszy rozwój teledetekcji oraz uruchomienie różnych typów czujników satelitarnych bardzo przyspieszyły zdalne monitorowanie roślinności (Jiao i in. 2021).

Susza wpływa na strukturę roślin. Zmiany strukturalne wywołane stresem suszy mogą obejmować zmniejszenie powierzchni liści, zrzućenie liści i zmianę rozkładu kąta nachylenia liści w obrębie korony. Zmiany te można oszacować na podstawie wskaźnika LAI (ang. *Leaf Area Index*) (Jiao i in. 2021).

Ze zdjęć satelitarnych można obliczyć różne wskaźniki, które są ważnymi parametrami wykorzystywanymi w różnych zastosowaniach rolniczych. Wskaźniki te są istotne dla cech morfologicznych, fizjologicznych i biofizycznych upraw. Opracowane są w celu opisanie stanu wzrostu upraw i wpływu warunków agroklimatycznych, chorób i szkodników, stresu wodnego oraz wpływu sposobu uprawy na wzrost roślin. Wskaźniki wegetacji są uzyskiwane jako połączenie danych teledetekcyjnych o różnych długościach fali (zazwyczaj w zakresie czerwonym i podczerwonym) (Jiao i in. 2021, Wu i in. 2023, Karmakar i in. 2024). Wiele wskaźników wegetacyjnych wykorzystywanych jest do szacowania suszy rolniczej – na przykład: VCI (ang. *Vegetation Condition Index*), NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (ang. *Normalized Difference Water Index*), VHI (ang. *Vegetation Health Index*), SAVI (ang. *Soil-Adjusted Vegetation Index*), TCI (ang. *Temperature Condition Index*) (West i in. 2019, Wu i in. 2023). Niektóre wskaźniki wegetacyjne są integrowane z LST (na przykład: TVDI – ang. *Temperature-Vegetation Dryness Index*, VTCI – ang. *Vegetation Temperature Condition Index*, MTVDI – ang. *Microwave Temperature Vegetation Drought Index*, TVPDI – ang. *Temperature Vegetation Precipitation Dryness Index*), pozwalając na łączenie badań na temat zawartości wody glebowej z monitoringiem suszy. Wskaźniki pochodzące z obrazowań hiperspektralnych wy-

kazują dobrą wydajność w monitorowaniu wczesnego stresu wodnego roślin poprzez odzwierciedlanie fizjologicznych i biochemicznych procesów roślinnych wywołanych suszą. Z kolei czujniki mikrofalowe mają wyższą zdolność penetracji i są mniej podatne na wpływy atmosferyczne (Jiao i in. 2021).

Jednym z najbardziej powszechnych wskaźników wegetacji do monitorowania zdrowia i dynamik zachodzących w roślinności jest wskaźnik NDVI, który służy jako miara odporności ekosystemu na suszę oraz jest wykorzystywany do określania wzrostu upraw (Ferguson i in. 2022). Wskaźnik NDVI jest związany z biofizycznymi markerami plonu i wzrostu upraw, używany jest do szacowania plonu (Roznik i in. 2022). Użyteczność wskaźnika NDVI w monitoringu suszy bierze się stąd, że wilgotność gleby odgrywa istotną rolę w trwałym wzroście i zdrowiu roślinności. Wskaźnika tego używa się zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej przez naukowców na wszystkich kontynentach. Jest użyteczny przy długo trwających suszach. Mimo dużej popularności i wykorzystania NDVI ma swoje ograniczenia. Jest łatwo zakłócany przez jasność gleby na obszarach o niskiej gęstości roślinności, a czułość wskaźnika jest ograniczona w środowiskach o wysokiej gęstości biomasy. Ponadto jest wrażliwy na czynniki tła, takie jak zacienienie, efekty atmosferyczne oraz nasycenie (West i in. 2019, Jiao i in. 2021). Aby wyeliminować te ograniczenia oraz żeby się bardziej skupiać na cechach fizjologicznych roślin, stworzono inne wskaźniki. Wskaźniki SAVI (ang. *Soil-Adjusted Vegetation Index*) oraz GEMI (ang. *Global Environment Monitoring Index*) pozwalają wyeliminować efekt tła glebowego na wskaźniki roślinne, natomiast wskaźnik EVI (ang. *Enhanced Vegetation Index*) służy do równoczesnej korekty efektu glebowego i atmosferycznego (Jiao i in. 2021).

Wskaźnik VHI używany do szacowania suszy przez wielu badaczy uważany jest za lepszy od NDVI, ponieważ dodatkowo podaje informacje o kondycji wegetacji w dłuższym okresie czasu. Naukowcy z Azji, Europy, Ameryki Północnej oraz Afryki wykazali użyteczność VHI w zarządzaniu suszą, rozwoju zdalnych możliwości monitorowania suszy oraz w badaniach zdrowia roślinności (West i in. 2019).

Kolejnym popularnym wskaźnikiem jest wskaźnik NDWI. Jest jednym z kompleksowych wskaźników suszy używanym do historycznego i przestrzennego wykrywania tego zjawiska. Przedstawia ilość wody w stanie ciekłym wewnątrz roślinności. Niższe wartości wskaźnika oznaczają występowanie stresu suszy. Indykator ten nie jest jednak dostępny dla zróżnicowanego terenu i obszaru klimatycznego ze względu na niejednorodność pokrycia terenu i rodzaju gleby. Z tego powodu opracowano wskaźnik NDDI (ang. *Normalized Difference Drought Index*). Koncentruje się on na założeniu, że różnica między NDVI i NDWI wzrasta wraz ze spadkiem zawartości wody w roślinności. Im wyższa wartość NDDI, tym niższy procent wody w roślinności, co wskazuje na występowanie stresu suszy. Wskaźnik NDDI jest dostępny dla wielu obszarów upraw i jest bardziej wrażliwy na suszę niż pojedyncze użycie NDVI lub NDWI (Jindo i in. 2021).

Ze względu na złożoność interakcji suszy w ekosystemach obserwacje teledetekcyjne za pomocą pojedynczego czujnika raczej nie zapewnią kompleksowego i przekonującego opisu ich charakterystyki. Oceny oparte na wielu czujnikach mogą poprawić zrozumienie zjawisk spowodowanych suszą, takich jak śmiertelność drzew czy pożary ekosystemów. Mogą także ułatwić wyjaśnienie mechanizmów związanych z suszą, w tym tych stojących za reakcją roślinności i sprzężenia zwrotnego ziemia–atmosfera podczas suszy (Jiao i in. 2021).

Podsumowanie

Zmieniający się klimat skutkuje intensyfikacją zjawiska suszy rolniczej, co powoduje redukcję plonów. Zmniejszenie plonów wpływa negatywnie na bezpieczeństwo żywnościowe. Ważne jest zatem znalezienie rozwiązań pozwalających szybko reagować na sytuacje stresowe, tak aby szkody były jak najmniejsze.

Przy budowaniu rolnictwa odpornego na zmiany klimatu ważne jest wykorzystanie nowoczesnych technologii do monitorowania suszy, tak aby można było ją wykryć już na wczesnym etapie i od razu odpowiednio reagować.

Mapy cyfrowe oraz teledetekcja w postaci zdjęć satelitarnych dostarczają narzędzi pozwalających na obserwacje zmian zachodzących na polu pod wpływem suszy w czasie rzeczywistym, w skali zarówno lokalnej, jak i regionalnej oraz szybkie działanie w celu zminimalizowania jej skutków.

Literatura

1. Abdelraouf M.A., Abouelghar M., Belal A.A., Saleh N., Yones M., Selim A.I., Amin M.E.S., Elwesemy A., Kucher D.E., Maginan S., Savin I.: Crop yield prediction using multi sensors remote sensing (Review Article). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2022, **25(3)**: 711-716.
2. Adamides G.: A Review of climate-smart agriculture application in Cyprus. *Atmosphere*, 2020, **11(9)**, 898.
3. Alvino A., Marino S.: Remote sensing for irrigation of horticultural crops. *Horticulturae*, 2017, **3(2)**40.
4. Atzberger C.: Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, 2013, **5(2)**: 949-981.
5. Boz A.O., Donmez Y., Ozyavuz M.: Use of climate maps in determining sustainable agriculture areas. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2020, **21(3)**: 1062-1071.
6. Calzolari C., Ungaro F., Filippi N., Guermandi M., Malucelli F., Marchi N., Staffilani F., Tarocco P.: A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geodrema*, 2016, **261**: 190-203.
7. Cetin M., Alsenjar O., Aksu H., Golpinar M.S., Akgul M.A.: Estimation of crop water stress index and leaf area index based on remote sensing data. *Water supply*, 2023, **23(3)**: 1390-1404.
8. Dayioğlu M.A., Türker U.: Digital transformation for sustainable future – Agriculture 4.0: A review. *Journal of Agricultural Science*, 2021, **27(4)**: 373-399.

9. Debangshi U.: Climate resilient agriculture an approach to reduce the ill-effect of climate change. *International Journal of Recent Advances in Multidisciplinary Topics*, 2021, **2(7)**: 309-315.
10. Doroszewski A., Jadczyszyn J., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Mizak K., Łopatka A., Koza P., Górski T., Wróblewska E.: *Podstawy Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2012, **12(2)**: 38, 77-91.
11. Elair C., Chaham K.R., Hadri A.: Assessment of drought variability in the Marrakech-Safi region (Morocco) at different time scales using GIS and remote sensing. *Water Supply*, 2023, **23(11)**: 4592-4624.
12. Fallon P., Betts R.: Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation – The importance of an integrated approach. *Science of Total Environment*, 2010, **408**: 5667-5687.
13. Ferguson A., Murray C., Tessema Y.M., McKeown P.C., Reymondin L., Loboguerrero A.M., Talsma T., Allen B., Jarvis A., Golden A., Spillane C.: Can remote sensing enable a Biomass Climate Adaptation Index for agricultural systems? *Frontiers in Climate*, 2022, **4**: 1-15.
14. Galieni A., D'Ascenzo N., Stagnari F., Pagnani G., Xie Q., Pisante M.: Past and future of plant stress detection: An overview from remote sensing to positron emission tomography. *Frontiers in Plant Science*, 2021, **11**, 609155.
15. Haworth B.T., Biggs E., Duncan J., Wales N., Boruff B., Bruce E.: Geographic information and communication technologies for supporting smallholder agriculture and climate resilience. *Climate*, 2018, **6(4)**, 97.
16. Jiao W., Wang L., McCabe M.F.: Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote sensing of Environment*, 2021, **256**, 112313.
17. Jindo K., Kozan O., Iseki K., Maestrini B., van Evert F.K., Wubengeda Y., Arai E., Shimabukuro Y.E., Sawada Y., Kempenaar C.: Potential utilization of satellite remote sensing for field-based agricultural studies. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2021, **8(58)**.
18. Jadczyszyn J., Stuczyński T.: Wykorzystanie numerycznej mapy glebowo-rolniczej do analizy obszarów wiejskich. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2008, **12(5)**: 55-64.
19. Jadczyszyn J., Smreczak B.: Mapa glebowo-rolnicza w skali 1:25000 i jej wykorzystanie na potrzeby współczesnego rolnictwa. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2017, **51(5)**: 9-27.
20. Karabulut A., Egoh B.N., Lanzanova D., Grizzetti B., Bidoglio G., Pagliero L., Bouraoui F., Aloe A., Reynaud A., Maes J., Vandecasteele I., Mubareka S.: Mapping water provisionig services to suport the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin. *Ecosysyem Services*, 2016, **17**: 278-292.
21. Karmakar P., Teng S.W., Murshed M., Pang S., Li Y., Lin H.: Crop monitoring by multimodal remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2024, **33**, 101093.
22. Karthikeyan L., Chawla I., Mishra A.K.: A review of remote sensing applications in agriculture for food security: Crop growth and yield, irrigation, and crop losses. *Journal of Hydrology*, 2020, **586**, 124905.
23. Luan Y., Xu J., Lv Y., Liu X., Wang H., Liu S.: Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial distribution information measured by thermal imaging. *Agricultural Water Management*, 2021, **246**, 106699.
24. Roznik M., Boyd M., Porth L.: Improving crop yield estimation by applying higher resoution satellite NDVI imagery and high-resolution cropland masks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022, **25**, 100693.

-
25. R a i R.K., Karada M.S., Mishra R., Agnihorti D., Patel K.K., Thakur S., Singh D.: Transformative role of remote sensing in advancing horticulture: Optimizing sustainability, efficiency and resilience. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, **13(10)**: 3559-3567.
 26. S a k a p a j i S.C., Puthenkalam J.J.: Harnessing AI for climate-resilient agriculture: Opportunities and challenges. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 2023, **1(6)**: 1144-1158.
 27. T a n r i v e r d i C., Atilgan A., Degrimenci H., Akyuz A.: Comparasion of crop water stress index (CWSI) and water deficit index (WDI) by using remote sensing (RS). *Polish Academy of Science Cracow branch*, 2017, **3(1)**: 879-894.
 28. W e s t H., Quinn N., Horswell M.: Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **232**, 111291.
 29. W i t e k T.: Mapy glebo-rolnicze oraz kierunki ich wykorzystywania. Seria P 18 IUNG, Puławy 1973.
 30. W i r é h n L.: Nordic agriculture under climate change: A systematic review of challenges, opportunities and adaptation strategies for crop production. *Land Use Policy*, 2018, **77**: 63-74.
 31. W u B., Zhang M., Zeng H., Tian F., Potgieter A.B., Qin X., Yan N., Chang S., Zhao Y., Dong Q., Boken V., Plotnikov D., Guo H., Wu F., Zhao H., Deronde B., Tits L., Loupian E.: Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: a review. *National Science Review*, 2023, **10(4)**: 1-17.
-

Adres do korespondencji:

mgr Ludwika Poręba
Zakład Gleboznawstwa i Analiz Środowiskowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 774
e-mail: lporeba@iung.pulawy.pl

AUTOR
Ludwika Poręba

ORCID
0000-0002-7987-1102

Marta Wyzińska, Jerzy Grabiński

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

BIOWĘGIEL – PERSPEKTYWY I MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA W NOWOCZESNYM ROLNICTWIE*

Słowa kluczowe: biowęgiel, biochar, plonowanie, nowoczesne rolnictwo

Wstęp

Współczesne rolnictwo stoi przed coraz większymi wyzwaniami wynikającymi z postępujących zmian klimatycznych, w tym częstszych i bardziej intensywnych susz oraz długotrwałych fal upałów. Warunki te istotnie ograniczają wzrost i rozwój roślin, zwłaszcza sadowniczych, wpływając negatywnie na aktywność fotosyntetyczną, pobieranie składników pokarmowych oraz ogólną kondycję roślin uprawnych. W odpowiedzi na te zagrożenia coraz większą uwagę zwraca się na rozwiązania umożliwiające efektywne gospodarowanie zasobami wodnymi i poprawę jakości środowiska glebowego. Jednym z takich rozwiązań jest biowęgiel, który w połączeniu z mikroorganizmami może znacząco ograniczać skutki stresu abiotycznego, w tym suszy.

Jednocześnie biowęgiel, jako produkt o wysokiej zawartości węgla organicznego i niskiej podatności na degradację, staje się kluczowym narzędziem odbudowy materii organicznej w glebach. Jego zastosowanie przyczynia się do poprawy struktury gleby, zwiększenia zawartości próchnicy oraz aktywności mikrobiologicznej. Jest to szczególnie istotne w kontekście obserwowanego w Polsce pogarszania się jakości gleb spowodowanego zarówno działalnością rolniczą, jak i pozarolniczą. Niedobór próchnicy, będący efektem nieprawidłowego gospodarowania zasobami glebowymi, zmusza do poszukiwania alternatywnych źródeł materii organicznej, takich jak biowęgiel, który może odgrywać istotną rolę w odbudowie funkcji biologicznych i chemicznych gleb.

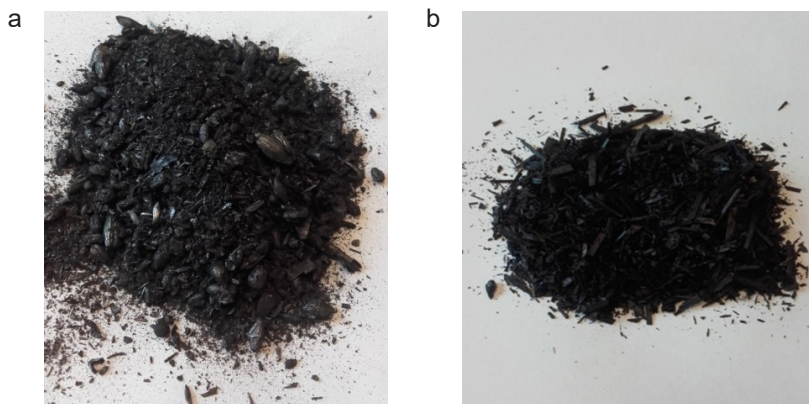
*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

Na świecie rośnie zainteresowanie produkcją i zastosowaniem biowęgla, szczególnie w rolnictwie i ochronie środowiska. Jako materiał pochodzący z pirolizy różnorodnej biomasy – od roślin energetycznych, przez odpady rolnicze, aż po osady ściekowe – biowęgiel znajduje zastosowanie głównie w celach nieenergetycznych. Postęp technologiczny w zakresie urządzeń do jego produkcji oraz możliwości wzbogacania biowęgla w mikroorganizmy, nawozy lub inne substancje bioaktywne otwiera nowe perspektywy dla jego roli jako komponentu poprawiającego jakość środowiska glebowego.

Biorąc pod uwagę rosnące zapotrzebowanie na żywność, szacuje się, że do 2050 r. produkcja zbóż musi wzrosnąć o 50–70%. Technologie takie jak biowęgiel mogą odegrać kluczową rolę nie tylko w podnoszeniu efektywności upraw, ale również w odbudowie zdolności produkcyjnej zdegradowanych gleb. Dlatego też, w świetle aktualnych i prognozowanych wyzwań klimatycznych oraz degradacyjnych biowęgiel i jego zastosowania stają się jednym z najbardziej obiecujących kierunków badań i wdrożeń w nowoczesnym, zrównoważonym rolnictwie.

Jak powstaje biowęgiel

Biowęgiel (biochar) to drobnoziarnista substancja stała (fot. 1) bogata w węgiel organiczny, powstająca w procesie pirolizy biomasy w warunkach beztlenowych lub ograniczonego dostępu tlenu. Jego unikalne właściwości fizykochemiczne sprawiają, że coraz częściej postrzegany jest jako wszechstronny materiał do poprawy jakości gleby, łagodzenia skutków zmian klimatu oraz zwiększania efektywności produkcji roślinnej (Lehmann i in. 2017).



Fot. 1. Biowęgiel a) z roślin medycznych po ekstrakcji, b) ze słomy żytniej

Fot. Marta Wyzińska

Średnia temperatura dla powolnej pirolizy wynosi 300–900°C, dla szybkiej pirolizy – 350–1000°C, a dla toryfikacji – 200–300°C; wydajność biowęgla dla powolnej

pirolizy wynosi 35–45%, dla szybkiej – 55–20%, a dla toryfikacji – 60–68% (Diatla i in. 2020, Gabhane i in. 2020) (tab. 1).

Tabela 1

Technologie produkcji biowęgla

Technologia	Opis metody
Metoda tradycyjna	W starożytności biowęgiel był wytwarzany na dwa sposoby: (i) spalano drewno na świeżym powietrzu, a następnie szybko przykrywano niedopalone drewno warstwami ziemi, (ii) układano drewno w dołach z ziemią, przykrywano je warstwami ziemi, a następnie stopniowo spalano przy braku dostępu lub przy ograniczonym dostępie powietrza.
Piroliza	• Spalanie biomasy zachodzi w temperaturach od 350°C do 1000°C w piecach i innych specjalistycznych urządzeniach przy częściowym lub całkowitym braku tlenu w celu wytworzenia biowęgla i biooleju. • W procesie powolnej pirolizy biomasa spalana jest w temperaturze 300–800°C i przy powolnym nagrzewaniu (od 0°C·s⁻¹ do 10°C·s⁻¹). • Powolny proces zachodzi zwykle przy ciśnieniu atmosferycznym i energii dostarczanej ze źródła zewnętrznego. • W przypadku pirolizy powolnej głównym produktem jest biowęgiel (35–45%), następnie bioolej (25–35%) i gaz syntezowy (20–30%). • Szybka piroliza zachodzi w temperaturach pomiędzy 350°C a 1000°C w warunkach beztlenowych, podobnie jak w przypadku wolnej pirolizy, chociaż szybkość nagrzewania w tym przypadku (17°C·s⁻¹) jest znacznie wyższa w porównaniu z wolną pirolizą.
Toryfikacja	• Jest to proces znany jako łagodna piroliza, służący do produkcji biowęgla. • Można go osiągnąć w różnych typach reaktorów. • Ogólnie rzecz biorąc, istnieją dwie główne kategorie reaktorów do toryfikacji: reaktory z ogrzewaniem bezpośrednim i reaktory z ogrzewaniem pośrednim.

Źródło: Alkharabsheh i in. 2021

Skład chemiczny i stabilność

Biowęgiel charakteryzuje się bardzo wysoką zawartością węgla organicznego (zazwyczaj powyżej 60%) oraz wyjątkowo niską podatnością na biodegradację. Dzięki temu może pozostawać w glebie przez setki, a nawet tysiące lat, pełniąc funkcję trwałego magazynu węgla. Jego wysoka stabilność termochemiczna wynika z obecności aromatycznych i kondensowanych struktur pierścieniowych, które są odporne na rozkład biologiczny (Lehmann i Joseph 2015).

Proces wytwarzania biowęgla polega na pirolizie biomasy w warunkach beztlenowych, co prowadzi do powstania materiału o dominującym udziale trwałych form węgla. Dzięki temu biowęgiel zachowuje się w środowisku znacznie dłużej

niż tradycyjna materia organiczna, co nadaje mu szczególne znaczenie w kontekście sekwestracji węgla i łagodzenia skutków zmian klimatu (Lehmann i Joseph 2015).

Skład chemiczny biowęgla zależy zarówno od rodzaju biomasy wykorzystywanej w procesie (np. drewno, słoma, odpady rolnicze), jak i od temperatury pirolizy, która zwykle mieści się w zakresie 300–700°C (tab. 2). Przy niższych temperaturach zachowuje się więcej związków organicznych, natomiast wyższe temperatury sprzyjają tworzeniu struktur bardziej stabilnych i odpornych na rozkład, zwiększając zawartość węgla organicznego do poziomu w granicach 50–90% (Glaser i in. 2002).

Tabela 2

Skład chemiczny różnych rodzajów biowęgla

Rodzaj biowęgla	Węgiel całkowity (%)	N (%)	S (%)	P (%)	pH	Temperatura spalania (°C)	Czas spalania (min)
1	70,8	3,9	0,074	0,320	8,50	550	bd ¹
2	63,5	1,8	0,890	0,095	10,00	600	bd
3	67,6	2,4	<0,100	0,330	6,79	500	4–7
4	42,6	3,6	0,224	4,420	6,78	550	240
5	70,5	1,2	0,146	0,260	9,65	550	180
6	75,6	1,9	0,136	0,120	8,32	550	240

¹1 – biowęgiel z plew zbożowych, 2 – biowęgiel z roślin medycznych po ekstrakcji, 3 – biowęgiel ze zrębków drzewnych „Fluid”, 4 – biowęgiel ze zrębków drzewnych, 5 – biowęgiel ze słomy żytniej, 6 – biowęgiel z mączki mięsno-kostnej;

²brak danych

Źródło: Wyzińska i Berbec 2024

Właściwości fizyczne

Biowęgiel charakteryzuje się porowatą strukturą, dużą powierzchnią właściwą (nawet powyżej 300 m²·g⁻¹) oraz niską gęstością objętościową. Takie właściwości fizyczne sprawiają, że przypomina on gąbkę zdolną do zatrzymywania znacznych ilości wody i składników pokarmowych w glebie. Dzięki temu biowęgiel szczególnie korzystnie wpływa na poprawę właściwości gleb lekkich, ograniczając straty wody przemieszczającej się poza strefę korzeniową.

Porowata struktura biowęgla pełni również istotną funkcję ekologiczną. Liczne mikropory stanowią dogodne środowisko dla mikroorganizmów glebowych, zapewniając im ochronę przed wysychaniem i promieniowaniem UV. Sprzyja to ich kolonizacji i zwiększa aktywność biologiczną gleby, co w konsekwencji poprawia jej żyzność oraz warunki wzrostu roślin (Kamman i in. 2015).

Zdolność sorpcyjna

Jednym z najważniejszych parametrów użytkowych biowęgla jest jego wysoka pojemność wymiany kationowej (CEC), która warunkuje zdolność do adsorpcji jonów i związków organicznych. Dzięki tej właściwości biowęgiel zwiększa retencję składników pokarmowych w glebie, ograniczając ich wymywanie, co ma szczególne znaczenie w przypadku gleb piaszczystych (Lehmann i in. 2017). Materiał ten efektywnie wiąże kationy, takie jak K^+ , NH_4^+ czy Ca^{2+} , a także niektóre substancje organiczne, przyczyniając się do poprawy żyzności i stabilności chemicznej środowiska glebowego.

Wartość CEC może ulegać dalszemu zwiększeniu w wyniku tzw. aktywacji biowęgla, polegającej m.in. na jego kompostowaniu z odpadami organicznymi lub inokulacji mikroorganizmami. Zabiegi te sprzyjają tworzeniu powierzchniowych grup funkcyjnych i zwiększeniu liczby miejsc sorpcyjnych, co poprawia dostępność składników pokarmowych dla roślin. Dodatkowo biowęgiel wykazuje zdolność do wiązania metali ciężkich oraz pozostałości pestycydów, co czyni go cennym materiałem wspomagającym procesy remediacji i rekultywacji gleb zdegradowanych (Lehmann i in. 2017).

Wpływ na właściwości chemiczne gleby

Biowęgiel może znacząco wpływać na odczyn gleby, najczęściej powodując jego wzrost. Właściwość ta jest szczególnie cenna w przypadku gleb kwaśnych, których zakwaszenie stanowi powszechny problem w warunkach klimatycznych Polski. Podwyższenie pH sprzyja lepszej dostępności makro- i mikroelementów, takich jak fosfor, wapń czy magnez, a jednocześnie ogranicza toksyczne działanie glinu i manganu.

Skład chemiczny biowęgla, w tym zawartość składników odżywczych, zależy od rodzaju użytej biomasy oraz parametrów procesu pirolizy. Wytworzony produkt może zawierać znaczące ilości wapnia, magnezu, fosforu i potasu, które przyczyniają się do poprawy żyzności gleb ubogich (Glaser i in. 2002). Na przykład popiół z biomasy drzewnej często charakteryzuje się wysoką zawartością potasu. Należy jednak podkreślić, że biowęgiel nie stanowi samodzielnego nawozu, lecz pełni rolę nośnika i stabilizatora składników pokarmowych, wspierając ich długotrwałą dostępność dla roślin.

Wpływ na właściwości biologiczne gleby

Wprowadzenie biowęgla do gleby może istotnie wspierać rozwój mikrobiomu glebowego poprzez tworzenie korzystnego mikrośrodowiska zapewniającego ochronę przed wysychaniem oraz odpowiednią powierzchnię do zasiedlania przez mikroorganizmy. Najlepsze efekty obserwuje się przy zastosowaniu biowęgla wzbogaconego

mikroorganizmami, uzyskanego np. poprzez proces kompostowania lub inokulację biofertylizatorami (Schmidt i in. 2014, Kammann i in. 2015).

Dzięki swojej porowatej strukturze biowęgiel sprzyja zwiększeniu liczebności i aktywności biologicznej drobnoustrojów glebowych. Pory materiału stanowią schronienie dla bakterii i grzybów, a obecne w nim związki organiczne mogą służyć jako źródło energii dla niektórych mikroorganizmów. Zastosowanie biowęgla w połączeniu z pożytecznymi mikroorganizmami, takimi jak *Bacillus* spp. czy *Trichoderma* spp., może dodatkowo stymulować procesy biologiczne w glebie i wspierać rozwój roślin.

Badania wskazują, że biowęgiel kompostowany (tzw. biochar compost) pełni funkcję promotora wzrostu, oddziałując zarówno na strukturę i aktywność mikrobiomu glebowego, jak i na zwiększenie dostępności składników pokarmowych dla roślin (Schmidt i in. 2014). Z tego względu rozwiązania oparte na biowęglu coraz częściej znajdują zastosowanie w rolnictwie regeneratywnym i systemach agroekologicznych.

Przeciwdziałanie degradacji gleb

W obliczu postępującego spadku zawartości próchnicy w glebach Polski biowęgiel staje się ważnym narzędziem wspierającym odbudowę zasobów węgla organicznego oraz poprawę jakości środowiska glebowego. Dzięki swojej wyjątkowej trwałości i odporności na rozkład, stanowi stabilny rezerwuar węgla, przyczyniając się do długotrwałej stabilizacji materii organicznej i ograniczenia procesów degradacji chemicznej, fizycznej oraz biologicznej (Lehmann i Joseph 2015).

W warunkach pogarszającej się jakości gleb rolniczych – wynikającej m.in. z erozji, zakwaszenia, utraty próchnicy czy nadmiernego stosowania nawozów mineralnych – biowęgiel może odgrywać kluczową rolę w przywracaniu ich funkcji produkcyjnych. Jego obecność w glebie sprzyja odbudowie struktury próchnicznej, zwiększeniu aktywności mikrobiologicznej oraz poprawie ogólnej żyzności, czyniąc z niego trwały element wspierający zrównoważone gospodarowanie zasobami glebowymi.

Znaczenie w nowoczesnym rolnictwie

Biowęgiel ma porowatą strukturę i wysoką zawartość węgla, dzięki czemu jest trwały i stabilny w glebie nawet przez setki lat (Hoque i in. 2025). Poprawia jej strukturę, zwiększa retencję wody, pomaga w magazynowaniu składników odżywczych oraz wspiera rozwój mikroorganizmów glebowych. Dodatkowo biowęgiel może pomagać w sekwestracji węgla poprzez długotrwałe zatrzymywanie go w glebie, co przyczynia się do łagodzenia zmian klimatu (Anyebe i in. 2025) (tab. 3).

Tabela 3

Zalety stosowania biowęgla

Zaleta	Opis mechanizmu działania biowęgla	Źródło
Zwiększenie retencji wody	porowata struktura zwiększa pojemność wodną gleby i wykazuje właściwości sorbcyjne	Atkinson i in. 2010
Poprawa żyzności gleby	poprawia pojemność wymiany kationów, pH, wpływa na aktywność mikrobiologiczną gleby	Lehmann 2007, Lehmann i in. 2011, Ding i in. 2023
Poprawa plonowania roślin	lepsze warunki glebowe (lepsza struktura gleby, dostępność wody i substancji odżywczych) skutkują wyższymi plonami roślin	Ding i in. 2023 Antonangelo i in. 2025
Sekwestracja węgla	stabilny węgiel biogeniczny pozostaje w glebie przez setki lat, ograniczając emisję CO ₂	Woolf i in. 2010
Oczyszczanie zanieczyszczeń	adsorbując metale ciężkie i pestycydy, wspomaga remediację gleby i wody	Kabir i in. 2021

Źródło: opracowanie własne

Wpływ biowęgla na plonowanie i produktywność roślin

Długotrwałe stosowanie biowęgla w systemach rolniczych może przyczyniać się do zwiększenia stabilności plonów oraz poprawy efektywności wykorzystania nawozów mineralnych. Z tego powodu biowęgla coraz częściej uwzględniany jest w strategiach zrównoważonego rolnictwa, agroleśnictwa i zarządzania krajobrazem (Kammann i in. 2015, Lehmann i in. 2015).

Zastosowanie biowęgla (biocharu) w praktyce rolniczej budzi rosnące zainteresowanie ze względu na jego zdolność do zwiększania produktywności roślin, szczególnie w warunkach stresu środowiskowego, takich jak susza, degradacja gleb czy zakwaszenie. Dzięki specyficznym właściwościom fizycznym, chemicznym i biologicznym biowęgla może wpływać na wzrost i rozwój roślin, poprawiając dostępność wody i składników pokarmowych oraz zwiększając ogólną efektywność wykorzystania zasobów środowiskowych (Lehmann i Joseph 2015).

W jednej z kluczowych analiz przeglądowych Jeffery i in. (2011) przeanalizowali wyniki 16 badań terenowych, wykazując, że średni wzrost plonów po zastosowaniu biowęgla wynosił ok. 10%. Największe efekty uzyskano w glebach tropikalnych, gdzie plony wzrosły średnio o 25%, podczas gdy w strefie umiarkowanej reakcja roślin była słabsza, co przypisano korzystniejszym warunkom glebowym i klimatycznym.

Najbardziej wyraźne pozytywne efekty obserwowano w glebach o niskiej żyzności, kwaśnych i ubogich w materię organiczną, gdzie poprawa właściwości fizykoche-

micznych po dodaniu biowęgla znacząco zwiększała dostępność wody i składników odżywczych, przekładając się na wzrost produktywności roślin (Glaser i in. 2002, Jeffery i in. 2011).

Efekt plonotwórczy biowęgla wynika z synergicznego działania kilku mechanizmów:

- Poprawa retencji wody – biowęgiel zwiększa zdolność gleby do zatrzymywania wody, co zmniejsza stres wodny w okresach suszy (Kammann i in. 2011);
- Zwiększenie pojemności sorpcyjnej gleby – biowęgiel poprawia pojemność wymiany kationowej (CEC), co ogranicza wymywanie składników pokarmowych i zwiększa ich dostępność (Lehmann i in. 2011);
- Neutralizacja pH – w glebach kwaśnych biowęgiel może podnieść pH, co sprzyja lepszej dostępności fosforu i ograniczeniu toksyczności glinu (Glaser i in. 2002);
- Stymulacja mikroorganizmów glebowych – porowata struktura biowęgla stanowi niszę dla pożytecznych drobnoustrojów, co może poprawiać mineralizację i przyswajanie składników odżywczych (Thies i in. 2015).

Wpływ biowęgla na rośliny zależy w dużej mierze od:

- Rodzaju gleby – gleby piaszczyste i kwaśne wykazują wyraźnie większą reakcję na aplikację biowęgla niż gleby gliniaste i zasobne w próchnicę (Jeffery i in. 2011);
- Rodzaju biowęgla – jego właściwości zależą od materiału wyjściowego (np. drewno, słoma, obornik) oraz temperatury pirolizy. Biowęgiel z drewna twardego może mieć lepsze właściwości sorpcyjne, ale niższą zawartość składników pokarmowych (Lehmann i Joseph 2015);
- Dawki i sposobu aplikacji – zbyt niskie dawki ($<5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) mogą być niewystarczające, natomiast bardzo wysokie mogą wpływać negatywnie na rozwój roślin przez zaburzenie proporcji składników odżywczych (Kätterer i in. 2019).

W badaniach prowadzonych w strefie tropikalnej, m.in. w Brazylii, zastosowanie biowęgla w dawkach $10\text{--}20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ przyczyniło się do znacznego wzrostu plonów manioku i kukurydzy – nawet o 30–50% (Steiner i in. 2007). W warunkach klimatu umiarkowanego, np. w Niemczech, dawka $16 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ pozwoliła zwiększyć plony pszenicy ozimej o 8–14%, szczególnie w okresach niedoboru wody (Kammann i in. 2011).

Pozytywne rezultaty uzyskano również w uprawach ogrodniczych. W doświadczeniach z pomidorem i papryką biowęgiel poprawiał dostępność azotu, co przekładało się na wzrost plonów o 10–20% (Rogovska i in. 2014). Jeszcze lepsze efekty osiągnęto, gdy biowęgiel wzbogacano mikroorganizmami, tworząc tzw. biochar compost, który dodatkowo aktywizował mikrobiom glebowy i zwiększał przyswajalność składników pokarmowych (Schmidt i in. 2014).

Oprócz bezpośredniego wpływu na plonowanie biowęgiel przyczynia się do poprawy efektywności wykorzystania nawozów mineralnych, ogranicza straty wody oraz redukuje emisję gazów cieplarnianych z gleby. Jego wyjątkowa trwałość – się-

gająca setek lat – sprawia, że jest on jednym z kluczowych narzędzi wspierających długoterminową odbudowę żyzności gleb oraz adaptację rolnictwa do zmian klimatu (Woolf i in. 2010, Lehmann i in. 2015).

Wieloaspektowe badania nad zastosowaniem biowęgla w glebie potwierdzają, że choć ich dodatek zazwyczaj poprawia właściwości gleby i może sprzyjać wzrostowi plonów, to jednak zakres tej poprawy jest silnie uzależniony od warunków glebowych, klimatycznych oraz charakterystyki samego materiału, z którego wyprodukowano biowęgiel (Jeffery i in. 2011).

Trwałość biowęgla i jego znaczenie dla sekwestracji węgla

Należy wyraźnie podkreślić, że trwałość biowęgla w środowisku glebowym, sięgająca setek, a nawet tysięcy lat, czyni go jednym z najbardziej obiecujących narzędzi w kontekście długoterminowej sekwestracji węgla oraz mitygacji zmian klimatu. W przeciwieństwie do świeżej materii organicznej, która ulega stosunkowo szybkiemu rozkładowi biologicznemu i mineralizacji, biowęgiel charakteryzuje się wysokim stopniem aromatyzacji i odpornością na procesy biodegradacji (Zimmerman 2010, Lehmann i in. 2017).

Szacunki wskazują, że okres półtrwania węgla zawartego w biowęglu wynosi od 100 do ponad 1000 lat, w zależności od rodzaju surowca, temperatury pirolizy oraz warunków środowiskowych (Spokas 2010, Woolf i in. 2010, Singh i in. 2012). Długotrwała stabilność biowęgla wynika z przewagi związków aromatycznych o wysokim stopniu kondensacji pierścieni węglowych, które są wyjątkowo odporne na utlenianie zarówno chemiczne, jak i biologiczne (Lehmann i Joseph 2015).

Z perspektywy bilansu globalnego węgla, zastosowanie biowęgla w glebie stanowi formę trwałego magazynowania węgla atmosferycznego poprzez konwersję biomasy w formy stabilne chemicznie. W procesie pirolizy część węgla zostaje uwolniona jako CO₂, CH₄ czy tlenek węgla, natomiast znaczna część (20–50% pierwotnego węgla organicznego) pozostaje w postaci stabilnego biowęgla, który może być wprowadzony do gleby i akumulowany przez dziesięciolecia (Lehmann i in. 2006, Woolf i in. 2010).

W modelach klimatycznych wykazano, że globalne wdrożenie technologii biowęgla mogłoby przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych o 0,5–1,8 Gt CO₂ eq rocznie, co odpowiada ok. 1–3% obecnych globalnych emisji antropogenicznych (Woolf i in. 2010, Smith i in. 2016). Potencjał ten jest szczególnie istotny w kontekście strategii NRTs (ang. *negative emission technologies*), obok bioenergetyki z wychwytem i składowaniem węgla (BECCS) czy sekwestracji węgla w ekosystemach leśnych i glebowych (Lehmann i in. 2021).

Co więcej, stabilność biowęgla nie oznacza jego całkowitej biernej obecności w glebie. Z czasem ulega on powolnym przemianom powierzchniowym, które zwiększają jego zdolność sorpcyjną i umożliwiają interakcje z mikroorganizmami oraz związkami organicznymi, przyczyniając się do długofalowej poprawy właściwości

gleby i zwiększenia jej pojemności węglowej (Zimmerman 2010, Lehmann i Joseph 2015).

Biowęgiel stanowi wyjątkowo trwały rezerwuar węgla organicznego i tym samym realny mechanizm trwałej sekwestracji CO₂. Włączenie jego produkcji i aplikacji do strategii gospodarki węglowej oraz polityk klimatycznych może przyczynić się do osiągnięcia celów neutralności klimatycznej w perspektywie długoterminowej.

Podsumowanie

W obliczu pogłębiających się zmian klimatu i rosnącej presji na zwiększenie efektywności produkcji rolnej, biowęgiel (biochar) jawi się jako innowacyjne i wielofunkcyjne narzędzie wspierające zrównoważony rozwój rolnictwa. Jego unikalne właściwości fizykochemiczne – takie jak porowata struktura, wysoka zawartość trwałego węgla organicznego, zdolność do sorpcji wody i składników odżywczych – czynią go wartościowym komponentem poprawiającym jakość środowiska glebowego, zwłaszcza w glebach zdegradowanych, kwaśnych lub ubogich w próchnicę.

Biowęgiel wykazuje ponadto pozytywny wpływ na właściwości chemiczne i biologiczne gleby – podnosi pH, poprawia pojemność wymiany kationowej (CEC), wspiera rozwój mikrobiomu glebowego, a przy tym może wiązać zanieczyszczenia, takie jak metale ciężkie czy pestycydy. Jego potencjał jako narzędzia remediacji i odbudowy materii organicznej jest szczególnie istotny w kontekście degradacji gleb, która stanowi jedno z kluczowych wyzwań dla bezpieczeństwa żywnościowego.

Efekty stosowania biowęgla na plonowanie roślin są zróżnicowane, zależne od rodzaju gleby, typu biowęgla, dawki i sposobu aplikacji. Największe korzyści obserwuje się na glebach słabych, piaszczystych i kwaśnych, gdzie poprawa warunków glebowych przekłada się na wzrost plonów nawet o 20–50%. W połączeniu z mikroorganizmami i kompostem, biowęgiel może dodatkowo zwiększać efektywność wykorzystania nawozów oraz wspierać rolnictwo regeneratywne.

Zważywszy na konieczność zwiększenia produkcji rolnej o 50–70% do 2050 r. oraz pilną potrzebę adaptacji systemów rolniczych do zmian klimatu, biowęgiel stanowi jedno z najbardziej obiecujących narzędzi wspierających długoterminową żyzność gleb, efektywność wodno-nawozową i odporność upraw. Jego dalsze wdrażanie wymaga jednak pogłębionych badań terenowych, standaryzacji metod produkcji oraz integracji z lokalnymi strategiami gospodarowania zasobami środowiskowymi.

Literatura

1. Alkharabsheh H.M., Seleiman M.F., Battaglia M.L., Shami A., Jalal R.S., Alhammad B.A., Almutairi K.F., Al-Saif A.M.: Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: a review. *Agronomy*, 2021, **11**, 993; <https://doi.org/10.3390/agronomy11050993>

2. Antonangelo J.A., Gronwald N.J., Laird D.A., Lawrinenko M., Smith K.M.: Biochar impact on soil health and tree-based crops: a review. *Recent Advances in Biochar Research and Applications*. Biochar 2025, **7**, 51; <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00450-6>
3. Anyebe O., Sadiq F.K., Monono B.O., Matsika T.A.: Biochar characteristics and application: Effects on soil ecosystem services and nutrient dynamics for enhanced crop yields. *Nitrogen*, 2025, **6(2)**, 31; <https://doi.org/10.3390/nitrogen6020031>
4. Atkinson C.J., Fitzgerald J.D., Hipps N.A.: Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil*, 2010, **337**: 1-18.
5. Diatta A.A., Fike J.H., Battaglia M.L., Galbraith J., Baig M.B.: Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arabian Journal of Geoscience*, 2020, **13**, 595; <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05586-2>
6. Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z.: Biochar to improve soil fertility: a review. *Agronomy Sustain. Dev.*, 2023, **43**, 1114752.
7. Glaser B., Lehmann J., Zech W.: Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*: Springer, 2002, **35(4)**: 219-230.
8. Gabhane J.W., Bhange V.P., Patil P.D., Bankar S.T., Kumar S.: Recent trends in biochar production methods and its application as a soil health conditioner: a review. *SN Applied Sciences*, 2020, **2**: 1-21; <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3121-5>
9. Hoque M.M., Saha B.K., Scopa A., Drosos M.: Biochar in agriculture: A review on sources, production, and composites related to soil fertility, crop productivity, and environmental sustainability. *Journal of Carbon Research*, 2025, **11(3)**, 50; <https://doi.org/10.3390/c11030050>
10. Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C.: A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*: Elsevier, 2011, **144(1)**: 175-187.
11. Kamman C.I., Ratering S., Eckhard C., Müller C.: Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils, *Journal of Environmental Quality*: ASA, CSSA, SSSA, 2011, **41(4)**: 1052-1066.
12. Kamman C.I., Schmidt H.P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., ... Glaser B.: Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports*: Nature Publishing Group, 2015, **5**, 11080.
13. Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L.: Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment, *Agriculture, Ecosystems & Environment*: Elsevier, 2019, **286**, 106665.
14. Kabir E., Kim K.H., Kwon E.E.: Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Journal of Environmental Management* 2021, **288**, 112409; <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112409>
15. Lehmann J., da Silva J., Steiner C., Nehls T., Zech W., Glaser B.: Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Fuel*: Elsevier, 2017, **209**: 230-240.
16. Lehmann J., Joseph S. (eds): *Biochar for environmental management. Science, Technology and Implementation*, Londyn: Routledge, 2015, pp. 976.
17. Lehmann J.: Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, **5**: 381-387.
18. Lehmann J., Abiven S., Kleber M., Pan G., Singh B.P., Sohi S., Zimmerman A.R.: Persistence of biochar in soil. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, **2**: 504-520.
19. Lehmann J., Gaunt J., Rondon M.: Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, **11**: 403-427.
20. Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D.: Biochar Effects on Soil Biota – A Review. *Soil Biology and Biochemistry* 2011, **43**: 1812-1836; <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>

21. Rogovska N., Laird D.A., Rathke S.J., Karlen D.L.: Biochar impact on midwestern mollisols and maize nutrient availability. *Geoderma: Elsevier*, 2014, **230–231**: 34-347.
22. Schmidt H.P., Pandit B.H., Martinsen V., Cornelissen G., Conte P., Kammann C., Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil. *Agriculture: MDPI*, 2014, **4(4)**: 598-614.
23. Singh B.P., Cowie A.L., Smernik R.J.: Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46(21)**: 11770-11778.
24. Smith P. et al.: Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 2016, **6**: 42-50.
25. Spokas K.A.: Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 2010, **1(2)**: 289-303.
26. Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S.: Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 2010, **1**, 56.
27. Zimmerman A.R.: Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). *Environmental Science & Technology*, 2010, **44(4)**: 1295-1301.
28. Steiner C., Teixeira W.G., Lehmann J., Nehls T., de Macêdo J.L.V., Blum W.E.H., Zech W.: Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil: Springer*, 2007, **291(1–2)**: 275-290.
29. Thies J.E., Rillig M.C., Graber E.R.: Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. *Soil Biology and Biochemistry: Elsevier*, 2015, **75**: 1-18.
30. Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S.: Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications: Nature Publishing Group*, 2010, **1**, 56.
31. Wyzińska M., Berbeć A.K.: Impact of biochar dose and origin on winter wheat grain quality and quantity. *Agriculture*, 2024, **14(1)**, 39; <https://doi.org/10.3390/agriculture14010039>

Adres do korespondencji:

dr inż. Marta Wyzińska
dr hab. Jerzy Grabiński, prof. IUNG-PIB
Zakład Uprawy Roślin i Jakości Plonu
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel.: 81 47 86 814; 811
e-mail: mwyzinska@iung.pulawy.pl
jurek@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Marta Wyzińska	0000-0002-2763-7955
Jerzy Grabiński	0000-0003-0427-9398

Jerzy Grabiński, Marta Wyzińska

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

SUPERABSORBENTY – MOŻLIWOŚCI STOSOWANIA W NOWOCZESNEJ PRODUKCJI ROŚLINNEJ*

Słowa kluczowe: superabsorbenty, hydrożele, nowoczesna produkcja, produktywność roślin

Wstęp

Nowoczesna produkcja roślinna stoi przed wyzwaniami związanymi z postępującymi zmianami klimatu, deficytem wody w glebie, jak również degradacją gleb. Dlatego też coraz większe zainteresowanie budzą technologie i produkty wspierające efektywne gospodarowanie zasobami wodnymi i poprawę jakości środowiska glebowego oraz dostępności wody dla roślin. Jednym z innowacyjnych rozwiązań (produktów) w tym zakresie są superabsorbenty – polimery posiadające zdolności do wiązania i zatrzymywania znacznych ilości wody w odniesieniu do swojej masy własnej.

Rośliny dla wydania wysokiego i dobrej jakości plonu wymagają odpowiednio dużej ilości wody. Dla roślin uprawianych w warunkach polowych głównym jej źródłem są opady. Przy czym ważna jest nie tylko ich ilość (suma), ale także rozkład w trakcie sezonu wegetacyjnego, bo możliwości magazynowania wody, zwłaszcza przez gleby posiadające słabo rozwinięty kompleks sorpcyjny, są ograniczone. Jeśli duże opady wystąpią tylko na początku danego okresu, to po upływie kilku tygodni, szczególnie na glebach lżejszych, rośliny zaczynają cierpieć na niedobór wody. W ostatnich latach niekorzystne rozkłady opadów stały się pewną normą. Nierzadko w okresie intensywnego wzrostu roślin zdarzają się bowiem okresy bezopadowe trwające dłużej niż 1 miesiąc. Producent może w pewnym stopniu niwelować negatywne skutki złego rozkładu opadów, zwłaszcza poprzez tworzenie odpowiedniej struktury gleby warunkującej jej potencjał retencyjny. Jest to możliwe przede wszystkim poprzez działania agrotechniczne związane z odpowiednią uprawą roli oraz poprzez

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

działania związane z wprowadzaniem do gleby różnego rodzaju materii organicznej (popłony, obornik).

Celem niniejszego opracowania jest ocena wykorzystania superabsorbentów w nowoczesnej produkcji roślinnej.

Wyniki i dyskusja

Superabsorbenty (SAP, *ang. Super Absorbent Polymers*) to materiały polimerowe zdolne do wchłaniania i zatrzymywania wody. Zdolność ta wynika z obecności grup hydrofilowych w strukturze chemicznej polimeru oraz jego usieciowienia przestrzennego, które umożliwia zatrzymywanie wody. Pod względem chemicznym superabsorbenty dzielą się na naturalne, syntetyczne oraz hybrydowe. Z punktu widzenia rolnictwa najbardziej istotny jest fakt, że posiadają one zdolność do wielokrotnego uwalniania i ponownego wchłaniania wody (Huttermann i in. 2009).

Rozważania dotyczące możliwości stosowania superabsorbentów w rolnictwie wynikają ze zdolności wiązania przez te substancje dużych ilości wody. Jak podają producenci, są to ilości rzędu 200–600 g wody $\cdot$ g⁻¹ hydrożelu. Tak duży zakres spowodowany jest różnicą w budowie chemicznej hydrożeli, są to bowiem związki różniące się znacznie pod względem składu chemicznego. Przykładowo w badaniach Dąbrowskiej i Lejcuś (2012) różnice w ilości wchłoniętej wody pomiędzy hydrożelem będącym usieciowionym poliakrylanem potasu a hydrożelem będącym usieciowionym kopolimerem akrylamidu z akrylanem przekraczały 30%.

Należy tutaj podkreślić, że określana przez producentów hydrożelu ilość wody, jaką może on wchłonąć dotyczy wody zdemineralizowanej. Ilość wody niezdemineralizowanej możliwej do wchłonięcia jest znacznie mniejsza. W badaniach Dąbrowskiej i Lejcuś (2012) obecność jonów jednowartościowych spowodowała zmniejszenie ilości wody wchłoniętej przez hydrożel potasowy aż o ponad 70%. Badania innych autorów wykazały, że w przypadku jonów dwuwartościowych te ograniczenia również występują. Powyższe stwierdzenia rodzą pytanie, jak wygląda proces wchłaniania wody deszczowej. Można założyć, że obecność jonów jedno- i dwuwartościowych w wodzie deszczowej jest raczej śladowa, ale jeśli woda ta przesiąknie przez wierzchnią warstwę gleby, to szybko zmienia swój skład i różne jony zaczynają się w niej pojawiać. Na pewno jest zapotrzebowanie na badania, które wyjaśniłyby ten problem. Można jeszcze dodać, że pewien wpływ na ilość wchłanianej wody przez dany superabsorbent ma także stopień jego rozdrobnienia (wielkość granulek). Najlepiej chłonie wodę hydrożel o granulach średniej wielkości (Dąbrowska i Lejcuś 2012). W rozważaniach o przyszłości hydrożeli informacje o ilości wody, jaką mogą te substancje chłonać jest o tyle istotna, że ma związek bezpośredni z proponowanymi dawkami na jednostkę powierzchni, a tym samym na koszt zastosowania. Wydaje się, że szansę na szersze zastosowanie w praktyce rolniczej mają SAP charakteryzujące się pobieraniem wody na poziomie co najmniej 250–300 g $\cdot$ g⁻¹.

Bariery dla stosowania SAP w nowoczesnej polowej produkcji roślinnej

Jeszcze niedawno superabsorbenty były traktowane jako produkty jednoznacznie nieszkodliwe dla człowieka i środowiska, rozkładające się w drodze reakcji chemicznych na dwutlenek węgla, wodę i materię organiczną (Thombare i in. 2018). Stwierdzono jednak, że jest to proces rozkładu raczej powolny (Nyssölä i Ahlgren 2019, Adjud i in. 2022), którego tempo zależy od wielu czynników: typu związku chemicznego, głębokości aplikacji oraz temperatury gleby i jej wilgotności. Niski poziom tlenu i wilgoci, wysokie zasolenie oraz niska dostępność składników odżywczych dodatkowo zmniejszają tempo biodegradacji SAP (Gu 2003, Adjud i in. 2022).

W ostatnich latach zaobserwowano zmiany w podejściu do stosowania hydrożeli, ponieważ pojawiły się doniesienia o zanieczyszczeniu środowiska mikroplastikiem. Z tego względu rozkład superabsorbentów, należących do klasy materiałów antropogenicznych, powinien być dodatkowo zbadany. Stawiane są hipotezy, że SAP w środowisku glebowym może na drodze różnych przemian chemicznych doprowadzać do powstania związków przypominających plastik. Na razie są to właściwie tylko przypuszczenia. Ważnym głosem w dyskusji nad tym zagadnieniem była praca przeglądowa Buchmanna i in. (2024), z której wnioski wskazały na konieczność przeprowadzenia szerokich badań, które określą mechanizmy i warunki przemian SAP w procesie ich starzenia. Zasugerowana została mapa drogowa dla takich badań, które miałyby wyjaśnić ten problem. W tej mapie przewidziano dwa etapy:

1. Identyfikacja najbardziej istotnych procesów i ich wzajemnych oddziaływań, które wyzwalają powstawanie stałych pozostałości SAP w glebie.
2. Ocena, w jakim stopniu ilość, częstotliwość i metody stosowania SAP modulują powstawanie stałych pozostałości SAP w glebie.

Rynek światowy SAP

Rynek superabsorbentów wykazuje dynamiczny wzrost, który jest napędzany rosnącym zapotrzebowaniem na produkty higieniczne, ale także rozwijającym rolnictwem. W sektorze rolnictwa superabsorbenty zyskują na znaczeniu jako środki poprawiające retencję wody w glebie, szczególnie w regionach narażonych na susze. Ich zastosowanie przyczynia się do zwiększenia efektywności wykorzystania wody i poprawy wysokości i jakości plonów (Liu i in. 2020).

Wykorzystanie superabsorbentów w rolnictwie będzie zależne od tego, jak będzie wyglądała produkcja i rynek tych substancji w perspektywie najbliższych lat. Prognozy, jakie wykonują różne agencje wskazują, że będzie on się rozwijał dość dynamicznie. Jak wynika z prognoz firmy Grand View Research, zarejestrowanej w stanie Kalifornia i mającej siedzibę w San Francisco, w najbliższych latach produkcja SAP na świecie będzie rosła i w 2030 r. będzie ona wyższa niż w 2023 r.

o ponad 50% (Raport 2024). Skumulowany roczny wskaźnik wzrostu produkcji SAP (CAGR, ang. *Compound Annual Growth Rate*) według tej firmy wyniesie aż 6,5% dla lat 2024–2030. Można zatem zakładać, że dostępność SAP na rynku będzie większa niż obecnie i w związku z tym nie można wykluczyć, że także ich cena będzie mniejsza.

Korzyści z zastosowania superabsorbentów w nowoczesnej produkcji roślinnej

Zdolność do wchłaniania wody przez hydrożele sprawia, że mogą one odegrać istotną rolę w kształtowaniu wilgotności gleby. Modelowe badania określające rolę superabsorbenta w ograniczaniu wysychania gleby przeprowadzili Yu i in. (2017) (tab. 1.).

Tabela 1

Zdolność do utrzymania wody w różnych glebach poddanych suszeniu, w zależności od ilości i rodzaju różnych superabsorbentów (piasek gliniasty)

Czas suszenia	Rodzaj SAP*	Dawka SAP (%)			
		0,1	0,5	1	2
0	WOTE	44,07Bdt*	68,5Cc	91,57Bb	132,2Ba
	GNKH	47,28Ad	73,06BCc	94,90Bb	141,28Ba
	BJ-2101S	45,44Bd	79,72Ac	109,99Ab	157,41Aa
	BJ-2010-M	43,57Bd	64,17Cc	78,69Cb	109,01Da
5	WOTE	5,9Dd	32,97Ec	48,56Fb	73,36Fa
	GNKH	10,11Cd	33,53Ec	57,52Eb	96,26Ea
	BJ-2101S	9,38Cd	42,64Dc	70,81Db	115,13Ca
	BJ-2010-M	10,74Cd	34,04Ec	51,05EFb	78,44Fa
10	WOTE	0,01Cd	6,44Gc	20,41b	46,17Ha
	GNKH	0,04EFd	12,75Fc	32,69Hb	65,31Fa
	BJ-2101S	0,38Ed	16,08Fc	42,42Gb	85,33Ea
	BJ-2101-M	0,06Efd	14,31Fc	32,65Hb	55,72Ca

*oznaczenia SAP: WOTE (SAP potasowy – 15% akryl + 85 akrylamid), GNKH (SAP sodowy – 60% akryl + 40% akrylamid), BJ-2101M (SAP sodowy 15% akryl + 85% akrylamid), BJ-2101M (SAP sodowy 15% akryl + 85% akrylamid)

**dane oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie ($p < 0,05$). Dla każdego czasu suszenia wielkie litery określają istotność różnic w kolumnie między rodzajami SAP, a małe litery istotność różnic w zależności od ilości zastosowanego SAP

Źródło: Yu i in. 2017

Te same badania (Yu i in. 2017) wykazały, że rola superabsorbenta w ograniczaniu strat wody wzrasta na glebach lżejszych, co potwierdziły również badania Li i in. (2014). Fallahi i in. (2015) udowodnili, że zastosowanie SAP doglebowo w warunkach stresu suszy wpływa pozytywnie na efektywność wykorzystania wody (o 14%) w uprawie bawełny. SAP mogą także wywierać pewien wpływ na właściwości fizyczne gleb. Na przykład Li i in. (2014) stwierdzili, że hydrożel w dawce $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ wpływa dodatnio na tworzenie dużych agregatów glebowych ($>0,25 \text{ mm}$). Pozytywny wpływ SAP na właściwości fizyczne gleby został dostrzeżony także przez Abrisham i in. (2018) (zmniejszenie jej masy objętościowej o 25,5% oraz wskaźnika infiltracji o 21,5%).

Wpływ superabsorbentów na plonowanie roślin uprawnych

Wiele badań dokumentuje pozytywny wpływ SAP na plonowanie roślin uprawianych w warunkach polowych, przy czym wielkość stosowanych dawek i zwyczaj plonu jest bardzo zmienna. Robiul i in. (2011) przeprowadzili badania polowe z pszenicą ozimą (*Triticum aestivum* L.) w warunkach suszy, stosując SAP w dawkach: 10; 20; 30 i $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. W przypadku niskiej i średniej dawki wzrost plonu ziarna badanego gatunku był statystycznie nieistotny. Istotne zwiększenia plonu dotyczyły dawek 30 i $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Badania te wykazały również dodatni wpływ SAP na cechy jakościowe ziarna (zawartość białka, cukru i skrobi).

Autorzy niniejszego opracowania realizowali doświadczenia polowe z pszenicą ozimą i jara, w których stosowali dawki od 0 do 30 kg superabsorbentu (hydrożelu potasowego). Badania prowadzono na stosunkowo mocnych glebach i przyrosty plonu były niezbyt duże – poniżej 10%. Tylko w jednym przypadku wzrost ten był zdecydowanie większy, ale dotyczył on suszy, która wystąpiła w sezonie 2015/2016 w środkowej części kraju, w RZD Błonie-Topola.

Shahrajabian (2019) określił jako właściwą dawkę SAP przy uprawie kukurydzy na poziomie $30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Uzyskał on wzrost plonu ziarna tego gatunku o 3,4–10%. Fallahi i in. (2015) badali możliwość wykorzystania SAP w warunkach stresu suszy w uprawie bawełny, przy czym stosowali oni SAP w dawkach: 0; 30; 60 i $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Dawka $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ została określona jako wystarczająca do ograniczenia umiarkowanego stresu suszy, który był związany z 15-dniowymi interwałami w nawadnianiu. Moslemi i in. (2011) przeprowadzili badania związane ze stosowaniem SAP na glinie ilastej. Superabsorbent w tych badaniach był stosowany zarówno w formie sypkiej, jak i w formie żelu, w rzędach, na głębokość 15 cm, w dawce $110 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Badania przeprowadzono na kukurydzy w warunkach stresu suszy bez stresu. W stosunku do obiektu kontrolnego plon ziarna po zastosowaniu SAP w formie sypkiej był wyższy o 27%, co wynikało z wyższej masy 1000 ziaren i większej ich ilości w kolbie. Warto zaznaczyć, że w warunkach bezstresowych również zaobserwowano wzrost plonu po zastosowaniu hydrożelu.

Znacznie większe dawki superabsorbentu stosowali Yazdani i in. (2007). Najwyższa uwzględniona w badaniach dawka wynosiła $275 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, a rośliną uprawną była soja. Najniższa stosowana dawka $75 \text{ kg SAP} \cdot \text{ha}^{-1}$ zwiększała plon soi o 11%, niezależnie od sposobu stosowanego nawodnienia.

Na uwagę zasługują również badania meta-analityczne. Zheng i in. (2023) dokonali przeglądu ponad 310 publikacji obejmujących 1504 pary danych i wykazali, że średni wzrost plonów po zastosowaniu superabsorbentów wynosił 12,8%, natomiast efektywność wykorzystania wody poprawiła się o 17,2%. Największe efekty odnotowano w uprawach warzywniczych oraz roślinach bulwiastych.

Podsumowanie

Zastosowanie superabsorbentów (SAP) w nowoczesnej produkcji roślinnej może stanowić odpowiedź na jedno z najpoważniejszych wyzwań współczesnego rolnictwa, jakim jest deficyt wody spowodowany zmianami klimatu. Analiza dostępnych źródeł literaturowych oraz wyników badań dowodzi, że SAP mają korzystny wpływ nie tylko na wzrost plonów, ale również na ich jakość (zwiększenie zawartości białka, skrobi i cukrów), szczególnie w warunkach stresu suszy oraz na glebach lekkich o niskiej pojemności wodnej. Ich skuteczność zależy jednak od rodzaju zastosowanego polimeru, warunków glebowych, sposobu aplikacji oraz dawki.

Dawki określane przez różnych autorów jako odpowiednie do stosowania w praktyce mieszczą się w przedziale $30\text{--}90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, choć w badaniach eksperymentalnych wykorzystywano także znacznie większe ilości – nawet do $275 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Koszt zastosowania SAP może wydawać się wysoki, jednak w przeliczeniu na okres kilku lat działania produktu (np. 5 lat, zgodnie z deklaracjami producentów) oraz potencjalne zwwyżki plonów – może okazać się opłacalny, zwłaszcza w warunkach ograniczonej dostępności wody. W październiku 2024 r. cena hydrożelu sodowego w opakowaniach przemysłowych (np. big-bagach) wynosiła ok. $11 \text{ zł} \cdot \text{kg}^{-1}$, co przy dawce $60\text{--}90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ oznacza koszt rzędu $660\text{--}990 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$, a dla hydrożelu potasowego – ok. 30% więcej.

Rosnące zainteresowanie praktyki rolniczej stosowaniem SAP sprzyja pojawianiu się pytań o ich wpływ na środowisko. Jeszcze do niedawna uznawano je za substancje bezpieczne i biodegradowalne, a obecnie rozważa się ich potencjalny udział w powstawaniu mikroplastiku w glebie. Procesy rozkładu SAP są złożone, powolne i zależą od wielu czynników środowiskowych, takich jak wilgotność, zasolenie, dostępność tlenu czy temperatura. Dla pełnego ich wyjaśnienia potrzeba jeszcze wiele pogłębionych badań, które pozwolą ocenić, czy ryzyko akumulacji SAP w środowisku glebowym rzeczywiście istnieje. Dopóki nie zostanie to jednoznacznie potwierdzone, SAP mogą być postrzegane jako realne narzędzie wspierające zrównoważone rolnictwo.

Dla szerokiego upowszechnienia stosowania SAP w praktyce rolniczej potrzeba jednak jeszcze wielu badań, także w zakresie sposobu ich wprowadzania do gleby. Można założyć, że największą efektywność ich działania można osiągnąć, gdy są one

rozmieszczone w bezpośredniej bliskości kiełkujących nasion, natomiast równomierne rozsiewanie SAP po całej powierzchni pola przynosi mniej spektakularne rezultaty. Dodatkowych wyjaśnień uzyskanych w ramach badań naukowych wymaga także problem wpływu obecności różnych jonów w wodzie znajdującej się w glebie na zdolność SAP do jej wchłaniania. Warto również zaznaczyć, że rosnąca dostępność hydrożeli na rynku sprzyja ich wykorzystywaniu jako komponentów nawozów mineralnych i organicznych, choć jest to zagadnienie wymagające osobnego omówienia.

Podsumowując, należy stwierdzić, że superabsorbenty mają potencjał, by stać się istotnym elementem nowoczesnych technologii produkcji – zwłaszcza w regionach narażonych na suszę. Główne bariery ich stosowania dotyczą kosztów oraz nie do końca wyjaśnionych aspektów środowiskowych. Jeśli badania wykażą, że hipotezy o negatywnym wpływie SAP na środowisko są nieprawdziwe, to do szybkiego wprowadzania ich do praktyki potrzeba jeszcze wielu badań, które wyjaśnią wszystkie aspekty związane z prawidłowym ich stosowaniem dla uzyskania najlepszego efektu.

Literatura

1. Abrisham E.S., Jafari M., Tavili A., Rabii A., Chahoki M.A.Z., Zare S., Egan T., Yazdanshenas H., Ghasemian D., Tahmoures M.: Effects of a super absorbent polymer on soil properties and plant growth for use in land reclamation. *Arid Land Research and Management*, 2018, **32**: 407-420.
2. Adjuk T.A., Nokes S.E., Montross M.D., Wendroth O.: The impacts of bio-based and synthetic hydrogels on soil hydraulic properties: A review. *Polymers*, 2022, **14(21)**, 4721.
3. Buchmann C., Neff J., Meyer M., Bundschuh M., Steinmetz Z.: Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics? *Environmental Science: Processes & Impacts: Cambridge University Press*, 2024, *Plastics*, 2, **e3**: 1-14.
4. Dąbrowska J., Lejcuś K.: Charakterystyka wybranych właściwości superabsorbentów. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich: PAN*, 2012, **3/IV**: 59-68.
5. Fallahi H.R., Taherpour Kalantari R., Aghhavani-Shajari M., Soltanzadeh M.G.: Effect of super absorbent polymer and irrigation deficit on water use efficiency, growth and yield of cotton. *Notulae Scientia Biologicae: Notulae*, 2015, **7(3)**: 338-344; DOI: 10.15835/nsb.7.3.9626
6. Gu J.D.: Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: Recent research advances. *International Biodeterioration & Biodegradation: Elsevier*, 2003, **52(2)**: 69-91.
7. Hüttermann A., Orikiriza L.J.B., Agaba H.: Application of superabsorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or polluted lands. *Clean – Soil, Air, Water: Wiley*, 2009, **37(7)**: 517-526.
8. Li X., He J.Z., Hughes J.M., Liu Y.R., Zheng Y.M.: Effects of super-absorbent polymers on a soil–wheat (*Triticum aestivum* L.) system in the field. *Applied Soil Ecology: Elsevier*, 2014, **73**: 58-63.
9. Liu M., Gong L., Zhao W., Yang B., Chen B.: Effects of super-absorbent polymer on soil remediation and crop growth in arid and semi-arid areas. *Agronomy: MDPI*, 2020, **10(3)**, 405.
10. Moslemi Z., Habibi D., Asgharzadeh A., Ardakani M.R., Mohammadi A., Sakari A.: Effects of super absorbent polymer and plant growth promoting rhizobacteria on yield and yield components of maize under drought stress and normal conditions. *African Journal of Agricultural Research: Academic Journals*, 2011, **6(19)**: 4471-4476.
11. Nyysölä A., Ahlgren J.: Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate. *International Biodeterioration & Biodegradation: Elsevier*, 2019, **139**: 24-33.

12. Report: Superabsorbent Polymers Market Research Report Information By Type (Sodium Polyacrylate, Polyacrylamide Copolymer, and Others), By Application (Health Care & Personal Care, Agriculture, Industry, Mining & Petroleum, and Others), And By Region (North America, Europe, Asia-Pacific, And Rest Of The World) – Market Forecast Till 2032 Source: https://www.marketresearchfuture.com/reports/superabsorbent-polymers-market-1956?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20373674291&hsa_grp=150985931723&hsa_ad=665909881832&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2086491755987&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1 (Dostęp 11.06.2025)
13. Robiul Islam M., Hu Y., Chen F., Xin Q., Egrinya Eneji A., Xue X.: Application of superabsorbent polymer: A new approach for wheat (*Triticum aestivum* L.) production in drought-affected areas of northern China. *Journal of Food, Agriculture & Environment*: WFL Publisher, 2011, **9(1)**: 304-309.
14. Shahrabian M.H., Sun W., Cheng Q., Khoshkham M.: The impact of soil amendment of superabsorbent polymer on grain yield and yield components of corn in center of Iran. *Cercetări Agronomice în Moldova: Agricultural Research and Development Station*, 2019, **LII(2, 178)**: 151-157; DOI: 10.2478/cerce-2019-0015
15. Thombare N., Mishra S., Siddiqui M.Z., Jha U., Singh D., Mahajan G.R.: Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications. *Carbohydrate Polymers*: Elsevier, 2018, **185**: 169-178.
16. Yazdani F., Allahdadi I., Akbari G.A.: Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition. *Pakistan Journal of Biological Sciences: ANSInet*, 2007, **10(23)**: 4190-4196.
17. Yu J., Shi J.G., Ma X., Dang P.F., Yan Y.L., Mamedov A.I., Shainberg I., Levy G.G.: Superabsorbent polymer properties and concentration effects on water retention under drying conditions. *Soil Science Society of America Journal: SSSA*, 2017; <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.07.0231>.
18. Zheng H., Li X., Wang Y., Zhang Z., Liu J.: Effects of super absorbent polymer on crop yield, water productivity and soil properties: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*: Elsevier, 2023, **282**, 108167.

Adres do korespondencji:

dr hab. Jerzy Grabiński, prof. IUNG-PIB
dr inż. Marta Wyzińska
Zakład Uprawy Roślin i Jakości Plonu
IUNG-PIB
ul. Czartosryskich 8
24-100 Puławy
tel.: 81 47 86 814; 811
e-mail: jurek@iung.pulawy.pl
mwyzinska@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Jerzy Grabiński	0000-0003-0427-9398
Marta Wyzińska	0000-0002-2763-7955

Adam Kleofas Berbec

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

AUTONOMICZNE ROBOTY POŁOWE JAKO ELEMENT ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU*

Słowa kluczowe: robotyka w rolnictwie, innowacje, drony naziemne, zrównoważony rozwój, autonomiczne roboty polowe

Wstęp

Światowe rolnictwo mierzy się obecnie z wyzwaniami, które wymagają podjęcia pilnych kroków, aby je rozwiązać. Należą do nich wzrost globalnej populacji, ograniczona dostępność zasobów czy negatywne skutki zmian klimatu. W odpowiedzi na te wyzwania coraz większego znaczenia nabiera koncepcja zrównoważonego rozwoju. Jest to koncepcja, według której zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego, ochrona środowiska i efektywne wykorzystanie zasobów musi być realizowane przy jednoczesnym utrzymaniu stabilności społeczno-gospodarczej obszarów wiejskich. Cyfryzacja i automatyzacja procesów produkcji rolnej, określana łącznie jako rolnictwo 4.0 (rolnictwo precyzyjne), jest szansą na sprostanie tym wyzwaniom z poszanowaniem idei zrównoważenia. Technologie rolnictwa precyzyjnego oparte na danych satelitarnych, sieciach czujników, sztucznej inteligencji i autonomicznych maszynach mają za zadanie ograniczyć straty środków produkcji (dzięki precyzyjnemu stosowaniu) i zwiększyć wydajność (zwiększenie wydajności pracy ludzi dzięki automatyzacji części procesów).

Według szacunków ONZ (2023) globalna populacja osiągnie poziom 9,7 mld ludzi już w 2050 r. Jednocześnie, w związku z rozwojem obszarów miejskich i prze-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

mysłowych, a także postępującą degradacją jakości gleb, powierzchnia dostępnych gruntów ornych pod produkcję roślinną może ulec zmniejszeniu. Jest to wyzwanie dla całego sektora rolniczego, który musi zapewnić zrównoważoną intensyfikację produkcji ziemiopłodów dla zwiększającej się liczby ludności. W tym kontekście coraz większym zainteresowaniem cieszą się technologie cyfrowe, robotyzacja i systemy wspomagania decyzji. Systemy te projektowane są w celu zwiększenia wydajności pracy, ale także zmniejszenia zużycia energii, nawozów i środków ochrony roślin – dzięki wdrożeniu precyzyjnego zarządzania ich stosowaniem. Rozwój autonomicznych robotów polowych (UGV, ang. *Unmanned Ground Vehicles*) stanowi jeden z najbardziej obiecujących kierunków współczesnej inżynierii rolniczej. Systemy te są w stanie samodzielnie wykonywać złożone operacje polowe, z minimalnym zaangażowaniem człowieka.

Robotyzacja jest jedną z możliwych ścieżek rozwoju rolnictwa, która staje się coraz bardziej popularna wśród producentów rolnych. Automatyczne i autonomiczne roboty rolnicze oferują rozwiązania, które mogą być wdrażane w różnych typach gospodarstw dla zwiększenia produktywności (wydajności pracy), przy jednoczesnym poszanowaniu zasad zrównoważonego rozwoju i zrównoważonej produkcji rolnej. Rozwiązania te mogą być także wdrażane przez gospodarstwa mniejsze, dla których wzrost wydajności przez intensyfikację produkcji rolnej (zakup ciężkiego sprzętu, ziemi i budynków rolniczych) może być rozwiązaniem zbyt drogim (Lowenberg-DeBoer i in. 2022). Roboty rolnicze, różnego typu, to mała rewolucja w zarządzaniu gospodarstwem. Maszyny te, wykorzystując nowoczesne technologie, jak RTK GPS (ang. *Real-Time Kinematic Global Positioning System* – system oparty na sieci lokalnych nadajników poprawiających dokładność prowadzenia operacji GPS do poziomu centymetrów) mogą wykonywać prace wcześniej zarezerwowane dla ciągników rolniczych i pracy ludzi, obniżając koszty pracy. Dodatkowo maszyny te korzystają często także ze wsparcia algorytmów rozpoznających w czasie rzeczywistym obraz z kamer umieszczonych na maszynie (także ze wsparciem sztucznej inteligencji), umożliwiając prowadzenie ultraprecyzyjnych zabiegów, zmniejszając jednocześnie zużycie nawozów, chemicznych środków ochrony roślin czy wody.

Strategie wdrażane w Unii Europejskiej, takie jak Europejski Zielony Ład czy koncepcja rolnictwa przyjaznego dla klimatu (CSA, ang. *Climate Smart Agriculture*) kładą nacisk na integrację innowacji technologicznych z celami ochrony środowiska i adaptacji do zmian klimatu. Wykorzystanie nowoczesnych technologii precyzyjnych uznawane jest powszechnie za rozwiązania tzw. climate-smart (przyjazne klimatowi), a więc takie, które pozwalają na zrównoważoną optymalizację produkcji rolnej przy jednoczesnej minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko naturalne (Hasan i in. 2022, Aijaz i in. 2025). Rozdział ten poświęcony jest omówieniu potencjału i możliwości zastosowania robotów rolniczych jako kluczowych elementów wspierających zrównoważony rozwój rolnictwa. W kolejnych akapitach omówiono podsta-

wowe technologie zastosowane w UGV, potencjalny wpływ na wydajność operacji rolniczych i środowisko, a także wyzwania we wdrożeniu technologii i wskazano obiecujące kierunki przysłych badań.

Podstawowe funkcje i technologia

Precyzyjna nawigacja i orientacja w przestrzeni

Współczesne roboty polowe wykorzystują zaawansowane systemy nawigacji RTK-GPS oraz inne systemy wspomagające precyzyjne prowadzenie maszyny (np. monitoring uślizgu koła) i integrują je z zaawansowanymi czujnikami, także wizyjnymi, tak aby w sposób autonomiczny wykrywać rzędy roślin, przeszkody czy pojedyncze rośliny uprawne i/lub chwasty. W badaniach eksperymentalnych dowiedziono, że roboty polowe oparte na tych technologiach mogą prowadzić precyzyjne prace polowe (np. opryski), ograniczając się jedynie do miejsc, w których jest to potrzebne (Wijesundara i in. 2023). Wykorzystanie lidarów, kamer rejestrujących obraz w świetle widzialnym i w spektrach niedostępnych dla ludzkich oczu (pasmo ultrafioletowe, pasmo podczerwone) i zaawansowanego oprogramowania pozwalają im rozróżniać rośliny i cechy terenu w czasie rzeczywistym. Dzięki tym możliwościom roboty mogą działać z dużą precyzją nawet w środowiskach o wysokim zróżnicowaniu roślinności i terenu. Wysokoprecyzyjny system RTK-GPS pozwala robotom działać z dokładnością do 2–3 cm, umożliwiając precyzyjne wysiewanie, pielenie i opryskiwanie. Precyzja ta może być dodatkowo zwiększona poprzez inne czujniki pozwalające na dokładniejsze pozycjonowanie w przestrzeni (kamery, czujniki laserowe, monitoring uślizgu kół) (Cubero i in. 2020, Wijesundara i in. 2023, Rodriguez-Sanchez i in. 2024). Wykorzystanie technologii SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*) umożliwia robotom jednoczesne tworzenie mapy otoczenia i szacowanie swojej pozycji na tej mapie, co ma kluczowe znaczenie w przypadku nieuporządkowanych i zmieniających się pól uprawnych. W zastosowaniach rolniczych SLAM radzi sobie z wyzwaniami związanymi z powtarzalnymi wzorami rzędów upraw, zmiennym oświetleniem i nierównym terenem, łącząc dane z czujników wizualnych, inercyjnych i stalitarnych (GPS). Na przykład najnowsze systemy SLAM wykorzystujące nawigację satelitarną (wielopasmową) i czujniki inercyjne wykazały 10–30% redukcję błędów lokalizacji podczas testów na autonomicznych robotach na polach soi w porównaniu z systemami wykorzystującymi wyłącznie czujniki wizualne i inercyjne. Taka dokładność umożliwia precyzyjną nawigację podczas wykonywania prac polowych, bez konieczności planowania trasy przez człowieka. Wraz z udoskonalaniem modeli SLAM, zwłaszcza dzięki technikom zamykania pętli, pojazdy UGV zyskują na niezawodności podczas długotrwałej autonomicznej pracy (Cremona i in. 2023). Oczekuje się, że dalszy rozwój algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego zwiększy poziom dokładności i niezawodności autonomicznych syste-

mów nawigacji, umożliwiając robotom polowym pracę w jeszcze bardziej złożonych i dynamicznych warunkach środowiskowych.

Moduły robocze

Roboty rolnicze mogą wykorzystywać także tzw. moduły robocze. Są to rozwiązania typu plug-and-play dostosowane do konkretnego narzędzia, które pozwalają na zwiększenie możliwości robota poprzez wymienną instalację różnych narzędzi. Mogą to być na przykład dysze do prowadzenia oprysków środkami ochrony roślin czy nawożenia dolistnego, mechaniczne urządzenia do odchwaszczania, sondy glebowe czy ramiona do przycinania – w zależności od realizowanego zadania. Przykładowo Agrobot Gari, zaprojektowany z myślą o uprawie borówki, może obsługiwać trzy różne moduły: jeden do autonomicznego pobierania próbek gleby i wykonania oznaczenia zawartości azotanów w glebie w terenie, drugi do prowadzenia precyzyjnego oprysku przeciw chwastom na podstawie ich detekcji wizualnej oraz trzeci z kamerą multispektralną do oceny stanu zdrowia roślin na podstawie indeksów spektralnych (Krklješ i in. 2025). Do mechanicznego odchwaszczania możliwe jest także zastosowanie wymiennych narzędzi rolniczych, takich jak kultywatory, glebogryzarki lub pielniki do chwastów – dobierane do rodzaju uprawy i jej fazy rozwojowej. Jedno z badań prowadzonych na polach ryżowych wykazało, że odchwaszczanie prowadzone z wykorzystaniem systemu wizyjnego osiągnęło skuteczność usuwania chwastów na poziomie ok. 89,7%, przy zaledwie 1,9% uszkodzeń roślin uprawnych, co dowodzi jej wysokiej selektywności i bezpieczeństwa dla uprawianych roślin (Wang i in. 2023).

Sztuczna inteligencja i systemy podejmowania decyzji

Roboty mogą wykorzystywać także algorytmy sztucznej inteligencji – w szczególności konwolucyjne sieci neuronowe (CNN). Sieci te umożliwiają analizę w czasie rzeczywistym obrazów rejestrowanych w pasmach widzialnym (RGB), wielospektralnym i hiperspektralnym. Obrazy te pochodzą z kamer montowanych na robotach i dronach w celu diagnozowania stanu zdrowia roślin, oceniania poziom stresu (np. wodnego) i wykrywania wczesnych oznak chorób lub uszkodzeń przez szkodniki, a także poziomu zachwaszczenia (Guerri i in. 2023, El Sakka i in. 2025). Na przykład model 3D-CNN wykorzystany przy ocenie obrazów hiperspektralnych liści osiągnął 84% dokładność we wczesnym wykrywaniu szarej pleśni na truskawkach, przewyższając konwencjonalne metody (Jung i in. 2022). CNN umożliwiły autonomicznym robotom skuteczne rozróżnianie upraw od chwastów, m.in. w uprawach buraka cukrowego i sałaty, gdzie osiągały bardzo wysoką dokładność. Pozwalało to na prowadzenie precyzyjnej kontroli zachwaszczenia (mechanicznej lub chemicznej) i na redukcję zużycia herbicydów nawet o 90% względem oprysków powierzchniowych (Milioto i in. 2017, Patel i in. 2022, Upadhyay i in. 2024). Także badania prowadzone w USA wykazały 90% redukcję zużycia herbicydów w uprawie pomido-

rów dzięki precyzyjnemu stosowaniu zabiegów herbicydowych przy wykorzystaniu algorytmów sztucznej inteligencji (Boyd 2025).

Systemy te są ciągle udoskonalane poprzez gromadzenie danych (Milioto i in. 2017, Patel i in. 2022).

Wsparcie zrównoważonego rozwoju i ograniczenie negatywnych skutków zmian klimatu

Autonomiczne roboty polowe wspierają rozwój zrównoważonych systemów rolniczych, których negatywny wpływ na klimat może zostać zneutralizowany lub w znacznym stopniu ograniczony. Wspólną cechą systemów autonomicznych jest optymalizacja wykorzystania zasobów (pracy, ale także paliwa i środków produkcji), zmniejszenie emisji i minimalizacja zależności od środków agrochemicznych (Seol i in. 2022, Reuters 2021). Roboty te – często zasilane energią elektryczną – mogą zastąpić w pewnym stopniu ciągniki spalinowe, zmniejszając emisje CO₂ i N₂O, które są powszechnie związane z ciężkimi maszynami (MIT News 2023). Inne autonomiczne nośniki narzędzi, takie jak Agroboti, chodzący są zasilane silnikami spalinowymi, mogą być lekką, energooszczędną, autonomiczną alternatywą dla klasycznych ciągników rolniczych. Autonomiczne nośniki narzędzi mogą wykonywać te same prace co ciągniki rolnicze, jednak nie ogranicza ich dostępność kierowcy; są bardziej energooszczędne dzięki niższej masie. Umożliwiając precyzyjne działania, systemy robotyczne zmniejszają ogólne zużycie środków ochrony roślin i nawozów, przyczyniając się bezpośrednio do ochrony środowiska i oszczędności kosztów. Takie innowacje wspierają realizację globalnych celów klimatycznych (ONZ 2015), jednocześnie zwiększając odporność gospodarstw rolnych dzięki wdrożeniu strategii podejmowania decyzji dotyczących zarządzania gospodarstwem opartych na danych zintegrowanych w ramach rolnictwa cyfrowego. Przykładowo, Robot Titan FT-35 firmy FarmWise wykorzystuje wizję maszynową i mechaniczne odchwaszczanie, osiągając zmniejszenie zużycia herbicydów o ok. 50–80% w porównaniu z konwencjonalnymi metodami opryskiwania (MIT News 2023, Bogue 2024). W Wielkiej Brytanii roboty firmy Small Robot Company pozwoliły na osiągnięcie redukcji zużycia chemicznych środków ochrony roślin o 41% i nawozów o ok. 32% (Wired UK 2018, Reuters 2021). Redukcja ta znacznie zmniejsza ryzyko wystąpienia emisji szkodliwych substancji do gleby i wody, przynosząc jednocześnie oszczędności operacyjne i zapewniając zgodność z bardziej rygorystycznymi przepisami dotyczącymi stosowania środków agrochemicznych (Seol i in. 2022). Precyzyjne metody niechemiczne wspierają zrównoważone i odporne na zmiany klimatu rolnictwo, eliminując uboczne szkody dla środowiska (Bloomer i in. 2023). Jednocześnie ocena środowiskowa (LCA, ang. *Life Cycle Assessment*) wdrożenia technologii autonomicznych powinna uwzględniać nie tylko fazę eksploatacji, ale również emisje związane z etapem produkcji tych maszyn, ich transportu oraz utylizacji po zakończeniu eksploatacji. W przypadku robotów

zasilanych elektrycznie proces wydobywania materiałów niezbędnych do produkcji akumulatorów i komponentów elektronicznych, a także proces budowy napędów związane są z wysoką emisją gazów cieplarnianych, które mogą czasowo niwelować korzyści wynikające z niższej emisyjności operacyjnej.

Niższa emisyjność i mniejsze zagęszczenie gleby

Lekkie roboty rolnicze mogą znacznie zmniejszyć zużycie paliw w porównaniu z konwencjonalnymi ciągnikami, bezpośrednio ograniczając emisję gazów cieplarnianych w gospodarstwach rolnych (Ghobadpour i in. 2022). Badania porównawcze pokazują, że zamiana ciągnika spalinowego o mocy 35 KM na elektryczny zmniejsza emisję w całym cyklu życia i koszty konserwacji, pomimo wyższych nakładów początkowych (Dhond i in. 2021, Karki i in. 2024). Ponadto badania gleboznawcze wskazują, że ultralekka konstrukcja robotów powoduje minimalne zagęszczenie gleby, zachowując jej porowatość, która ma kluczowe znaczenie dla wzrostu korzeni i aktywności mikroorganizmów (Reiser i in. 2023). Co więcej, teoria robotyki rojowej sugeruje, że zastąpienie jednego ciężkiego ciągnika wieloma małymi robotami nie spowoduje utraty wydajności produkcji, a jednocześnie będzie skutkowało zmniejszeniem o 15% zagęszczeniem wierzchniej warstwy gleby (Ghobadpour i in. 2022).

Zoptymalizowane wykorzystanie zasobów

Roboty polowe wyposażone w czujniki połączone z internetem rzeczy (IoT), takie jak sondy do pomiaru wilgotności gleby, czujniki do oznaczania zasobności gleb w składniki odżywcze czy detektory stresu roślin, umożliwiają precyzyjne stosowanie środków produkcji i wody w czasie rzeczywistym, dostosowane do konkretnego miejsca. W jednym z badań platforma AgriOne UGV wykorzystywała czujniki wilgotności do autonomicznej regulacji nawadniania na polach o zróżnicowanej strukturze, osiągając dokładną zakładaną wilgotność objętościową bez konieczności stosowania stałych sond (Tsimpidi i in. 2025). Analogiczne wyniki osiągnięto w badaniach mobilnej UGV z czujnikiem przewodności elektrycznej gleby. Campbell i in. (2021) pokazali, że robot pomiarowy wykonał pomiary z dokładnością porównywalną z ręcznym badaniem gleby, lecz przy znacznym odciążeniu ludzi. Ponadto kompleksowe systemy łączące drony latające (UAV), sieci czujników i roboty naziemne (UGV) umożliwiają generowanie map wilgotności lub zasobności gleb w czasie rzeczywistym, co pozwala na aplikację zasobów tylko tam, gdzie są one potrzebne (Mansoor i in. 2025).

Wyzwania i wdrożenie technologii

Ograniczenia techniczne

Autonomiczne roboty rolnicze, pracując w rzeczywistych, zmiennych warunkach, muszą dostosowywać się do nieregularnego terenu, zmiennych warunków pogodowych i zróżnicowanego środowiska upraw. Do tej pory w literaturze wciąż brakuje

przykładów w pełni niezawodnych systemów stosowanych w terenie (Duckett i in. 2018, Eiffert i in. 2020), co sugeruje, że systemy te są wciąż udoskonalane i technologia wciąż podlega dynamicznemu rozwojowi. Główne wyzwania inżynieryjne obejmują zapewnienie odpowiedniej żywotności baterii do wykonania zadań w terenie, solidną wodoodporność i odporność na kurz podczas ekspozycji na warunki atmosferyczne oraz niezawodne działanie w różnych temperaturach i na różnych rodzajach gleby (Duckett i in. 2018, Eiffert i in. 2020). Aby dorównać elastyczności i skuteczności maszyn obsługiwanych przez ludzi, bieżące badania i rozwój muszą koncentrować się na długotrwałej autonomii, eliminacji błędów, modułowej adaptowalności, konstrukcji odpornej na awarie i bezpieczeństwie obsługi (Duckett i in. 2018, Salazar i in. 2024). Projekt Hands Free Hectare (HFH) prowadzony przez Harper Adams University w Wielkiej Brytanii jest przykładem produkcji polowej przy użyciu wyłącznie autonomicznych ciągników, dronów i pojazdów bezzałogowych (UGV), bez udziału człowieka na polach. Projekt wykazał, że małe, zmodernizowane ciągniki z oprogramowaniem open source mogą samodzielnie wykonywać siew i oprysk, pobierać próbki i zbierać plony, osiągając wydajność 4,5 t jęczmienia jarego, zbliżoną do lokalnej średniej. Ponadto HFH zainicjowało testy z wykorzystaniem działania roju, kładąc nacisk na koordynację między wieloma kompaktowymi robotami i wykazując oszczędności w zakresie paliwa, pracy i intensywności użytkowania gruntów (Chatterjee 2024).

Kwestie społeczno-etyczne

Rzeczywistość robotyki rolniczej budzi obawy związane z zatrudnieniem, ponieważ może spowodować utratę miejsc pracy przez pracowników rolnych o niskich kwalifikacjach, co z kolei rodzi wyzwania etyczne i społeczno-gospodarcze związane z zatrudnieniem na obszarach wiejskich i równością szans. Proces automatyzacji, choć zwiększa efektywność produkcji, może w dłuższej perspektywie prowadzić do stopniowego ograniczenia zapotrzebowania na pracę fizyczną i sezonową w gospodarstwach. Szczególnie narażone są regiony, w których rolnictwo stanowi główne źródło utrzymania. Kluczowe wydaje się wdrożenie, wraz z rozwojem technologii i zapotrzebowaniem rynku, programów wsparcia i szkoleń, które pozwolą tej grupie zawodowej dostosować się do nowych realiów cyfrowego rolnictwa, np. w zakresie obsługi, analizy danych czy planowania operacji rolniczych z wykorzystaniem nowych technologii. Jednocześnie zmiany w rolnictwie, postępująca mechanizacja i automatyzacja procesów jest w rolnictwie od zawsze elementem jego rozwoju.

Wprowadzenie zaawansowanych robotów polowych wiąże się z nakładami inwestycyjnymi. Wysokie koszty początkowe mogą wykluczyć drobnych producentów rolnych. Teoretycznie dobrym rozwiązaniem mogłyby być grupy producenckie i spółdzielnie wspólnie ponoszące wysokie koszty zakupu sprzętu. Rozwiązania te są jednak mało popularne. Jednocześnie rozwój rolnictwa opartego na technologii może generować nowe miejsca pracy w sektorach związanych z planowaniem operacji

rolniczych, serwisowaniem sprzętu i analizą danych rolniczych, co potencjalnie może częściowo zrównoważyć negatywne skutki społeczne. W rolnictwie precyzyjnym wciąż potrzebna jest praca ludzi także do bieżącego monitorowania pracy robotów i ich obsługi. Zmienia się natomiast wydajność pracy – jeden człowiek może wykorzystywać flotę kilku–kilkunastu robotów wykonujących operacje rolnicze na kilku polach. Kluczowe jest jednak, aby dostęp do tej transformacji był szeroki – choćby przez organizację szkoleń z obsługi urządzeń. Istnieje ryzyko, że wdrożenie technologii autonomicznych będzie ograniczone tylko do dużych gospodarstw lub koncernów technologicznych, co może pogłębić istniejące nierówności strukturalne w rolnictwie.

Budowanie zaufania rolników wymaga przejrzystych praktyk w zakresie udostępniania danych, solidnych programów szkoleniowych oraz przyjaznych dla użytkownika interfejsów, które umożliwią rolnikom interpretację, korzystanie z systemów autonomicznych i nadzorowanie ich (Duckett i in. 2018, Salazar i in. 2024). Równie istotna jest kwestia przejrzystości i własności danych gromadzonych przez systemy autonomiczne. Wraz z postępującą cyfryzacją produkcji rolniczej coraz więcej informacji o glebach, chorobach i szkodnikach, plonach czy zastosowanych środkach ochrony roślin trafia do zewnętrznych baz danych, nierzadko kontrolowanych przez producentów oprogramowania. Brak jednoznacznych regulacji dotyczących tego, kto jest właścicielem i administratorem danych może prowadzić do sytuacji asymetrii informacyjnej między rolnikami a dostawcami technologii. Informacje te mogą posłużyć do trenowania modeli sztucznej inteligencji, która wymaga wielkiej ilości danych dla precyzyjnego modelowania i rozpoznawania wzorców. Dlatego konieczne jest zapewnienie rolnikom pełnego prawa wglądu i decydowania o sposobie wykorzystania danych generowanych przez ich maszyny.

Kompromisy środowiskowe

Roboty autonomiczne mają różne źródła zasilania. Mogą być zasilane klasycznymi silnikami spalinowymi, powodując emisję gazów cieplarnianych zarówno w miejscu eksploatacji (spalanie paliw), jak i podczas całego procesu produkcji lub zasilane energią elektryczną. Chociaż używanie robotów elektrycznych zmniejsza emisję w miejscu ich eksploatacji, to jednak ich produkcja, ale także produkcja energii elektrycznej, opracowywanie oprogramowania i utylizacja po zakończeniu eksploatacji, mają wpływ na środowisko i emisję dwutlenku węgla (Salazar i in. 2024). Kompleksowe oceny cyklu życia muszą uwzględniać emisje związane z produkcją, energią zużywaną do produkcji baterii oraz przepływy materiałów nadających się do recyklingu (Duckett i in. 2018). Analiza LCA pozwala na ocenę wpływu autonomicznych systemów na emisję gazów cieplarnianych, a także pełnego śladu węglowego (ang. *carbon footprint*). Zrównoważony rozwój wymaga, aby redukcje emisji w fazie użytkowania przewyższały emisje powstałe podczas produkcji, transportu i utylizacji komponentów robotów.

Podsumowanie

Najbliższa przyszłość i potrzeby badawcze

Wdrożenie robotyki rolniczej oraz rozwiązań autonomicznych ma ogromny potencjał. Związane jest to z możliwością zwiększenia wydajności pracy ludzi przy jednoczesnym znaczącym zmniejszeniu nakładów na środki produkcji. Niestety powszechne zastosowanie tej stosunkowo młodej technologii jest nadal ograniczone przez kilka kluczowych barier, w tym wysokie nakłady inwestycyjne, ale także ograniczenia łączności na obszarach wiejskich (w przypadku wschodniej Polski także zakłócenia GPS związane z wojną rosyjsko-ukraińską) oraz brak ram legislacyjnych dotyczących autonomicznych operacji polowych (Obeng-Ofori i in. 2025). Jednocześnie istnieje obecnie duży postęp w dziedzinie robotyki roju – umożliwiający wykorzystanie skoordynowanej floty mniejszych robotów – oraz brzegowej sztucznej inteligencji, która umożliwia analizę danych w czasie rzeczywistym, co prawdopodobnie przyczyni się do szerszego zastosowania tych rozwiązań poprzez poprawę elastyczności, skali i opłacalności (Albiero i in. 2021, Obeng-Ofori i in. 2025). Gwałtowny rozwój technologii autonomicznych, a także opracowanie skalowalnych, modułowych architektur opartych na rojach może znacząco obniżyć koszty wejścia na rynek dla drobnych rolników. Albiero i in. (2021) wykazali, że flota 24-kilowatowych elektrycznych traktorów robotycznych może łącznie dorównać wydajności polowej pojedynczego 270-kilowatowego traktora z silnikiem wysokoprężnym, oferując lepszą efektywność energetyczną i mniejsze ryzyko zagęszczenia gleby. Podobnie modułowe roboty, takie jak Hefty, umożliwiają konfigurację pod kątem różnych zadań i rodzajów upraw, zmniejszając wydatki na specjalistyczne maszyny, a jednocześnie wspierając adaptacyjność (Guri i in. 2024). Integracja robotów rolniczych pracujących na powierzchni pola, sieci czujników, dronów UAV i systemów zarządzania gospodarstwem pozwala na stworzenie płynnych ekosystemów rolnictwa precyzyjnego. Architektura taka umożliwi wdrożenie analiz predykcyjnych, a więc prognozowanie wystąpienia chorób i szkodników, wykrywanie stresu wodnego lub niedożywienia roślin. Pozwoli to na koordynację działań na różnych platformach, poprawiając szybkość reakcji i zmniejszając zależność od środków produkcji (mniejsze nakłady na środki produkcji) (Obeng-Ofori i in. 2025).

Co więcej, roboty rolnicze mogą wspierać także gospodarstwa ekologiczne poprzez stosowanie ekologicznych, nieselektywnych herbicydów, które w systemach precyzyjnych mogą być aplikowane bezpośrednio na chwasty. Ponadto roboty rolnicze poprzez precyzję działania mogą bezpośrednio wspierać różnorodność biologiczną gleby, sekwestrację dwutlenku węgla i ochronę siedlisk. Te atuty robotów rolniczych i systemów precyzyjnych będą miały kluczowe znaczenie w miarę dojrzewania ram zrównoważonego rozwoju i zyskiwania na popularności rolnictwa regeneracyjnego na całym świecie (Albiero i in. 2021, Obeng-Ofori i in. 2025).

Literatura

1. A i j a z N., Lan H., Raza T., Yaqub M., Iqbal R., Pathan M.S.: Artificial intelligence in agriculture: Advancing crop productivity and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2025, **20**, 101762; <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101762>
2. A l b i e r o D., Garcia A.P., Umezu C.K., Paulo R.L.: Swarm robots in agriculture: A review of mechanized operations. *arXiv*, 2021, 2103.06732; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.06732>
3. B l o o m e r D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H., James T.K.: Robots and shocks: emerging non-herbicide weed control options for vegetable and arable cropping. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2023, **67(1)**: 81-103; <https://doi.org/10.1080/00288233.2023.2252769>
4. B o g u e R.: Robots addressing agricultural labour shortages and environmental issues. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 2024, **51(1)**: 1-6; <https://doi.org/10.1108/IR-10-2023-0245>
5. B o y d N.: AI technology uses less herbicide to kill weeds. *University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences*, 2025; <https://news.ufl.edu/2025/02/ai-herbicide/>
6. C a m p b e l l M., Ye K., Scudiero E., Karydis K.: A portable agricultural robot for continuous apparent soil electrical conductivity measurements to improve irrigation practices. In 2021 IEEE 17th international conference on automation science and engineering (CASE). 2021, August, pp. 2228-2234, IEEE; doi:10.1109/CASE49439.2021.9551401
7. C h a t t e r j e e A.: Exploring the prospects and challenges of digital agriculture for food security – A case study of the “Hands Free Hectare” digital farm in the UK. *Digital Agricultural Ecosystem: Revolutionary Advancements in Agriculture*, 2024, pp. 259-267; <https://doi.org/10.1002/9781394242962.ch14>
8. C r e m o n a J., Civera J., Kofman E., Pire T.: GNSS-stereo-inertial SLAM for arable farming. *arXiv*, 2023; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.12836>
9. C u b e r o S., Marco-Noales E., Aleixos N., Barbé S., Blasco J.: RobHortic: a field robot to detect pests and diseases in horticultural crops by proximal sensing. *Agriculture*, 2020, **10(7)**, 276; <https://doi.org/10.3390/agriculture10070276>
10. D h o n d R., Srivastav U., Patil B.T., Vaishnav H.: Comparative study of electric tractor and diesel tractor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, **1168**, 012003; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1168/1/012003>
11. D u c k e t t T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B., Chen W.H., Cielniak G. et al.: *Agricultural robotics: the future of robotic agriculture*. 2018, *arXiv preprint arXiv:1806.06762*.
12. E i f f e r t S., Wallace N.D., Kong H., Pirmarzashti N., Sukkarieh S.: A hierarchical framework for long-term and robust deployment of field ground robots in large-scale farming. In 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE 2020, pp. 948-954.
13. E l S a k k a M., Ivanovici M., Chaari L., Mothe J.: A review of CNN applications in smart agriculture using multimodal data. *Sensors*, 2025, **25(2)**, 472; <https://doi.org/10.3390/s25020472>
14. G h o b a d p o u r A., Monsalve G., Cardenas A., Mousazadeh H.: Off-road electric vehicles and autonomous robots in agriculture: Trends, challenges, and opportunities. *Vehicles*, 2022, **4(3)**: 843-864; <https://doi.org/10.3390/vehicles4030047>
15. G u e r r i M.F., Distanto C., Spagnolo P., Bougourzi F., Taleb-Ahmed A.: Deep learning techniques for hyperspectral image analysis in agriculture: A review. *arXiv*, 2023; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.13880>
16. G u r i D., Lee M., Kroemer O.: Hefty: A modular reconfigurable robot for advancing robot manipulation in agriculture. *arXiv*, 2024, 2402.18710; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.18710>

17. Hasan M.M., Islam M.U., Sadeq M.J.: Towards technological adaptation of advanced farming through AI, IoT, and robotics: A comprehensive overview. In: Artificial intelligence and smart agriculture technology, U. Kose, P. Mondal, S. Podder (eds). 2022, rozdz. 2, pp. 21-42. CRC Press; <https://doi.org/10.1201/9781003299059-2>
18. Jung D.H., Kim J.D., Kim H.Y., Lee T.S., Kim H.S., Park S.H.: A hyperspectral data 3D convolutional neural network classification model for diagnosis of gray mold disease in strawberry leaves. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**, 837020; <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.837020>
19. Karki A., Shrestha B., Sharma P.P., Tuladhar D., Basnet S.: Comparative analysis between electrified tractor and diesel-powered tractor. *TSAE Journal*, 2024, **30(1)**: 37-41.
20. Krklješ D., Kitić G., Panić M., Petes C., Filipović V., Stefanović D., Obrenović N., Lalić M., Marko O.: Agrobot Gari, a multimodal robotic solution for blueberry production automation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, **206**, 110626; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110626>
21. Lakhari A., Yan H., Zhang C., Wang G., He B. i in.: A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate. *Agriculture*, 2024, **14(7)**, 1141; <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
22. Lowenberg-DeBoer J.: Economics of agricultural robotics. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2022, **44(1)**: 42-61; <https://doi.org/10.19103/AS.2023.0124.19>
23. Mansoor S., Iqbal S., Popescu S.M., Kim S.L., Chung Y.S., Baek J.H.: Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 2025, **16**, 1587869; <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
24. Milioto A., Lottes P., Stachniss C.: Real-time semantic segmentation of crop and weed for precision agriculture robots. *arXiv*, 2017; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.06764>
25. MIT News Office. (2023, March 9). Titanic robots make farming more sustainable. MIT Sustainability; <https://sustainability.mit.edu/article/titanic-robots-make-farming-more-sustainable>
26. Obeng-Ofori D., Atianashie M., Kuffour M.K.: The role of artificial intelligence and robotics in shaping the future of sustainable agriculture. *Academia Engineering*, 2025, **2**: 1-3.
27. ONZ, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). World population prospects 2022: Volume I, comprehensive tables (ISBN: 978-92-1-148373-4; eISBN: 978-92-1-001438-0). United Nations.
28. Patel D., Gandhi M., Shankaranarayanan H., Darji A.: Design of an autonomous agriculture robot for real-time weed detection using CNN. *arXiv*, 2022; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.12077>
29. Reiser D., Sharipov G.M., Hubel G., Nannen V., Griepentrog H.W.: Development and experimental validation of an agricultural robotic platform with high traction and low compaction. *Agriculture (Switzerland)*, 2023, **13(8)**, 1510; <https://doi.org/10.3390/agriculture13081510>
30. Reuters. (2021, February 15). Robot farming revolution: Meet Tom, Dick & Harry. Reuters UK; <https://www.reuters.com/plus/robot-farming-revolution-meet-tom-dick-harry>
31. Rodriguez-Sanchez J., Johnsen K., Li C.: A ground mobile robot for autonomous terrestrial laser scanning-based field phenotyping. *arXiv*, 2024; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.04404>
32. Salazar M., Portero P., Rubin J.: Identification of Technical Requirements for the Initial Design of an Autonomous Fruit-Harvesting Robot. *AgriEngineering*, 2024, **6(4)**: 3823-3842; <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040218>
33. Seol J., Kim J., Son H.I.: Field evaluations of a deep learning-based intelligent spraying robot with flow control for pear orchards. *Precision Agriculture*, 2022, **23(2)**: 712-732. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09856-1>
34. Tsimpidi I., Tevetzidis I., Sumathy V., Nikolakopoulos G.: Design and evaluation of a UGV-based robotic platform for precision soil moisture remote sensing [Preprint]. *arXiv*, 2025; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.18284>

-
35. Upadhyay A. i in.: Advances in ground robotic technologies for site-specific weed management: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, **225**, 109363; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109363>
 36. Wang H., Zhang L., Li F.: A combined paddy field inter-row mechanical weeder: Design optimization and field experimentation. *Agriculture*, 2023, **14**(3), 444; <https://doi.org/10.3390/agriculture14030444>
 37. Wijesundara W.M.T.D., Wanigathunga T.D., Waas M.N.C., Hithanadura R.T., Munasinghe S.R.: Accurate Crop Spraying with RTK and Machine Learning on an Autonomous Field Robot [Preprint], 2023, arXiv; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.16812>
 38. Wired UK. (2018, November 11). How small robots may kill the tractor and make farming efficient. Wired UK; <https://www.wired.com/story/farming-robots-small-robot-company-tractors>
-

Adres do korespondencji:

dr Adam Kleofas Berbec
Zakład Agroekologii i Ekonomiki
IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8

24-100 Pulawy

tel. 81 47 86 824

e-mail: Adam.Berbec@iung.pulawy.pl

AUTOR

Adam Kleofas Berbec

ORCID

000-0002-4609-081X

Adam Kleofas Berbec

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ROLNICTWO EKOLOGICZNE – MIEJSCE WDRAŻANIA INNOWACJI ROLNICZYCH I BUDOWANIA ODPORNOŚCI AGROEKOSYSTEMÓW*

Słowa kluczowe: rolnictwo ekologiczne, innowacje, odporność agroekosystemów

Wstęp

Rolnictwo ekologiczne stanowi kluczowy obszar wdrażania innowacji rolniczych. W niniejszym rozdziale opisano, w jaki sposób jest możliwa integracja zaawansowanych technologii rolnictwa 4.0 z praktykami ekologicznymi, a także podkreślono jej konieczność, jeśli chcemy budować odporne agroekosystemy zdolne sprostać wyzwaniom XXI w. Opiswane innowacje techniczne wspierają budowanie odporności gospodarstw i całych agroekosystemów. W kontekście rolnictwa 4.0 wykorzystanie zaawansowanych technologii, takich jak sztuczna inteligencja, robotyka i precyzyjne rolnictwo, umożliwia optymalizację procesów produkcyjnych przy jednoczesnym poszanowaniu zasad zrównoważonego rozwoju i dbałości o naturalne środowisko i bioróżnorodność. W tym rozdziale omówiono, jak innowacje technologiczne mogą wspierać rolnictwo ekologiczne, zwiększając jego efektywność i odporność na zmiany klimatu oraz zakłócenia rynkowe.

Odporność (ang. *resilience*) ekosystemów i gospodarstw definiuje się jako zdolność systemów do adaptacji i regeneracji w obliczu zakłóceń. Zakłócenia te obejmują zmiany klimatyczne, choroby roślin, szkodniki czy ekstremalne warunki pogodowe, ale także są związane z niestabilnością rynków. W kontekście gospodarstw ekologicznych większa odporność manifestuje się poprzez zmniejszone ryzyko ekonomiczne, poprawę jakości gleby, zwiększoną bioróżnorodność, redukcję zależności od zewnętrznych środków produkcji oraz poprawę gospodarki wodnej. Wdrażanie innowacji rolniczych, takich jak precyzyjne rolnictwo, robotyka czy systemy wspomagania decyzji oparte na sztucznej inteligencji, może znacząco zwiększyć odporność

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

gospodarstw ekologicznych, umożliwiając im lepsze zarządzanie zasobami i adaptację do zmieniających się warunków.

Praktyki wzmacniające agroekosystemy

Rolnictwo ekologiczne w swoich założeniach opiera się na naturalnych środkach produkcji, takich jak kompost, nawozy organiczne i naturalne. To także wykorzystanie międzyplonów, zielonych nawozów i przede wszystkim szerokiego, przyrodniczo poprawnego płodozmianu. W systemie tym nie stosuje się syntetycznych nawozów i środków ochrony roślin pochodzących ze sztucznej syntezy chemicznej. Strategia prowadzenia gospodarstwa ekologicznego, oparta na odnawialnych zasobach środowiska i środkach produkcji dostępnych w gospodarstwie, często wspiera odporność tych gospodarstw w większym stopniu niż strategia zarządzania wdrażana w intensywnych gospodarstwach konwencjonalnych, oparta na masowym wykorzystaniu syntetycznych środków produkcji. Agrotechnika stosowana w gospodarstwach ekologicznych nastawiona jest na wzmacnianie struktury gleby, zwiększanie bioróżnorodności, poprawę retencji wody i zmniejszanie erozji. Długoterminowe badania wykazały, że systemy ekologiczne są w stanie dorównać wydajnością systemom konwencjonalnym w warunkach stresu, takich jak susza lub inne niekorzystne zjawiska pogodowe.

Synergie między technologią a rolnictwem ekologicznym

Precyzyjne rolnictwo wydaje się być szczególnie interesujące dla gospodarstw ekologicznych, które mogą wykorzystywać zaawansowane technologie, aby zwiększać efektywność zabiegów agrotechnicznych, a także aby móc wykorzystać innowacyjne, ekologiczne środki produkcji (np. nieselektywne bioherbicydy), których rolnicze wykorzystanie jest bardzo ograniczone bez zastosowania technik precyzyjnych. Integracja tych innowacji z praktykami ekologicznymi może prowadzić do jeszcze większej odporności i zrównoważonego rozwoju gospodarstw, co jest kluczowe w obliczu globalnych wyzwań środowiskowych i ekonomicznych.

Potrzeba takich synergii staje się szczególnie widoczna w kontekście współczesnych wyzwań rolnictwa. Polska, z ponad 14 mln ha użytków rolnych i zróżnicowanymi strefami agroekologicznymi, jest jednym z czołowych producentów zbóż, roślin okopowych i warzyw w Europie (EC 2021, FAOSTAT 2022). Jednak ta produktywność w dużej mierze zależy od syntetycznych agrochemikaliów. Nadmierne stosowanie nawozów i środków ochrony roślin przyczyniło się do zakwaszenia gleby, wymywania składników odżywczych, utraty różnorodności mikrobiologicznej i spadku liczebności zapylaczy (Rusco i in. 2018, Europejska Agencja Środowiska 2020). Ponad 30% próbek wód gruntowych na obszarach wiejskich przekracza bezpieczne poziomy azotanów lub pozostałości środków ochrony roślin (WHO Europe 2021). Niedawne globalne zakłócenia, w tym pandemia COVID-19 i wojna na Ukrainie, dodatkowo ujawniły słabości systemów rolniczych uzależnionych

od dostaw syntetycznych środków produkcji. Te kryzysy zakłóciły łańcuchy dostaw i spowodowały gwałtowny wzrost cen środków produkcji, zmniejszając rentowność konwencjonalnej produkcji rolniczej (OECD–FAO 2023). Wydarzenia ostatnich lat uwidoczniły wyzwania, przed jakimi obecnie stoi rolnictwo, w tym pilną potrzebę wdrożenia niskonakładowych i cyrkularnych strategii zarządzania w rolnictwie. Rolnictwo precyzyjne oraz narzędzia wykorzystujące sztuczną inteligencję zapewniają wsparcie dla takiej gospodarki.

Odporność gospodarstw ekologicznych

Opisane powyżej wyzwania współczesnego rolnictwa szczególnie wpływają na gospodarstwa prowadzące certyfikowaną produkcję ekologiczną. Gospodarstwa te muszą równoważyć ograniczenia w stosowaniu syntetycznych środków produkcji z koniecznością utrzymania opłacalności produkcji. Rolnictwo ekologiczne jest często w większym stopniu zależne od pracy ludzi niż wielkoobszarowe, wysoce zmechanizowane rolnictwo konwencjonalne. Technologie autonomiczne przyczyniają się do zwiększenia efektywności produkcji rolnej, ale także do minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko. Wyniki badań naukowych (np.: Pretto i in. 2019, Moraru i in. 2023) wskazują, że precyzyjne autonomiczne nośniki narzędzi umożliwiają realizację tych celów poprzez następujące działania:

- **redukcję zużycia chemicznych środków ochrony roślin:** precyzyjne usuwanie chwastów za pomocą mechanicznych narzędzi eliminuje potrzebę stosowania herbicydów, co jest zgodne z zasadami rolnictwa ekologicznego;
- **ochronę gleby i zwiększenie dokładności operacji:** lekkie maszyny minimalizują ugniatanie gleby, sprzyjając zachowaniu jej struktury i żyzności. Jednocześnie wykorzystanie zaawansowanych czujników i systemów nawigacji pozwala na precyzyjne wykonywanie zabiegów, co jest kluczowe w uprawach ekologicznych bazujących na metodach niechemicznych;
- **zwiększenie efektywności czasowej:** autonomiczne systemy mogą pracować przez dłuższy czas bez przerw, w tym w nocy oraz w okresach weekendowych, co zwiększa wydajność operacji polowych i pozwala na terminowe wykonywanie zabiegów agrotechnicznych;
- **zmniejszenie nakładu pracy:** automatyzacja rutynowych zadań odciąża rolników, pozwalając im skupić się na bardziej złożonych aspektach zarządzania gospodarstwem.

Technologie dla wsparcia rolnictwa ekologicznego

Europejski Zielony Ład i strategia „od pola do stołu” mają na celu zmniejszenie zużycia środków ochrony roślin pochodzących ze sztucznej syntezy chemicznej i ryzyka związanego z ich stosowaniem o 50% do 2030 r. (EC 2020). Gospodarstwa ekologiczne, które stanowią ok. 4% gruntów rolnych w Polsce (Eurostat 2023),

w dużej mierze opierają się na mechanicznym lub ręcznym odchwaszczaniu. Presja chwastów i zwalczanie szkodników stanowią stałe ograniczenia dla rozwoju rolnictwa ekologicznego (Marques da Silva i in. 2023). Dostępne ekologiczne herbicydy – pochodzące z kwasu pelargonowego, octu lub olejków eterycznych – są zazwyczaj nieselektywne, fitotoksyczne i mają niejednolite działanie (Dayan i in. 2009).

Precyzyjne systemy opryskiwania

Ograniczenie stosowania chemicznych środków ochrony roślin w rolnictwie ekologicznym jest możliwe dzięki skutecznemu wykorzystaniu metod mechanicznego zwalczania chwastów. Badania polowe przeprowadzone przez Gawędę i in. (2014) wykazały, że różne metody regulacji chwastów – w tym mechaniczne – wpływają na liczebność chwastów w uprawach zbożowych, a ich skuteczność zależy od stosowanej metody i warunków uprawy. Dodatkowo zastosowanie lekkich maszyn sprzyja ochronie gleby, minimalizując jej zagęszczenie i zachowując jej strukturę, co jest szczególnie istotne na glebach ciężkich (Berbec i in. 2018).

Wykorzystanie środków biologicznych wymaga zastosowania precyzyjnego systemu aplikacji, aby maksymalizować ich skuteczność (Kumar i in. 2019, Xiang 2024). Konwencjonalne rozwiązania koncentrują się głównie na środkach syntetycznych stosowanych na dużych powierzchniach bez elastyczności (i oszczędności) wymaganej w rolnictwie ekologicznym (Gupta i Kumar 2025). Narzędzie precyzyjne, np. Platforma Ecorobotix, do prowadzenia ultraprecyzyjnego opryskiwacza z dokładnością do 2 cm, może być przykładem rozwiązania szczególnie cennego dla upraw ekologicznych (van Steenberg i in. 2024). Systemy ultraprecyzyjne zdolne rozpoznawać roślinę uprawną i chwasty udostępniają techniczną możliwość zastosowania nieselektywnych herbicydów pochodzenia naturalnego (np. kwasów organicznych) w uprawie roślin. Obecnie nie ma możliwości prawnych stosowania bioherbicydów w certyfikowanym rolnictwie ekologicznym, natomiast pojawiające się możliwości techniczne ultraprecyzyjnego nawożenia mogłyby zaoferować rozwiązanie jednego z najważniejszych wyzwań w rolnictwie ekologicznym – skutecznego zwalczania chwastów. Co więcej, ultraprecyzyjne systemy oprysku mogą także wspierać zwiększanie produktywności ekologicznej poprzez precyzyjne dostarczanie nawożenia dolistnego dla rośliny uprawnej. W zastosowaniach praktycznych, systemy precyzyjnego opryskiwania wykorzystują sztuczną inteligencję i wizję komputerową do wykrywania roślin w czasie rzeczywistym, umożliwiając identyfikację obiektów o wielkości poniżej 1 cm. Takie rozwiązania umożliwiają redukcję zużycia środków ochrony roślin nawet o 95% (Ghaly i Ibrahim 2022), co otwiera nowe możliwości dla precyzyjnego stosowania biologicznej ochrony roślin w rolnictwie ekologicznym. Kluczowym wyzwaniem pozostaje adaptacja tych technologii do lokalnych warunków uprawowych.

Biologiczne środki ochrony roślin, w tym także biopestycydy, charakteryzują się mniejszą toksycznością i trwałością, ale często mają ograniczoną stabilność, skuteczność i kompatybilność z tradycyjnymi technologiami opryskiwania (Gupta i Dikshit

2010, Roy i in. 2023). Biopestycydy dolistne mogą poprawić odporność roślin, ale tylko wtedy, gdy są stosowane precyzyjnie. Obecne systemy opryskiwania są zaprojektowane do równomiernego stosowania dużych ilości środków syntetycznych i często nie nadają się do stosowania tych wrażliwych materiałów (Bhullar i in. 2021). Jednocześnie rolnicy są otwarci na innowacyjne, zrównoważone środki produkcji, ale ich stosowanie jest ograniczone przez nieodpowiednie systemy dostarczania, które nie spełniają wymogów agronomicznych lub ekonomicznych (Riar i in. 2017, Bhullar i in. 2021). Powoduje to utrzymujące się „niedopasowanie dostaw” między ekologicznymi środkami produkcji a konwencjonalnymi maszynami.

Robotyzacja zabiegów polowych

W ostatniej dekadzie rozwój robotów polowych umożliwił wprowadzenie alternatywy dla chemicznego odchwaszczania w rolnictwie ekologicznym, zestawiając efektywność technologii z minimalnym wpływem na środowisko. Na przykład Bakker i in. (2006) opisują wykorzystanie autonomicznego robota do usuwania chwastów, wykorzystującego precyzyjną wizję maszynową, który w warunkach szklarniowych osiągnął średni błąd wykrywania ≤ 25 mm, co stanowiło istotny krok w kierunku eliminacji ręcznej pracy. Ręczne pilenie i stosowanie herbicydów są coraz częściej postrzegane jako nieefektywne, kosztowne, czasochłonne i szkodliwe dla środowiska.

Technologie robotycznego odchwaszczania są przykładem innowacji oferującej zautomatyzowane rozwiązania w trzech kluczowych fazach: wykrywanie, podejmowanie decyzji i działanie. Wśród nich kluczową rolę odgrywa wykrywanie prowadzące do rozwoju systemów opartych na obrazowaniu (kamery pracujące w różnych pasmach (RGB, NIR, termiczne) oraz systemów nieopartych na obrazowaniu (LIDAR, ToF i ultradźwięki) (Shamshiri i in. 2024). Korzyści zastosowania tych technologii w postaci zmniejszenia kosztów oraz eliminacji zanieczyszczenia wody i gleby mają szczególne znaczenie dla rolnictwa ekologicznego, które zakazuje stosowania syntetycznych herbicydów i kładzie nacisk na zrównoważony rozwój. Nadal jednak istnieją wyzwania, takie jak wysokie koszty początkowe, błędy w precyzji działania, wrażliwość na zmienne warunki środowiska, a także brak wykwalifikowanego (przeszkolonego) personelu do obsługi zaawansowanych technicznie rozwiązań (Shamshiri i in. 2024).

Możliwe jest także wykorzystanie technologii autonomicznego zwalczania chwastów za pomocą lasera, co Krupańek i in. (2024) zaprezentowali na przykładzie projektu WeLASER. W projekcie tym autonomiczny robot z laserowym systemem likwidacji chwastów osiągnął poziom dojrzałości TRL 7 oraz znaczną przewagę środowiskową w analizie życia cyklu (LCA), choć autorzy ci wskazują na konieczność optymalizacji zużycia energii w fazie produkcji i eksploatacji.

Możliwe jest także wykorzystanie robotów zarówno naziemnych, jak i UAV, wykorzystujących głębokie uczenie do wykrywania chwastów w czasie rzeczywistym, co umożliwia późniejsze mechaniczne lub chemiczne precyzyjne usuwanie chwastów bez ingerencji człowieka. Metody głębokiego uczenia maszynowego dzięki wykorzy-

staniu dużych zbiorów danych treningowych oraz modeli wstępnie wytrenowanych wykazują wysoką skuteczność w wykrywaniu chwastów i szkodników upraw. Istotnymi wyzwaniami technicznymi pozostają zmienność warunków oświetleniowych czy trudności w transferze danych. Rakhmatulin i in. (2021) oraz Shahi i in. (2023) wskazują, że algorytmy głębokiego uczenia są szczególnie dobrze przystosowane do złożonych problemów rozpoznawania obiektów i klasyfikacji, gdyż potrafią automatycznie wydobywać istotne cechy z dużej liczby danych.

Internet rzeczy (IoT) w rolnictwie ekologicznym

Zastosowanie internetu rzeczy (IoT) w rolnictwie ekologicznym umożliwia precyzyjny monitoring parametrów środowiskowych i biologicznych w czasie rzeczywistym, co znacząco zwiększa efektywność działań agrotechnicznych oraz odporność agroekosystemów. System rolnictwa ekologicznego, w którym ograniczone są metody interwencyjne ochrony roślin, a preferowane metody zapobiegania, jest szczególnie wrażliwy na wczesne wykrycie problemu w uprawie. Pozwala to na szybką interwencję i zapobieganie stratom plonu. Systemy oparte na sieciach czujników rozmieszczonych w glebie i na powierzchni roślin pozwalają na stałą rejestrację parametrów środowiska, takich jak temperatura, wilgotność, pierwsze symptomy (lub warunki do wystąpienia) chorób lub niedoborów pokarmowych. Dane gromadzone przez czujniki są analizowane przez algorytmy sztucznej inteligencji (AI), które umożliwiają dynamiczne podejmowanie decyzji dotyczących nawadniania, nawożenia czy zabiegów ochronnych.

Inteligentne systemy nawadniania

W warunkach rosnącego deficytu wody obserwowanego w wielu rejonach świata oraz ograniczonej możliwości stosowania regulatorów wzrostu w rolnictwie ekologicznym, inteligentne systemy nawadniania (ang. *smart irrigation systems*) stanowią istotne narzędzie wspierające odporność środowiskową i efektywność wodną gospodarstw. Systemy te wykorzystują czujniki wilgotności gleby, temperatury, intensywności promieniowania słonecznego oraz prognozy meteorologiczne i na tej podstawie budują możliwe scenariusze. Mogą one być dodatkowo zintegrowane z logiką rozmytą lub innymi metodami uczenia maszynowego (ang. *machine learning*), umożliwiając im automatyczne, adaptacyjne dostosowywanie nawodnienia do bieżących potrzeb roślin. W scenariuszach tych często jest brane pod uwagę także ryzyko wystąpienia chorób grzybowych; nawadnianie dostosowywane jest w ten sposób, aby ryzyko to zminimalizować (nawet kosztem nieoptymalnego nawadniania). Richard i in. (2022) podkreślają, że nawadnianie może stanowić drogę do rozprzestrzeniania się patogenów, na przykład nawadnianie naziemne może sprzyjać rozpylaniu lub splukiwaniu patogenów liściowych, podczas gdy nawadnianie zalewowe może sprzyjać patogenom glebowym. Możliwość zapobiegania rozwojowi chorób jest szczególnie istotna z punktu widzenia rolnictwa ekologicznego – w którym interwencyjne zwalczanie

chorób i szkodników jest o wiele trudniejsze niż zapobieganie wystąpieniu porażenia. Jak wskazują badania Hosack i Miller (2017), ograniczanie nawadniania naziemnego, a tym samym skracanie czasu wilgotności liści, stanowi skuteczną praktykę kulturową minimalizującą występowanie chorób plamistości liści. Według Café-Filho i in. (2019) zarządzanie epidemiami chorób roślin poprzez praktyki nawadniania jest jednym z najważniejszych zabiegów kulturowych w zintegrowanym zarządzaniu chorobami roślin, szczególnie w systemach rolnictwa ekologicznego, gdzie opcje kontroli chemicznej są ograniczone. Navarro-Hellín i in. (2016) opracowali automatyczny inteligentny system wspomagania decyzji w nawadnianiu (SIDSS), który wykorzystuje system neuro-rozmyty ANFIS do przewidywania tygodniowych potrzeb nawadniania na podstawie pomiarów glebowych i zmiennych klimatycznych. Badania kontrolowane wykazały, że zaawansowane systemy kontroli nawadniania mogą przynieść średnio 30% oszczędności wody w zastosowaniach komercyjnych przy jednoczesnym zachowaniu stabilności plonowania (Lunstadt i Sowby 2024). Integracja wielu metod, w tym zastosowanie systemów IoT oraz modeli predykcyjnych opartych na danych z sensorów może skutecznie wspomagać zarządzanie ryzykiem suszy i minimalizować negatywne skutki zmian klimatycznych w uprawach ekologicznych. Kushwaha i in. (2024) wykazali, że bezprzewodowe sieci sensorów w inteligentnych systemach nawadniania znacznie poprawiają efektywność zarządzania zasobami wodnymi w rolnictwie. Integracja IoT z narzędziami bezzałogowymi (np. UAV) dodatkowo rozszerza możliwości detekcji przestrzennej, co pozwala na lokalne, precyzyjne interwencje i redukcję strat produkcyjnych. Morchid i in. (2025) przedstawili system IoT umożliwiający inteligentne kontrolowanie nawadniania poprzez wbudowane systemy i technologie Server-Sent Events. Systemy nawadniania oparte na logice rozmytej wykazują wysoką efektywność w optymalizacji zużycia wody (Togneri i in. 2022). Efektywność takich systemów dodatkowo wzrasta w połączeniu z odnawialnymi źródłami energii, co może zmniejszyć zużycie energii nawet o 30%, umożliwiając niezależne energetycznie działanie systemów w warunkach braku zasilania sieciowego.

Odnawialne źródła energii i niezależność energetyczna

Możliwe jest zintegrowanie zastosowania odnawialnych źródeł energii (OZE) w gospodarstwach ekologicznych, jako kluczowego elementu budowania zdywersyfikowanego systemu rolniczego, o wielu niezależnych źródłach energii. Strategia taka może pomóc budować niezależność operacyjną gospodarstwa, ale także wspierać odporność systemów rolniczych na zakłócenia zewnętrzne, w tym przerwy w dostawach energii czy wzrost cen nośników. Wdrażanie odnawialnych źródeł energii (instalacje fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe czy mikrobiogazownie rolnicze) jako integralnej części gospodarstw ekologicznych może mieć kluczowe znaczenie dla zapewnienia niezależności energetycznej gospodarstwa, ale także obniżyć koszty pracy systemów autonomicznych (np. korzystających z elektryczności jako źródła zasilania). To także sposób na redukcję emisji gazów cieplarnianych, a więc zmniejszenie śladu węglowego

produkcji rolniczej, co w gospodarstwach ekologicznych ma szczególne znaczenie.

Strategia ta wydaje się być wyjątkowo korzystna w połączeniu z wykorzystaniem robotów rolniczych zasilanych elektrycznie. Zdywersyfikowane źródła energii dla gospodarstw ekologicznych mogą obejmować systemy fotowoltaiczne, mikroturbiny wiatrowe i biogazownie oparte na fermentacji odpadów rolniczych. Instalacje te mogą zaspokajać potrzeby energetyczne zarówno w zakresie zasilania maszyn autonomicznych, jak i czujników IoT czy systemów nawadniających. Wdrożenie agrowoltaiki (ang. *agrivoltaics*) pozwala na zwiększenie produktywności ziemi nawet o 70% poprzez równoczesną produkcję energii elektrycznej i upraw (Anusuya i in. 2024). W kontekście rolnictwa ekologicznego OZE wpisują się w strategię minimalizacji śladu węglowego, promując zrównoważony rozwój i wsparcie dla gospodarki obiegu zamkniętego. Szczególne miejsce zajmują tutaj biogazowanie rolnicze, które mogą utylizować odpady rolnicze w procesie produkcji biogazu (i energii), a odpad z tej produkcji (poferement) może stanowić gotowy produkt rolniczy lub surowiec do produkcji tzw. polepszaczy glebowych. Co ważne, przejście na alternatywne źródła energii w zarządzaniu energetycznym w rolnictwie ma duży potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych, poprawy efektywności energetycznej i promowania zrównoważonej produkcji żywności (Majeed i in. 2023).

Technologia blockchain

Technologia blockchain, bazująca na zdecentralizowanych, niezmiennych rejestrach danych, znajduje coraz szersze zastosowanie w rolnictwie ekologicznym jako narzędzie zapewniające przejrzystość, identyfikowalność oraz ułatwiające proces certyfikacji. Każdy etap procesu produkcyjnego – od siewu, przez nawożenie, aż po zbiór i transport – może być zapisywany w systemie blockchain, umożliwiając audyt i weryfikację zgodności z wymogami rolnictwa ekologicznego. Van Hilten i in. (2020) w swoich badaniach nad zastosowaniem blockchain w produkcji żywności ekologicznej wykazali, że technologia ta znacząco poprawia przejrzystość łańcucha dostaw „od pola do stołu” oraz umożliwia konsumentom dokładną weryfikację pochodzenia produktów ekologicznych. Blockchain umożliwia także integrację z IoT, co pozwala na automatyczne rejestrowanie danych z sensorów bezpośrednio do rejestru, bez udziału człowieka, eliminując błędy i podnosząc wiarygodność danych produkcyjnych. Zastosowanie tej technologii w rolnictwie ekologicznym może skutecznie wspierać małych producentów w dostępie do rynków premium, jednocześnie ograniczając ryzyko oszustw żywnościowych.

Nowoczesne technologie oferują szerokie spektrum możliwości wspierania rozwoju rolnictwa ekologicznego. Każda z przedstawionych technologii wnosi specyficzne korzyści, które są szczególnie wartościowe w kontekście ograniczeń charakterystycznych dla systemów ekologicznych. Tabela 1 przedstawia syntetyczne zestawienie omawianych technologii wraz z ich głównymi zastosowaniami i korzyściami dla rolnictwa ekologicznego.

Tabela 1

Przegląd kluczowych technologii wspierających rolnictwo ekologiczne

Technologia	Zastosowanie	Korzyści dla rolnictwa ekologicznego
IoT i czujniki	pomiar wilgotności, temperatury, nasłonecznienia, patogenów	precyzyjne decyzje, oszczędność wody i nawozów
AI/ML/DSS	wspomaganie decyzji agrotechnicznych	zwiększenie efektywności bez chemii
Robotyka/UAV	odchwaszczanie, monitorowanie upraw, zabiegi międzyrzędowe	obniżenie nakładów pracy i precyzja zabiegów
Precyzyjne opryski	ultraprecyzyjna aplikacja nawozów (i ŚOR)	skuteczność i minimalne straty biologicznych środków
OZE i magazyny energii	zasilanie urządzeń autonomicznych, niezależność energetyczna	redukcja emisji i kosztów operacyjnych
Blockchain	identyfikowalność, certyfikacja, śledzenie produktu	zaufanie konsumentów, eksport, przejrzystość łańcucha dostaw

Źródło: Kushwaha i in. 2024; Gupta i Pal 2025; Xiang 2024; Marques da Silva i in. 2023; van Sneebergen i in. 2024; Anusuya i in. 2024; van Hiltten i in. 2020

Przyszłe możliwości badań i rozwoju

W systemie ekologicznym zrównoważony rozwój, ochrona środowiska i dostarczanie żywności wysokiej jakości jest w centrum zainteresowania praktyki, ale także nauki rolniczej. Rolnictwo 4.0 to nowoczesny model produkcji rolnej wykorzystujący zaawansowane technologie, takie jak autonomiczne maszyny, drony i analizy danych, aby zwiększyć wydajność, precyzję i zrównoważony rozwój gospodarstw. Jego celem jest optymalizacja procesów rolniczych poprzez automatyzację, monitorowanie w czasie rzeczywistym oraz minimalizację zużycia zasobów, takich jak woda, nawozy czy energia. Wdrożenie elementów rolnictwa 4.0 umożliwia efektywne zarządzanie uprawami przy jednoczesnym poszanowaniu zasad ekologii i ochrony środowiska.

W literaturze naukowej podkreśla się znaczenie robotyzacji w rozwoju rolnictwa, wskazując na jej wpływ na efektywność produkcji oraz poszanowanie środowiska naturalnego (Pawlak 2010, Botta i in. 2022). Ponadto raport Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR 2023) zwraca uwagę na rosnącą rolę automatyzacji w rolnictwie, podkreślając jej potencjał w kontekście zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. W raporcie tym wskazano, że istnieje potrzeba zwiększenia świadomości i wiedzy rolników na temat korzyści płynących z wdrażania nowych technologii oraz zapewnienia odpowiedniego wsparcia edukacyjnego. Globalny ruch ekologiczny uznaje obecnie potrzebę innowacji technicznych. Ramy Organic 3.0 IFOAM wzywają do integracji narzędzi cyfrowych i robotyki w celu zwiększenia zrównoważonego

rozwoju. Rolnictwo ekologiczne 3.0 IFOAM to strategia rozwoju rolnictwa ekologicznego trzeciej generacji, którego integralną częścią są innowacje społeczne, ekonomiczne i technologiczne. Innowacje te muszą iść w parze z poszanowaniem podstawowych zasad rolnictwa ekologicznego, a więc troski o środowisko naturalne i zdrowie ludzi, ale także muszą uwzględniać dobrostan zwierząt i szeroko pojętą sprawiedliwość społeczną. Koncepcja ta promuje otwartość na nowe technologie – w tym cyfryzację, robotykę i sztuczną inteligencję – pod warunkiem, że wspierają one zrównoważony rozwój i odporność agroekosystemów (ang. *resilience*) (Arbenz i in. 2016). Tymczasem rolnictwo precyzyjne – zwłaszcza narzędzia oparte na sztucznej inteligencji – wykazuje duży potencjał w zakresie redukcji nakładów chemicznych (Serrano in. 2020).

Rozwiązania rolnictwa precyzyjnego (rolnictwa 4.0, rolnictwa cyfrowego) wykorzystujące robotykę, drony (UAV) monitorujące oraz prowadzące zabiegi agrotechniczne, a także autonomiczne roboty rolnicze, mogą znaleźć zastosowanie w precyzyjnych i ekologicznych praktykach rolniczych, odpowiadając na rosnące zapotrzebowanie na nowoczesne systemy automatyzacji rolnictwa. Shinde i in. (2024) wskazują na możliwości wykorzystania robotyki w przygotowaniu ziemi, siewie, operacjach międzyrzędowych (np. usuwanie chwastów, opryski, zbiory) oraz działaniach poźniowych, realizowanych za pomocą robotów polowych, dronów UAV agrotechnicznych i dronów UAV wykonujących monitoring upraw.

Technologie oparte na czujnikach, sztucznej inteligencji (AI), uczeniu maszynowym (ML), głębokim uczeniu (DL) oraz analizie dużych zbiorów danych wspierają rozwój systemu wspomagania decyzji (DSS). Autorzy tacy jak Gupta i Kumar (2025), Kushwaha i in. (2024), Morchid i in. (2025) oraz Navarro-Hellin i in. (2016) wskazują na to, że integracja technologii hybrydowych i cyfrowych otwiera nowe możliwości automatyzacji prac polowych i zwiększania plonów w systemach ekologicznej produkcji rolnej, co stanowi dynamicznie rozwijającą się dziedzinę badań w rolnictwie. Zastosowanie licznych czujników, wykorzystanie komercyjnych rozwiązań umożliwia tworzenie niedrogich urządzeń technologicznych dla rolników i naukowców pracujących nad rozwiązaniami rolnictwa precyzyjnego. Technologie autonomiczne, takie jak nowoczesne nośniki narzędzi rolniczych, odgrywają istotną rolę w zwiększaniu efektywności operacyjnej w rolnictwie. Systemy te umożliwiają ciągłą pracę bez konieczności interwencji człowieka, co pozwala na terminowe wykonywanie zabiegów agrotechnicznych nawet w nocy i w dni wolne od pracy. Dzięki temu zmniejszają zapotrzebowanie na pracę fizyczną, przyczyniając się do lepszego zarządzania czasem i zasobami (Shang i Xie 2024). Precyzja oferowana przez zaawansowane czujniki i systemy nawigacji jest szczególnie ważna w rolnictwie ekologicznym, gdzie ograniczone stosowanie chemikaliów wymaga dokładności w siewie oraz czynnościach pielęgnacyjnych (Naik i in. 2023). Automatyzacja w rolnictwie nie tylko redukuje obciążenie pracą, ale również umożliwia rolnikom skoncentrowanie się na bardziej złożonych aspektach zarządzania gospodarstwem, co przekłada się na wzrost ogólnej produktywności i efektywności (Rööß i in. 2018).

Podsumowanie

Rolnictwo ekologiczne stanowi dziś nie tylko alternatywę dla intensywnych systemów konwencjonalnych, ale coraz częściej staje się polem testowym dla najbardziej zaawansowanych innowacji rolniczych. Zasady produkcji rolnej narzucane przez systemy certyfikacji ekologicznej – w tym zakaz stosowania syntetycznych nawozów, środków ochrony roślin i regulatorów wzrostu – wymuszają poszukiwanie alternatywnych metod utrzymania produktywności i zdrowotności upraw. W rezultacie gospodarstwa ekologiczne, szczególnie te nastawione na osiąganie wysokiej jakości plonu i produktywności agroekosystemów, stają się naturalnym środowiskiem testowania innowacji technologicznych, które muszą łączyć skuteczność z pełnym poszanowaniem zasad ekologii. Technologie precyzyjnych oprysków opartych na teledetekcji, robotyce polowej, systemach IoT czy algorytmach sztucznej inteligencji, pozwalają weryfikować skuteczność nowych technologii zabiegów agrotechnicznych i zarządzania zasobami. W ten sposób rolnictwo ekologiczne staje się swego rodzaju poligonem doświadczalnym, w którym innowacje są testowane w warunkach najwyższych wymagań środowiskowych i etycznych. Co więcej, rozwiązania dedykowane rolnictwu ekologicznemu (precyzyjne zwalczanie chwastów, biologiczna ochrona roślin) coraz częściej przenikają do rolnictwa konwencjonalnego jako rozwiązania bardziej zrównoważone. Integracja technologii rolnictwa 4.0 z praktykami ekologicznymi tworzy unikalne możliwości budowania odpornych agroekosystemów, które mogą sprostać wyzwaniom XXI w.

Kluczowe technologie omówione w niniejszym rozdziale – od precyzyjnych systemów opryskiwania, przez robotykę polową, po inteligentne systemy nawadniania i blockchain – nie zastępują fundamentalnych zasad rolnictwa ekologicznego, lecz je wzmacniają. Pozwalają one na realizację celów ekologicznych z większą precyzją i efektywnością, jednocześnie redukując nakłady pracy i zwiększając stabilność produkcji.

Szczególne znaczenie ma możliwość precyzyjnego stosowania biologicznych środków ochrony roślin, które dotychczas były ograniczone przez niedoskonałość tradycyjnych metod aplikacji. Ultranowoczesne, precyzyjne systemy opryskiwania, połączone ze sztuczną inteligencją, otwierają nowe perspektywy dla biopreparatów i naturalnych regulatorów wzrostu.

Wdrażanie nowoczesnych technologii wiąże się często z wysokimi kosztami. Może być to istotna, jeśli nie najistotniejsza bariera we wdrażaniu nowoczesnych technologii autonomicznych w rolnictwie ekologicznym. Małe i średnie gospodarstwa ekologiczne, które dominują w strukturze rolnictwa w Polsce, często dysponują ograniczonym kapitałem inwestycyjnym i niższym poziomem mechanizacji, co utrudnia im dostęp do zaawansowanych, drogich technologii. Wydaje się więc konieczne opracowanie instrumentów wsparcia finansowego, które umożliwią tym gospodarstwom udział w procesie wdrażania cyfryzacji i innowacji autonomicznych w gospodarstwach rolnych. Wyzwania związane z wdrażaniem tych technologii – wysokie koszty

początkowe, potrzeba kształcenia rolników, konieczność adaptacji rozwiązań do lokalnych warunków – nie powinny przesłaniać ogromnego potencjału, jaki niosą dla przyszłości zrównoważonej produkcji żywności. Rolnictwo ekologiczne wspierane nowoczesnymi technologiami może stać się modelem dla całego sektora rolniczego, łącząc produktywność z odpowiedzialnością środowiskową.

Literatura

1. Anusuya K., Vijayakumar K., Martin M.L.J., Manikandan S.: Agrophotovoltaics: enhancing solar land use efficiency for energy food water nexus. *Renewable Energy Focus*, 2024, **50**, 100600; <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100600>
2. Arbenz M., Gould D., Stopes C.: *Organic 3.0 for truly sustainable farming and consumption*. IFOAM – Organics International. Bonn, Germany, 2016.
3. Bakker T., van Asselt C.J., Bontsema J., Müller J., van Straten G.: An Autonomous Weeding Robot for Organic Farming. W: Corke P., Sukkarieh S. (red.), *Field and Service Robotics. Results of the 5th International Conference FSR 2005*, Port Douglas, Australia, 29–31 July 2005. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 25. Springer, Berlin–Heidelberg, 2006, p. 579-590; https://doi.org/10.1007/11736592_48
4. Berbé A.K., Feledyn-Szewczyk B., Thalmann C., Wyss R., Grenz J., Kopiński J., Stalenga J., Radzikowski P.: Assessing the sustainability performance of organic and low-input conventional farms from Eastern Poland with the RISE Indicator System. *Sustainability*, 2018, **10(6)**, 1792; <https://doi.org/10.3390/su10061792>
5. Bhullar G.S., Bautze D., Adamtey N., Ammann L., Cicek H., Goldmann E., Riar A., Rüegg J., Schneider M., Huber B.: What is the contribution of organic agriculture to sustainable development? A synthesis of twelve years (2007–2019) of the long-term farming systems comparisons in the tropics (SysCom). Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), 2021.
6. Botta A., Cavallone P., Baglieri L., Colucci G., Tagliavini L., Quaglia G.: A Review of robots, perception, and tasks in precision agriculture. *Applied Mechanics*, 2022, **3(3)**: 830-854; <https://doi.org/10.3390/applmech3030049>
7. Café-Filho A.C., Lopes C.A., Rossato M.: Management of plant disease epidemics with irrigation practices. *Irrigation in agroecosystems*, 2019, pp. 123-140; <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78253>
8. Dayan F.E., Cantrell C.L., Duke S.O.: Natural products in crop protection. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2009, **17(12)**: 4022-4034; <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2009.01.046>
9. European Commission 2021. EU agricultural outlook 2021–2031. Directorate-General for Agriculture and Rural Development. <https://agriculture.ec.europa.eu>
10. European Commission 2020. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
11. Eurostat 2023. Organic farming statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Organic_farming_statistics
12. European Environment Agency 2020. Pesticides in Europe: Overview of environmental and health impacts. <https://www.eea.europa.eu>
13. FAOSTAT 2022. Crops and livestock products: Poland. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat>
14. Gawęda D., Wesołowski M., Kwiatkowski C.A.: Weed infestation of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) depending on the cover crop and weed control method. *Acta Agrobotica*, 2014, **67(1)**: 77-84; <https://doi.org/10.5586/aa.2012.015>
15. Ghaly A.E., Ibrahim M.M.: Mechanization of weed management in sugar beet. In: *Sugar beet cultivation, management and processing*, V. Misra i in. (eds). Springer Nature Singapore, 2022, pp. 327-367; https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_17
16. Gupta S., Dikshit A.K.: Biopesticides: An ecofriendly approach for pest control. *Journal of Biopesticides*, 2010, **3(1)**: 186-188; <https://www.jbiopest.com/index.php/ojs/article/view/115>

17. Gupta G., Kumar Pal S.: Applications of AI in precision agriculture. *Discover Agriculture*, 2025, **3**, 61; <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00220-9>
18. Hosack P., Miller L.: Preventing and managing plant diseases. Master Gardner, University of Missouri Extension, 2017, **13**, 1-16.
19. Krupańek J., Gonzales de Santos P., Emmi L., Wollweber M., Sandmann H., Scholle K., Tran D.D., Schouteten J.J., Andreasen C.: Environmental performance of an autonomous laser weeding robot – a case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2024; <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02295->
20. Kumar V.V.: Biofertilizers and biopesticides in sustainable agriculture. In: *Role of rhizospheric microbes in soil: Volume 1: Stress management and agricultural sustainability*. 2019, pp. 377-398.
21. Kushwaha Y.K., Joshi A., Panigrahi R.K., Pandey A.: Development of a smart irrigation monitoring system employing the wireless sensor network for agricultural water management. *Journal of Hydroinformatics*, 2024, **26(12)**: 3224-3243; <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.241>
22. Lunsd N.T., Sowby R.B.: Smart irrigation controllers in residential applications and the potential of integrated water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2024, **150(1)**, 03123002; <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5871>
23. Majeed Y., Khan M.U., Waseem M., Zahid U., Mahmood F., Majeed F., ... Raza A.: Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 2023, **10**, 344-359; <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.032>
24. Marques da Silva J.R., Esteves M., Silva A.B.: Mechanical weed control in row crops: Challenges for organic agriculture. *Agronomy Research*, 2023, **21(3)**: 234-248; <https://doi.org/10.15159/AR.23.145>
25. Moraru I., Zhivkov T., Coutts S., Li D., Sklar E.I.: A variable autonomy approach for an Automated Weeding Platform. *arXiv*, 2023; https://arxiv.org/abs/2303.05461?utm_source=chatgpt.com”<https://arxiv.org/abs/2303.05461>
26. Morchid A., Et-taibi B., Oughannou Z., El Alami R., Qjidaa H., Jamil M.O. et al.: IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events. *Scientific African*, 2025, **27**, e02527; <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02527>
27. Naik M.R., Teja R., Ramanjaneyulu A.V., Reddy D., Gopinath K.A., Ramasubramanian V., Sarath Chandran M.A., Ghosh S., Viswanatha Reddy K., Paramesha V., Kumar R., Kumar A.: Global research dynamics in organic farming: Emerging trends and scientometric insights. *Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C)*, 2026, **142**, 104223; <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104223>
28. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: Rolnictwo 4.0. Identyfikacja trendów technologicznych. Warszawa 2023; ISBN 978-83-967832-1-9.
29. Navarro-Hellín H., Martínez-del-Rincon J., Domingo-Miguel R., Soto-Valles F., Torres-Sánchez R.: A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, **124**: 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003>
30. OECD-FAO 2023. OECD-FAO agricultural outlook 2023–2032. OECD Publishing; <https://www.oecd.org/agriculture>
31. Pawlak J.: Rola mechanizacji w rozwoju rolnictwa. *Roczniki Nauk Rolniczych, Seria G*, 2010, **97(2)**: 165-175; <https://doi.org/10.22630/RNR.2010.97.2.26>
32. Polish Ministry of Agriculture and Rural Development 2022. Report on the effects of geopolitical conditions on agricultural input prices in Poland; <https://www.gov.pl/web/agriculture>
33. Pretto A., Aravecchia S., Burgard W., Chebrolu N., Falck T., Fankhauser P., Popović M., Jenő J.: Building an aerial-ground robotics system for precision farming: An adaptable solution. *arXiv*, 2019; https://arxiv.org/abs/1911.03098?utm_source=chatgpt.com”<https://arxiv.org/abs/1911.03098>
34. Rakhmatulin I., Kamilaris A., Andreasen C.: Deep neural networks to detect weeds from crops in agricultural environments in real-time: A Review. *Remote Sensing*, 2021, **13(21)**, 4486; <https://doi.org/10.3390/rs13214486>
35. Riar A., Mandloi L.S.S., Messmer M., Poswal R.S., Bhullar G.S.: A diagnosis of biophysical and socio-economic factors influencing farmers’ choice to adopt organic or conventional farming systems for cotton production. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, 1289; <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01289>

36. Richard B., Qi A., Fitt B.D.: Control of crop diseases through Integrated Crop Management to deliver climate-smart farming systems for low-and high-input crop production. *Plant Pathology*, 2022, **71(1)**: 187-206; <https://doi.org/10.1111/ppa.13493>
37. Roy R., Sultana A., Ghosh S.: Biopesticides in sustainable agriculture: Current trends and future prospects. *Crop Protection*, 2023, **165**, 106175. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106175>
38. Röss E., Mie A., Wivstad M., Salomon E., Johansson B., Gunnarsson S., Wallenbeck A., Hoffmann R., Nilsson U., Sundberg C., Watson C.A.: Risks and opportunities of increasing yields in organic farming: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, **38(2)**, 14; <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0489-3>
39. Russo E., Ferretti M., Freppaz M.: Impacts of agricultural chemicals on soil and water in Central Europe. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190(6)**, 347; <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6725-9>
40. Shang M., Xie J.: Agricultural sustainable development: Soil, water resources, biodiversity, climate change, and technological innovation. *Advances in Resources Research*, 2024, **4(2)**: 181-204; https://doi.org/10.50908/arr.4.2_181
41. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J., Paixão L., Carreira E., Pereira A., Carvalho M.: Climate changes challenges to the management of Mediterranean Montado ecosystem: Perspectives for use of precision agriculture technologies. *Agronomy*, 2020, **10(2)**, 218.
42. Shahi T.B., Dahal S., Sitaula C., Neupane A., Guo W.: Deep learning-based weed detection using UAV Images: A Comparative Study. *Drones*, 2023, **7(10)**, 624; <https://doi.org/10.3390/drones7100624>
43. Shamsiri R.R., Rad A.K., Behjati M., Balasundram S.K.: Sensing and Perception in Robotic Weeding: Innovations and Limitations for Digital Agriculture. *Sensors*, 2024, **24(20)**, 6743; <https://doi.org/10.3390/s24206743>
44. Togneri R., Dos Santos D.F., Camponogara G., Nagano H., Custodio G., Prati R. et al.: Soil moisture forecast for smart irrigation: The primetime for machine learning. *Expert Systems with Applications*, 2022, **207**, 117653.
45. WHO Regional Office for Europe 2021. Water safety and nitrate pollution in agricultural areas: A public health perspective; <https://www.who.int/europe>
46. van Sneebergen G., de Jong D., Djouhri-Toumi M., Holterman H.J., van de Zande J.: Spray drift evaluation of the Ecorobotix ARA spot sprayer: A technical performance comparison between the Ecorobotix ARA and the shielded bed sprayer (No. WPR-1276). Wageningen Plant Research, 2024.
47. van Hilten M., Ongena G., Ravesteijn P.: Blockchain for organic food traceability: Case studies on drivers and challenges. *Frontiers in Blockchain*, 2020, **3**, 567175; <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.567175>
48. Xiang L.: Artificial Intelligence (AI)-enabled robotic weeders in precision agriculture. North Carolina State University Cooperative Extension, 2024; <https://content.ces.ncsu.edu/artificial-intelligence-ai-enabled-robotic-weeders-in-precision-agriculture>

Adres do korespondencji:

dr Adam Kleofas Berbec
Zakład Agroekologii i Ekonomiki
IUNG-PIB
ul. Czarторыskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 824
e-mail: Adam.Berbec@iung.pulawy.pl

AUTOR

Adam Kleofas Berbec

ORCID

000-0002-4609-081X

Katarzyna Żyłowska, Jerzy Kozyra

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ZINTEGROWANE MONITOROWANIE SUSZY NA POTRZEBY ROLNICTWA – PRZEGLĄD SYSTEMÓW I WSKAŹNIKÓW*

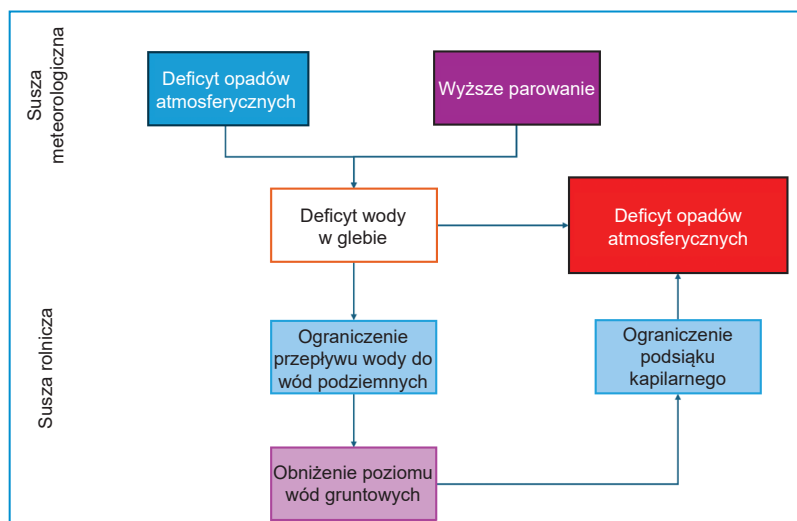
Słowa kluczowe: susza, systemy monitoringu, wskaźniki suszy meteorologicznej, wskaźniki suszy rolniczej

Wstęp

Rolnictwo jest uznawane za jeden z najbardziej wrażliwych sektorów gospodarki na zmianę klimatu – zarówno ze względu na bezpośredni wpływ warunków meteorologicznych na przebieg procesów produkcyjnych, jak i ograniczone możliwości ich kontrolowania (IPCC 2019, FAO 2016). W ostatnich latach, w związku z coraz częstszym występowaniem zjawisk ekstremalnych i pogłębieniem się deficytów wody w Polsce (Urban i in. 2022, Żyłowska i Kozyra 2023), wzrosło ryzyko strat w rolnictwie, co przekłada się na poważne konsekwencje gospodarcze (Kundzewicz i in. 2017, Piniewski i in. 2020, Karaczun i Kozyra 2020).

Znaczące odchylenia od średnich warunków klimatycznych wymuszają konieczność modyfikacji praktyk agrotechnicznych, natomiast ekstremalne zjawiska pogodowe – takie jak susze, fale upałów czy nawalne opady – zakłócają funkcjonowanie agroekosystemów, prowadząc do znacznych strat plonów (Olesen i Bindi 2002, Górski i in. 2008, Jaggard i in. 2010). W obliczu rosnącego ryzyka strat spowodowanych suszą niezbędne staje się wdrażanie modeli decyzyjnych opartych na wskaźnikach uwzględniających cykl hydrologiczny w obrębie szeroko pojętego monitoringu na rzecz adaptacji do zmiany klimatu (van Lanen i Peters 2000, Gronaszewski i in. 2020, Leeper i in. 2022) (rys. 1).

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.



Rys. 1. Relacja między suszą meteorologiczną i suszą rolniczą

Źródło: opracowanie własne na podstawie van Lanen i Peters 2000

Wyniki i dyskusja

Nowoczesne metody monitorowania suszy obejmują wykorzystanie m.in. danych satelitarnych (Hazaymeh i Hassan 2016), modelowania hydrologicznego i modelowania agroekosystemów oraz integrację danych modelowych z informacjami lokalnymi (Kasperska-Wołowicz i Łabędzki 2006, Łabędzki i Bąk 2011). Odchodzi się od monitoringu wykorzystującego pojedyncze wskaźniki suszy, odnoszącego się tylko do opadów atmosferycznych lub pochodnych, tj. standaryzowany wskaźnik opadu (SPI, ang. *Standardized Precipitation Index*), które nie uwzględniają roli temperatury i parowania w powstawaniu warunków suszy (Vicente-Serrano i in. 2010) i proponuje się bardziej złożone systemy biorące pod uwagę różne parametry (Van Lanen i Peters 2000, Łabędzki i Bąk 2013). Z punktu widzenia precyzji szacowania obszarów dotkniętych niedoborem wody takie podejście jest niezwykle istotne, gdyż umożliwia uwzględnienie wielu czynników prowadzących do powstania suszy, a nie tylko wielkości opadu atmosferycznego. Wyzwaniem dla systemów wsparcia decyzji w rolnictwie w kontekście suszy jest implementacja wyników monitoringu i skuteczna integracja danych pochodzących z różnych źródeł (Kępińska-Kasprzak i Struzik 2023). Implementacja wskaźników w proces podejmowania decyzji nadal stwarza problemy w optymalizacji wielokryterialnej w nowoczesnych technologiach decyzyjnych (Nendel i in. 2023).

W niniejszym opracowaniu omówiono sześć systemów monitorowania suszy, koncentrując się na końcowych produktach generowanych przez każdy z systemów pod kątem ich aplikacyjnego wykorzystania w rolnictwie.

Europejskie Obserwatorium ds. Suszy

Europejskie Obserwatorium ds. Suszy (EDO, ang. *European Drought Observatory*) jest serwisem prowadzonym przez Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (JRC) (<https://drought.emergency.copernicus.eu/tumbo/edo/map/>). Podstawowym wskaźnikiem wykorzystywanym w tym systemie jest wskaźnik CDI (ang. *Combined Drought Indicator*) (Cammalleri i in. 2021). Wskaźnik CDI jest obliczany w cyklu dziesięciodniowym, natomiast raz w miesiącu są publikowane raporty dotyczące warunków suszy w Europie. CDI określany jest przestrzennie na podstawie norm opadowych, wskaźników wilgotności gleby oraz anomalii wegetacyjnych, wyznaczanych na podstawie danych satelitarnych.

Na podstawie wartości CDI wyróżnia się obszary zagrożone wystąpieniem suszy, tereny, na których roślinność jest już dotknięta suszą oraz obszary, gdzie warunki suszy zaczynają ustępować. Dodatkowo klasyfikowane są trzy poziomy intensywności zjawiska: obszary do obserwacji, obszary objęte ostrzeżeniami o możliwości wystąpienia suszy oraz obszary z alertem, gdzie notuje się występowanie suszy rolniczej. W przypadku obszarów, na których następuje poprawa warunków, na osobnej mapie przedstawiane są klasy regeneracji: tymczasowa regeneracja wilgotności gleby, tymczasowa regeneracja roślinności oraz pełna regeneracja obszaru.

Serwis EDO oferuje również dostęp do interaktywnych map umożliwiających przegląd danych bieżących i historycznych oraz analizę anomalii klimatycznych na tle długoterminowych norm (średnia z lat 1995–2020). Użytkownicy mają możliwość przeglądania raportów sytuacyjnych dla poszczególnych krajów i regionów Europy, analizy trendów sezonowych i wieloletnich, a także integracji danych z systemem Copernicus EMS (ang. *Emergency Management Service*) wspierającym działania kryzysowe w sytuacjach zagrożeń klimatycznych. Platforma umożliwia także pobieranie danych i ich dalsze przetwarzanie w aplikacjach analitycznych, co czyni ją istotnym narzędziem w planowaniu adaptacyjnym oraz zarządzaniu ryzykiem w rolnictwie i gospodarce wodnej.

Monitor Suszy w Stanach Zjednoczonych

Monitor Suszy w Stanach Zjednoczonych (USDM, ang. *U.S. Drought Monitor*) to serwis prowadzony we współpracy instytucji federalnych, stanowych oraz ośrodków akademickich (<https://droughtmonitor.unl.edu/>). System został opracowany przez zespół meteorologów i klimatologów z Narodowego Centrum Łagodzenia Skutków Suszy Uniwersytetu w Nebrasce (NDMC), Narodowej Agencji ds. Oceanów i Atmosfery (NOAA) oraz Departamentu Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USDA).

Do monitorowania suszy wykorzystywane są dane pochodzące zarówno z naziemnych stacji meteorologicznych, jak i z obserwacji satelitarnych. USDM korzysta także z szerokiej sieci ponad 450 obserwatorów terenowych, obejmującej przedstawicieli

agencji rządowych, służb rolniczych, hydrologów, klimatologów oraz lokalnych ekspertów ds. zarządzania zasobami wodnymi. Obserwatorzy ci dostarczają bieżących informacji o skutkach suszy w konkretnych lokalizacjach, takich jak: pogorszenie stanu upraw, niedobory wody, uszkodzenia roślinności naturalnej czy zakłócenia w funkcjonowaniu lokalnej gospodarki. Dane zebrane w ramach tej sieci stanowią ważny komponent walidacyjny i jakościowy, który pozwala na dostosowanie map suszy do realnych warunków w terenie. System posiada dedykowane moduły dla różnych sektorów rolnictwa, w których integrowane są dane meteorologiczne, stan upraw oraz informacje od obserwatorów terenowych, co znacząco zwiększa trafność analiz i prognoz (Leeper i in. 2022).

Mapy wskaźników suszy nanoszone są na obszary upraw konkretnych gatunków roślin, co pozwala na oszacowanie rzeczywistej powierzchni produkcyjnej narażonej na potencjalne straty plonów. Stopień intensywności suszy przedstawiany jest w systemie sześciostopniowej skali opracowanej na podstawie porównania skumulowanych wartości wskaźników suszy z danymi historycznymi. Skala obejmuje: brak suszy oraz stan „nieznaczonej suszy” (D0), a dla obszarów objętych właściwą suszą wyróżniono cztery poziomy: umiarkowaną (D1), silną (D2), ekstremalną (D3) oraz wyjątkową (D4).

Na podstawie aktualnych danych co tydzień publikowane są mapy przedstawiające intensywność suszy w przedziałach siedmiodniowych. Dodatkowo w formie tabelarycznej prezentowany jest procentowy udział powierzchni kraju przyporządkowanej do każdej z klas suszy. W serwisie USDM dostępne są również krótkie raporty opisujące bieżące warunki suszy w poszczególnych regionach Stanów Zjednoczonych.

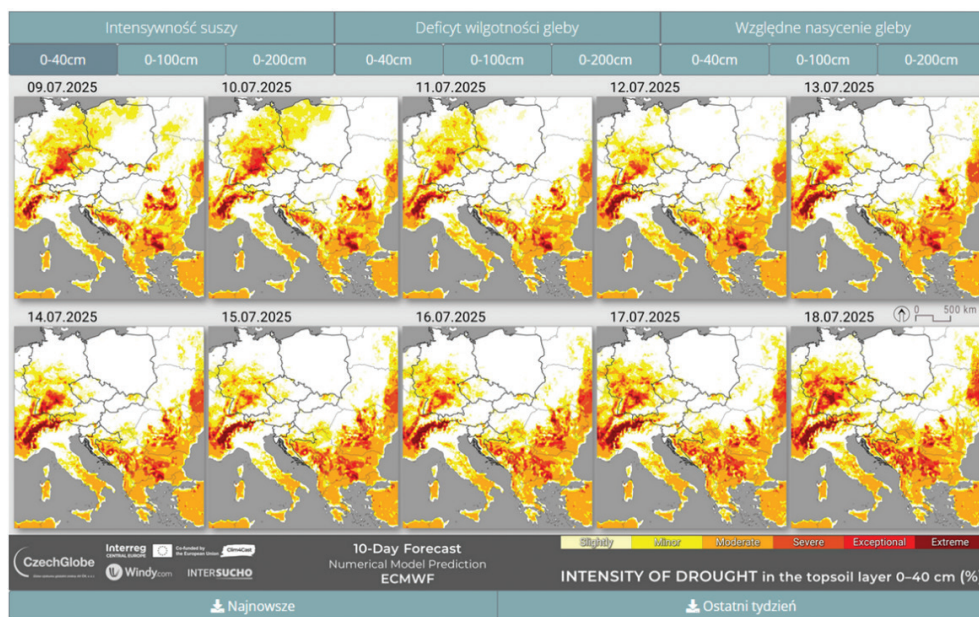
Monitoring suszy dla Europy Środkowo-Wschodniej – Clim4Cast

System Clim4Cast został opracowany w ramach projektu Interreg EUROPA ŚRODKOWA 2021 i jego głównym celem jest zintegrowane monitorowanie zagrożeń związanych z suszą, falami upałów oraz ryzykiem pożarowym (www.clim4cast.eu). Inicjatorem i liderem projektu jest Instytut Badań nad Zmianami Globalnymi (Global Change Research Institute) z Czech, który udostępnia infrastrukturę systemową opartą na założeniach czeskiego systemu monitorowania suszy InterSUCHO (Trnka i in. 2020), wykorzystywanego również na Słowacji.

Do obliczeń wskaźników intensywności suszy wykorzystywane są dane satelitarne dostępne dla instytucji naukowo-badawczych. Dane meteorologiczne pochodzą ze Zintegrowanego Systemu Prognoz Pogody (IFS), opracowanego przez Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody (ECMWF). Informacje o pokryciu terenu generowane są na podstawie indeksu powierzchni liściowej (LAI, ang. *Leaf Area Index*) obliczanego ze zdjęć satelitarnych. Dane o właściwościach gleby pochodzą z globalnej bazy SoilGrids (Hengl i in. 2014 i 2017).

System opiera się na wskaźniku intensywności suszy wyznaczanym przy użyciu modelu bilansu wodnego SoilClim (Řehoř i in. 2021). Na podstawie danych meteorologicznych, informacji o pokryciu terenu oraz właściwości glebowych obliczana jest względna wilgotność gleby. Następnie wartości dziennej wilgotności porównywane są ze średnią wartością z okresu referencyjnego 1981–2020. W wyniku tego porównania każdy piksel klasyfikowany jest do jednej z sześciu kategorii intensywności suszy.

Na podstawie tych danych generowane są mapy prezentujące intensywność suszy na trzech głębokościach: do 40 cm, do 100 cm oraz do 200 cm, obejmujące obszar krajów Europy Środkowo-Wschodniej. Mapy te przedstawiają aktualny rozkład przestrzenny wskaźnika intensywności suszy oraz prognozy na kolejne dni (rys. 2), z przestrzenną rozdzielczością 10 km.

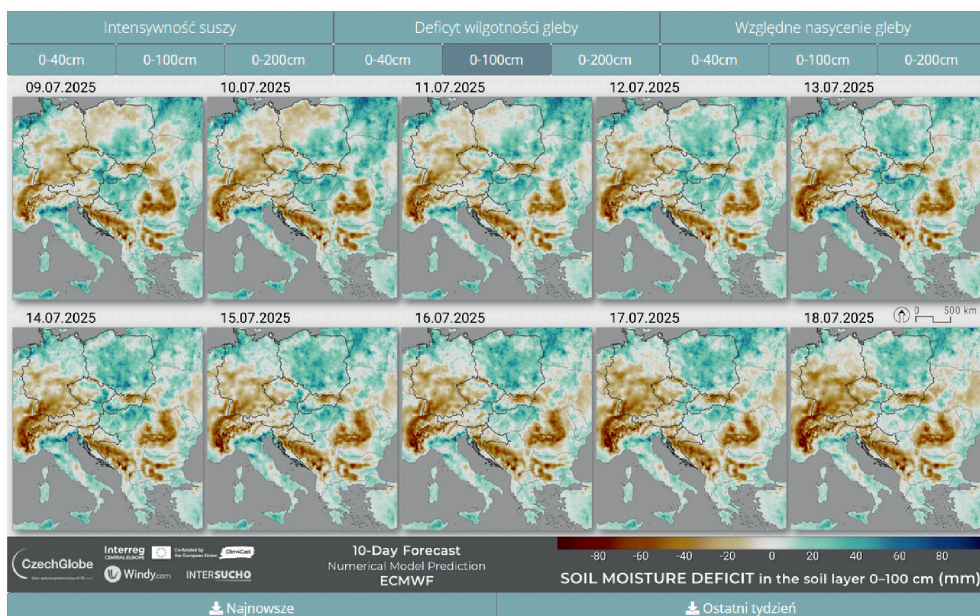


Rys. 2. Rozkład przestrzenny wskaźnika intensywności suszy w warstwie 0–40 cm w okresie od 8 do 17 lipca 2025 roku

Źródło: www.clim4cast.eu

Drugim wskaźnikiem systemu Clim4Cast jest deficyt wilgotności gleby obliczany również przy użyciu bilansu wodnego SoilClim. Deficyt wilgotności gleby jest wyliczany na podstawie różnicy pomiędzy wilgotnością gleby dla danego dnia a wartością mediany wyznaczoną na podstawie okresu referencyjnego. Okres referencyjny dla tego wskaźnika to lata 1961–2010. Dane wyliczane do tego wskaźnika pochodzą z tych samych źródeł co przy wskaźniku intensywności suszy. Deficyt wilgotności gleby wyrażony jest w mm, wartości ujemne oznaczają niedobór wody w glebie,

zaś wartości dodatnie wskazują na nadwyżkę wody w profilu glebowym. Podobnie jak przy wskaźniku intensywności suszy deficyt wilgotności gleby jest pokazywany na trzech poziomach głębokości profilu glebowego. Przykład prezentacji wyników przedstawiono na rysunku 3. W podobny sposób przedstawiany jest również wskaźnik względnego nasycenia gleby.



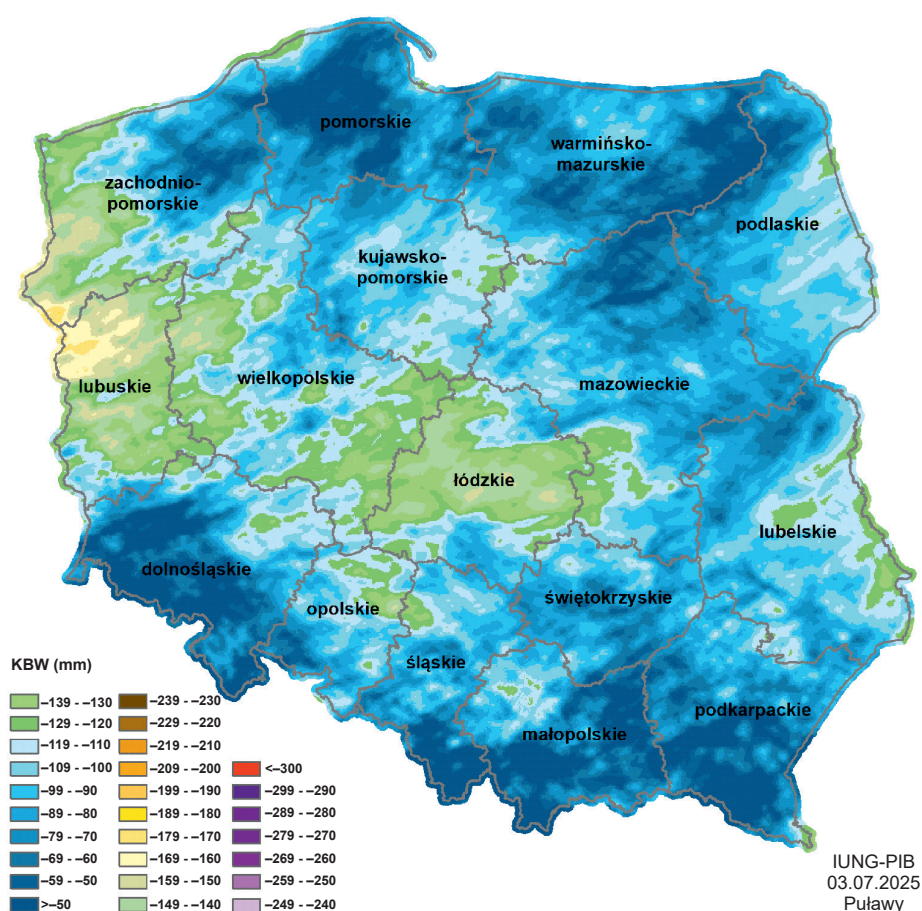
Rys. 3. Rozkład przestrzenny wskaźnika deficytu wilgotności gleby w warstwie 0–100 cm w okresie od 8 do 17 lipca 2025 roku

Źródło: www.clim4cast.eu

Polskie systemy monitorowania suszy

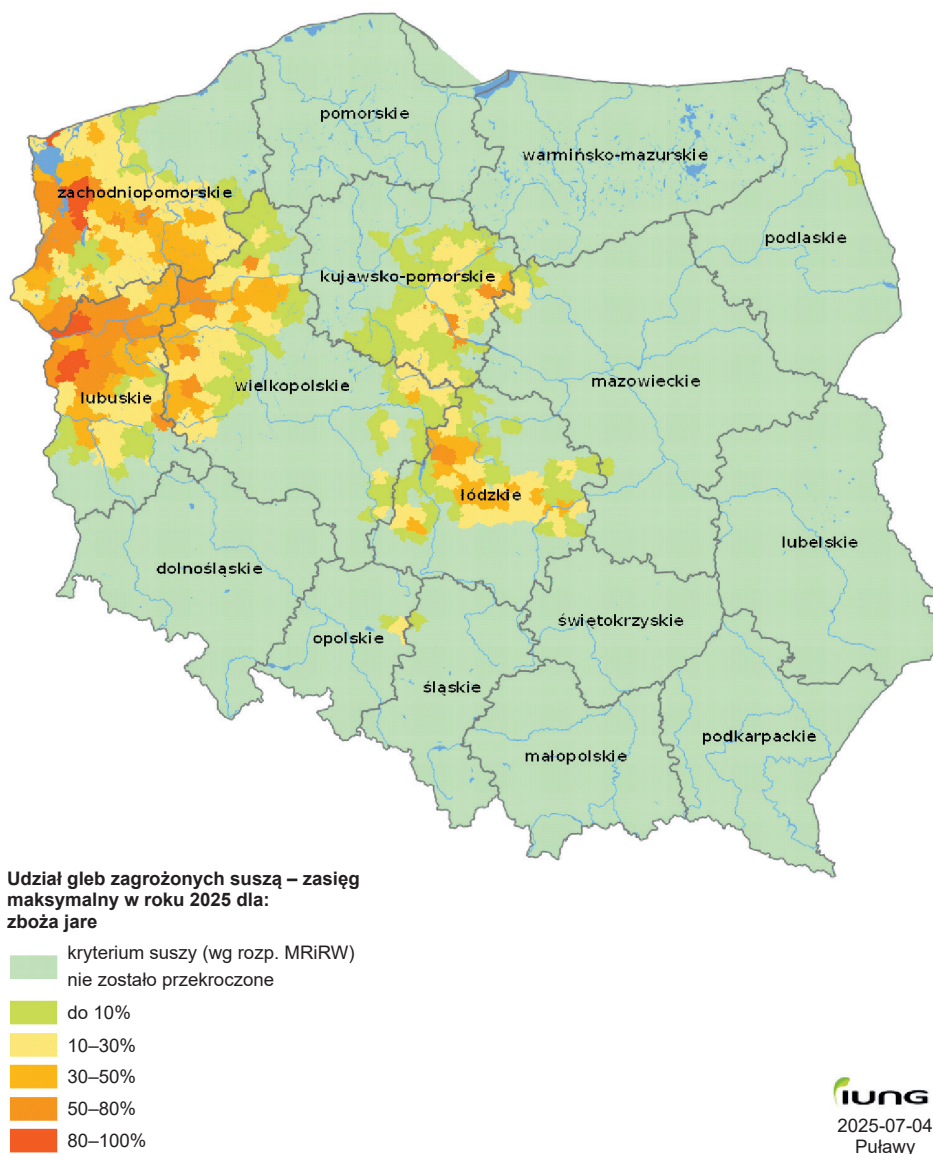
System Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR) to specjalistyczny system wspomagający rolnictwo w zakresie ubezpieczeń rolnych, którego głównym celem jest identyfikacja obszarów dotkniętych stratami plonów spowodowanymi suszą. System ten prowadzony jest przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy (IUNG-PIB), a jego wyniki (rys. 4–6) są wykorzystywane m.in. przy realizacji ustawy z dnia 7 lipca 2005 r. o ubezpieczeniach upraw rolnych i zwierząt gospodarskich (Dz.U. 2005 poz. 1249). W SMSR przyjęto, że spadek klimatycznego bilansu wodnego (KBW) poniżej określonego progu dla danej rośliny i kategorii glebowej oznacza co najmniej 20% stratę plonu. W ramach SMSR gleby w Polsce podzielono na cztery kategorie podatności na suszę, w zależności od ich składu granulometrycznego, przypisanego do odpowiednich kategorii agronomicz-

nych. Do pierwszej kategorii, czyli gleb bardzo podatnych na suszę, zaliczono między innymi piasek luźny, piasek luźny pylasty, piasek słabo gliniasty oraz piasek słabo gliniasty pylasty. Druga kategoria obejmuje gleby podatne na suszę, trzecia – gleby średnio podatne, a czwarta – gleby najmniej podatne, takie jak gliny średnie, gliny ciężkie, pył ilasty oraz iły. Mapa ilustrująca podatność gleb na suszę dostępna jest na stronie internetowej SMSR (www.clim4cast.eu). Użytkownicy mają tam również możliwość sprawdzenia, do której kategorii została przypisana konkretna działka ewidencyjna. Wartości progowe KBW różnią się znacznie między kategoriami glebowymi – różnica ta może wynosić nawet ok. 100 mm pomiędzy glebami najbardziej i najmniej podatnymi na suszę.



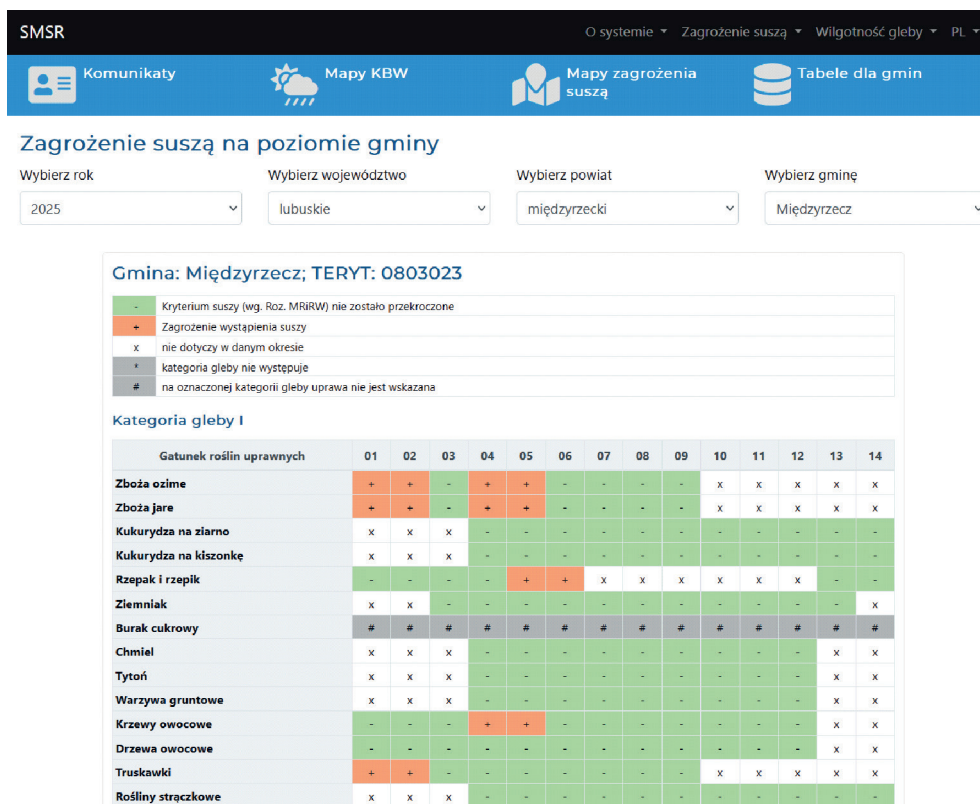
Rys. 4. Mapa klimatycznego bilansu wodnego (KBW) w okresie od 1 maja do 30 czerwca 2025 roku będąca podstawowym produktem Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej

Źródło: www.clim4cast.eu



Rys. 5. Mapa udziału gleb zagrożonych suszą dla zbóż jarych w okresie od 21 marca do 30 czerwca 2025 roku będąca podstawowym produktem Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej

Źródło: www.clim4cast.eu



Rys. 6. Informacja dla gmin wskazująca na zagrożenie suszą dla poszczególnych upraw na I kategorii glebowej w gminie Międzyrzecz (powiat: międzyrzecki; woj. lubuskie), będąca produktem Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej

Źródło: www.clim4cast.eu

SMSR do określenia KBW w okresach sześciodekadowych wykorzystuje zasoby danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) udostępniane poprzez API oraz sieć stacji meteorologicznych należących do IUNG-PIB, stacji meteorologicznych, które zostały skonfigurowane podobnie jak stacje IUNG-PIB a zakupione przez samorządy lokalne, samorządy rolnicze oraz ośrodki doradztwa rolniczego. W ramach systemu funkcjonuje sieć gospodarstw referencyjnych, w których pod różnymi uprawami mierzona jest profilowo do 1 m głębokości wilgotność gleby. W każdym z gospodarstw funkcjonuje automatyczna stacja meteorologiczna wyposażona w sondę profilową wilgotności gleby.

Znaczący zasób wskaźników suszy na potrzeby rolnictwa oferują systemy udostępniane przez IMGW-PIB, głównie poprzez serwis AGROMETEO IMGW-PIB

(<https://agrometeo.imgw.pl>). Wskaźniki suszy tego serwisu to: klimatyczny bilans wodny (KBW), wskaźnik hydrotermiczny (Chmist-Sikora i in. 2022), wilgotność gleby, okresy nadmiaru i niedoboru opadów oraz stopień zaspokojenia potrzeb wodnych roślin uprawnych.

Klimatyczny bilans wodny prezentowany jest w układzie dekadowym i miesięcznym, co umożliwia całoroczne monitorowanie sytuacji, a tym samym stanowi uzupełnienie systemu SMSR w ujęciu klimatycznym. Dane o opadach pochodzą z systemu RainGRS (te dane są również udostępniane na potrzeby SMSR), który łączy informacje z pomiarów naziemnych, radarowych i satelitarnych. Ewapotranspiracja określana jest na podstawie satelitarnego produktu EUMETSAT Land SAF. Wilgotność gleby monitorowana jest z wykorzystaniem danych satelitarnych, a rozdzielczość przestrzenna tego wskaźnika wynosi 25 km. W serwisie prezentowany jest również wskaźnik hydrotermiczny Sielanianowa (HTC), który pozwala ocenić ogólne warunki wilgotnościowe w danym okresie. Otrzymane wartości klasyfikowane są do jednej z dziewięciu klas – od skrajnie suchego po skrajnie wilgotny. W systemie wyznacza się też stopień zaspokojenia potrzeb wodnych roślin uprawnych jako różnicę pomiędzy rzeczywistą sumą opadów a optymalną ilością opadów miesięcznych dla danej uprawy. Uzyskane wartości klasyfikowane są jako: optimum (różnica $\pm 10\%$ względem wartości referencyjnej), nadmiar (powyżej $+10\%$) lub niedobór (poniżej -10%). Optymalne wielkości opadów dla tych wskaźników zostały określone na podstawie badań Dzieżyca (1989).

Podsumowanie

W artykule przeprowadzono przegląd sześciu wybranych systemów monitorowania suszy, skupiając się na analizie generowanych przez nie produktów końcowych oraz ocenie ich potencjalnej przydatności w zastosowaniach rolniczych. Szczególną uwagę zwrócono na zakres przestrzennej i czasowej rozdzielczości danych, rodzaje wykorzystywanych wskaźników (m.in. CDI, KBW, Soil Moisture Deficit) (tab. 1), możliwość prognozowania i stopień integracji danych lokalnych. Przykłady systemów takich jak EDO, USDM czy Clim4Cast wskazują na rosnącą rolę modeli bilansu wodnego i wskaźników wielokryterialnych, natomiast polskie systemy (SMSR, AGROMETEO) stanowią przykład wdrożenia narzędzi dopasowanych do specyfiki krajowego rolnictwa i systemu ubezpieczeń upraw.

Tabela 1

Zestaw wskaźników wykorzystywanych w prezentowanych systemach monitoringu suszy

System monitoringu	Wskaźniki suszy meteorologicznej	Wskaźniki suszy rolniczej	Wynik
SMSR	• klimatyczny bilans wodny	• strata plonów na 4 kategoriach glebowych • dostępność wody w glebie	% obszarów gruntów objętych suszą dla 14 upraw
AGROMETEO IMGW-PIB	• klimatyczny bilans wodny • współczynnik hydrotermiczny HTC • okresy niedoborów i nadmiarów opadów	• stopień zaspokojenia potrzeb wodnych wg optymalnych	
EDO European Drought Monitor	standaryzowany wskaźnik opadu (SPI, ang. <i>Standardized Precipitation Index</i>)	• anomalia wilgotności gleby (Soil Moisture Anomaly SMA) • anomalia stanu roślinności (Anomaly of Vegetation Condition FAPAR Anomaly)	łączony wskaźnik suszy (Combined Drought Indicator CDI)
U.S Drought Monitor	• standaryzowany wskaźnik opadu (SPI, ang. <i>Standardized Precipitation Index</i>) • standaryzowany wskaźnik klimatycznego bilansu wodnego (SPEI, ang. <i>Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index</i>)		• % obszaru objętego suszą przez uprawę i kategorię suszy meteorologicznej • raporty obserwatorów
Clim4Cast / Intersucho	wskaźnik suchości	• deficyt wilgotności gleby • względne nasycenie gleby wodą	szacunkowy wpływ suszy na plony wg obserwatorów

Źródło: opracowanie własne

Rozwój nowych metod monitorowania warunków meteorologicznych, w tym integracja danych satelitarnych, modelowanie hydrologiczne, wykorzystanie modeli prognozujących plon, a także zastosowanie sztucznej inteligencji w analizie danych i automatyzacji pomiarów, znacząco zwiększa możliwości wczesnego wykrywania suszy i prognozowania jej skutków. Przedstawione w pracy systemy wskazują, że modelowy system monitoringu suszy powinien integrować najlepsze praktyki i rozwiązania zaobserwowane w istniejących systemach krajowych (tj. SMSR, AGROMETEO)

oraz międzynarodowych (tj. EDO, U.S. Drought Monitor, Clim4Cast). Celem takiego systemu powinno być nie tylko wykrywanie suszy i jej klasyfikacja, ale również prognozowanie zagrożeń, wspieranie decyzji administracyjnych oraz wzmacnianie adaptacji rolnictwa do zmiennych warunków klimatycznych. W systemie monitoringu suszy kluczową rolę powinny odgrywać nie tylko dane z automatycznych stacji pomiarowych, satelitów i modeli, ale również lokalne obserwacje terenowe prowadzone przez wyspecjalizowaną sieć obserwatorów. Doświadczenia takich systemów jak U.S. Drought Monitor oraz InterSucho jednoznacznie pokazują, że włączenie lokalnych raportów do systemu znacząco zwiększa jego trafność, wiarygodność i użyteczność decyzyjną. Zastosowanie sieci obserwatorów terenowych w modelowym systemie monitoringu suszy ma kilka istotnych zalet. Przede wszystkim umożliwia walidację danych z modeli i satelitów, co zwiększa ich wiarygodność. Ponadto pozwala na szybkie wykrywanie skutków suszy, zanim staną się one widoczne we wskaźnikach ilościowych, co jest szczególnie ważne w okresach przejściowych i w sytuacjach lokalnych niedoborów wody. Lokalne raporty mogą również wskazywać na błędną klasyfikację wskaźnikową, wymuszając korektę map zagrożenia. Dodatkowo dane zebrane przez obserwatorów w jednolitym systemie mogą stanowić cenny materiał do kalibracji istniejących już modeli w zmieniających się warunkach klimatycznych.

Wyniki analizy wskazują, że skuteczne aplikacyjne wykorzystanie tych systemów w rolnictwie wymaga nie tylko wysokiej jakości danych wejściowych, ale również ich integracji w nowoczesnych narzędziach wspomagania decyzji. Opracowane produkty – mapy, wskaźniki, prognozy – mogą stanowić podstawę do podejmowania decyzji zarządczych na poziomie gospodarstwa, regionu i polityki publicznej, wspierając działania w zakresie monitorowania ryzyka oraz planowania adaptacyjnego dla rolnictwa wobec zmiany klimatu.

Literatura

1. Bachmair S., Stahl K., Collins K., Hannaford J., Acreman M., Svoboda M., Knutson C., Smith K.H., Wall N., Fuchs B., Crossman N.D., Overton I.C.: Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *WIREs Water*, 2016, **3**: 516-536.
2. Cammalleri, C., Arias-Muñoz, C., Barbosa, P., de Jager, A., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Naumann, G., Spinoni, J., and Vogt, J.: A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, **21**: 481-495.
3. Chmiś-Sikorska J., Kępińska-Kasprzak M., Struzik P.: Agricultural drought assessment on the base of Hydro-thermal Coefficient of Selyaninov in Poland. *Italian Journal of Agrometeorology* 2022, **(1)**: 3-12; DOI: 10.36253/ijam-1530
4. Dziężycki J.: Potrzeby wodne roślin uprawnych. PWN Warszawa, 1989, ss. 418.
5. FAO 2016. The state of food and agriculture climate change, agriculture and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 2016.
6. Górski T., Kozyra J., Doroszewski A.: Field crop losses in Poland due to extreme weather conditions – case studies. In: *The Influence of extreme phenomenon on the natural environment and human living conditions*, S. Liszewski (ed.). Łódź. ŁTN, 2008, pp. 35-49.

7. Granośzewski W., Kowalczyk A., Ploch I., Rubinkiewicz J., Uścińowicz G., Woźnicka M., Kępińska-Kasprzak M., Limanówka D., Doktor R., Struzik P., Dubel A., Skotak K., Hajto M., Kozyra J., Pudełko R., Żyłowska K., Jędrejek A., Łopatka A., Jadczyński J., Nieróbca A., Doroszewski A., Barszczeńska M.: Rola instytucji badawczych we wsparciu działań adaptacyjnych do zmian klimatu. *Przegląd Geologiczny*, 2020, **68(1)**: 25-44.
8. Hazayme H.K., Hassan Q.K.: Remote sensing of agricultural drought monitoring: A state of art review. *AIMS Environmental Science*, 2016, **3(4)**: 604-630.
9. Hengl T., de Jesus J.M., MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Ribeiro E. i in.: SoilGrids1km – Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PLoS ONE*, 2014, **9(8)**: e105992.
10. Hengl T., de Jesus J.M., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A.: SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 2017, **12(2)**: e0169748.
11. Interreg Central Europe „Central European Alliance for Increasing Climate Change Resilience to Combined Consequences of Drought, Heatwave, and Fire Weather through Regionally-Tuned Forecasting” Clim4Cast; www.clim4cast.eu
12. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 896; <https://doi.org/10.1017/9781009157988>.
13. Jaggar K.W., Qi A., Ober E.S.: Possible changes to arable crop yields by 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2010, **365**: 2835-2851.
14. Karcz Z.M., Kozyra J.: Wpływ zmian klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe Polski. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2020, ss. 119.
15. Kasprzak A., Wołowicz W., Łabędzki L.: Koncepcja systemu monitorowania suszy na obszarach rolniczych. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2006, t. 6, **1(16)**: 161-171.
16. Kępińska-Kasprzak M., Struzik P.: Monitoring of Plant Cultivation Conditions Using Ground Measurements and Satellite Products. *Water* 2023, **15**, 449; <https://doi.org/10.3390/w15030449>.
17. Kundzewicz Z.W., Hov O., Okruszko T. (red.): Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce. Poznań, 2017, ss. 273.
18. Leeper R.D., Bilotta R., Petersen B., Stiles C.J., Heim R., Fuchs B., Prat O.P., Palecki M., Ansari S.: Characterizing U.S. drought over the past 20 years using the U.S. drought monitor. *International Journal of Climatology*, 2022, **42(12)**: 6616-6630.
19. Łabędzki L., Bąk B.: Prognozowanie suszy meteorologicznej i rolniczej w systemie monitorowania suszy na Kujawach i w dolinie górnej Noteci. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2011, **5**: 19-28.
20. Łabędzki L., Bąk B.: Monitoring i prognozowanie przebiegu i skutków deficytu wody na obszarach wiejskich. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2013, **2(I)**: 65-76.
21. Nelder C. (ed.): Modelling climate change impacts on agricultural systems. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, 2023, pp. 39-74; www.bdsublishing.com (dostęp: 20.07.2025).
22. Oficjalny serwis agrometeorologiczny prowadzony przez IMGW-PIB; <https://agrometeo.imgw.pl>
23. Olesen J.E., Bindu M.: Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 2002, **16**: 239-262.

24. P i n i e w s k i M., Marcinkowski P., O'Keeffe J., Szcześniak M., Nieróbca A., Kozyra J., Kundzewicz Z.W., Okruszko T.: Model-based reconstruction and projections of soil moisture anomalies and crop losses in Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020; <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03106-6>
25. Ř e h o ř J., Brazdil R., Lhotka O., Trnka M., Balek J., Stepanek P., Zahradnicek P.: Precipitation in the Czech Republic in light of subjective and objective classifications of circulation types. *Atmosphere*, 2021, **12**, 1536.
26. T r n k a M., Hlavinka P., Mozy M. i in.: Czech Drought Monitor System for monitoring and forecasting agricultural drought and drought impacts. *International Journal of Climatology*, 2020, **40**: 5941-5958.
27. U r b a n G., Kuchar L., Kepińska-Kasprzak M., Łaszycza E.Z.: A climatic water balance variability during the growing season in Poland in the context of modern climate change, „*Meteorologische Zeitschrift*”, 2022, t. 31.
28. Ustawa z dnia 7 lipca 2005 roku o ubezpieczeniach upraw rolnych i zwierząt gospodarskich (Dz.U. 2005 r. poz. 1249).
29. V a n L a n e n H.A.J., Peters E.: Definition, Effects and Assessment of Groundwater Droughts. In: *Drought and Drought Mitigation in Europe*, J.V. Vogt, F. Somma (eds). *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 14. Springer, 2000, Dordrecht; https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1_4
30. V i c e n t e - S e r r a n o V., Beguería S.M., López-Moreno S., Juan I.: A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Climate*, 2010, **23**(7): 1696-1718; <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
31. Ż y ł o w s k a K., Kozyra J.: Zmiany klimatycznego bilansu wodnego okresu wegetacyjnego w Polsce w latach 1971–2020. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2023, **71**(25): 75-87.

Adres do korespondencji:

dr Katarzyna Żyłowska
dr hab. Jerzy Kozyra, prof. IUNG-PIB
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 786; 764
e-mail: kzyłowska@iung.pulawy.pl
Jerzy.Kozyra@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Katarzyna Żyłowska	0000-0002-6019-034X
Jerzy Kozyra	0000-0002-7082-8765

Anna Nieróbca

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

PLONOWANIE W NOWOCZESNYM ROLNICTWIE W PORÓWNANIU Z UBIEGŁYM WIEKIEM*

Słowa kluczowe: plonowanie, zielona rewolucja, postęp biologiczny, rolnictwo precyzyjne, zmiany klimatu, rolnictwo odporne na zmiany klimatu

Wstęp

Plonowanie roślin uprawnych, w szczególności zbóż odgrywa fundamentalną rolę w zaspokajaniu rosnącego zapotrzebowania na żywność. Zdolność do utrzymania, a w perspektywie globalnej do zwiększania plonów, jest kluczowa dla stabilności produkcji żywności, również w Polsce (Matyka i Krasowicz 2024, Sułek i in. 2024).

Wzrost liczby ludności na świecie, z prognozami przekraczającymi 10 mld do 2100 r., stawia przed rolnictwem poważne wyzwania w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego (Ritchie i in. 2023). Jednocześnie współczesna produkcja rolnicza stoi w obliczu narastających zagrożeń wynikających ze zmian klimatu. Nasilające się zjawiska ekstremalne wywierają coraz silniejszy wpływ na stabilność produkcji. Rosnąca temperatura, zmienność opadów oraz intensyfikacja ekstremalnych zdarzeń pogodowych, takich jak susze, powodzie czy fale upałów, bezpośrednio zagrażają stabilności plonów (Doroszewski i in. 2014, Lesk i in. 2016, Sadowski 2024). W Polsce symptomy tych procesów są już wyraźnie widoczne, co wymusza wdrażanie skutecznych strategii adaptacyjnych w rolnictwie (Kundzewicz i Kozyra 2011, Paluszkiwicz i in. 2024).

W odpowiedzi na te wyzwania rolnictwo usilnie poszukuje innowacyjnych rozwiązań umożliwiających stabilizację i zwiększanie plonowania roślin. Priorytetem pozostaje postęp biologiczny (genetyczny), który sprzyja tworzeniu odmian o podwyż-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

szonym potencjale plonowania, lepszej efektywności wykorzystania zasobów oraz zwiększonej odporności na stresy biotyczne i abiotyczne (Tester i Langridge 2010, Marciniak 2011, Świącicki i in. 2011).

Równolegle rozwija się nowoczesna agrotechnika. Powstają precyzyjne systemy nawożenia i ochrony roślin, których implementacja wymaga wykorzystania zaawansowanych technologicznie maszyn rolniczych (Zhang i in. 2002, Fountas i in. 2020). W dużych gospodarstwach rolniczych kluczowe znaczenie zyskuje rolnictwo precyzyjne (często określane jako rolnictwo 4.0 i 5.0). Dzięki zastosowaniu teledetekcji i integracji różnorodnych danych umożliwia ono zarządzanie zasobami na poziomie polowym, co prowadzi do bardziej zrównoważonej i efektywnej produkcji (Wolfert i in. 2017).

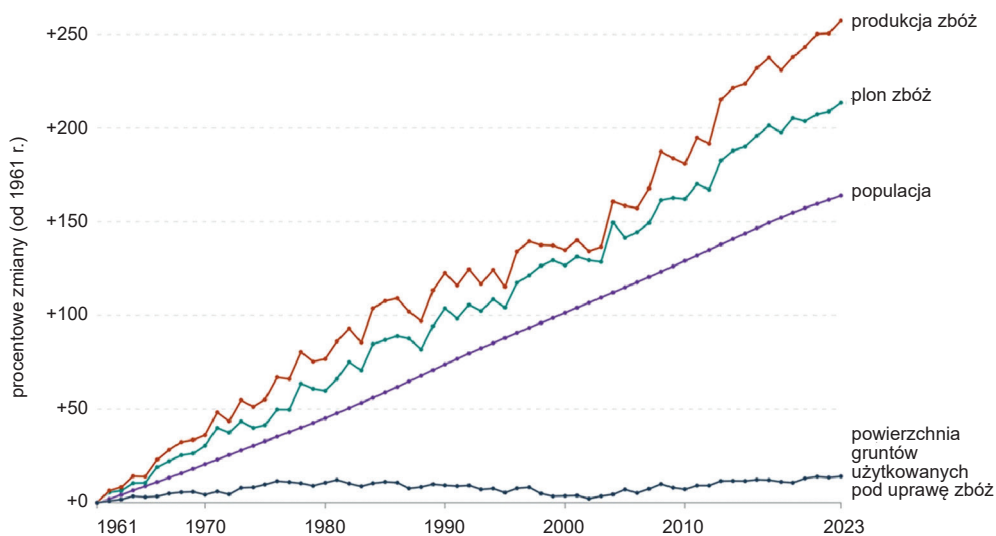
Niniejsza praca ma na celu omówienie wpływu innowacji w rolnictwie na plonowanie roślin w kontekście budowania rolnictwa odpornego na zmiany klimatu. Zostaną przedstawione kluczowe czynniki, takie jak postęp biologiczny, rozwój agrotechniki oraz cyfryzacja, zrozumienie fizjologii roślin i środowiska, a także ich oddziaływanie na wykorzystanie potencjału plonotwórczego roślin.

Plonowania roślin w Polsce i na świecie w XX i XXI wieku

Globalny wzrost plonów w XX i XXI w. jest jednym z najbardziej znaczących osiągnięć ludzkości pozwalającym na wyżywienie rosnącej populacji (Godfray i Garnett 2014, Krasowicz 2024, Sułek i in. 2024). Historyczne trendy plonowania na świecie wykazują dynamiczny wzrost plonów, szczególnie po II wojnie światowej. Przed tym okresem wzrost plonów był stosunkowo powolny i w dużej mierze determinowany przez rozszerzanie obszarów uprawnych przy wykorzystaniu dość prostych metod agrotechnicznych (Evenson i Gollin 2003).

Punktem zwrotnym w globalnym rolnictwie była tak zwana zielona rewolucja, która rozpoczęła się w latach 60. XX w. Jej głównymi filarami były: wprowadzenie do produkcji wysoko plonujących odmian zbóż (ryżu, pszenicy, kukurydzy), intensywne stosowanie nawozów mineralnych i środków ochrony roślin, rozwój systemów nawadniających oraz postęp w mechanizacji rolnictwa (Pingali 2012). W wyniku wykorzystania postępu hodowlanego w państwach takich jak Indie czy Pakistan, które wcześniej borykały się z chronicznymi niedoborami żywności, osiągnęły samowystarczalność w produkcji zbóż (Conway 1997). Od początku lat 60. XX w. globalna produkcja zbóż wzrosła o ponad 250%. Wzrost ten jest wyraźnie szybszy niż przyrost populacji, co oznacza, że produkcja żywności zwiększała się w tempie pozwalającym na poprawę bezpieczeństwa żywnościowego na świecie. Wzrost ten był szczególnie dynamiczny po 2000 r., co można wiązać z rozwojem technologii upraw, intensyfikacją rolnictwa oraz postępem hodowlanym. Światowe plony zbóż w tym okresie wzrosły o ok. 200%. Oznacza to, że głównym czynnikiem wzrostu produkcji była poprawa wydajności

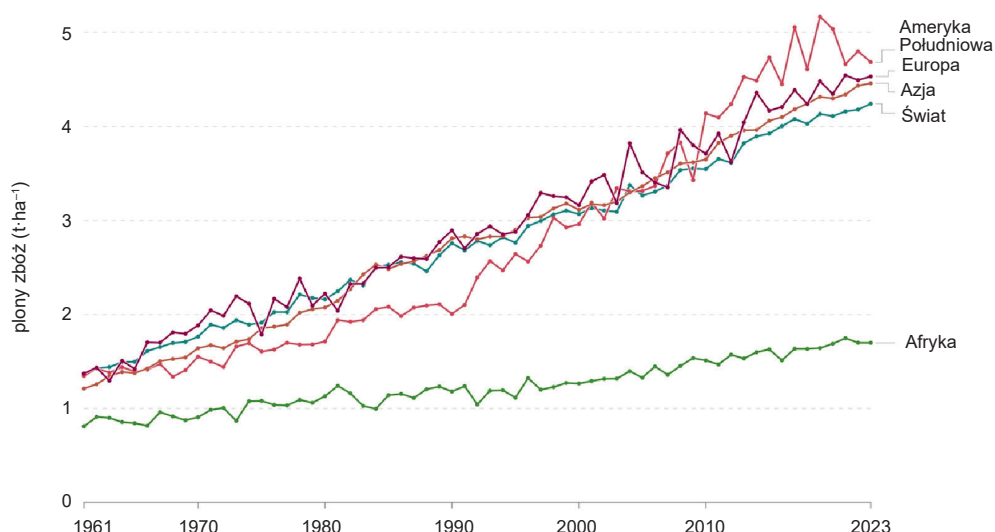
upraw, a nie zwiększenie areału zasiewów (rys. 1). W analizowanym okresie obserwuje się wyraźny i systematyczny wzrost wydajności upraw zbóż we wszystkich regionach świata, choć tempo tego wzrostu było zróżnicowane geograficznie. Średni światowy plon zbóż wzrósł z ok. $1,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w 1961 r. do ponad $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w 2023 r., co oznacza niemal trzykrotny wzrost. Wzrost ten był szczególnie intensywny po 1980 r., w wyniku wprowadzenia nowoczesnych technologii upraw i tzw. zielonej rewolucji. Jednocześnie między regionami świata jest duża dysproporcja w wielkościach uzyskiwanego plonu (rys. 2). Afryka pozostaje regionem o najniższych plonach zbóż na świecie. W 1961 r. wynosiły one ok. $0,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, a w 2023 r. zaledwie $1,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Choć wydajność wzrosła dwukrotnie, różnica w stosunku do pozostałych kontynentów jest nadal bardzo duża, czego przyczyną są ograniczenia technologiczne, niestabilność polityczna, degradacja gleb oraz niedostateczne wsparcie inwestycyjne i infrastrukturalne dla sektora rolnego (Ritchie i in. 2023).



Rys. 1. Zmiany w produkcji zbóż, plonach, użytkowaniu gruntów i populacji – świat.

Wszystkie wartości są indeksowane względem pierwszego roku na osi czasu;
oznacza to, że pierwszy rok serii czasowej ma wartość zero

Źródło: UN FAO 2025



Rys. 2. Plony zbóż wyrażone w tonach z hektara. Zboża obejmują pszenicę, ryż, kukurydzę, jęczmień, owies, żyto, proso, sorgo, grykę i mieszanki zbożowe

Źródło: UN FAO 2025

W polskim rolnictwie w ciągu ostatnich sześćdziesięciu lat również zaszła głęboka transformacja; sektor rolny przeszedł znaczące przeobrażenia strukturalne i technologiczne, co ma odzwierciedlenie w plonie. Powierzchnia zasiewów ogółem w Polsce systematycznie się zmniejszała. W 1960 r. wynosiła ona 15,3 mln ha, natomiast w 2024 r. – 10,8 mln ha, co oznacza spadek o ok. 4,5 mln ha (tj. 29%). Zmniejszaniu powierzchni zasiewów towarzyszyły jednak znaczące zmiany w strukturze upraw, szczególnie w grupie zbóż. Zboża pozostają dominującą grupą roślin uprawnych w Polsce, choć ich areał ulegał zmianom. W 1960 r. zajmowały 9,22 mln ha, natomiast w 2024 r. – 7,1 mln ha. Udział zbóż w strukturze zasiewów ogółem wahał się w analizowanym okresie od ok. 54% w 1980 r. do ponad 73% w 2010 r., a obecnie wynosi 65,5% (tab. 1).

W latach 1960–2024 nastąpiły istotne zmiany w strukturze zasiewów zbóż, w tym wyraźny wzrost udziału kukurydzy. Gatunek ten, będący w latach 60. XX w. uprawą marginalną, obecnie zajmuje drugie miejsce po pszenicy. W 2024 r. powierzchnia uprawy kukurydzy przekroczyła 1,28 mln ha. Pszenica natomiast jest obecnie uprawiana na powierzchni ok. 2,4 mln ha.

Największy spadek powierzchni zasiewów spośród wszystkich zbóż odnotowano w przypadku uprawy żyta. W 1960 r. uprawiano je na 5,12 mln ha, natomiast w 2024 r. już tylko na 0,68 mln ha, co oznacza spadek o prawie 87%.

Tabela 1

Powierzchnia uprawy poszczególnych gatunków zbóż w latach 1960–2024 (w mln ha)

Wyszczególnienie	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2015	2020	2024
Powierzchnia zasiewów ogółem	15,3	15,0	14,5	14,2	12,4	10,4	10,7	10,9	10,8
% w strukturze zasiewów	60,2	55,8	54,1	59,9	71,0	73,7	69,9	68,1	65,5
Zboża ogółem	9,22	8,34	7,85	8,53	8,81	7,6	7,5	7,5	7,1
Pszenica	1,36	1,99	1,61	2,28	2,64	2,14	2,39	2,39	2,38
Żyto	5,12	3,41	3,04	2,31	2,13	1,06	0,75	0,85	0,68
Jęczmień	0,72	0,92	1,32	1,17	1,10	0,97	0,84	0,68	0,69
Owies	1,64	1,53	1,00	0,75	0,57	0,57	0,41	0,51	0,52
Pszenżyto	-	-	-	0,75	0,70	1,32	1,52	1,39	1,15
Mieszkanki zbożowe	0,26	0,40	0,74	1,17	1,48	1,10	0,83	0,59	0,25
Kukurydza na ziarno	0,02	0,01	0,02	0,06	0,15	0,34	0,67	0,95	1,28

Źródło: opracowanie własne na podstawie Krasowicz i Madej (2020), Sułek i in. (2024), GUS (2015, 2020, 2024)

Z danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS 1956–2024) wynika (tab. 2), że od początku lat 60. XX w. do 2024 r. w Polsce nastąpił wyraźny wzrost plonów wszystkich gatunków zbóż. Przykładowo, plony pszenicy ozimej zwiększyły się z poziomu $1,48 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w 1956 r. do ponad $5,29 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w 2024 r. (rys. 3). Wzrost ten charakteryzował się jednak zmienną dynamiką. Do początku lat 90. średnioroczny trend wzrostu plonów wynosił ok. $72 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ rocznie. Po tym okresie nastąpiło jego osłabienie, co było związane m.in. z transformacją ustrojowo-gospodarczą w Polsce. W latach 1991–2024 trend wzrostu plonów wynosił średnio $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ rocznie.

Tabela 2

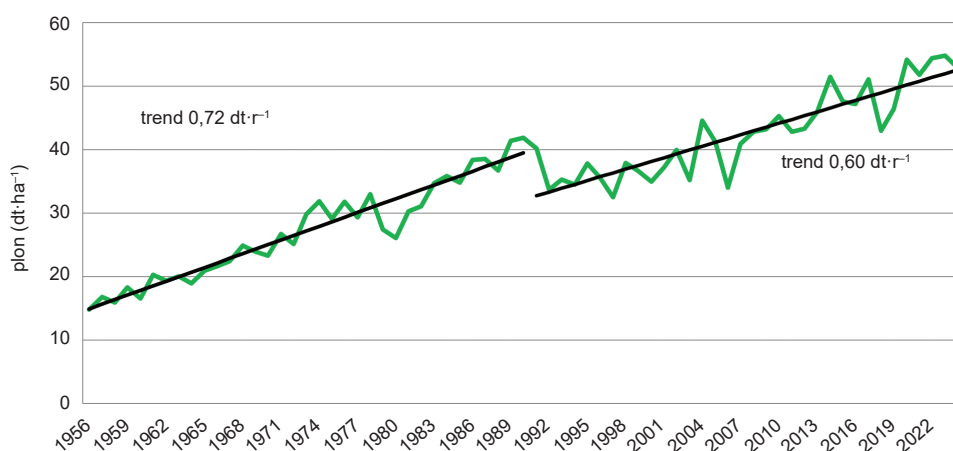
Plony poszczególnych gatunków zbóż w latach 1961–2024 ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)

Wyszczególnienie	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2015	2016–2020	2021–2023	2024
Pszenica	2,14	2,87	3,51	3,40	3,89	4,45	4,60	5,16	5,20
Żyto	1,73	2,24	2,52	2,28	2,44	2,79	2,88	3,42	3,57

cd. tab. 2

Wyszczególnienie	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2015	2016–2020	2021–2023	2024
Jęczmień	2,12	2,81	3,19	2,93	3,16	3,61	3,71	4,29	4,34
Owies	1,88	2,37	2,62	2,36	2,44	2,76	2,77	3,11	3,17
Pszenżyto	-	-	-	3,01	3,24	3,58	3,71	4,33	4,00
Kukurydza na ziarno	2,34	3,81	4,51	5,06	5,77	6,48	6,59	7,15	7,36

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS-u 1956–2024



Rys. 3. Plony pszenicy ozimej w Polsce w latach 1956–2024

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS-u 1956–2024

Nieregularna zmienność plonów pszenicy ozimej w poszczególnych latach wynika w dużej mierze z wpływu warunków pogodowych (rys. 3). W ostatnich latach odchylenia od linii trendu plonów pszenicy ozimej stały się wyraźniejsze, co wskazuje na rosnącą zmienność plonowania. Widoczne odchylenia od trendów potwierdzają istotny wpływ czynników meteorologicznych na wysokość uzyskiwanych plonów. Może to być interpretowane jako efekt wzrastającej niestabilności klimatycznej. Mimo że obecnie średnie plony pszenicy ozimej przekroczyły poziom $5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, dane z doświadczeń odmianowych wskazują na możliwość uzyskiwania znacznie wyższych plonów przekraczających $8\text{--}9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Świadczy to o znacznym, wciąż niewykorzystanym potencjale biologicznym upraw (Wicki 2017).

Niewykorzystany potencjał plonotwórczy

Pomimo znaczącego postępu w zakresie genetyki oraz agrotechniki we współczesnym rolnictwie nadal obserwuje się istotny, niewykorzystany potencjał plonotwórczy odmian, określanej jako luka plonowania (ang. *yield gap*). Termin ten oznacza różnicę między potencjalnym plonem – możliwym do uzyskania w optymalnych warunkach środowiskowych i przy zastosowaniu najlepszej dostępnej agrotechniki dla danej odmiany – a rzeczywistym plonem osiąganym w warunkach produkcyjnych (van Ittersum i in. 2013). Tym samym, choć nadal obserwujemy ogólny trend wzrostu plonów dzięki innowacjom genetycznym i agronomicznym (rys. 2), to tempo tego wzrostu ulega osłabieniu. Warto też podkreślić, że niestabilność klimatyczna oddziałuje nie tylko przez obniżenie średniego plonu, ale także przez zwiększenie zmienności plonów między latami. Badania wskazują, że w regionach dotkniętych wzrostem częstotliwości ekstremów pogodowych plonowanie cechuje się większymi wahaniami, co ogranicza przewidywalność produkcji rolniczej. Przykładem może być analiza plonowania zbóż w niemieckich badaniach odmianowych, która wykazała stagnację wzrostu plonów w połączeniu ze zwiększonym oddziaływaniem stresów cieplnych i suszowych (Riedesel i in. 2024).

Badania prowadzone przez Dworakowskiego i in. (2018) również wskazują, że w Polsce pomimo postępu biologicznego jego pełna implementacja w praktyce rolniczej pozostaje ograniczona. W województwie podlaskim, w latach 1960–2009, plony zbóż uzyskiwane w warunkach doświadczalnych były średnio o 60–145% wyższe niż te uzyskiwane w gospodarstwach produkcyjnych. Natomiast według badań Wickiego (2008) poziom wykorzystania potencjału plonowania odmian zbóż w Polsce wynosił średnio ok. 55% dla okresu 1970–2007. Jednym z głównych czynników ograniczających poziom plonowania było niewystarczające i nie zrównoważone nawożenie. Zmniejszenie luki plonowania jest możliwe dzięki efektywniejszemu wykorzystaniu postępu hodowlanego oraz optymalizacji praktyk agrotechnicznych. Szacuje się, że dzięki temu produkcja zbóż w Polsce mogłaby wzrosnąć o 20–30% bez konieczności zwiększania powierzchni zasiewów (Wicki 2008, Podleśny i Grabiński 2019). W Polsce na wielkość luki plonowania ma wpływ regionalne zróżnicowanie warunków produkcji wynikające z odmiennych uwarunkowań glebowo-klimatycznych oraz zróżnicowanego poziomu intensywności gospodarowania (Krasowicz i Madej 2020, Matyka i Krasowicz 2024).

Postęp biologiczny w hodowli roślin uprawnych

Postęp biologiczny (hodowlany) polega na wprowadzaniu i upowszechnianiu nowych odmian roślin o ulepszonych cechach genetycznych, mających na celu zwiększenie wydajności, poprawę jakości plonu i odporności. Na początku XX w. postęp

biologiczny bazował głównie na klasycznych metodach hodowlanych, takich jak selekcja i krzyżowanie (hybrydyzacja). Metody te polegały na obserwacji i doborze fenotypów, bez wiedzy o strukturze DNA. W latach 60. XX w. Norman Borlaug za pomocą selekcji uzyskał półkarłowe, wysokoplonujące odmiany pszenicy. Strategicznym elementem tych prac było ukierunkowanie alokacji asymilatów (produktów fotosyntezy) na korzyść organów generatywnych, co doprowadziło do zwiększenia indeksu żniwnego (HI, ang. *Harvest Index*), czyli stosunku masy plonu użytkowego (np. ziarna, bulw) do całkowitej suchej masy rośliny (Donald i Hamblin 1976, Reynolds i in. 2011). W przypadku pszenicy indeks żniwny wzrósł z poziomu 0,3–0,35 w odmianach tradycyjnych do 0,45–0,5 w nowoczesnych odmianach karłowatych, znacząco podnosząc ich wydajność. Wdrożenie tych odmian do uprawy stanowiło kluczowy element zielonej rewolucji, umożliwiając krajom borykającym się z niedoborami żywności, takim jak Indie czy Pakistan, osiągnięcie samowystarczalności w produkcji zbóż (Conway 1997). Przykładowo, w Indiach produkcja pszenicy wzrosła z około 12 mln t w 1965 r. do ponad 20 mln t w 1970 r., co jest uznawane za koronny przykład sukcesu rewolucji żywieniowej (Conway 1997).

Kolejnym istotnym osiągnięciem tego okresu była hodowla mieszańcowa (hybrydowa) wykorzystująca zjawisko heterozji (wigoru mieszańców). Metoda ta przyczyniła się do znacznego wzrostu plonowania zwłaszcza kukurydzy (Duvick 2001). Dzięki hybrydyzacji średnie plony kukurydzy w Stanach Zjednoczonych wzrosły z ok. $2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w latach 30. XX w. do ponad $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ obecnie (Duvick 2001). W Polsce hodowla odmian mieszańcowych jest kluczowym kierunkiem doskonalenia genetycznego nie tylko w kukurydzy, lecz także w rozwoju żyta hybrydowego, którego plonowanie przewyższa odmiany populacyjne (Świąćicki i in. 2011).

Kolejnym krokiem milowym w hodowli roślin był postęp w biotechnologii i inżynierii genetycznej. Techniki takie jak hodowla kultur tkankowych przyspieszają rozmnażanie (propagację) roślin, natomiast inżynieria genetyczna (transgeneza) umożliwia precyzyjne wprowadzanie genów z innych organizmów lub gatunków. Świąćicki i in. (2011) podkreślają znaczenie genetycznych modyfikacji organizmów (GMO) jako elementu nowoczesnych technologii rolniczych, zwracając uwagę na ich potencjalny proekologiczny charakter, zwłaszcza w kontekście ograniczania stosowania środków ochrony roślin. Przykładem są rośliny genetycznie zmodyfikowane (GM), takie jak kukurydza Bt (odporna na szkodniki) czy soja Roundup Ready (tolerancyjna na herbicydy). Ich wprowadzenie przyczyniło się do ograniczenia strat w plonach oraz globalnego wzrostu produkcji o 20–30% w regionach intensywnego stosowania (James 2014, Brookes i Barfoot 2020).

Współczesna hodowla roślin korzysta z zaawansowanych technologii, takich jak selekcja wspomagana markerami molekularnymi (MAS, ang. *Marker-Assisted Selection*), która umożliwia identyfikację genów odpowiedzialnych za pożądane cechy, m.in. wysokie plonowanie, odporność na choroby czy tolerancję na stres abiotyczny

(Collard i Mackill 2008). Markery molekularne stanowią obecnie jedno z kluczowych narzędzi w hodowli roślin również w Polsce, umożliwiając szybszą i bardziej precyzyjną selekcję materiału roślinnego (Święcicki i in. 2011). MAS pozwala na ocenę cech genetycznych już na wczesnych etapach rozwoju roślin, co znacząco skraca czas tworzenia nowych odmian (Tester i Langridge 2010). Przykładowo, w przypadku kukurydzy zastosowanie tej technologii umożliwiło skrócenie procesu hodowli odmian odpornych na suszę o 3–5 lat, co przełożyło się na szybsze wprowadzanie odmian o zwiększonej stabilności plonowania w zmiennych warunkach pogodowych (Ribaut i Ragot 2007).

Najnowocześniejsze metody, takie jak edycja genomu z wykorzystaniem narzędzi CRISPR/Cas9, umożliwiają jeszcze dokładniejsze modyfikacje materiału genetycznego. Technologia ta pozwala na wprowadzanie pożądaných zmian bez konieczności dodawania obcych genów, co czyni ją bardziej akceptowalną społecznie. Edycja genomu otwiera nowe możliwości w zakresie doskonalenia roślin uprawnych, zwłaszcza w kontekście zwiększania plonów, efektywnego wykorzystania składników pokarmowych (np. azotu i fosforu), odporności na patogeny oraz tolerancji na suszę i zasolenie (Jaganathan i in. 2018).

Postęp technologiczny w rolnictwie

Od drugiej połowy XX w. w rolnictwie obserwujemy dynamiczny postęp technologiczny obejmujący zarówno technologie uprawy i maszyny rolnicze, jak i rewolucję cyfrową, która doprowadziła do powstania koncepcji rolnictwa precyzyjnego. Postęp technologiczny przyczynił się do wprowadzania coraz doskonalszych maszyn i narzędzi, ale także do integrowania technologii uprawy z osiągnięciami postępu biologicznego oraz koniecznością dostosowania praktyk rolniczych do zmieniających się warunków środowiskowych (Fountas i in. 2020, Smagacz i Madej 2024).

W ciągu kilkudziesięciu lat agrotechnika uprawy roślin przeszła ewolucję – od tradycyjnych, ręcznych metod do wysokoefektywnych, zmechanizowanych systemów uprawy roli (Święcicki i in. 2011, Smagacz i Madej 2024). Postęp mechanizacyjny pośrednio przyczynił się do wzrostu plonów, umożliwiając poprawę jakości zabiegów agrotechnicznych, lepsze dopasowanie terminów siewu i zbioru, bardziej racjonalne nawożenie, odpowiednie zagęszczenie łanu oraz skuteczniejsze strategie ochrony przed chwastami, chorobami i szkodnikami.

Maszyny rolnicze przeszły transformację – od prostych narzędzi do zaawansowanych technologicznie, np. ciągniki wyposażone w systemy GPS i autopilota, precyzyjne siewniki, opryskiwacze ze zmienną dawką aplikacji oraz kombajny z systemami monitorowania plonów w czasie rzeczywistym umożliwiają optymalizację każdego etapu produkcji (Zhang i in. 2002, Fontas i in. 2020). Zastosowanie precyzyjnych siewników pozwala na optymalne rozmieszczenie nasion, co może zwiększyć plony

o 5–10% (Zhang i in. 2002). Znaczący postęp dokonał się również w mechanizacji zbioru, co przyczyniło się do ograniczenia strat plonów i przyspieszenia prac polowych. Dynamicznie rozwija się także robotyzacja umożliwiając automatyzację wielu zadań, takich jak: pielenie, punktowe opryski czy monitoring stanu roślin, co ogranicza zapotrzebowanie na pracę ludzką i zwiększa precyzję wykonywanych zabiegów (Shamshiri i in. 2018).

Cyfryzacja rolnictwa, oparta na integracji technologii informatycznych, przyczyniła się do rozwoju metod teledetekcji oraz powszechnego wykorzystania w praktyce dronów, satelitów i sensorów naziemnych. Umożliwia to bieżące monitorowanie stanu roślin, gleby i środowiska. Pozwala to na wczesną identyfikację niedoborów składników pokarmowych, stresu wodnego oraz presji chorób i szkodników, a tym samym na szybką interwencję i ograniczenie strat plonów nawet o 10–15% (Weiss i in. 2020).

Rozwój technologii przesyłu danych umożliwia integrację informacji z różnych źródeł – czujników, maszyn, stacji pogodowych oraz systemów monitoringu – i ich analizę przy użyciu algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego (Piwowar 2015, Wolfert i in. 2017).

Postęp w zakresie rolnictwa precyzyjnego (RP) pozwala na aplikację nawozów i środków ochrony roślin dostosowaną do przestrzennego zróżnicowania zasobności gleby i zapotrzebowania roślin, na podstawie map zasobności i danych z czujników (Gebbers i Adamchuk 2010, Roberts 2014). Zastosowanie tych technologii może zmniejszyć zużycie nawozów o 10–30%, jednocześnie zwiększając plonowanie o 3–7%.

Technologie RP wspierają także wdrażanie integrowanej ochrony roślin (IPM), m.in. poprzez punktowe aplikacje środków ochrony roślin, na podstawie danych z teledetekcji i systemów monitoringu. Pozwala to na ograniczenie zużycia pestycydów nawet o 70% bez pogorszenia skuteczności zabiegów (Święcicki i in. 2011).

Rozwój technologiczny oraz cyfryzacja znacząco przyczyniły się do wzrostu plonowania we współczesnym rolnictwie. Rolnictwo precyzyjne umożliwia dostosowanie zabiegów do lokalnych warunków siedliskowych i aktualnych potrzeb roślin, optymalizację produkcji, ograniczenie strat oraz zwiększenie odporności systemów rolnych na skutki zmian klimatycznych.

Postęp w nawożeniu

Wpływ nawożenia na wzrost plonów od dawna uznawany jest za jeden z najważniejszych czynników determinujących poziom plonowania. Zrównoważone i precyzyjne nawożenie roślin stanowi podstawę efektywnej produkcji rolniczej. Lata 60. i 70. XX w. były okresem masowego stosowania nawozów syntetycznych, które odegrały kluczową rolę w intensyfikacji produkcji roślinnej. Intensyfikacja nawożenia mineralnego, szczególnie azotowego, była możliwa dzięki opracowaniu przemysło-

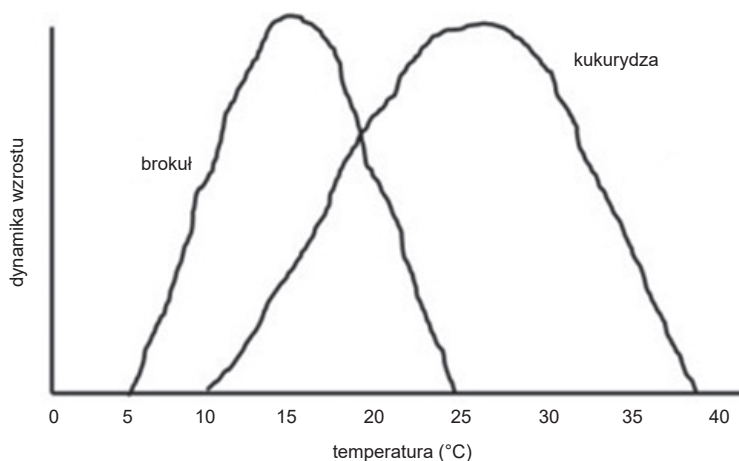
wego procesu syntezy amoniaku (proces Habera-Boscha) (McArthur i McCord 2017). W XXI w. podejście do nawożenia uległo istotnej zmianie – większy nacisk położono na efektywność wykorzystania składników pokarmowych, minimalizację wpływu nawożenia na środowisko oraz precyzyjne zarządzanie składnikami nawozowymi. Wprowadzono nawozy o kontrolowanym uwalnianiu składników pokarmowych (CRF, ang. *Controlled Release Fertilizers*), które ograniczają straty azotu do środowiska i zapewniają jego dostępność w kluczowych fazach rozwojowych roślin (Lam i in. 2020). Z kolei nawozy o zwiększonej efektywności (EEN, ang. *Enhanced Efficiency Fertilizers*) umożliwiają bardziej zrównoważone i ukierunkowane odżywianie roślin (Bindraban i in. 2015). Nowoczesne technologie obejmują także rozwój nanonawozów i biopreparatów mikrobiologicznych. Dzięki zastosowaniu nośników, takich jak nanokrzemionka czy nanozeolity, nanonawozy pozwalają na celowane dostarczanie składników w fazach krytycznych dla plonowania. Badania wykazały, że mogą one zwiększyć plon pszenicy o 55%, kukurydzy o 40%, a ryżu o 25% (Channab i in. 2024). W przypadku roślin strączkowych odnotowano wzrost żywotności pyłku i efektywności zapylenia nawet o 47% (Arora i in. 2024).

Czynniki środowiskowe w wykorzystaniu potencjału plonotwórczego

Efektywne wykorzystanie potencjału genetycznego roślin uprawnych wymaga zrozumienia procesów fizjologicznych oraz mechanizmów ich interakcji ze środowiskiem.

Fotosynteza jest podstawowym procesem metabolicznym w roślinach, gdzie następuje przemiana energii słonecznej w energię chemiczną zakumulowaną w biomase. Zwiększenie efektywności tego procesu zarówno poprzez działania hodowlane (np. modyfikacje enzymów cyklu Calvina, zmiana architektury liści), jak i poprzez optymalizację warunków środowiskowych (stężenie CO₂, natężenie światła, temperatura), może istotnie wpłynąć na wzrost plonów (Zhu i in. 2010). Szacuje się, że nawet niewielki wzrost efektywności fotosyntezy o 1% może przełożyć się na zwiększenie plonów o 1–2%, co ma ogromne znaczenie w skali globalnej.

Reakcje roślin na temperaturę różnią się w zależności od gatunku oraz fazy rozwojowej. Każdy gatunek ma określony zakres temperatur, w którym przebiega jego rozwój. Faza wegetatywna najczęściej przyspiesza wraz ze wzrostem temperatury aż do wartości optymalnej, która zwykle jest wyższa niż dla fazy generatywnej. Przykładowo kukurydza (*Zea mays* L.) znosi wyższą temperaturę niż brokuł (*Brassica oleracea* L.) (rys. 4). Zbyt wysoka temperatura może jednak skrócić cykl życia rośliny, ograniczając czas przeznaczony na akumulację plonu, co prowadzi do jego obniżenia (Hatfield i Prueger 2015).



Rys. 4. Reakcja roślin kukurydzy i brokuła na zmiany temperatury, pokazująca dolną, górną i optymalną granicę temperatury dla fazy wzrostu wegetatywnego

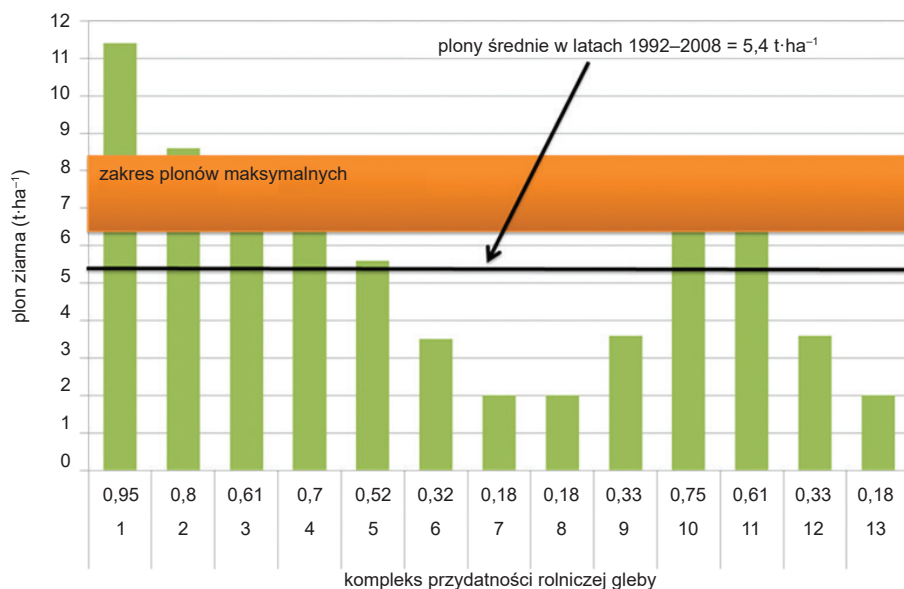
Źródło: Hatfield i Prueger 2015

Wzrost temperatury ma silniejszy wpływ na fazy generatywne niż wegetatywne, ponieważ procesy reprodukcyjne są bardziej wrażliwe na stres cieplny. Wysoka temperatura w czasie kwitnienia i zawiązywania nasion prowadzi do obniżenia żywotności pyłku i zakłócenia procesu zapłodnienia, co skutkuje istotnym spadkiem plonu. Szczególnie wrażliwe są rośliny fotoperiodyczne, takie jak soja (*Glycine max* L.), których rozwój może ulec zaburzeniu w warunkach anomalii termicznych (Hatfield i Prueger 2015). Badania prowadzone przez Hatfielda i Pruegera (2015) w warunkach kontrolowanych wykazały, że wzrost temperatury przyspiesza tempo rozwoju roślin (fenologię), lecz nie wywiera istotnego wpływu na akumulację biomasy w organach wegetatywnych. Kluczowe znaczenie dla efektywności produkcji ma faza rozwojowa, w której występuje stres termiczny. W przypadku kukurydzy (*Zea mays* L.) ekspozycja na stres termiczny w fazie rozwoju generatywnego (zwłaszcza podczas gametogenezy, tj. tworzenia pyłku) może spowodować spadek plonu ziarna sięgający 80–90% w porównaniu z warunkami optymalnymi.

Według Kozyry (2013) w ostatnich dekadach obserwuje się przyspieszenie faz fenologicznych, co wymusza dostosowanie agrotechniki do zmieniających się warunków pogodowych. Stres cieplny w newralgicznych fazach rozwojowych – takich jak kwitnienie i dojrzewanie – może ograniczać plony.

Równie ważnym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie potencjału plonotwórczego są warunki glebowe. Typ gleby, jej struktura, zawartość materii organicznej, pH oraz zasobność w składniki pokarmowe w istotny sposób wpływają na możliwości wzrostu i plonowania roślin. W Polsce występuje duże zróżnicowanie gleb, od żyznych czarnoziemów po słabe gleby piaszczyste, co wymaga starannego doboru

gatunków i odmian do lokalnych warunków siedliskowych (Witek 1979, Krasowicz i Madej 2020, Paluszkiewicz i in. 2024). Przykładem może być zróżnicowanie plonów kukurydzy w zależności od kompleksu przydatności rolniczej – od ok. 2 do ponad 11 t ziarna·ha⁻¹ (Grzebisz 2012) (rys. 5).



Rys. 5. Plony maksymalne kukurydzy na tle jakości gleby (wskaźnik produktywności gleby 1 = 100%)

Źródło: Grzebisz 2012

W kontekście rosnącej częstotliwości i intensywności susz w Polsce – szczególnie w latach 2015 i 2018 – niekorzystne warunki pogodowe powodowały spadki plonów zbóż o 15–30%, w zależności od regionu i stopnia nasilenia stresu (Paluszkiewicz i in. 2024, Sadowski 2024). W regionach szczególnie narażonych na niedobory wody korzystniejsze rezultaty uzyskuje się przy uprawie odmian pszenicy ozimej, które charakteryzują się mniejszymi stratami plonu w porównaniu z odmianami jarymi (Oleksiak i in. 2022). Jednym z kluczowych elementów poprawy produktywności gleb jest zwiększenie zawartości materii organicznej i wdrażanie uprawy konserwującej. Takie praktyki mogą zwiększyć plonowanie nawet o 10–20% na glebach słabej jakości, głównie dzięki poprawie retencji wodnej i dostępności składników pokarmowych (Lal 2004).

Warto zaznaczyć, że w ostatnich latach szczególnego znaczenia nabiera efektywność wykorzystania wody i składników pokarmowych, tj. WUE (ang. *Water Use Efficiency*) i NUE (ang. *Nutrient Use Efficiency*). W obliczu zmian klimatycznych i wzrastających kosztów nawozów mineralnych efektywne gospodarowanie tymi zasobami staje się kluczowe dla zrównoważonego rolnictwa. Odmiany roślin charakteryzujące się wyso-

ką WUE wytwarzają więcej biomasy przy mniejszym zużyciu wody. Z kolei wysoka NUE oznacza lepsze wykorzystanie azotu i fosforu z gleby, ograniczając potrzebę intensywnego nawożenia oraz straty tych pierwiastków do środowiska (Hawkesford i in. 2013). Coraz częstsze susze w Polsce (Kundzewicz i Kozyra 2011, Sadowski 2024) podkreślają konieczność upowszechnienia odmian roślin o zwiększonej tolerancji na niedobory wody oraz tolerujących wysokie temperatury (Święcicki i in. 2011).

W praktyce rolniczej zastosowanie technik zwiększających WUE – takich jak uprawa konserwująca czy dobór odpowiednich odmian – może przyczynić się do zwiększenia plonów 15–20% w warunkach umiarkowanego deficytu wody (Tester i Langridge 2010). Właściwe zarządzanie nawożeniem zarówno naturalnym (Wach i Kopiński 2024), jak i mineralnym (Smagacz i Madej 2024) jest również kluczowe dla poprawy efektywności nawożenia (Wicki 2008).

Wdrażanie rozwiązań agrotechnicznych zwiększających zdolność gleby do zatrzymywania wody oraz poprawiających efektywność jej wykorzystania przez rośliny stało się koniecznością. Równolegle istotne są działania hodowlane ukierunkowane na tworzenie odmian bardziej odpornych na stres abiotyczny – w tym suszę i wysokie temperatury (Wahid i in. 2007, Święcicki i in. 2011).

Transfer wiedzy we wdrażaniu innowacji

Transfer wiedzy odgrywa kluczową rolę w procesie wdrażania postępu biologicznego i technologicznego w rolnictwie, stanowiąc pomost między badaniami naukowymi a praktyką rolniczą. Nawet najbardziej innowacyjne rozwiązania genetyczne czy technologiczne nie przyniosą oczekiwanych rezultatów, jeśli nie zostaną efektywnie przekazane, zrozumiane i zaadaptowane przez rolników (Kristjanson i in. 2012, Oleksiak 2013).

Na początku XX w. transfer wiedzy w rolnictwie opierał się głównie na bezpośrednich kontaktach między naukowcami, doradcami rolniczymi a rolnikami. Dominowały formy takie jak spotkania w gospodarstwach, dni pola oraz publikacje w prasie rolniczej i materiałach drukowanych. W miarę postępu naukowego i technicznego system doradztwa rolniczego stawał się coraz bardziej sformalizowany, oparty na współpracy z państwowymi instytutami badawczymi i uczelniami wyższymi, które odgrywały kluczową rolę w upowszechnianiu wyników badań.

Wraz z rozwojem mediów masowych na przełomie XX i XXI w., pojawiły się nowe kanały komunikacji, takie jak radio, telewizja, a następnie Internet. Cyfryzacja zrewolucjonizowała dostęp do informacji – współcześnie rolnicy mogą korzystać z platform e-learningowych, aplikacji mobilnych, mediów społecznościowych oraz specjalistycznych portali branżowych, co pozwala na szybkie pozyskiwanie aktualnej i dostosowanej do potrzeb wiedzy.

Kluczowe znaczenie dla skutecznego transferu wiedzy ma utrzymanie i rozwój silnego, profesjonalnego i dobrze finansowanego systemu doradztwa rolniczego.

Doradcy powinni być wyposażeni w aktualną wiedzę, narzędzia cyfrowe i kompetencje komunikacyjne, które umożliwiają im efektywną współpracę z rolnikami oraz dostosowanie zaleceń do lokalnych warunków środowiskowych, glebowych i ekonomicznych (Garforth i in. 2006, Zaliwski 2013).

Badania wskazują, że tradycyjne, bezpośrednie formy doradztwa – takie jak wizyty w gospodarstwach, demonstracje technologiczne i konsultacje indywidualne – nadal pozostają najskuteczniejsze w przypadku złożonych i trudnych do wdrożenia innowacji (Sutherland i in. 2014). Współczesne podejścia do transferu wiedzy coraz częściej opierają się na koncepcji współtworzenia innowacji (ang. *co-innovation*), w której rolnicy, naukowcy, doradcy i inne podmioty (np. firmy technologiczne, administracja publiczna) współpracują w ramach sieci wiedzy. Przykładem są tzw. żywe laboratoria (ang. *Living Labs*) i grupy operacyjne w ramach Europejskiego Partnerstwa Innowacyjnego na rzecz wydajnego i zrównoważonego rolnictwa (EIP-AGRI), które promują wymianę doświadczeń i wspólne rozwiązywanie problemów rolnictwa. Takie podejście sprzyja większemu zaangażowaniu praktyków i zwiększa skuteczność wdrażania innowacji w warunkach produkcyjnych.

Podsumowanie

Rozwój rolnictwa w XX i XXI w. to historia bezprecedensowego wzrostu plonów, napędzanego synergicznym oddziaływaniem innowacji biologicznych i technologicznych. Zapoczątkowana w połowie XX w. zielona rewolucja poprzez wprowadzenie wysoko plonujących odmian oraz intensyfikację agrotechniki, radykalnie zwiększyła globalną produkcję żywności i znacząco przyczyniła się do poprawy bezpieczeństwa żywnościowego zarówno na świecie, jak i w Polsce. Średnie plony pszenicy ozimej wzrosły z ok. 2 t·ha⁻¹ w latach 60. XX w. do ponad 5 t·ha⁻¹ obecnie (GUS 1956–2024).

Kluczowym elementem tego postępu były osiągnięcia genetyki. Ewolucja metod hodowlanych – od klasycznej selekcji i krzyżowania, przez biotechnologię i inżynierię genetyczną, aż po precyzyjne techniki wspomagane markerami (MAS) i edycję genomu – umożliwiła tworzenie odmian o wyższym potencjale plonowania, lepszym wykorzystaniu zasobów (wody, składników pokarmowych) oraz zwiększonej odporności na stresy biotyczne i abiotyczne, takie jak susza, wysokie temperatury czy choroby.

Pomimo osiągnięć hodowlanych wciąż utrzymuje się znaczna luka w plonowaniu (ang. *yield gap*), czyli różnica między potencjalnym a rzeczywistym plonem. W Polsce szacuje się, że niewykorzystany potencjał plonowania zbóż może sięgać 20–30%, co wskazuje na potrzebę dalszej optymalizacji technologii produkcji oraz lepszego wykorzystania istniejącego potencjału biologicznego odmian.

Zrozumienie fizjologii roślin – m.in. efektywności fotosyntezy, wykorzystania wody i składników pokarmowych – oraz ich dynamicznych interakcji ze środowiskiem (warunki termiczne, długość okresu wegetacji, właściwości gleby, niedobory

wody, stres termiczny) jest kluczowe dla efektywnego wykorzystania genotypu i zmniejszenia luki plonowania.

Postęp technologiczny – obejmujący rozwój zaawansowanych maszyn rolniczych (ciągniki z autopilotem, siewniki precyzyjne, systemy zbioru), a także cyfryzację produkcji rolnej (teledetekcja, czujniki, sztuczna inteligencja, systemy informacji przestrzennej) – znacząco usprawnił agrotechnikę i umożliwił zarządzanie produkcją na poziomie mikroparceli. Rolnictwo precyzyjne, dzięki optymalizacji nawożenia, punktowym zabiegom ochrony roślin oraz dostosowaniu działań do zmienności przestrzennej i czasowej środowiska, pozwala na zwiększenie plonów przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia środków produkcji oraz minimalizacji presji środowiskowej.

Wiodącą rolę w budowaniu rolnictwa odpornego na zmiany klimatu (ang. *Climate-Smart Agriculture*) odgrywa skuteczny transfer wiedzy – od nauki do praktyki. System ten, który ewoluował od tradycyjnego doradztwa do nowoczesnych, cyfrowych platform wymiany wiedzy, umożliwia rolnikom adaptację do zmieniających się warunków klimatycznych poprzez wdrażanie innowacyjnych rozwiązań i bardziej zrównoważone zarządzanie zasobami środków produkcji. Efektywność transferu wiedzy zależy zarówno od jakości systemów doradztwa, jak i zaangażowania wszystkich uczestników systemu wiedzy i innowacji rolniczej (AKIS). Obecnie nowoczesne formy współtworzenia innowacji, polegają na tworzeniu tzw. żywych laboratoriów (ang. *Living Lab*), które stanowią platformy współpracy między rolnikami, naukowcami i instytucjami doradczymi.

Literatura

1. A r o r a R., Singh R., Kaur J.: Bionanofertilizers: emerging solution for sustainable crop production. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2024, **22**, 100797.
2. B i n d r a b a n P. S., Muiderts E. D., Koenraads H.: Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake and reduced nutrient losses. *Global Food Security*, 2015, **4**: 26-37.
3. B r o o k e s G., Barfoot P.: Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996-2018: impacts on pesticide use and carbon emissions. *GM Crops Food*, 2020, **11**(4): 215-241.
4. C h a n n a b A. R., Karadi B. V., Hipparagi R. V.: Impact of nanofertilizers on crop yield and nutrient uptake: A review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2024, **24**: 2341-2352.
5. C o l l a r d B. C. Y., Mackill D. J.: Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363**(1491): 557-572.
6. C o n w a y G.: *The Doubly Green Revolution: Food for all in the 21st Century*. Cornell University Press, 1997.
7. D o n a l d C. M., Hamblin J.: The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*, 1976, **28**: 361-405.
8. D o r o s z e w s k i A., Jóźwicki T., Wróblewska E., Kozyra J.: Susza rolnicza w Polsce w latach 1961–2010. Monografia IUNG-PIB, Puławy, 2014.
9. D u v i c k N.: The continuing evolution of plant breeding. *Science*, 2001, **291**(5505): 856-859.
10. D u r a k o w s k i T., Kuźmicki J., Zawojński K.: Plonowanie zbóż w latach 1960–2009 w doświadczeniach oraz warunkach produkcyjnych w województwie podlaskim. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 2018, **2**: 103-112.

11. Evenson R.E., Gollin D.: Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, 2003, **300**(5620): 758-762.
12. FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations (2025) – with major processing by Our World in Data. “Land used for cereal production – UN FAO” [dataset]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Production: Crops and livestock products”. (12.10.2025).
13. Fountas S., Mylonas., Malounas I., Rodias E., Hellmann S., Ch.: Pekkeriet E. Agricultural Robotics for Field Operations, review. *Sensors*, 2020, 20, **2672**: 14-27.
14. Garforth C., Rehman T., Viegas L.: Review of the provision of extension services to farmers by the public sector in Europe. *Agricultural Economics*, 2006, **34**(2): 125-135.
15. Gebbers R., Adamchuk S.I.: Precision agriculture and food security. *Science*, 2010, **327**(5967): 828-831.
16. Godfray H.C.J., Garnett T.: Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, **369**(1639), 20120273.
17. Grzebiś W.: Technologie nawożenia roślin uprawnych – fizjologia plonowania TOM 2 Zboża i kukurydza, 2012, PWRiL ss. 280.
18. GUS. 1956–2024 Rocznik Statystyczny Rolnictwa (wybrane lata w celu kompilacji danych). Warszawa: GUS.
19. Hatfield J. L., Prueger J.H.: Temperature extremes and crop production: A review. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2015, **201**(5): 337-352.
20. Hawkesford M.J., Araus J.L., Atherton K., Hartley A., Lightfoot P., Salt D., Poole D.: New approaches to understanding and improving nutrient use efficiency in plants. *Plant and Cell Physiology*, 2013, **54**(5): 793-802.
21. Jaganathan V., Kannan B., Scarpellin I. M., Platonov D., Melchiori F., Prudencio M., Chopra V.L.: Crispr/Cas9 for crop improvement: Perspectives and challenges. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2018, **37**(3): 205-219.
22. James C.: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014. ISAAA Brief No. 49. ISAAA: Ithaca, NY, 2014.
23. Kozyra J.: Wpływ prognozowanych zmian temperatury powietrza na fenologię zbóż ozimych w Polsce. Monografie i Rozprawy Naukowe. Puławy, 2013.
24. Krasowicz S., Madej A.: Organizacyjno-ekonomiczne uwarunkowania produkcji zbóż w różnych rejonach Polski. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy 2020, **62**(16): 35-70.
25. Kristjansson P., Harvey B., Thornton P.: Learning platforms for climate-smart agriculture. *Agriculture & Food Security*, 2012, **1**(1): 7.
26. Kundzewicz Z. W., Kozyra J.: Ograniczanie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. *Polish Journal of Agronomy*, 2011, 7: 68-81.
27. Lal R.: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
28. Lam S.K., Mitchell A., Richards M.: Controlled-release fertilizers as a tool to reduce nitrogen losses and improve productivity. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, **40**: 23.
29. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty S.: Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature Food*, 2016, **3**(2): 1-5.
30. Marciniak K.: Nowoczesne technologie w produkcji roślinnej – przyjazne dla człowieka i środowiska. *Polish Journal of Agronomy*, 2011, 7: 102-112.
31. Matyka M., Krasowicz S.: Zmiany w regionalnym zróżnicowaniu polskiego rolnictwa; integracja versus polaryzacja. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2024, **73**(27): 7-21.
32. McArthur J.W., McCord G.C.: Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *Journal of Economic Growth*, 2017, **22**: 1-33.
33. Oleksiak T., Spyroglou I., Paoń D., Matysik P., Pernisová M., Rybka K.: Effect of drought on wheat production in Poland between 1961 and 2019. *Crop Science* 2022, **62**: 537-964.

34. Oleksiak T.: Stosowanie kwalifikowanego materiału siewnego a plonowanie zbóż ozimych. Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 2013, **268**: 87-99; doi: 10.37317/biul-2013-0035.
35. Paluszkie wicz M., Torzyński M., Bielecki J., Abdullaieva S., Kryszak Ł.: Impact of Weather Conditions on Cereal Yields in Poland / Wpływ warunków pogodowych na plony zbóż w Polsce. Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics, 2024, **379(2)**: 1-18.
36. Pingali P.L.: Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, **109(31)**: 12302-12308.
37. Piwowar A.: Współczesne kierunki rozwoju rolnictwa precyzyjnego. Roczniki Nauk Rolniczych, Seria G, 2015, **102(2)**: 35-47.
38. Podleśny J., Grabiński J.: Wybrane zagadnienia dotyczące postępu biologicznego i technologicznego w produkcji zbóż i roślin strączkowych. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2019, **60(14)**: 9-23.
39. Reynolds M., Pelton E.M., Reyes-Villanueva H.: Agronomic and physiological approaches to increase yield potential in wheat. Journal of Experimental Botany, 2011, **62(1)**: 221-231.
40. Ribaut J.M., Ragot M.: Marker-assisted selection for drought tolerance in maize: a case study. Journal of Experimental Botany, 2007, **58(2)**: 351-360.
41. Riedesel L., Ma D., Piepho H.P., Laidig F., Moller M., Golla B., Kautz T., Feike T.: Climate change induced heat and drought stress hamper climate change mitigation in German cereal production. Field Crops Research, 2024, **317(109551)**: 1-15.
42. Ritchie H., Rodés-Guirao L., Mathieu E., Gerber M., Ortiz-Ospina E., Hasell J., Roser M.: Population Growth Explore global and national data on population growth, demography, and how they are changing. OurWorldinData.org, 2023; <https://ourworldindata.org/population-growth> (dostęp 15.10.2025).
43. Ritchie H., Rosado P., Roser M.: Crop Yields. 2022. Published online at OurWorldinData.org. 2022; <https://ourworldindata.org/crop-yields> (dostęp 25.10.2025).
44. Roberts T.L.: The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Plant and Soil, 2014, **381(1-2)**: 1-12.
45. Sadowski M.: Ocena potencjalnych skutków społeczno-gospodarczych zmian klimatu w Polsce. WWF Polska, 2024, ss. 11.
46. Shamsiri R.R., Kamaruzzaman S.M., Yakub M.A., Kahn M.R.I., Nazir S., Huzaira M., Bandara M.: The future of robotics in agriculture: A review. Agricultural and Biological Research, 2018, **34(2)**: 101-118.
47. Smagacz J., Madej A.: Zmiany w zużyciu wybranych środków produkcji w Polsce w latach 2004–2022. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024, **73(27)**: 171-186.
48. Sułek A., Nieróbca A., Baranowska A., Leszczyńska D.: Kierunki zmian w produkcji zbóż po akcesji Polski do Unii Europejskiej. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024, **73(27)**: 51-61.
49. Sutherland A., Mcroberts N., Bountoulas A.: Agricultural extension and knowledge transfer. In: Knowledge management in agriculture and rural development. CABI, 2014.
50. Świącicki W.K., Surma M., Koziara W., Skrzypczak G., Szukała J., Bartkowiak-Broda I., Zimny J., Banaszak Z., Marciniak K.: Nowoczesne technologie w produkcji roślinnej – przyjazne dla człowieka i środowiska. Polish Journal of Agronomy, 2011, **7**: 102-112.
51. Tester M., Langridge P.: Breeding technologies to increase crop production in a changing climate. Science, 2010, **327(5967)**: 814-818.
52. Van Ittersum M.K., Cassman K.G., Grassini P., Wright A.D.: Yield gap analysis of crop production systems. In: Food security in a world of growing population and finite resources. Springer, 2013, 149-161.
53. Wach D., Kopiński J.: Zmiany w gospodarowaniu nawozami naturalnymi w polskim rolnictwie pomiędzy rokiem 2002 a 2020. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024, **73(27)**: 131-147.
54. Wahid A., Ahmad I., Rashid A., Basra S.M.A.: Heat stress: An overview. In: Plant Acclimation to Environmental Stress. Springer, 2007, pp. 1-25.

55. Weiss M., Jacquet O., Allain G., Debaecker P.: Remote sensing applications for agriculture and environmental monitoring. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, **40(2)**: 1-18.
56. W i c k i L.: Postęp w plonowaniu odmian pszenicy ozimej i żyta w doświadczeniach odmianowych w Polsce. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 2017, **XIX(4)**: 184-189.
57. W i c k i L.: Wykorzystanie postępu odmianowego w produkcji zbóż w polskim rolnictwie. *Roczniki Nauk Rolniczych, Seria G*, 2008, **94(2)**: 136-146.
58. W i t e k T.: Wpływ jakości gleb na plonowanie roślin uprawnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 1979, **224**: 35-47.
59. Wolfert S., Georgiadis P., Verdouw C., Klerkx L., Beatsma P.: Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 2017, **153**: 69-80.
60. Z h a n g N., Wang M., Wang N.: Precision agriculture – A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, **35(1)**: 45-59.
61. Zhu X. G., Long S. P., Ort D. R.: Improving photosynthesis for greater yield: The need for an integrative approach. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, **61**: 235-261.
62. Zaliwski A.S.: Informacja, wiedza, decyzje i systemy wspomagania decyzji. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy 2013, **33(7)**: 45-68.

Adres do korespondencji:

dr Anna Nieróbca
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 4786754
e-mail: Anna.Nierobca@iung.pulawy.pl

AUTOR
Anna Nieróbca

ORCID
000-0002-8611-6515

Małgorzata Kozak

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ROZPOZNANIE REGIONALNYCH BARIER W ROZWOJU ROLNICTWA 4.0 W POLSCE*

Słowa kluczowe: rolnictwo 4.0, regionalizacja rozwoju rolnictwa

Wstęp

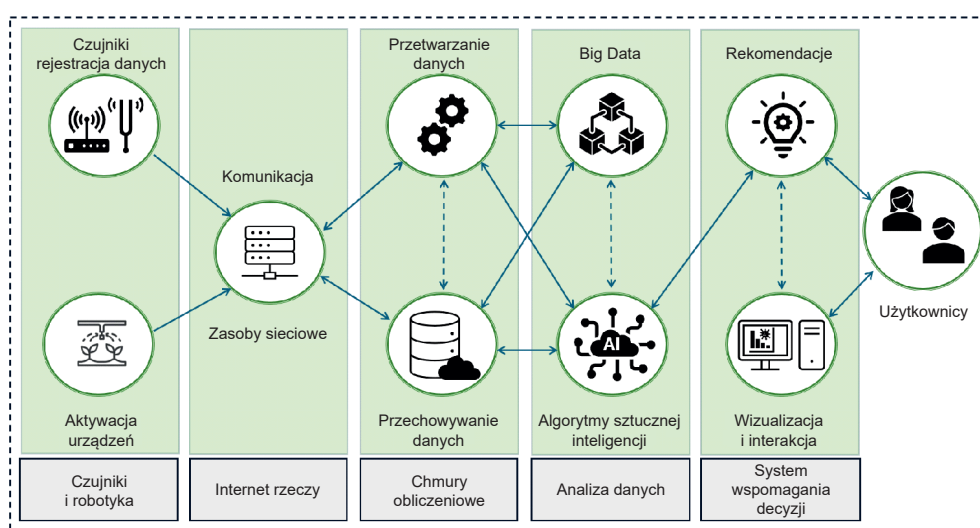
Współczesne rolnictwo stoi przed wieloma wyzwaniami związanymi z zapewnieniem bezpieczeństwa żywnościowego dla wciąż rosnącej populacji przy jednoczesnej potrzebie zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne, co jest jednym z głównych założeń zrównoważonego rozwoju. Jest to zatem duża presja dla rolników, którzy w dobie zmieniającego się klimatu muszą dostarczać na rynek zdrową żywność w oczekiwanych wysokich standardach, jednocześnie borykając się z niepewną sytuacją rynkową i rosnącymi cenami środków produkcji.

Aby stymulować zrównoważony rozwój sektora rolniczego, konieczne są inwestycje w badania technologiczne, które pomogą rozwijać oraz wdrażać inteligentne praktyki i rozwiązania wpisujące się w koncepcję rolnictwa 4.0. Jest to już kolejny kamień milowy w rozwoju rolnictwa, po mechanizacji rolnictwa – rolnictwo 1.0, wprowadzeniu biotechnologii w rolnictwie – rolnictwo 2.0 i zainicjowanego postępu technologicznym rolnictwa precyzyjnego – rolnictwo 3.0. Rolnictwo 3.0 było ukierunkowane na racjonalne wykorzystanie środków produkcji poprzez np. precyzyjne nawożenie, nawadnianie czy stosowanie środków ochrony, które możliwe jest przez zastosowanie systemów monitoringu pola, systemy GPS czy automatyzację w procesie upraw. Natomiast rolnictwo 4.0 jest szerszą koncepcją, która wykorzystuje rozwój zaawansowanych technologii również w otoczeniu sektora rolniczego, w tym przypadku za kluczowy element uznaje się wymianę informacji poprzez wielokierun-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

kową komunikację zdalną, która jest bazą do systemu organizacji produkcji rolniczej (Wesołowski i Ekielski 2019, Kordowska i in. 2023).

Postęp technologiczny w takim zakresie, jak: internet rzeczy, czujnik i sieci czujników, robotyka, sztuczna inteligencja, duże zbiory danych, przetwarzanie w chmurze itp., daje nowe możliwości na wykorzystanie ich w branży rolniczej poprzez urządzenia zbierające dane, urządzenia wykonawcze (autonomiczne roboty i coboty), ale również systemy wspierania decyzji i całe zintegrowane systemy zarządzania (Woźniak 2021). Przykładowy schemat przepływu danych pomiędzy tymi technologiami przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1 Przepływ danych pomiędzy technologiami rolnictwa 4.0

Źródło: opracowanie własne na podstawie Araújo i in. 2021

Według powyższego schematu opracowanego przez Araújo i in. (2021) zidentyfikowano pięć głównych etapów, które składają się na trzon rolnictwa 4.0, tj.:

1. Czujniki i robotyka;
2. Internet rzeczy – do komunikacji danych;
3. Przetwarzanie w chmurze – do preprocesingu, przechowywania i przetwarzania danych;
4. Analiza danych – obejmuje duże zbiory danych i metody oparte na sztucznej inteligencji do ich analizy;
5. System wspomagania decyzji DSS – wizualizacja danych, funkcje rekomendacji i interakcji z użytkownikiem.

Pożądane dane zbierane w terenie przez urządzenia IoT (czujniki, satelity) przesyłane są za pomocą sieci do serwera w chmurze obliczeniowej, gdzie są przechowywa-

ne oraz poddawane przetworzeniu i analizom. Przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji możliwa jest analiza dużych zbiorów danych o złożonej strukturze. W efekcie daje to możliwość pozyskania zasobów wiedzy/informacji/rekomendacji, dla użytkowników systemu IoT, którzy mogą wchodzić z nim w interakcje w zakresie działań optymalizacyjnych, ułatwiających procesy decyzyjne w gospodarstwie. Opisana powyżej architektura i koncepcja rolnictwa 4.0 wykorzystuje wiele zaawansowanych technologii i źródeł danych, które, aby mogły być szeroko stosowane, wymagają otwartego środowiska, ale również wiedzy i kompetencji samych użytkowników.

Oprócz wielu możliwości, jakie niesie za sobą wprowadzanie rolnictwa 4.0, istotne jest również rozpoznanie, zrozumienie i rozwiązanie problemów i wyzwań z nim związanych. Aby w pełni wykorzystać ten potencjał, innowacje technologiczne muszą być połączone z koncepcją odpowiedzialności zarówno na poziomie środowiskowym, jak i społecznym (Maffezzoli i in. 2022). Jest to bowiem z jednej strony szansa na zwiększenie konkurencyjności i wydajności sektora rolniczego, a z drugiej ryzyko, które może pogłębiać już istniejące różnice regionalne.

Kierunki rozwoju rolnictwa w Polsce

Rolnictwo jako sektor uzależniony od wielu warunków, nie tylko przyrodniczych, ale również społeczno-ekonomicznych ulega regionalizacji zarówno na poziomie światowym, jak i w mniejszej, krajowej i regionalnej skali. W Polsce na zróżnicowanie warunków rozwoju rolnictwa oprócz wspomnianych czynników przyczynił się również aspekt historyczny i polityczny, który przez lata pogłębiał różnice zwłaszcza w kontekście struktury gospodarstw. Jak zatem zarysowane przez lata różnice regionalne w rozwoju rolnictwa przekładają się na bariery w postępie kolejnego etapu, jakim jest rolnictwo 4.0? Jest to dziedzina, która w ostatnich latach niezwykle intensywnie się rozwija, jednak czy w polskich realiach możliwe jest wykorzystanie tego potencjału we wszystkich regionach kraju?

Niewątpliwie poważnym zwrotem w rozwoju polskiego rolnictwa było wstąpienie do struktur Unii Europejskiej. Wspólna Polityka Rolna (WPR), objęła polskie rolnictwo mechanizmami wsparcia w ramach dwóch filarów. I filar WPR dawał możliwość na bezpośrednie wsparcie finansowe rolników poprzez system dopłat bezpośrednich. Natomiast filar II WPR dotyczył wsparcia w rozwoju obszarów wiejskich poprzez wzmacnianie stabilności społecznej, środowiskowej i gospodarczej, tym samym uzupełniając filar I WPR obejmujący wsparcie dochodu i środki rynkowe (Plewa i in. 2024, Rozwój obszarów wiejskich – Komisja Europejska 2025). Poza wsparciem w tych obszarach pojawiła się również możliwość poszerzenia rynków zbytu dla produktów sektora rolno-żywnościowego poprzez swobodny przepływ towarów, kapitału, ale także osób, w ramach Jednolitego Rynku Europejskiego. Obecnie głównym celem WPR na lata 2023–2027 jest modernizacja rolnictwa i obszarów wiejskich przez wspieranie i szerzenie wiedzy, innowacji i cyfryzacji. Dodatkowo od 2023 r. pojawiła

się możliwość wykorzystania środków z Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności (KPO)¹. W ramach Działania 6 Wsparcie w zakresie rolnictwa 4.0 rolnicy mogą ubiegać się o dotacje na rozwój w swoich gospodarstwach technologicznej bazy do zarządzania gospodarstwem rolnym. Powyższe wsparcie udzielne jest na podstawie ustalonych kryteriów.

Kryteria przyznania wsparcia w ramach rolnictwa 4.0:

- od 0 do 5 pkt – gospodarstwa z produkcją ekologiczną;
- od 0 do 2 pkt – wielkość gospodarstwa co najmniej równa średniej powierzchni gruntów rolnych w gospodarstwie w Polsce. Wielkość gospodarstwa co najmniej równa średniej powierzchni gruntów rolnych w gospodarstwie w województwie, w przypadku województwa o niższej średniej niż krajowa;
- 0 do 4 pkt – przedsięwzięcie realizowane przez młodego rolnika (rolnik do 40 roku życia włącznie).

Warunki wsparcia:

Rolnik otrzymuje wsparcie po zakończeniu założonego zadania, przy czym można wnioskować o zaliczkę w wysokości 50%. Zwrot dotyczy kosztów kwalifikowalnych:

- do 80% kosztów – dla rolników ekologicznych lub wnioskodawców poniżej 41 roku życia;
- do 65% kosztów – w przypadku pozostałych wnioskodawców.

Maksymalne wsparcie do 200 000 zł kwoty wsparcia rządowego oraz minimalna kwota wsparcia od 15 000 zł. Rolnicy w zakresie tego działania mogą zakupić maszyny, sprzęt lub oprogramowanie wraz z montażem i instalacją; dotyczy to w szczególności czujników, sprzętu informatycznego i aplikacji. W ramach tego finansowania możliwy jest również zakup patentów i licencji oraz wliczenie kosztów ogólnych związanych z przygotowaniem i realizacją przedsięwzięcia (Działanie 6. Wsparcie w zakresie rolnictwa 4.0. – Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa – Portal Gov.pl, n.d.).

Powyższe kryteria i warunki wsparcia promują określony profil producentów rolnych, którzy ze względu na młody wiek i status gospodarstwa ekologicznego wpisują się w możliwość realizacji założeń zrównoważonego rozwoju w dłuższej perspektywie czasu.

Materiały i metody badań

Badania oparto na podstawie ogólnodostępnych danych pozyskanych z GUS-u, w tym z Powszechnego Spisu Rolnego (PSR) (2020), na podstawie których scharakteryzowano warunki społeczne i strukturalne polskiego rolnictwa, stosując metody

¹KPO – Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności jest planem rozwojowym określającym cele związane z odbudową i tworzeniem odporności społeczno-gospodarczej Polski po kryzysie wywołanym pandemią COVID-19 oraz służące ich realizacji reformy i inwestycje (Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności Polski, n.d.)

statystyki opisowej. Natomiast informacje na temat producentów wnioskujących o wsparcie w zakresie rolnictwa 4.0 pozyskano z ARiMR-u, z Departamentu Działania Inwestycyjnych, gdzie weryfikowane są wnioski o te płatności. W celu wizualizacji regionalnych różnic wykonano mapy z wykorzystaniem oprogramowania QGIS (Spatial without Compromise·QGIS Web Site, n.d.).

Identyfikacja regionalnych barier w transformacji do rolnictwa 4.0

Bariera prawna

W przypadku barier prawnych mogących wpłynąć na wdrażanie praktyk rolnictwa 4.0, szczególną uwagę należy zwrócić na stan polskiego prawodawstwa rolnego na tle przepisów europejskich dotyczących tej kwestii. W tym przypadku nie podlegają one regionalizacji w skali kraju. Różne regiony i kraje mają różne ramy prawne, które wpływają na wdrażanie technologii cyfrowych w sektorze rolnictwa, szczególnie w zakresie monitorowania i dostaw żywności rolnej (Abbasi i in. 2022). Natomiast istotne w skali regionalnej (np. województw) mogą być środki pozyskiwane w ramach rozwoju regionalnego, w tym np. na rozwój koncepcji Smart Village.

Przepisy europejskie nie wyznaczają sztywnych ram w doborze instrumentów pomocowych w kwestii rolnictwa 4.0, co pozostawia pewną swobodę dla legislacji na poziomie krajowym. Kwestie związane z wprowadzeniem rolnictwa 4.0 są znormalizowane przede wszystkim w ramach kamienia milowego inwestycyjnego znanego jako A1.4.1 Inwestycje w celu dywersyfikacji i skrócenia łańcucha dostaw produktów rolnych i żywności oraz budowania odporności podmiotów w łańcuchu w ramach Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności. W prawodawstwie polskim rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 17 lipca 2023 r. przyjęte w ramach KPO (Dz.U. z 2013 r. poz.1389) określa szczegółowe przeznaczenie, warunki i tryb wsparcia realizacji przez producentów rolnych projektów wdrażania rozwiązań dla rolnictwa 4.0, polegających na zastosowaniu systemów teleinformatycznych i rozwiązań cyfrowych do obsługi procesów produkcji i obrotu artykułami rolno-spożywczymi (Niewiadomska 2024). W przytoczonej publikacji autorka, zauważa pewne ryzyka związane z zapisami tego rozporządzenia, są to m.in.:

- w ust. 4 (1) rozporządzenia wsparcie udzielane jest projektom, których realizacja trwa nie dłużej niż 12 miesięcy od dnia zawarcia umowy o objęcie projektu wsparciem i nie dłużej niż do dnia 30 września 2025 r. – oznacza to, że realizacja zakupu, o który wnioskował rolnik, musi być dokonana w krótkim czasie, co niesie ryzyko dostarczenia odpowiednich rozwiązań w terminie.
- pomoc udzielana w formie refundacji. Jest ona zasadna ze względu na pewne zabezpieczenie przed nieuzasadnionym, nieprzemyślanym zakupem sprzętu, przez podmioty, które być może nie będą go wykorzystywały. Stwarza jednak ryzyko inwestycyjne dla osób, które muszą wyłożyć środki własne na zakup sprzętu i technologii, co może być zbyt dużym obciążeniem finansowym

i wiązać się z ryzykiem rozciągniętego w czasie zwrotu poniesionych kosztów. W tym zakresie jest co prawda możliwość wypłacenia 50% zaliczki, jednak może to wydłużać cały proces inwestycji.

Poza tym pewne wątpliwości w zasadach przyznawania wsparcia dotyczą również dofinansowania w tym zakresie szkół rolniczych. Obecnie taką możliwość mają tylko szkoły prowadzone przez ministra rolnictwa. Takich szkół branżowych w całym kraju jest 64 (Wykaz szkół rolniczych – Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi – Portal Gov.pl.), natomiast pozostałe placówki będące pod pieczęą samorządów nie mają szansy na wsparcie w tym zakresie.

Oprócz przepisów obejmujących warunki przyznawania pomocy w zakresie rolnictwa 4.0 pozostaje również kwestia dostosowania przepisów prawnych odnoszących się do wykorzystania zaawansowanych technologii. Ciągły rozwój technologiczny oraz potrzeba operowania ogromną liczbą danych sprawia również, że obecny system prawny i legislacyjny, który z zasady bardzo wolno wprowadza zmiany, nie nadąża za implementacją odpowiednich narzędzi i ram prawnych regulujących np. kwestie własności danych, dostępu i zarządzania nimi, jak również możliwości ich komercjalizacji (Kosior 2020, Kordowska i in. 2023). Jest to duże wyzwanie stojące przed środowiskiem prawniczym, zwłaszcza że nie wypracowano jeszcze strategii rozwoju polskiego modelu rolnictwa 4.0 (Niewiadomska 2024).

Duże znaczenie ma również obecna polityka rolna. Podstawą prawną gospodarowania ziemią rolniczą w Polsce jest ustawa o kształtowaniu ustroju rolnego z 2003 r. (Dz.U. z 2024 r. poz. 423) wielokrotnie nowelizowana, która reguluje obrót ziemią rolną. Wciąż szeroką kwestią jest potrzeba poprawy struktury gruntów i gospodarstw rolnych, zwłaszcza w kontekście rozwoju rolnictwa 4.0. Dotyczy to głównie przejmowania i rozszerzania działalności młodych rolników, którzy chcieliby nabyć nowe grunty rolne. Być może ta kwestia w kontekście ww. ustawy wymagałaby pewnego usprawnienia legislacyjnego. Dotyczy to również regionów o niekorzystnej strukturze powierzchniowej działek, gdzie uwidocznił się zapoczątkowany w latach 90. proces porzucania gruntów rolnych. Problem w zagospodarowaniu tych gruntów oraz np. przejęciu na poczet powiększenia gospodarstwa, stanowi kwestia często nieuregulowanych praw własności.

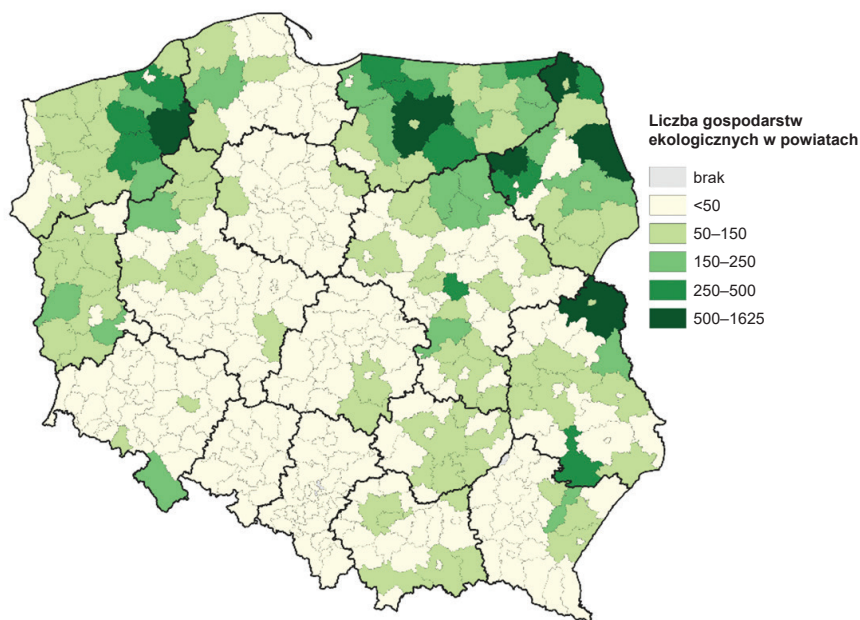
Uregulowania prawnego wymaga również system dzierżawy ziemi oraz podejście Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa (KOWR) do kwestii uwolnienia gruntów i umożliwienia nabycia ich przez rolników, którzy chcą rozwijać swoje gospodarstwa.

Aspekty prawne mogące być barierą dla rozwoju rolnictwa 4.0 w Polsce dotyczą więc wielu czynników, jednak w kontekście ich regionalizacji w dużej mierze powinny ułatwiać rozwiązanie problemów na obszarach z dużym rozdrobieniem gruntów oraz tych wymagających ich scalenia. Jest to bardzo trudny proces legislacyjny, ponieważ dotyczy form własności gruntów, które są jednocześnie podstawowym czynnikiem produkcji w gospodarstwach.

Gospodarstwa ekologiczne

Wśród kryteriów wsparcia rolnictwa 4.0 dodatkowo premiowane są gospodarstwa ekologiczne. W tym przypadku alternatywny względem rolnictwa konwencjonalnego system gospodarowania w swoich założeniach łączy najkorzystniejsze dla środowiska praktyki rolnicze i metody produkcji, z zachowaniem przyjętych zasad produkcji zdrowej żywności. W ciągu ostatnich lat ten kierunek produkcji dynamicznie się rozwija, wychodząc naprzeciw rosnącemu zapotrzebowaniu konsumentów na zdrową, ekologiczną żywność. Wysokie standardy jakości produkcji ekologicznej, które musi spełnić rolnik ekologiczny, mogą stymulować zainteresowanie nowymi technologiami, a dodatkowe wsparcie w zakresie rolnictwa 4.0, może ułatwić nie tylko proces produkcji, ale również dystrybucji produktów ekologicznych oraz skracanie łańcuchów dostaw (Jasiński i in. 2014, Ziętara i Mirkowska 2024).

Obecnie w Polsce jest ponad 24,79 tys. certyfikowanych gospodarstw ekologicznych, co stanowi ok. 2% wszystkich producentów rolnych (Wykaz producentów w rolnictwie ekologicznym – Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych – Portal Gov.pl, n.d.)², natomiast powierzchnia ekologicznych użytków rolnych wynosi 691,47 tys. ha i stanowi 4,9% wszystkich użytków rolnych. Rozwój rolnictwa ekologicznego wciąż wykazuje rosnący trend, jednak zauważa się silną regionalizację występowania gospodarstw ekologicznych (rys. 2, tab. 1).



Rys. 2. Przestrzenne rozmieszczenie producentów ekologicznych w ujęciu dla powiatów

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wykazu producentów w rolnictwie ekologicznym – Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych – Portal Gov.pl, n.d.

²Liczba producentów ekologicznych w Polsce wg stanu na dzień 31.12.2024 r.

Tabela 1

Zestawienie liczby producentów ekologicznych

Wyszczególnienie	Liczba producentów ekologicznych	Procentowy udział producentów ekologicznych w ogólnej liczbie producentów rolnych	Procentowy udział producentów ekologicznych w ich ogólnej liczbie
Dolnośląskie	908	1,9	3,7
Kujawsko-pomorskie	447	0,8	1,8
Lubelskie	2060	1,3	8,3
Lubuskie	1289	6,9	5,2
Łódzkie	674	0,6	2,7
Małopolskie	708	0,7	2,9
Mazowieckie	3009	1,6	12,2
Opolskie	92	0,4	0,4
Podkarpackie	842	0,8	3,4
Podlaskie	5023	6,4	20,3
Pomorskie	801	2,3	3,2
Śląskie	242	0,6	1,0
Świętokrzyskie	571	0,7	2,3
Warmińsko-mazurskie	3811	8,5	15,4
Wielkopolskie	1255	1,1	5,1
Zachodniopomorskie	2971	10,8	12,0
Polska	24703	2,0	

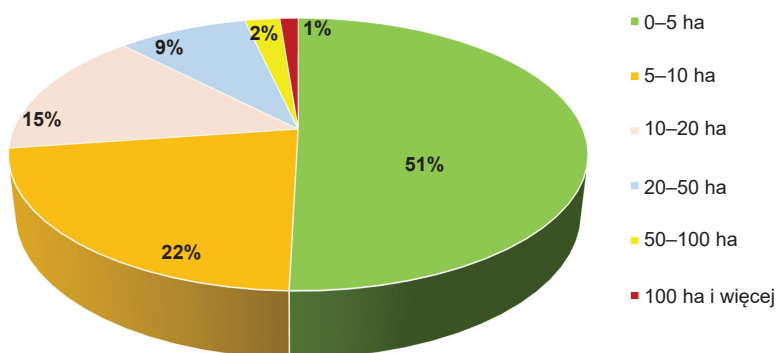
Źródło: opracowanie własne na podstawie Wykazu producentów w rolnictwie ekologicznym – Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych – Portal Gov.pl, n.d.

Jak wynika z powyższych danych, największa liczba gospodarstw ekologicznych występuje w województwie podlaskim (m.in. powiat suwalski, sokólski) i stanowi ok. 20% wszystkich gospodarstw ekologicznych w kraju. Wysoki odsetek tego typu gospodarstw występuje również w województwach: warmińsko-mazurskim – 15,4 %, mazowieckim – 12,2% i zachodniopomorskim – 12%, gdzie udział producentów ekologicznych w ogólnej liczbie producentów rolnych w województwie jest najwyższy w kraju i stanowi 10,8%. Wymienione regiony mają zatem szansę na wzmocnienie i utrzymanie trendu rozwoju gospodarstw ekologicznych dzięki dodatkowemu wspar-

ciu z dotacji na rolnictwo 4.0. Natomiast to, czy producenci sięgają po dodatkowe płatności na potrzeby rozwoju technologicznego swoich gospodarstw ekologicznych, zostanie przedstawione w dalszej części artykułu.

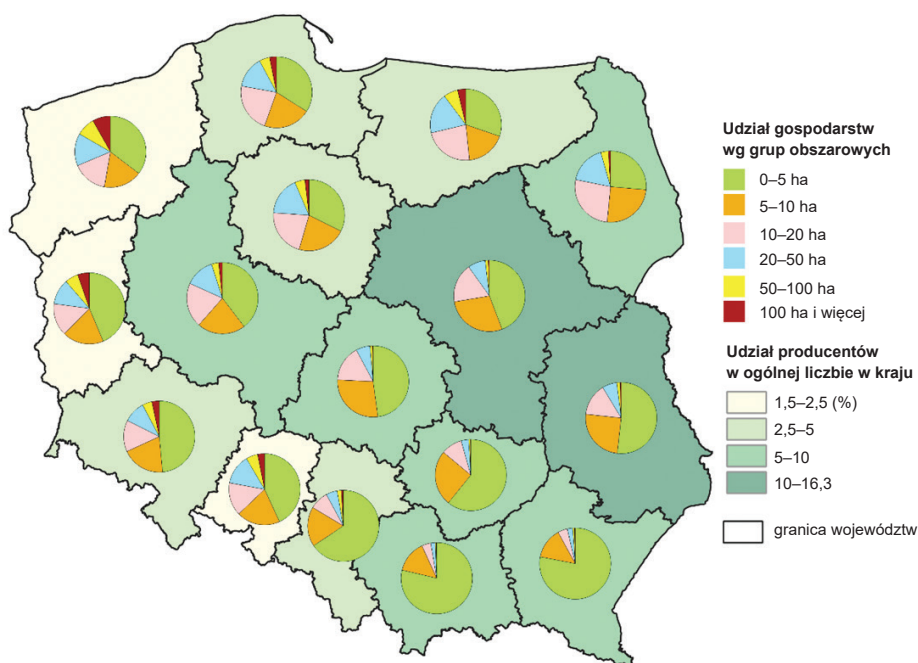
Bariera struktury obszarowej gospodarstw

Jedną z cech polskiego rolnictwa zidentyfikowanych jako największy problem, z którym się mierzy w kontekście rozwoju i utrzymania konkurencyjności jest niekorzystna struktura agrarna gospodarstw charakteryzująca się wysokim rozdrobnieniem (Wilkin i in. 2018). W Polsce wśród ogółu gospodarstw ponad 50% stanowią gospodarstwa małe do 5 ha oraz 22% gospodarstw 5–10 hektarowych, natomiast gospodarstw w grupie obszarowej 10–20 ha jest 15%, co w sumie daje aż 87% gospodarstw do 20 ha. Znacznie mniejszy udział przypada gospodarstwom powyżej 20 ha, 9% w grupie 20–50 ha, 2% w grupie 50–100 ha, natomiast gospodarstw wielkoobszarowych, powyżej 100 ha, jest zaledwie 1% (rys. 3–4). Jest to bariera, która od lat, pomimo wsparcia w ramach PROW, nadal utrzymuje regionalne zróżnicowanie. Są to cechy wynikające z przyczyn nie tyle środowiskowych, a organizacyjnych, politycznych i historycznych.



Rys. 3. Udział procentowy gospodarstw rolnych wg grup obszarowych

Źródło: opracowano na podstawie danych GUS-u – Bank Danych Lokalnych, n.d. dane na rok 2023



Rys. 4. Struktura wielkościowa gospodarstw rolnych w województwach na tle ogólnej liczby gospodarstw

Źródło: opracowano na podstawie danych GUS-u – Bank Danych Lokalnych, n.d.) dane na rok 2023

W warunkach przyznawania dotacji w zakresie rozwoju rolnictwa 4.0 określone jest kryterium wielkości gospodarstwa, które ma być równe co najmniej średniej powierzchni gruntów rolnych w gospodarstwie w Polsce. Według danych ARiMR-u na 2024 r. wynosiła ona 11,59 ha (Średnia powierzchnia gruntów rolnych w gospodarstwie w 2024 roku – Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa – Portal Gov.pl, n.d.). W przypadku połowy województw średnia wielkość gospodarstw jest poniżej tej wartości; dotyczy to województw zlokalizowanych w południowo-wschodniej części kraju, tj. lubelskiego, łódzkiego, małopolskiego, mazowieckiego, podkarpackiego i śląskiego. W przypadku tych województw za kryterium przyjmuje się wielkość gospodarstwa co najmniej równą średniej powierzchni gruntów rolnych w gospodarstwie w danym województwie (tab. 2).

Jednak nawet przy takim założeniu dla województw małopolskiego i podkarpackiego duża część może nie spełniać tego kryterium, bowiem ponad 78% gospodarstw w tych województwach ma wielkość poniżej 5 ha. Również dla województw lubelskiego i mazowieckiego, które w sumie skupiają niemal 30% producentów, kryterium wielkości nie będzie spełnione dla ok. 70% gospodarstw. Oprócz samej wielkości gospodarstw istotne na tych obszarach jest również występowanie małych działek

rolnych, dla których trudne byłoby wprowadzenie nawet najprostszych technik rolnictwa precyzyjnego.

Tabela 2

Średnia powierzchnia gruntów rolnych w gospodarstwach według województw

Wyszczególnienie	Średnia wielkość powierzchni gruntów rolnych w gospodarstwie w 2024 r. (ha)	Udział gospodarstw o powierzchni do 10 ha* (%)
Dolnośląskie	18,60	68,1
Kujawsko-pomorskie	17,66	54,5
Lubelskie	8,34	76,7
Lubuskie	23,67	62,4
Łódzkie	8,25	75,7
Małopolskie	4,36	93,2
Mazowieckie	9,05	72,4
Opolskie	20,13	62,9
Podkarpackie	5,21	92,0
Podlaskie	12,96	51,6
Pomorskie	20,64	55,5
Śląskie	8,60	83,6
Świętokrzyskie	6,13	86,1
Warmińsko-mazurskie	24,14	48,4
Wielkopolskie	14,72	61,5
Zachodniopomorskie	33,50	52,7
Polska	11,59	

*na podstawie danych GUS-u – Bank Danych Lokalnych, n.d. dane na rok 2023

Źródło: ARiMR (Średnia powierzchnia gruntów rolnych w gospodarstwie w 2024 roku – Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa – Portal Gov.pl, n.d.)

Dużo korzystniejsza sytuacja występuje w zachodniej i północnej Polsce (województwa: zachodniopomorskie, lubuskie, warmińsko-mazurskie, pomorskie, opolskie, wielkopolskie i kujawsko-pomorskie), gdzie funkcjonuje więcej wielkoobszarowych, często wyspecjalizowanych gospodarstw, które dzięki zwiększonej koncentracji zasobów ziemi wykazują dużo większy potencjał do realizowania i wdrażania nowych technologii. Poza tym tego typu gospodarstwa zauważają potrzebę optymalizacji środków produkcji, ale również częściowego zastąpienia pracowników sezonowych, których jest coraz trudniej pozyskać, przez zastosowanie robotów i autonomicznych maszyn (Kordowska i in. 2023).

Niekorzystna struktura agrarna, która regionalnie od lat jest kluczowym problemem dla polskiego rolnictwa, przekłada się na ograniczenia w rozwoju zaawansowanych technologii, poprzez często bezpośrednie przełożenie wielkości gospodarstwa na wydajność ekonomiczną, a tym samym możliwość inwestowania w innowacje.

Bariera struktury społecznej wsi

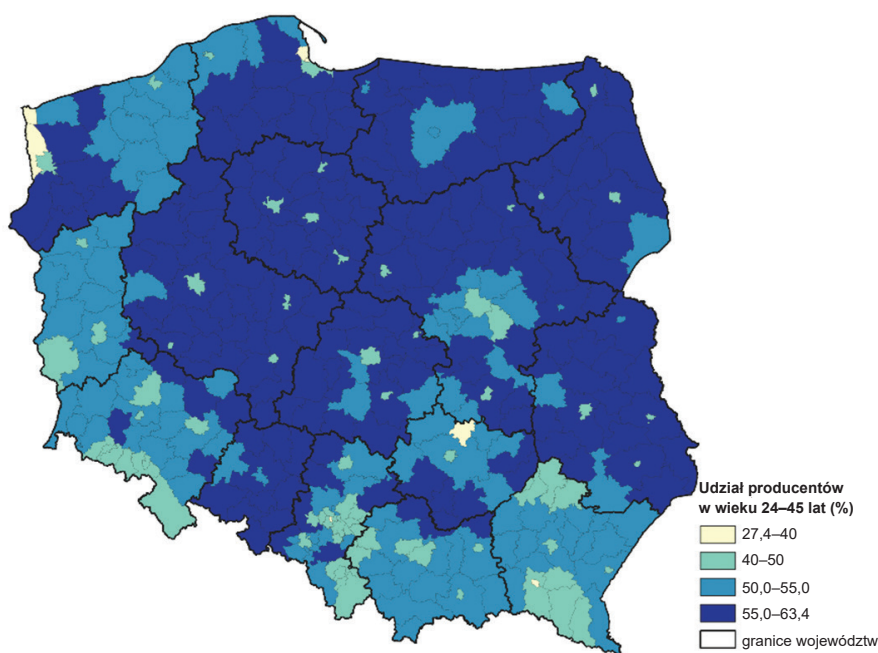
Kierunki rozwoju gospodarstw rolnych, ich rentowność i możliwości adaptacji do zmian rynkowych i tych które konieczne są w dobie zmiany klimatu, zależą od wielu czynników. Jednak niezwykle ważny jest aspekt społeczny, który można rozpatrywać w wielu kontekstach. W przypadku wdrażania nowych technologii w gospodarstwach rolnych istotną rolę może odegrać struktura wiekowa osób kierujących gospodarstwem rolnym oraz ich poziom wykształcenia. W przypadku tych cech również w Polsce zauważamy pewne zróżnicowanie przestrzenne, które może marginalizować niektóre regiony. W przypadku dotacji na rolnictwo 4.0 wyraźnie preferuje się młodych rolników do 40 roku życia. Obecna struktura wiekowa prowadzących gospodarstwo rolne wydaje się być korzystna, ponieważ według Powszechnego Spisu Rolnego (PSR 2020) w ujęciu krajowym ponad połowa, bo 54% kierujących gospodarstwem rolnym znajduje się w przedziale wiekowym 24–45 lat, przy czym ok. 17% to rolnicy w wieku 15–34 lat. Poniższa mapa (rys. 5) przedstawiająca tę cechę w ujęciu powiatów nie wykazuje znacznego zróżnicowania przestrzennego. Jedynie w rejonach podgórskich procentowy udział rolników kierujących gospodarstwem rolnym w tym przedziale wiekowym nie przekracza 50%. Można więc uznać, iż w przypadku struktury wiekowej większość regionów w Polsce ma podobne warunki.

Korzystna struktura wiekowa to duży potencjał we wdrażaniu rolnictwa 4.0, ponieważ młode osoby są bardziej otwarte na wprowadzanie zaawansowanych technologii w swoich gospodarstwach oraz łatwiej jest im dostosować się do wymagań rynku (Woźniak 2021). Poza tym posiadają zazwyczaj umiejętności w zakresie wykorzystywania narzędzi internetowych niezbędnych do wdrażania innowacji w rolnictwie.

Oprócz korzystnej struktury wiekowej społeczności wiejskiej nie bez znaczenia ma odpowiednie wykształcenie. O ile w tradycyjnym gospodarstwie wiedzę praktyczną przekazywano z pokolenia na pokolenia, to w przypadku wykorzystywania nowych technologii i inteligentnego rolnictwa potrzebna jest również wiedza teoretyczna i chęć ciągłego rozwijania umiejętności, aby wdrażać innowacje zgodne z postępem technologicznym. W 2020 r. według PSR odsetek kierowników gospodarstw rolnych posiadających wyższe wykształcenie w skali kraju wynosił 17,8%, jednak wykształcenie wyższe kierunkowe – rolnicze posiadało 3,7%. Zróżnicowanie przestrzenne tego zjawiska przedstawiają rysunki 6 i 7, które obrazują udział procentowy kierowników gospodarstw rolnych z wykształceniem wyższym rolniczym oraz średnim rolniczym. Przewaga gospodarstw kierowanych przez rolników z rolniczymi kwalifikacjami na

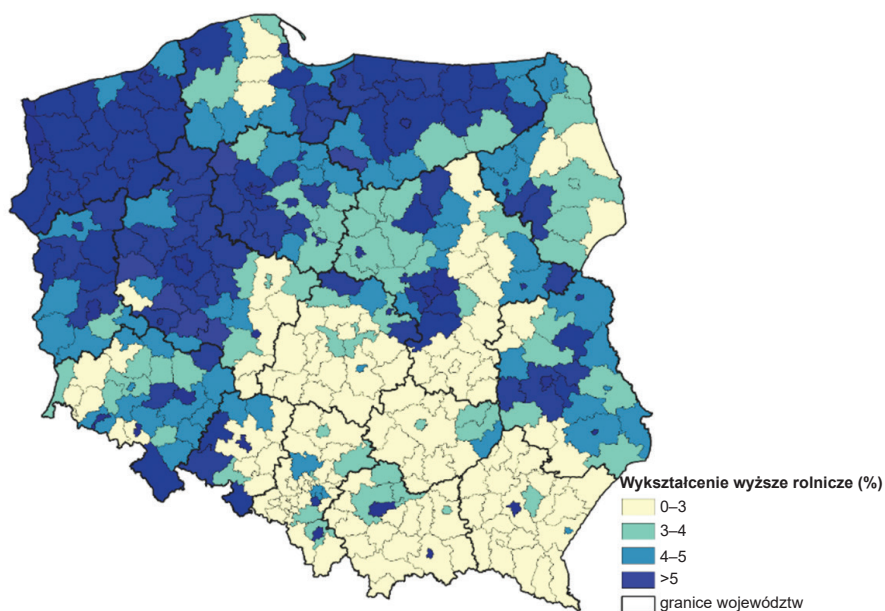
poziomie średnim i wyższym, występuje w północnej i północno-zachodniej części kraju, głównie w województwach: wielkopolskim, kujawsko-pomorskim, a zwłaszcza w zachodniopomorskim i warmińsko-mazurskim, gdzie jest największy odsetek osób kierujących gospodarstwem z wyższym wykształceniem rolniczym odpowiednio: 7,9% i 5,8%. Są to regiony, gdzie funkcjonują duże gospodarstwa towarowe będące często jedynym źródłem utrzymania domowników, a tym samym praca w rolnictwie nie jest traktowana jako sposób na życie, a jako zawód, który wymaga odpowiednich kwalifikacji (Polna 2025).

Natomiast obszarami, gdzie odsetek rolników kierujących gospodarstwem z wykształceniem wyższym lub średnim kierunkowym jest najniższy to region południowo-wschodni, głównie województwa: podkarpackie, małopolskie i świętokrzyskie. W tym przypadku poziom i kierunek wykształcenia może stać się istotną barierą we wdrażaniu w gospodarstwach nowoczesnej organizacji produkcji i zaawansowanych technologii.



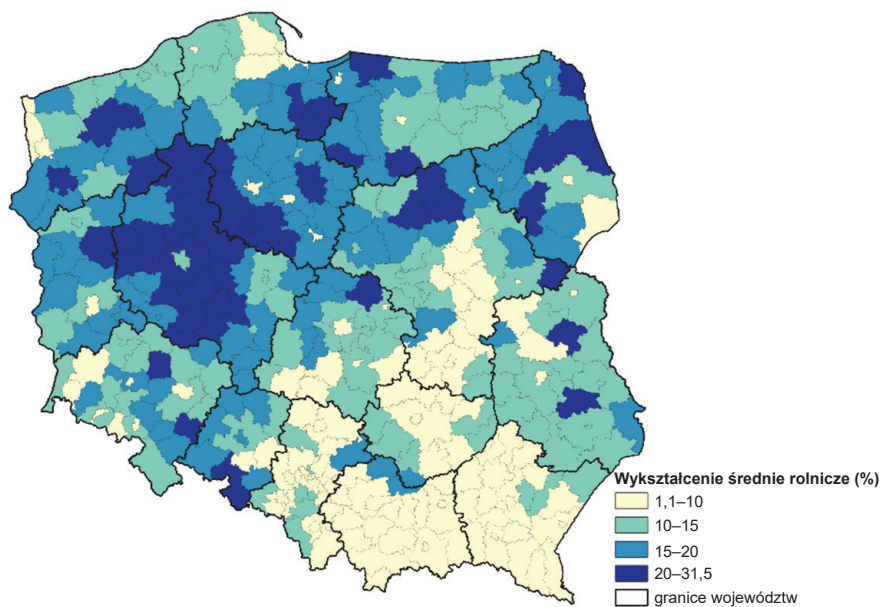
Rys. 5. Udział kierujących gospodarstwem rolnym w przedziale wiekowym 24-44 lat w ujęciu dla powiatów

Źródło: opracowanie własne na podstawie PSR 2020



Rys. 6. Udział kierujących gospodarstwem rolnym z wykształceniem wyższym rolniczym w ogólnej ich liczbie

Źródło: opracowanie własne na podstawie PSR 2020



Rys. 7. Udział kierujących gospodarstwem rolnym z wykształceniem średnim rolniczym w ogólnej ich liczbie

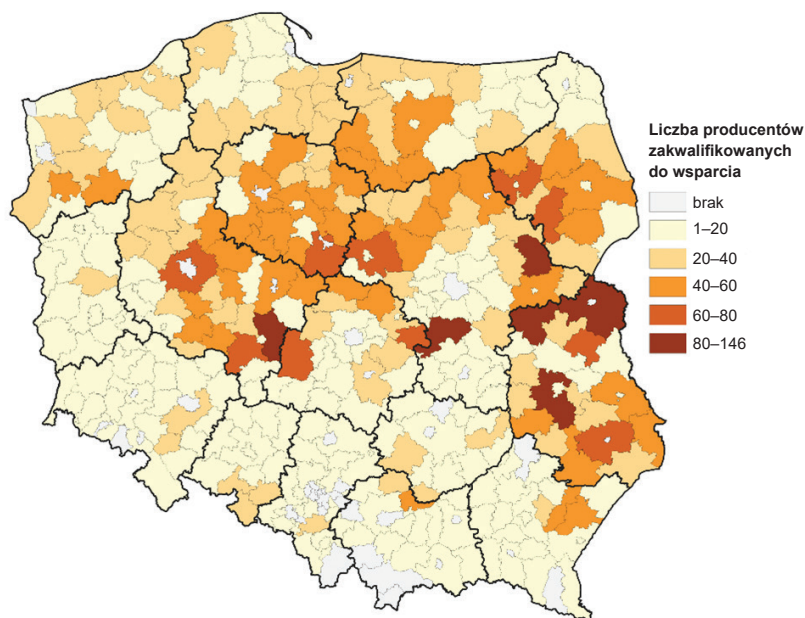
Źródło: opracowanie własne na podstawie PSR 2020

Charakterystyka producentów otrzymujących dotacje dla rolnictwa 4.0

Omówione powyżej bariery regionalne próbowano zidentyfikować w kontekście rozwoju rolnictwa 4.0. Natomiast charakterystykę producentów rolnych, którzy ubiegali się i zostali zakwalifikowani do dotacji w tym zakresie, w ramach KPO, przeanalizowano na podstawie udostępnionych przez ARiMR danych pochodzących z wniosków na rok 2023. Według nich zakwalifikowano do dopłat 7392 producentów. Na rysunku 8 zobrazowano regionalny rozkład tej cechy, natomiast zestawienie liczbowe przedstawia tabela 3.

Według tych danych największa liczba producentów, którzy uzyskali wsparcie na rozwój technologiczny swoich gospodarstw w ramach rolnictwa 4.0 występuje w województwach: wielkopolskim, mazowieckim (ponad 1 tys. producentów) oraz w lubelskim (900 producentów). W sumie jest to ponad 40% wszystkich producentów objętych tym wsparciem. Jednak zróżnicowanie regionalne zarysowuje się bardziej szczegółowo, co widać w ujęciu dla powiatów (rys. 8). Przykładem może być województwo mazowieckie, gdzie największą liczbę w kraju 146 zakwalifikowanych producentów wystąpiło w powiecie grójeckim. Jest to region, który od lat specjalizuje się w roślinach sadowniczych i jest jednym z bardziej liczących się zagłębi produkujących i eksportujących jabłka w Europie. Powiat ten wyraźnie wyróżnia się na tle innych powiatów w południowej części województwa mazowieckiego. Nie bez znaczenia dla rozwoju rolnictwa 4.0 wydaje się być zatem specjalizacja w produkcji rolniczej w poszczególnych regionach, co widać również w przypadku województwa lubelskiego, np. powiaty łukowski i bialski, specjalizujące się w chowie bydła i trzody chlewnej, natomiast powiat lubelski w produkcji owoców miękkich. Jednak aby szerzej analizować ten problem, potrzebne są bardziej szczegółowe informacje o charakterze produkcji poszczególnych producentów wnioskujących o te płatności. Do kolejnej grupy województw w liczbie producentów ze wsparciem rolnictwa 4.0 należą województwa: kujawsko-pomorskie, pomorskie, warmińsko-mazurskie i zachodniopomorskie. Natomiast najmniej producentów korzystających ze wsparcia dla rolnictwa 4.0 występuje na obszarze południowej Polski, głównie w województwach: małopolskim, podkarpackim, śląskim i świętokrzyskim. W tym przypadku należy się odnieść do bariery, jaką stanowi struktura obszarowa gospodarstw w tych regionach.

Jeżeli chodzi o charakterystykę gospodarstw, dane zestawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 9. Na ich podstawie możemy stwierdzić, że zdecydowaną większość (86,8%) to rolnicy posiadający gospodarstwa powyżej 20 ha, z najliczniejszą grupą w przedziale 20–50 ha stanowiącą 37% producentów. Gospodarstwa małe, do 10 ha, stanowią natomiast marginalną ich część, dokładnie 3,3%.



Rys. 8. Przestrzenne zróżnicowanie liczby producentów korzystających ze wsparcia w ramach rolnictwa 4.0 w ujęciu dla powiatów

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z ARiMR-u

Tabela 3

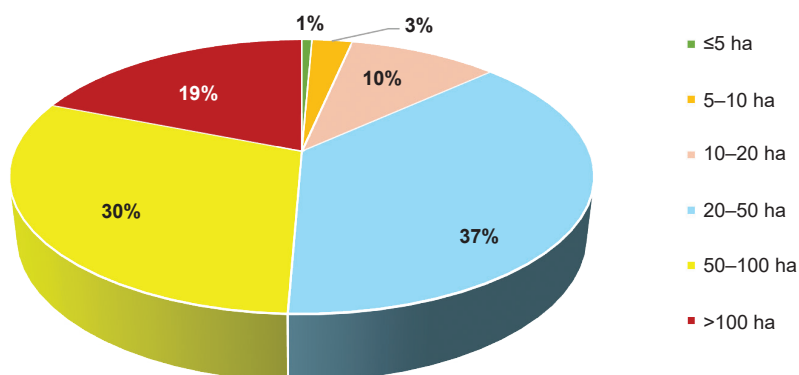
Liczba producentów rolnych korzystających ze wsparcia w ramach rolnictwa 4.0 według struktury wielkości gospodarstw

Wyszczególnienie	Powierzchnia gospodarstw rolnych (ha)						Suma
	<= 5	5–10	10–20	20–50	50–100	>100	
	liczba producentów						
Dolnośląskie	1	0	9	61	108	116	295
Kujawsko-pomorskie	4	4	53	298	277	136	772
Lubelskie	8	20	133	425	236	78	900
Lubuskie	0	0	1	36	35	58	130
Łódzkie	3	35	102	222	125	36	523
Małopolskie	6	19	20	60	37	14	156
Mazowieckie	12	67	205	428	235	69	1016
Opolskie	0	1	4	48	69	37	159
Podkarpackie	1	9	14	79	73	41	217
Podlaskie	2	3	30	253	166	49	503

cd. tab. 3

Wyszczególnienie	Powierzchnia gospodarstw rolnych (ha)						Suma
	<= 5	5–10	10–20	20–50	50–100	>100	
	liczba producentów						
Pomorskie	2	3	17	97	127	118	364
Śląskie	0	4	5	60	59	36	164
Świętokrzyskie	3	15	22	61	40	12	153
Warmińsko-mazurskie	0	3	18	132	168	193	514
Wielkopolskie	8	11	92	444	352	183	1090
Zachodniopomorskie	0	2	7	61	140	226	436
Polska	50	196	732	2765	2247	1402	7392

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z ARiMR-u na 2023 rok

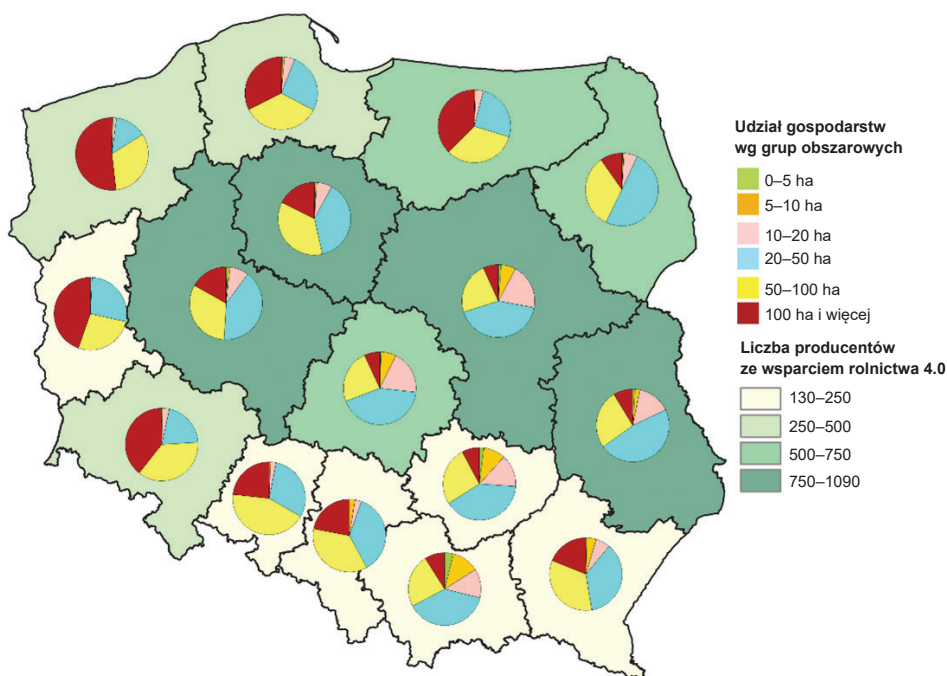


Rys. 9. Udział gospodarstw zakwalifikowanych do wsparcia w ramach rolnictwa 4.0 według grup obszarowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z ARiMR-u na 2023 r.

Porównując udziały grup obszarowych przedstawione na rysunkach 3 i 9, widzimy również duży 19% udział gospodarstw największych, ponad 100 ha, wśród producentów realizujących wsparcie dla rolnictwa 4.0.

Regionalne zróżnicowanie przestrzennego udziału poszczególnych grup obszarowych gospodarstw ze wsparciem rolnictwa 4.0 w województwach przedstawia rysunek 10.



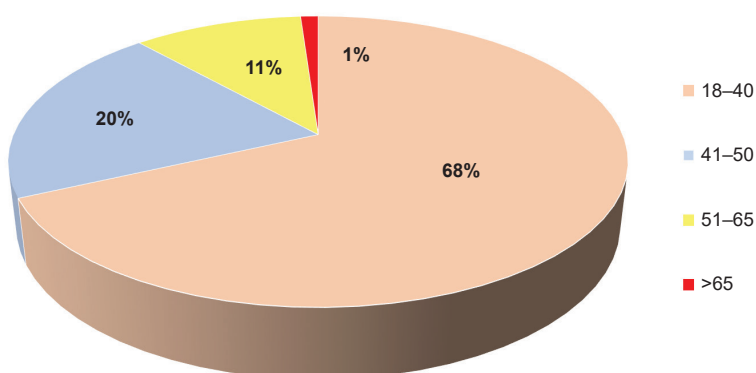
Rys. 10. Struktura wielkości gospodarstw rolnych ze wsparciem dla rolnictwa 4.0 w województwach na tle liczby producentów objętych tym wsparciem

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z ARiMR-u

Analizując obraz powyższej mapy, można wyodrębnić grupę województw, w których dominują gospodarstwa największe, ponad 100 ha; należą do niej województwa północno-zachodniej części Polski: zachodniopomorskie (52%), lubuskie (45%), dolnośląskie (39%), warmińsko-mazurskie (38%). Natomiast w południowo-wschodniej części przeważają gospodarstwa mniejsze, od 20 ha do 100 ha. Najwięcej gospodarstw małych, do 10 ha, występuje w województwie małopolskim. Opisana sytuacja pokazuje, że wsparcie w zakresie rozwoju rolnictwa 4.0 praktycznie nie dotyczy najmniejszych gospodarstw, których w skali kraju jest najwięcej.

Jednym z warunków wsparcia premiowanym w uzyskaniu dotacji jest posiadanie certyfikatu gospodarstwa ekologicznego. Wśród liczby zakwalifikowanych gospodarstw do wsparcia w zakresie rolnictwa 4.0, te z certyfikatem stanowią zaledwie 2,5%. Najwięcej występuje w województwach: lubuskim – blisko 7% oraz zachodniopomorskim, warmińsko-mazurskim i pomorskim – po ok. 5%. W tych regionach jest szansa na rozwój technologiczny gospodarstw ekologicznych wpisujących się w realizację celów zrównoważonego rozwoju. Wydaje się, że w pozostałych regionach (województwa: podlaskie, mazowieckie i lubelskie) gospodarstwa ekologiczne nie wykazują potencjału we wdrażaniu rolnictwa 4.0.

Natomiast bardzo korzystnie przedstawia się struktura wiekowa producentów chcących rozwijać nowe technologie w rolnictwie (rys. 11). Na podstawie danych z wniosków przekazanych przez ARiMR największą grupę, ok. 68%, stanowią osoby w przedziale wiekowym 18–40 lat oraz 41–50 lat – 20%. W warunkach wsparcia premiowany był co prawda wiek rolnika, ale wydaje się, że obserwowany udział stosunkowo młodych rolników wynika raczej z posiadanych kompetencji cyfrowych, które chętniej rozwijają młodzi ludzie. Rozwój rolnictwa z wykorzystaniem zaawansowanych technologii (w tym sztucznej inteligencji) wymaga zdobycia wiedzy w tym zakresie, która jest obecnie implementowana w programy nauczania w szkołach średnich i uczelniach wyższych, a nie była szeroko dostępna jeszcze 10–20 lat wstecz.



Rys. 11. Struktura wiekowa producentów z uzyskanym wsparciem w zakresie rolnictwa 4.0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z ARiMR-u

W przypadku struktury wiekowej producentów ze wsparciem w zakresie rolnictwa 4.0 nie obserwuje się znacznego zróżnicowania regionalnego. Można jedynie wymienić województwa, gdzie udział producentów najstarszych, powyżej 65 roku życia, jest największy (oscyluje w okolicach 3%); są to województwa lubuskie i zachodniopomorskie.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz i identyfikacji barier regionalnych we wdrażaniu rolnictwa 4.0 można stwierdzić, że najbardziej istotna i trudna do przezwyciężenia jest bariera struktury obszarowej gospodarstw oraz ich duże rozdrobnienie. Jest to problem, który dotyczy szczególnie południowo-wschodniej części kraju, województw: małopolskiego, podkarpackiego, świętokrzyskiego oraz śląskiego. Specyfika warunków i niekorzystna struktura agrarna w tych regionach od lat jest barierą, która ze względu na to, że dotyczy podstawowego środka produkcji, jakim jest gleba, przekłada się również na inne społeczno-ekonomiczne aspekty.

Ograniczone możliwości rozwijania gospodarstwa przekładają się bowiem na niskie zyski ekonomiczne i brak zasobów finansowych pozwalających na inwestowanie w innowacyjne technologie, które przy małym areale będą miały nikłą szansę na szybki zwrot inwestycji. W tym kontekście możliwość rozwoju rolnictwa 4.0 należy również postrzegać jako szansę zachowania ciągłości pokoleniowej, ponieważ dla młodych ludzi perspektywa prowadzenia nowoczesnego gospodarstwa z udziałem zaawansowanych technologii jest dużo bardziej atrakcyjna. Ważnym zagadnieniem, które wymaga uwagi jest rozpoznanie możliwości wykorzystania elementów rolnictwa 4.0 w małych i średnich gospodarstwach, które w Polsce stanowią ok. 70%. Być może należałoby stworzyć dodatkowe formy wsparcia finansowego, ale również pogłębić transfer wiedzy specjalistycznej, która pomogłaby w inicjowaniu nowoczesnych rozwiązań. Szczególnie cenne może być wdrażanie działań pilotażowych przez rolników-praktyków poprzez zacieśnienie współpracy w ramach zajęć dydaktycznych już na poziomie szkół średnich, poprzez uczelnie i instytuty naukowe powiązane z rolnictwem, które realizują szereg projektów naukowych dotyczących innowacji w rolnictwie.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że pomimo dodatkowego premiowania stosunkowo mało gospodarstw ekologicznych (2,5% zakwalifikowanych) podejmuje się inwestycji w zaawansowane technologie. Jest to niezrozumiałe z uwagi na to, że ich wdrożenie wydaje się być dużą szansą na ułatwienie produkcji według ściśle określonych standardów, z jednoczesnym zaoszczędzeniem środków produkcji oraz daje możliwość włączenia działań marketingowych pomocnych w proces dystrybucji produktów certyfikowanych.

Zmiany w sektorze rolnym są nieuniknione ze względu na wyzwania związane ze zmianą klimatu, potrzebą zrównoważonego, racjonalnego gospodarowania środkami produkcji oraz ogólnoswiatowej sytuacji rynkowej. Dużym wyzwaniem dla polskiego rolnictwa będzie sprostanie konkurencji krajów zarówno w UE, ale również poza nią, gdzie postęp technologiczny jest dużo szybszy. Jak widać z analizy danych rolników, którzy uzyskali dotacje do rozwoju rolnictwa 4.0, nowoczesne technologie cieszą się dużym zainteresowaniem rolników, co jest bardzo optymistyczne, jednak bez znacznego wsparcia finansowego producenci rolni prawdopodobnie nie będą w stanie sami wdrażać zaawansowanych technologii. Korzystna struktura wiekowa rolników ubiegających się o wsparcie wykazuje duży potencjał do technologicznego rozwoju rolnictwa 4.0, które jest szansą dla polskiego sektora rolnego.

Szybki postęp technologiczny coraz częściej wyprzedza wprowadzane regulacje prawne dotyczące wykorzystania zaawansowanych technologii, w tym sztucznej inteligencji bazującej na ogromnej liczbie danych – big data. W tym kontekście zauważa się problem braku wyznaczonych i ściśle określonych ram prawnych regulujących zasady wykorzystania, własności i zarządzania, czasami bardzo szczegółowymi informacjami zbieranymi przez czujniki i sensory, które powinny podlegać odpowiednim wytycznym w funkcjonowaniu i rozwijaniu Rolnictwa 4.0.

Literatura

1. A b b a s i R., Martinez P., Ahmad R.: The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 2022, **2**, 100042; <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>
2. A r a ú j o S.O., Peres R. S., Barata J., Lidon F., Ramalho J.C.: Characterising the agriculture 4.0 landscape – emerging trends, challenges and opportunities. *Agronomy*, 11(4), 2021, Article 4; <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>
3. Działanie 6. Wsparcie w zakresie rolnictwa 4.0. – Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa – Portal Gov.pl. (n.d.). Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa. Retrieved 29 April 2025; <https://www.gov.pl/web/arimr/dzialanie-6-wsparcie-inwestycji-rolnikow-w-zakresie-rolnictwa-40>
4. GUS – Bank Danych Lokalnych. (n.d.). Retrieved 29 May 2025; <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/tablica>
5. J a s i ń s k i J., Michalska S., Śpiewak R.: Rolnictwo ekologiczne jako czynnik rozwoju lokalnego. *Więś i Rolnictwo*, 2014, **165(4)**: 145-158.
6. K o r d o w s k a M., Baranowski M., Pisarek J., Ziemacki Z., Wawer R., Czech T.: Rolnictwo 4.0 Identyfikacja trendów technologicznych. *NCBiR*, 2023, ss. 91.
7. K o s i o r K.: Łańcuch wartości dużych zbiorów danych (big data) w rolnictwie – problemy i wyzwania regulacyjne. *Studia BAS*, 2020, **3(63)**: 101-125.
8. Krajowy Plan Odbudowy i Zwiększania Odporności Polski: Aktualna sytuacja | Think Tank | Parlament Europejski. (n.d.). Retrieved 29 April 2025; [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/pl/document/EPRS_BRI\(2022\)733665](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/pl/document/EPRS_BRI(2022)733665)
9. M a f f e z z o l i F., Ardolino M., Bacchetti A., Perona M., Renga F.: Agriculture 4.0: A systematic literature review on the paradigm, technologies and benefits. *Futures*, 2022, **142**, 102998; <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.102998>
10. N i e w i a d o m s k a A.: Agriculture 4.0 – an opportunity or threat to Polish agriculture. *Przegląd Prawa Rolnego*, 2024, **2(35)**, Article 2(35). <https://doi.org/10.14746/ppr.2024.35.2.11>
11. P l e w a J., Matyka M., Stanny M., Komorowski Ł., Fedyszak-Radziejowska B., Zegar J.S., Poczta W., Nurzyńska I., Siebielec G., Hałasiewicz A., Baer-Nawrocka A., Kalinowski S., Bartkowski J., Pawlak K., Kozyra J., Chmielewska B., Drygas M. (eds.): Polska wieś 2024: Raport o stanie wsi: 20 lat w Unii Europejskiej. Wydawnictwo Naukowe Scholar: na zamówienie FDPA, 2024; <https://doi.org/10.7366/9788367450843>
12. P o l n a M.: Tendencje zmian poziomu wykształcenia kierowników gospodarstw rolnych w Polsce w latach 2010–2020. *Czasopismo Geograficzne*, 2025, **96(1)**: 105-126; <https://doi.org/10.12657/czageo-96-05>
13. PSR 2020. Powszechny Spis Rolny. Główny Urząd Statystyczny, 2020.
14. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 17 lipca 2023 r. w sprawie szczegółowego przeznaczenia, warunków i trybu udzielania wsparcia w zakresie rolnictwa 4.0 w ramach Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności (b.d.) (Dz.U. z 2023 r. poz. 1389); <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20230001389> (dostęp 11.12.2025).
15. Rozwój obszarów wiejskich – Komisja Europejska. (2025, April 25); https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/rural-development_pl
16. Spatial without Compromise · QGIS Web Site. (n.d.). Retrieved 17 June 2025; <https://qgis.org/>
17. Średnia powierzchnia gruntów rolnych w gospodarstwie w 2024 roku – Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa – Portal Gov.pl. (n.d.). Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa. Retrieved 3 June 2025; <https://www.gov.pl/web/arimr/srednia-powierzchnia-gruntow-rolnych-w-gospodarstwie-w-2024-roku>

18. Wesołowski K., Ekielski A. (eds.): Systemy agrotechniczne. Polska Izba Gospodarcza Maszyn i Urządzeń Rolniczych, 2019.
19. Wilkin J., Hałasiewicz A., Jadczyszyn T., Jasiński J., Korta G., Milczarek-Andrzejewska D., Taszakowski J., Bański J.: Ziemia ginącym i podlegającym degradacji zasobem rolnictwa i obszarów wiejskich. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa (FDPA), 2018.
20. Woźniak M.: Polska jako kraj o potencjale do intensywnego rozwoju inteligentnego rolnictwa. Intercathedra, 2021, **2(47)**: 97-102.
21. Wykaz producentów w rolnictwie ekologicznym – Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych—Portal Gov.pl. (n.d.). Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych. Retrieved 19 May 2025; <https://www.gov.pl/web/ijhars/udostepnianie-informacji-o-producentach-w-rolnictwie-ekologicznym-1>
22. Wykaz szkół rolniczych – Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi – Portal Gov.pl. (n.d.). Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Retrieved 13 May 2025; <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/wykaz-szkol-rolniczych>
23. Ziętara W., Mirkowska Z.: Rolnictwo ekologiczne w Polsce – uwarunkowania i kierunki rozwoju. Wieś i Rolnictwo, 2024, **202(1)**: 69-93.

Adres do korespondencji:

*dr Małgorzata Kozak
Zakład Geomatyki
IUNG-PIB*

*ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 769*

e-mail: Malgorzata.Kozak@iung.pulawy.pl

AUTOR
Małgorzata Kozak

ORCID
000-0003-4595-2825

Magdalena Borzęcka

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ROLA NARZĘDZI INTERNETOWYCH W SZERZENIU WIEDZY
NA TEMAT BIOGOSPODARKI ORAZ BUDOWANIU WSPÓŁPRACY
MIĘDZY PODMIOTAMI*

Słowa kluczowe: narzędzia internetowe, DSS, geoportal, biogospodarka

Wstęp

Rola nauki w procesie wspierania innowacyjności i konkurencyjności rolnictwa polega przede wszystkim na: prowadzeniu rzetelnej analizy aktualnej sytuacji sektora rolnego i przemysłu spożywczego; ocenie możliwości praktycznego wykorzystania wyników badań naukowych; tworzeniu i udostępnianiu nowych technologii oraz systemów produkcji, które uwzględniają zarówno wymagania jakościowe konsumentów i przetwórców, jak i ich wpływ na środowisko naturalne; identyfikowaniu barier utrudniających wdrażanie postępu technologicznego i organizacyjnego; całościowej analizie efektów wprowadzania innowacji w wymiarze produkcyjnym, ekonomicznym, społecznym i ekologicznym, a także na formułowaniu propozycji narzędzi instytucjonalnych, prawnych i finansowych wspierających proces rozwoju innowacyjności oraz wzmacniania konkurencyjności sektora rolno-spożywczego (Krasowicz i in. 2023). W związku z tym rola narzędzi internetowych w szerzeniu wiedzy o biogospodarce i budowaniu współpracy między podmiotami jest dziś kluczowa, szczególnie w kontekście transformacji ku gospodarce cyrkularnej, neutralnej klimatycznie i opartej na odnawialnych zasobach.

Biogospodarka polega na wykorzystaniu odnawialnych surowców do produkcji dóbr i usług codziennego użytku. Szeroka gama upraw rolniczych oraz przemysłowo-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

wych zapewnia duży wybór biomasy do rozwoju bioprzemysłu. Jak wynika z raportu Polska wieś i rolnictwo 2023 przedstawionego przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, mieszkańcy wsi coraz częściej uważają, że sytuacja polskiego rolnictwa pogarsza się, szczególnie jeśli chodzi o niską opłacalność produkcji rolnej, która zależy od kilku czynników: trudnych warunków uprawy, coraz częstszych susz, czy drogich nawozów mineralnych. Biogospodarka jest potrzebna w transformacji systemu ekonomicznego, przyczyniając się do dekarbonizacji gospodarek oraz zmniejszenia niedoborów surowców nieodnawialnych, tak aby stopniowo zastępować produkcję opartą na paliwach kopalnych i funkcjonować zgodnie z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym (Brenne 2022, Holden 2022). Przeprowadzone w ramach projektu BioRural analizy potrzeb interesariuszy, innowacyjnych pomysłów i zainteresowań dotyczących biorozwiązań dla obszarów wiejskich pokazują, że największymi barierami dla ich przyjęcia wskazywanymi przez polskich rolników są brak środków finansowych, jasnych wytycznych lub krajowej strategii biogospodarki, a także niewystarczająca wiedza. To samo badanie wskazało długoterminowe korzyści ekonomiczne, rosnący popyt konsumentów lub zachęty finansowe jako czynniki napędzające wdrażanie biorozwiązań przez praktyków. Najnowsze dane pokazują, że sektory biogospodarki UE zajmujące się produkcją i przetwarzaniem biomasy wygenerowały 812 mld euro wartości dodanej w 2022 r., co stanowi ok. 5,0% PKB UE i rośnie o 12% w ujęciu nominalnym w porównaniu z 2021 r. Ponadto sektory te stworzyły 17,2 mln miejsc pracy w 2022 r., co stanowi 8,0% całkowitego zatrudnienia w UE (López i in. 2022). Choć tak duża liczba miejsc pracy w Unii Europejskiej generowana jest w biogospodarce, sektor pierwotny – taki jak rolnictwo i leśnictwo – odpowiada jedynie za niewielką część całkowitego obrotu i wartości dodanej. Wśród głównych przyczyn tej dysproporcji Komisja Europejska wskazuje niewystarczające kompetencje producentów biomasy w zakresie zarządzania pozostałościami i przetwarzania produktów ubocznych (European Commission 2023). Podczas gdy liczba miejsc pracy jest podobna do tej z 2021 r., niektóre rodzaje działalności związanej z produkcją biopochodną, takie jak biochemikalia, farmaceutyki, tworzywa sztuczne i guma lub produkcja wyrobów z drewna, wykazały wzrost liczby zatrudnionych osób (López i in. 2022). Komisja Europejska wskazuje, że choć zatrudnienie w sektorze biogospodarki jest wysokie, wartość dodana i zyski koncentrują się głównie w sektorach przetwórczych i usługowych, a nie w sektorze pierwotnym. Podkreśla się również potrzebę podnoszenia kwalifikacji oraz wsparcia rolników i leśników w zakresie innowacji oraz wdrażania rozwiązań cyrkularnych (European Commission 2023).

Najnowsze narzędzia cyfrowe opracowane w celu promowania wdrażania biorozwiązań na obszarach wiejskich mogą poprawić ich sytuację ekonomiczną. Ponadto narzędzia internetowe umożliwiają dostęp do zasobów wiedzy, które to oferują repozytoria materiałów edukacyjnych, baz danych, modeli biznesowych i studiów przypadku. E-learning i zawarte tam szkolenia (interaktywne kursy, webinary i MOOC-i)

mogą służyć jako wsparcie w kształceniu rolników, przedsiębiorców, decydentów i obywateli, natomiast infografiki, filmy i quizy online promują wiedzę o korzyściach biogospodarki (np. BBioNets Toolkit) oraz zwiększają świadomość społeczeństwa. Internetowe narzędzia mogą zostać wykorzystane do wspierania i budowania współpracy oraz sieciowania interesariuszy. Mapowanie interesariuszy i zasobów może się odbywać poprzez interaktywne mapy, które pomagają lokalizować partnerów, dostępne technologie i źródła biomasy. Tworzenie wspólnot praktyków, takich jak fora, czaty i platformy wymiany (tzw. żywe laboratoria, ang. *Living Labs*) sprzyjają interakcji między nauką, przemysłem i społecznościami lokalnymi (Jałocha 2023). Narzędzia typu DSS (ang. *Decision Support Systems*) pomagają grupom interesariuszy wybierać najlepsze ścieżki rozwoju (Łatuszyńska 2010). Cyfrowe narzędzia umożliwiają zbieranie i analizę danych o biomacie za pomocą systemów GIS i ich rozwój jest bardzo potrzebny (Scarlat i in. 2019).

Narzędzia cyfrowe odgrywają kluczową rolę w rozwoju biogospodarki, oferując możliwości w zakresie monitorowania, analizy danych, współpracy i zgodności regulacyjnej. Jednak ich skuteczna implementacja wymaga uwzględnienia barier technicznych, społecznych i instytucjonalnych oraz dostosowania polityk i strategii do specyfiki sektora. Z danych zawartych w bazie CORDIS-u wynika, że w Polsce od 2012 r. przeprowadzono 151 projektów w zakresie szeroko rozumianej biogospodarki, a 132 z nich uwzględniały prace nad narzędziami internetowymi wspierającymi rozwój biogospodarki.

W ramach projektów finansowanych przez Unię Europejską, takich jak BioRural, MainstreamBIO oraz BBioNets, opracowano zestawy narzędzi (toolkits), które mają na celu wspieranie wdrażania rozwiązań opartych na biogospodarce na szczeblu lokalnym, regionalnym i krajowym.

Celem tej pracy jest analiza i porównanie wyżej wymienionych narzędzi, których głównym zadaniem jest wsparcie decydentów, przedsiębiorców, rolników i organizacji społeczeństwa obywatelskiego w takich działaniach, jak:

- rozpoznanie lokalnego potencjału biomasy;
- projektowanie modeli biznesowych;
- ocena wpływu środowiskowego i ekonomicznego;
- identyfikacja barier i możliwości wdrażania innowacji.

Wyniki i dyskusja

MainstreamBIO

Zestaw narzędzi cyfrowych opracowany w ramach projektu **MainstreamBIO** tworzy możliwości, wsparcie i porady dostosowane do producentów biomasy, przedstawicieli biznesu i właścicieli technologii, wpisując się w koncepcję biogospodarki o obiegu zamkniętym. Platforma wspiera partnerstwa mające na celu pokonywanie

barier i wprowadzanie bioinnowacji na rynek z praktycznym wsparciem innowacji, przyspieszając rozwój już dostępnych produktów i usług biopochodnych. Równolegle tworzony jest zestaw narzędzi cyfrowych w celu dostosowania biotechnologii, innowacji społecznych i dobrych praktyk w zakresie recyklingu składników odżywczych, dostępnej biomasy i trendów rynkowych, a także w celu poszerzenia wiedzy na temat biogospodarki poprzez edukacyjny pakiet zasobów opartych na istniejących wynikach badań i narzędziach. Zestaw narzędzi cyfrowych prezentuje szeroki zakres biotechnologii na małą skalę, innowacyjnych modeli biznesowych i rozwiązań społecznych (rys. 1). Zestaw narzędzi składa się z siedmiu głównych komponentów przedstawionych poniżej:

Katalog małoskalowych rozwiązań biotechnologicznych: technologie, modele biznesowe i innowacje społeczne, do porównywania przypadków i oceny możliwości przedsięwzięć biznesowych.

Zbiór najlepszych praktyk w zakresie ulepszanego recyklingu składników odżywczych, aby skutecznie zarządzać recyklingiem składników odżywczych i materii organicznej z powrotem do gleby.

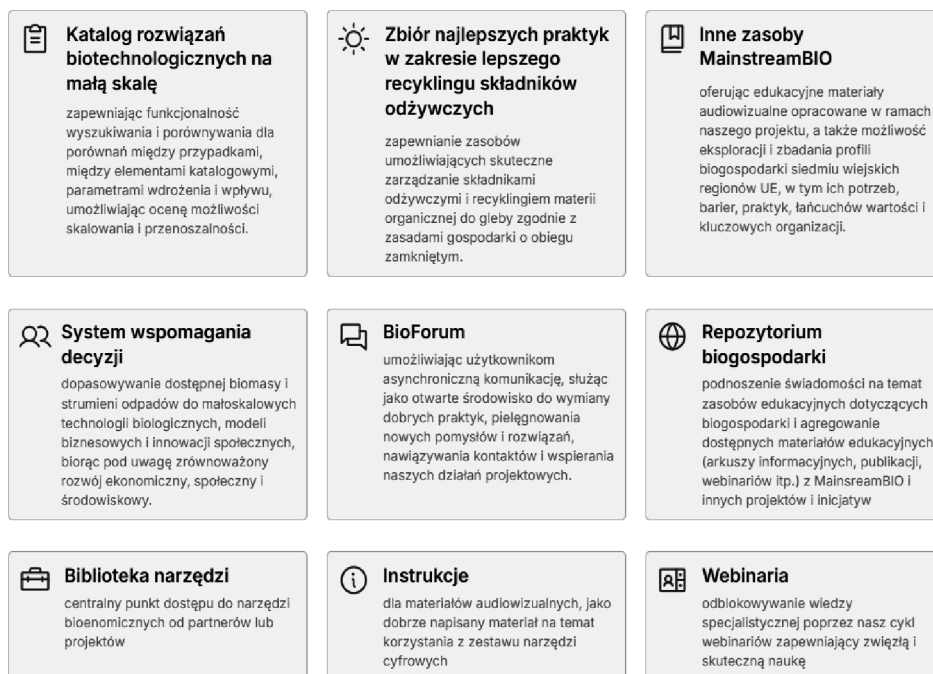
System wspomagania decyzji, który pomaga użytkownikom dopasować dostępną biomasę i strumień odpadów do małoskalowych technologii biotechnologicznych, modeli biznesowych i innowacji społecznych.

Repozytorium biogospodarki, którego celem jest agregacja materiałów edukacyjnych z projektów biotechnologicznych i podnoszenie świadomości na temat zasobów edukacyjnych biogospodarki.

Biblioteka narzędzi, która zapewnia użytkownikom dostęp do wielu narzędzi biogospodarki (mapowanie zasobów biologicznych, katalogi, narzędzie wartości strumienia pobocznego itp.) z innych projektów związanych z biogospodarką. BioForum do komunikacji, wymiany pomysłów, rozwiązań i dobrych praktyk oraz nawiązywania kontaktów z innymi członkami MIP.

Zasoby MainstreamBIO – eksploracja szeregu zasobów dostosowanych do wspierania projektów biotechnologicznych, w tym wytycznych i filmów.

Wprowadzenie do zestawu narzędzi cyfrowych MainstreamBIO jest dostępne online, oferując kompleksowe podsumowanie zasobów i jasne instrukcje dotyczące optymalnego wykorzystania zestawu narzędzi zarówno w formacie wideo, jak i tekstowym.



Rys. 1. Struktura platformy wiedzy online MainstreamBIO

Źródło: https://mainstreambio-digital-toolkit.eu/?lang=en_us&intro=yes

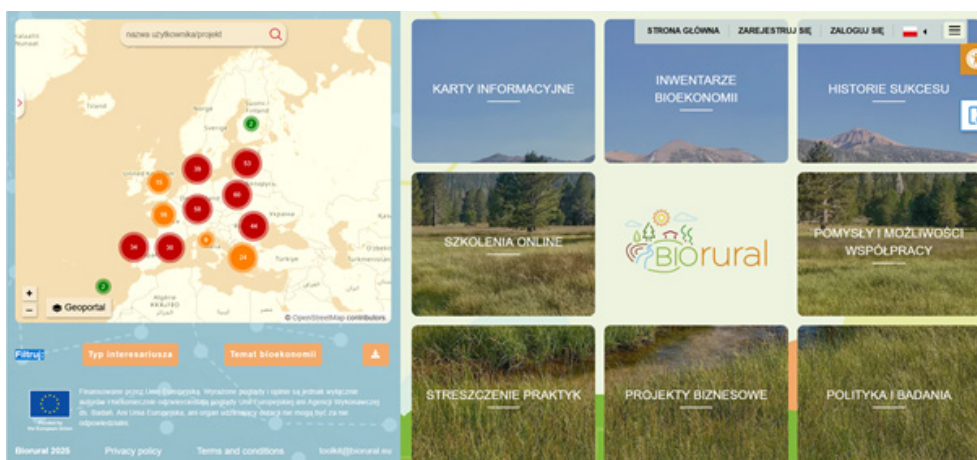
BioRural

Repozytorium rozwiązań bioopartych umożliwiających interakcję między aktorami wiejskimi oraz wspierające przejście z gospodarki liniowej na cyrkularną opracowane w projekcie BioRural jest dostępne na stronie internetowej <https://biorural-toolkit.eu/> (rys. 2).

Celem zestawu narzędzi BioRural jest zniwelowanie luki między innowacjami a rzeczywistymi potrzebami obszarów wiejskich poprzez promowanie wdrażania rozwiązań biopochodnych w społecznościach lokalnych. Zestaw narzędzi obejmuje kilka kluczowych komponentów. Jednym z nich jest inwentarz rozwiązań biopochodnych stanowiący żywą bazę danych, która zawiera skalowalne technologie, dobre praktyki oraz modele biznesowe dostosowane do specyfiki kontekstu wiejskiego. Umożliwia on lokalnym interesariuszom wybór i adaptację rozwiązań najbardziej odpowiadających ich potrzebom. Zasoby dotyczące podwyższania świadomości i szkoleń zawierają materiały do działań informacyjnych, materiały szkoleniowe oraz moduły edukacyjne, które wspierają proces wdrażania poprzez budowanie wiedzy i kompetencji społeczności wiejskich. Zasoby zawierające ocenę barier oraz czynników sprzyjających wdrażaniu innowacji uwzględniają aspekty społeczne, technolo-

giczne, ekonomiczne, środowiskowe i regulacyjne. Dzięki temu użytkownicy mogą trafnie ocenić potencjał wdrożeniowy danego rozwiązania.

Mapa ekosystemu innowacji przedstawia w formie wizualnej kluczowe podmioty, infrastrukturę oraz sieci działające w ramach regionalnych biogospodarek. Ułatwia to identyfikację potencjalnych partnerów oraz zrozumienie powiązań w systemie innowacji. Właśnie to narzędzie wspiera **sieciowania interesariuszy** oraz **wymianę wiedzy** w kontekście rozwoju biogospodarki na obszarach wiejskich w Europie. Po zalogowaniu do platformy uzyskujemy unikatowy dostęp do bazy interesariuszy z całej Europy zrzeszonych w ramach tworzonej europejskiej sieci obszarów wiejskich.



Rys. 2. Struktura platformy wiedzy online BioRural

Źródło: <https://biorural-toolkit.eu/>

BBioNets

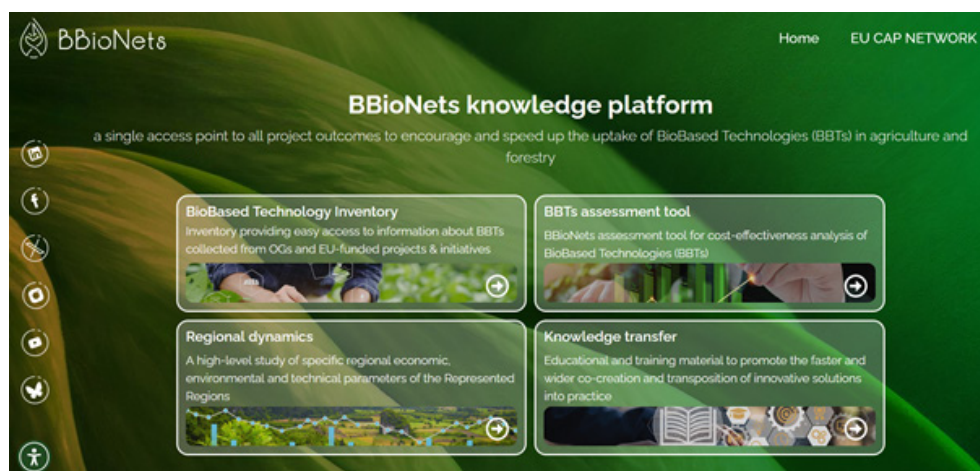
Platforma wiedzy wspierająca wdrażanie technologii bioopartych w rolnictwie i leśnictwie, oparta na modelu kwintuple helix i podejściu wieloaktorowym. Platforma BBioNets została zaprojektowana w celu zapewnienia dostępu do materiałów zebranych podczas realizacji projektu za pośrednictwem przyjaznego użytkownikowi, intuicyjnego interfejsu (rys. 3). Platforma będzie funkcjonować jako bezpłatne repozytorium online i stopniowo integrować wszystkie istotne wyniki generowane w ramach BBioNets. Pierwsza sekcja platformy wiedzy BBioNets przedstawia wyniki wysiłków partnerów w celu identyfikacji i analizy technologii opartych na biologii opracowanych i wdrożonych przez grupy operacyjne EIP-AGRI. Zebrane informacje (tj. inwentaryzacja BBT) są prezentowane w przejrzysty i zwięzły sposób, dostosowany do potrzeb rolników i leśników. Sekcja ta umożliwi użytkownikom przeglądanie lub filtrowanie informacji na podstawie określonych kategorii.

Narzędzie online do analizy opłacalności BBT oferuje ilościową (koszty inwestycji, koszty operacyjne, zdolność przetwórcza itp.) i jakościową (wartość dodana, złożoność

procesu itp.) ocenę BBT. Jego celem jest ułatwienie procesu dopasowywania dostępnych technologii do potrzeb i zasobów interesariuszy z sektora rolnictwa i leśnictwa.

Sekcja dynamiki regionalnej prezentuje takie wyniki, jak parametry ekonomiczne, środowiskowe i techniczne reprezentowanych regionów. Użytkownicy mają możliwość uzyskania szczegółowych informacji o wybranym regionie, w tym ogólnego opisu dostępnych zasobów, gospodarki ze szczególnym uwzględnieniem sektorów rolnictwa i leśnictwa, najnowocześniejszego sposobu waloryzacji biomasy, a także analizy grup operacyjnych w regionie.

Ostatnia sekcja przeznaczona jest na prezentację materiałów edukacyjnych i szkoleniowych dostosowanych do potrzeb Reprezentowanych Regionów (RR). Zasoby będą obejmować streszczenia praktyk, infografiki, arkusze informacyjne, wideoreferencje producentów podstawowych, którzy zastosowali określone BBT, krótkie filmy opisowe BBT itp. zaprojektowane tak, aby były zarówno przydatne, jak i angażujące.



Rys. 3. Struktura platformy wiedzy online BBioNets

Źródło: <https://bbionets-platform.eu/>

Porównywane narzędzia przeznaczone są głównie do promowania małoskalowych rozwiązań bezpośrednio lub pośrednio dla rolnika (tab. 1). W projekcie **Mainstream-BIO** stworzono szereg narzędzi mających na celu ułatwienie wdrażania rozwiązań biopochodnych w małych i średnich przedsiębiorstwach oraz gospodarstwach rolnych. Centralnym elementem zestawu jest interaktywne narzędzie wspierające podejmowanie decyzji (ang. *Decision Support Tool*), które pozwala użytkownikom analizować lokalny potencjał biomasy, oceniać wykonalność konkretnych modeli biznesowych i otrzymywać spersonalizowane rekomendacje. Z kolei projekt **BioRural** koncentruje się na przekształcaniu europejskich obszarów wiejskich w dynamiczne ośrodki innowacji biogospodarczej poprzez adaptację innowacji na małą skalę. Główne narzędzie

to BioRural Toolkit, czyli otwarta baza danych zawierająca przykłady skalowalnych technologii (historie sukcesu), modeli biznesowych oraz praktyk dostosowanych do warunków wiejskich. Uzupełnieniem zestawu są takie narzędzia, jak geoportal, który dostarcza informacji na temat dostępności biomasy oraz mapa umożliwiająca cyfrową identyfikację i analizę lokalnych interesariuszy, która wizualizuje sieci podmiotów zaangażowanych w rozwój regionalnej biogospodarki. Narzędzia te charakteryzują się dużą użytecznością informacyjną i są dostosowane do potrzeb władz lokalnych i organizacji społecznych. Trzecim projektem, który wyróżniono, jest **BBioNets**, którego celem jest rozwój regionalnych ekosystemów innowacji w biogospodarce poprzez budowanie współpracy i wspólne projektowanie rozwiązań. W tym przypadku na wyróżnienie zasługuje narzędzie do oceny technologii biologicznych. Narzędzia BBioNets charakteryzują się wysoką interaktywnością i są skierowane głównie do decydentów, organizacji badawczych oraz klastrów innowacji.

Tabela 1

Porównanie narzędzi internetowych

Projekt	Cel główny	Kluczowe komponenty	Grupa docelowa	Dostępność językowa
BioRural	promowanie małoskalowych rozwiązań bioopartych w obszarach wiejskich	interaktywna mapa, historie sukcesu, fakty, modele biznesowe, abstrakty praktyczne, wytyczne polityczne	rolnicy, innowatorzy uczniowie, doradcy, decydenci, obywatele	16 europejskich języków
MainstreamBIO	wprowadzenie małoskalowych rozwiązań bioopartych do praktyki w Europie	katalog technologii, system wspomagania decyzji, biblioteka narzędzi, repozytorium edukacyjne, forum	rolnicy, uczniowie, doradcy, innowatorzy, MŚP, platformy wieloaktorowe	24 europejskie języki
BBioNets	wsparcie wdrażania biotechnologii opartych na rolnictwie i leśnictwie	narzędzie oceny BBT, platforma wiedzy, materiały edukacyjne, filmy, infografiki, abstrakty praktyczne	rolnicy, leśnicy, sieci AKIS	język angielski

Źródło: opracowanie własne

Wszystkie trzy projekty zidentyfikowały podobne bariery, które utrudniają wdrażanie innowacji opartych na biosurowcach, szczególnie na obszarach wiejskich. Jednym z kluczowych wyzwań jest brak kapitału finansowego. Małe i średnie przedsiębiorstwa (MŚP) często mają trudności z dostępem do finansów potrzebnych do wejścia lub

ekspansji w biogospodarce. Ponadto wysokie koszty początkowe związane z opracowywaniem i przyjmowaniem biotechnologii zostały uznane za główne ograniczenie, szczególnie dla małych podmiotów o ograniczonej elastyczności finansowej. Ponadto postrzegane ryzyko finansowe związane z inwestowaniem w technologie wschodzące zniechęca inwestorów prywatnych, szczególnie w fazie skalowania od pilotażu do wdrożenia przemysłowego. Inną znaczącą barierą jest rozdrobniona współpraca między interesariuszami, która ogranicza wymianę wiedzy i integrację łańcucha wartości. Stwierdzono również, że wiele przedsiębiorstw wiejskich cierpi z powodu niskiej świadomości i ograniczonej wiedzy na temat możliwości wykorzystania biosurowców.

Podsumowanie

W ostatnich latach w ramach projektów finansowanych z programu Horyzont Europa powstało wiele narzędzi cyfrowych wspierających rozwój biogospodarki w Europie. Wśród nich szczególnie wyróżniają się rozwiązania opracowane w projektach MainstreamBIO, BioRural oraz BBioNets, które odpowiadają na zróżnicowane potrzeby interesariuszy – od rolników, przez samorządy, po instytucje badawcze.

Podsumowując, wszystkie trzy projekty oferują cenne i komplementarne zestawy narzędzi cyfrowych, które wspierają rozwój biogospodarki w różnych kontekstach regionalnych. MainstreamBIO stawia na praktyczne wdrażanie rozwiązań biopochodnych przez rolników i MŚP, BioRural wspiera adaptację innowacji na terenach wiejskich, natomiast BBioNets koncentruje się na tworzeniu i koordynowaniu regionalnych ekosystemów innowacji. Pomimo różnic wszystkie projekty podkreślają znaczenie współpracy, wymiany wiedzy i dostosowania technologii do lokalnych uwarunkowań jako kluczowych czynników sukcesu transformacji w kierunku zrównoważonej biogospodarki. Każdy z przedstawionych zestawów narzędzi oferuje unikalne zasoby dostosowane do specyficznych potrzeb różnych grup interesariuszy w zakresie biogospodarki. Wybór odpowiedniego narzędzia zależy od konkretnych celów użytkownika, takich jak wdrażanie technologii bioopartych, rozwój strategii regionalnych czy edukacja i budowanie sieci współpracy.

Literatura

1. BBioNets Platform; <https://bbionets-platform.eu/> (dostęp 15.06.2025).
2. BioRural toolkit; <https://biorural-toolkit.eu/> (dostęp 15.06.2025).
3. B r e n n e R.: European Bioeconomy Strategy: Stocktaking and future developments. Digitisation of biology for circular bioeconomy applications. 2022. Bioeconomy and Food System Unit, European Commission.
4. European Commission.. Bioeconomy strategy progress report. Publications Office of the European Union, 2023. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/48127>
5. H o l d e n N.M., A readiness level framework for sustainable circular bioeconomy. EFB Bioeconomy Journal, 2022, **2**, 100031.

6. J a ł o c h a B.: Wykorzystanie koncepcji living labu w praktyce zarządzania (z) interesariuszami projektów. *Studia i prace. Kolegium Zarządzania Finansów. Zeszyt Naukowy* 2023, **193**: 107-120.
 7. K r a s o w i c z S., Matyka M., Madej A.: Zmiany w polskim rolnictwie w latach 1950–2020 a kierunki działalności IUNG-PIB. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2023, **70(24)**: 9-37.
 8. L ó p e z J., Hermoso H., Tamošiūnas S., Porc O., Poranki N., M'barek R: Jobs and wealth in the EU bioeconomy / JRC – Bioeconomics. European Commission, Joint Research Centre (JRC) 2022 [Dataset] PID: <http://data.europa.eu/89h/7d7d5481-2d02-4b36-8e79-697b04fa4278>
 9. Ł a t u s z y Ń s k a A.: Przestrzenne systemy wspomagania decyzji. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Studia Informatica*, 2010, **26**: 89-103.
 10. MainstreamBIO Toolkit; https://mainstreambio-digital-toolkit.eu/?lang=en_us&intro=yes (dostęp 15.06.2025)
 11. S c a r l a t N., Fahl F., Lugato E.: Monforti-Ferrario F., Dallemand J.F. Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe. 2019, **122**: 257-269.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Magdalena Borzęcka
Zakład Geomatyki
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 761
e-mail: mborzecka@iung.pulawy.pl

AUTOR
Magdalena Borzęcka

ORCID
000-0002-3105-3370

Tytus Berbeć

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

IŁOŚĆ ŚLADU WĘGLOWEGO GENEROWANEGO
PRZEZ ALGORYTMY AI I MASZYNY W ROLNICTWIE CYFROWYM
W KONTEKŚCIE ZMIAN KLIMATU*

Słowa kluczowe: rolnictwo odporne na zmiany klimatu, innowacje technologiczne, rolnictwo 4.0, rolnictwo precyzyjne, historia rolnictwa precyzyjnego, internet rzeczy (IoT)

Wstęp

Współczesne rolnictwo cyfrowe (rolnictwo 4.0) stoi przed trudnymi wyzwaniami, które wymuszają potrzebę zwiększania światowej produkcji żywności, adaptacji do szybko postępującej zmiany klimatu czy wywierania dużej presji na zmniejszenie degradacji środowiska naturalnego. Rolnictwo napędzane przez sztuczną inteligencję (AI), w tym algorytmy głębokiego uczenia i jej poszczególne elementy, oferuje szereg możliwości zwiększenia wydajności produkcji czy stabilnej odporności systemów żywnościowych, które mają szansę zrewolucjonizować sektor poprzez możliwość stosowania nawozów czy środków ochrony roślin w sposób precyzyjny. Dzięki zaawansowanej analizie obrazów teledetekcji nisko- i wysokopułapowej możliwe jest generowanie precyzyjnych map, np. do sterowania autonomicznych maszyn rolniczych, zbierania informacji o stanie kondycji roślin czy prognozowania plonów. Kluczowe w rozwoju rolnictwa 4.0 jest dokonywanie obliczeń przez AI z wykorzystaniem ogromnych zbiorów danych, ich generowaniem, przetwarzaniem i analizą, co wywiera negatywny wpływ na środowisko poprzez wykorzystywanie ogromnych ilości energii. Budowanie sieci infrastruktury technologicznej od energochłonnych serwerowni po produkcję, wykorzystanie i utylizację narzędzi obliczeniowych, czyli elementy pracujące na rzecz rolnictwa 4.0 i 5.0, generują znaczący ślad węglowy,

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

o ilościach których nie każdy zdaje sobie sprawę. Wciąż rosnąca zależność od technologii opartych na algorytmach sztucznej inteligencji może rodzić pytanie o prawdziwe koszty ich wykorzystania przez rolników, szczególnie o ślad węglowy związany z ogromnym zapotrzebowaniem na energię niezbędną do napędzenia modeli treninowych i zasilania serwerowni (Strubell i in. 2019). Niniejszy artykuł przedstawia próbę przeanalizowania wpływu AI na rolnictwo cyfrowe, bilansując jej pozytywny wkład w mitygację i adaptację z generowanym przez nią śladem węglowym. W pracy została wykorzystana metoda oceny cyklu życia (LCA) do przeprowadzenia analizy emisji wygenerowanej i unikniętej.

Wyniki i dyskusja

Światowe rolnictwo jako jeden z głównych sektorów gospodarki znajduje się obecnie w centrum globalnego kryzysu klimatycznego. Jest on szczególnie również ze względu na złożoność systemu produkcji żywności, ponieważ odgrywa rolę zarówno jednego z największych emiterów dwutlenku węgla, jak i zapewnia największą możliwość jego sekwestracji. Sektor rolniczy jest jednym z głównych źródeł antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych (GHG) do atmosfery. Chów bydła i zaspokajanie potrzeb żywnościowych człowieka odpowiada za dużą część globalnych emisji metanu (CH_4) i podtlenku azotu (N_2O). Cały cykl żywnościowy od pola do stołu, obejmujący ogół agrotechniki, produkcję rolną, przetwarzanie i dystrybucję, generuje około jednej trzeciej globalnych emisji GHG, przyczynia się do utraty bioróżnorodności i zużywa około dwie trzecie światowych zasobów wody słodkiej. Jednakże sektor ten jest wyjątkowo wrażliwy na skutki zmian klimatu. Rolnicy coraz częściej muszą zmagać się z efektami tych zmian w postaci ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak susze, powodzie, fale upałów, negatywne zmiany w rozkładzie i ilości opadów, erozja wodna i wietrzne gleby, zwiększona presja szkodników czy patogenów itp. Czynniki te bezprecedensowo zagrażają światowemu bezpieczeństwu żywnościowemu i stabilności dochodów rolników na całym świecie.

W obliczu wyzwań, jakie stoją przed współczesnym rolnictwem, można wskazać na konieczność całkowitej transformacji rolnictwa w kierunku modeli zrównoważonych i odpornych na zmiany klimatu. Wprowadzone strategie, takie jak Zielony Ład, „od pola do stołu” czy paszportyzacja żywności podkreślają potrzebę przejścia na gospodarkę o obiegu zamkniętym i redukcji degradacji środowiska. Transformacja wprowadzająca rolnictwo cyfrowe do powszechnego użytku jest również kluczowa dla osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju (SDGs) Organizacji Narodów Zjednoczonych, w szczególności: 2. Zero głodu; 6. Czysta woda i warunki sanitarne oraz 13. Działania w dziedzinie klimatu.

W odpowiedzi na wyzwania można wskazać na dwie kluczowe koncepcje kształtujące przyszłość rolnictwa cyfrowego. Jedną z nich jest rolnictwo czwartej generacji które opiera się na zbieraniu, przetwarzaniu i wykorzystywaniu ogromnych zbiorów

danych (big data) generowanych przez szereg czujników, sensorów rozmieszczonych w gospodarstwie w celu optymalizacji procesów produkcyjnych. Fundamentem tej koncepcji jest integracja zaawansowanych technologii, takich jak internet rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI), robotyka, autonomiczne maszyny czy wykorzystanie dronów i przekazanie szeregu informacji do chmury obliczeniowej. Głównym celem rolnictwa 4.0 jest zwiększenie efektywności produkcji i rentowności przy jednoczesnym promowaniu zrównoważonego rozwoju poprzez precyzyjniejsze zarządzanie gospodarstwem i zasobami w nim wykorzystywanymi.

Jako drugą kluczową koncepcję można wskazać rolnictwo przyjazne dla klimatu, które zostało zdefiniowane przez Organizację Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) oraz Bank Światowy (CSA, ang. *Climate-Smart Agriculture*). Jest to zintegrowane podejście do zarządzania gospodarstwem rolnym (uprawami, hodowlą, leśnictwem i rybołówstwem), które dąży do jednoczesnego osiągnięcia kilku kluczowych celów, wśród których można wskazać: zrównoważone zwiększenie produktywności rolniczej i rentowności gospodarstwa; adaptację i budowanie odporności systemów rolniczych na zmiany klimatyczne czy zredukowanie emisji gazów cieplarnianych lub w miarę możliwości usuwanie ich emiterów gazów w miejscach, w których jest taka możliwość. Rolnictwo przyjazne dla klimatu nie jest zbiorem uniwersalnych praktyk, lecz koncepcją zarządzania gospodarstwem rolnym, w którym promowane są technologie i strategie dostosowane do specyficznych warunków agroekologicznych i społeczno-ekonomicznych danego regionu.

Technologie cyfrowe, w tym sztuczna inteligencja, są powszechnie postrzegane jako główne narzędzia umożliwiające realizację celów rolnictwa przyjaznego dla klimatu. Ich zdolność do analizy ogromu złożonych danych w czasie rzeczywistym otwiera drogę do zwiększenia precyzji działania przy zarządzaniu i wykorzystaniu zasobów, co bezpośrednio przekłada się na mitygację emisji i zwiększenie zdolności adaptacyjnych współczesnego rolnictwa. Jednakże infrastruktura stanowiąca podstawę rolnictwa cyfrowego – od energochłonnych procesów produkcyjnych, przez globalne sieci telekomunikacyjne, po centra danych zasilające algorytmy AI, które pobierają ogromne ilości energii, wytwarzając duże ilości ciepła wymagające chłodzenia – generuje znaczący i wciąż rosnący ślad węglowy. Sektor technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT) odpowiada już za 2–4% globalnych emisji GHG, a prognozy wskazują na dalszy wzrost tego udziału (Malmodin i Lundén 2018). Systemy AI mogą stać się użytecznym narzędziem do redukcji emisji gazów cieplarnianych bezpośrednio w gospodarstwie. Algorytmy rolnictwa precyzyjnego pozwalają na optymalizację dawek nawozów makro- i mikroelementowych, co bezpośrednio ogranicza emisję np. podtlenku azotu (N_2O), czyli gazu o potencjale cieplarnianym blisko 300 razy większym niż CO_2 w perspektywie 100 lat (Sokal i Kachel 2025). Natomiast zastosowanie elementów AI w autonomicznych maszynach do precyzyjnych oprysków herbicydami czy fungicydami może zredukować nie tylko ilość stosowanych środków ochrony roślin, ale również zużycie paliwa przez ograniczenie liczby przejazdów

(Mogili i Deepak 2018). Ślad węglowy generowany przez sztuczną inteligencję AI nie jest monolitem i wynika z kilku kluczowych czynników. Należy przede wszystkim rozróżnić dwie fazy pracy modelu: trening i wnioskowanie. Badania Strubell i in. (2019) wykazały, że trening jednego, dużego modelu AI do przetwarzania języka naturalnego może wygenerować ponad 280 t ekwiwalentu CO₂, co odpowiada rocznej emisji całkowitego śladu węglowego generowanego przez 15 średniej wielkości gospodarstw domowych w Polsce. Chociaż jest to zazwyczaj koszt jednorazowy, złożoność modeli stale rośnie, a wraz z ewoluowaniem modeli rośnie ich zapotrzebowanie na energię elektryczną. Natomiast faza wnioskowania (ang. *inference*), czyli codzienne użytkowanie wytrenowanego modelu, jest jednostkowo znacznie mniej kosztowna energetycznie, ale przy masowym wdrożeniu jej skumulowany ślad węglowy może przewyższyć koszt treningu (Patterson i in. 2021). Przykładowo zużycie energii w lekkich zadaniach AI, takich jak NLP, wynosi średnio 5–15 W·h⁻¹, zadania cięższe polegające na wykrywaniu obiektów czy rozpoznawaniu twarzy potrzebuje pobrać ok. 14–40 W·h⁻¹, natomiast głębokie uczenie w czasie rzeczywistym czy obliczanie skomplikowanych algorytmów zużywa od 30 do 150 W·h⁻¹. Trenowanie dużego modelu głębokiego uczenia może wynosić w zależności od modelu od 500 do 1500 MWh. Kluczowe znaczenie ma tutaj infrastruktura sprzętowa i lokalizacja centrów danych. Emisje są bezpośrednio powiązane z miejscem, w którym sieci zasilają serwerownię. Trening tego samego modelu w centrum danych zasilanym energią odnawialną, np. elektrownią wodną, będzie miał znacznie niższy ślad węglowy niż w elektrowni wykorzystującej paliwa kopalne, np. węgiel (Luccioni i in. 2022). Ponadto efektywność energetyczna samego centrum jest opisywana wskaźnikiem PUE (ang. *Power Usage Effectiveness*), który zależy od wielu czynników. Przykładem może być porównanie energochłonnych procesorów GPU z bardziej wyspecjalizowanymi i oszczędniejszymi procesorami typu TPU/NPU. Przesyłanie 1 GB danych za pośrednictwem Internetu może pochłonąć 5–7 kWh energii. Systemy sztucznej inteligencji, które bazują na częstym przesyłaniu danych (głównie modele oparte na chmurze) mogą znacząco przyczynić się do zużycia energii. Na całym świecie centra danych obsługujące systemy sztucznej inteligencji są odpowiedzialne za zużycie ok. 2% całkowitej energii elektrycznej, a odsetek ten rośnie wraz z rozwojem AI.

Zatem, czy korzyści na poziomie gospodarstwa są częściowo niwelowane przez „ukryty” koszt środowiskowy zastosowania nowoczesnej technologii? Wciąż rosnące zapotrzebowanie na moc obliczeniową do trenowania i wdrażania modeli AI prowadzi do wzrostu zużycia energii, która w skali globalnej wciąż w dużej mierze pochodzi ze spalania paliw kopalnych, takich jak węgiel. Tworzy to złożony kompromis, w którym cyfrowa optymalizacja sektora rolnego może prowadzić do zwiększenia obciążenia środowiska naturalnego.

W związku z powyższym adekwatna staje się odpowiedź na pytanie, czy korzyści zmian w zarządzaniu gospodarstwem dotyczące poprawy klimatu wynikające z zastosowania AI w rolnictwie precyzyjnym przewyższają jej własny ślad węglowy?

Można postawić tezę, że ocena rzeczywistego wpływu zaimplementowania sztucznej inteligencji w zarządzaniu gospodarstwem rolnym i jej wpływu na klimat w całym sektorze rolniczym wymaga przeprowadzenia szeroko zakrojonych analiz, które bilansują emisje uniknięte dzięki optymalizacji działalności rolniczej z emisjami generowanymi w pełnym cyklu życia ogółu technologii AI. Wydaje się, że ostateczny wynik tak przeprowadzonej analizy może nie zostać rozstrzygnięty z powodu ogromu czynników, takich jak szereg zmiennych technologicznych (np. efektywność energetyczna algorytmów), operacyjnych (np. źródła zasilania) i politycznych (np. standardy zarządzania e-odpadami).

Modele AI stosowane w rolnictwie czwartej generacji rzadko osiągają skalę i złożoność największych modeli językowych. Aplikacje rolnicze często bazują na bardziej wyspecjalizowanych sieciach konwolucyjnych (CNN) służących do analizy danych spektralnych, których ślad węglowy jest mniejszy (Kamilaris i Prenafeta-Boldú 2018). Rosnąca liczba danych pochodzących z urządzeń IoT, dronów i satelitów prowadzi do potrzeby przetwarzania ogromnych zbiorów danych (big data), co generuje wysokie zapotrzebowanie na moc obliczeniową. W literaturze naukowej coraz częściej można natrafić na koncepcję Green AI promującą badania nad zieloną sztuczną inteligencją, która jest nie tylko pomocna, ale i wydajniejsza obliczeniowo (Schwartz i in. 2019). Do takich działań można zaliczyć tworzenie efektywniejszych modeli, które wymagają mniejszych nakładów energii poprzez takie techniki, jak kwantyzacja, tzw. pruning, czyli przycinanie sieci czy transfer wiedzy, które pozwalają na budowę mniejszych modeli bez znacznej utraty dokładności (Gupta i in. 2022). Ponadto oszczędności na zużyciu energii można znaleźć, zwiększając efektywność sprzętową poprzez projektowanie i wykorzystywanie dedykowanych, energooszczędnych układów scalonych (ASICs), takich jak Google TPU (ang. *Tensor Processing Unit*), które wykonują operacje AI znacznie wydajniej niż tradycyjne GPU (Jouppi i in. 2017). W ramach oszczędności energii ważnym elementem może okazać się wybór dostawców chmury, na której będą trenowane i wnioskowane modele, którzy zasilają swoje centra danych energią odnawialną czy rozwój oprogramowania, które może planować wykonanie najbardziej energochłonnych zadań obliczeniowych w porach, gdy w sieci energetycznej dostępny jest duży udział energii pochodzącej z OZE. Świadomość i transparentność są tu kluczowe. Postuluje się, aby badacze i deweloperzy raportowali nie tylko dokładność swoich modeli, ale również szacowali koszt obliczeniowy i ślad węglowy ich wytrenowania, co pozwoli na bardziej świadome wybory technologiczne. Zyskującą na popularności alternatywą dla przetwarzania danych w chmurze może być przetwarzanie danych na urządzeniu końcowym. Możliwość wykonywania obliczeń algorytmów bezpośrednio na autonomicznym ciągniku, dronie czy innym urządzeniu pracującym w gospodarstwie eliminuje potrzebę przesyłania ciężkich ilości danych do odległych centrów, co samo w sobie redukuje zużycie energii. Ponadto takie rozwiązanie sprzyja rozwojowi lekkich, zoptymalizowanych modeli, co wpisuje się w globalny trend dążenia do bardziej zrównoważonej sztucznej inteligencji (Varghese i in. 2021).

Historia rewolucji technologicznych, jaka miała miejsce na przełomie wieków w rolnictwie, uczy ostrożności. Doświadczenia płynące z zielonej rewolucji pokazały, że znaczący wzrost wydajności w wykorzystaniu zasobów (np. energii czy ziemi na jednostkę produktu) niekoniecznie prowadzi do absolutnej redukcji ich zużycia w skali globalnej. Zjawisko to, znane jako paradoks Jevonsa, polega na tym, że wzrost efektywności może stymulować popyt (większe zużycie zasobu), niwelując lub nawet odwracając początkowe oszczędności. Istnieje zatem realne ryzyko, że wykorzystując algorytmy AI, mające uczynić rolnictwo bardziej wydajnym, może nie przyczynić się do absolutnej redukcji jego śladu węglowego, a jedynie umożliwić dalszą, bardziej wydajną ekspansję i intensyfikację produkcji. Analiza netto musi zatem uwzględniać nie tylko bezpośrednie bilanse emisji, ale także potencjalne systemowe efekty odbicia.

Sztuczna inteligencja oferuje cały zbiór narzędzi, które mogą znacząco przyczynić się do transformacji rolnictwa w kierunku zgodnym z celami Climate-Smart Agriculture. Jej wkład można podzielić na mitygację emisji gazów cieplarnianych poprzez optymalizację wykorzystania zasobów oraz zwiększenie zdolności adaptacyjnych systemów rolnych do szybko podążających już zmian klimatu.

Rolnictwo precyzyjne, napędzane przez AI i IoT, umożliwia przejście od uśrednionego zarządzania całym polem do precyzyjnego dostosowywania działań do potrzeb poszczególnych jego części lub nawet pojedynczych roślin. Prowadzi to do wymiernych korzyści związanych z redukcją emisji gazów cieplarnianych GHG. Efekt ten najszybciej można zaobserwować podczas redukcji emisji podtlenku azotu (N_2O) z gleby. Nadmierne stosowanie nawozów azotowych z powodu braku wykonywania podstawowych zabiegów analitycznych, takich jak analizy glebowe, jest głównym źródłem emisji N_2O . Inteligentne systemy, wykorzystując dane z czujników IoT monitorujących w czasie rzeczywistym wilgotność i skład chemiczny gleby, pozwalają algorytmom AI na precyzyjne określenie zapotrzebowania roślin na makroelementy, w tym azot. Dzięki temu nawozy mogą być aplikowane tylko w niezbędnych ilościach, w odpowiednim czasie i konkretne miejsca, co minimalizuje ich straty w procesie ulatniania się nawozu do atmosfery. Zastosowanie zaawansowanych algorytmów w dronach i robotach polowych pozwala na precyzyjną detekcję chwastów oraz ognisk chorób i szkodników. Umożliwia to systemom opryskowym (tradycyjnym lub bezzałogowym) wykonywanie zabiegów punktowych, ograniczając aplikację środków chemicznych tylko do zainfekowanych fragmentów uprawy. Przykładem może być rozwiązanie firmy John Deere oferujące system See & Spray, który według doniesień może zredukować zużycie herbicydów w zależności od opryskiwanej powierzchni o 67% w roślinach zielonych do 77% w ugorze (Schrumpf 2021, Bedord 2022, Kalcevic 2022, Dulaney i in. 2023). Ograniczenie stosowania środków ochrony roślin zmniejsza ślad węglowy związany z ich produkcją, transportem i aplikacją.

W obliczu coraz częstszych susz efektywne gospodarowanie wodą staje się kluczowe dla wszystkich jej odbiorców. Wykorzystanie inteligentnych systemów nawadniających wspomaganych przez algorytmy AI w zakresie sterowania, analizujących

dane z czujników rozmieszczonych w glebie mierzących wilgotność, generujących prognozy pogody oraz dostarczających informacji z zakresu stanu fizjologicznego roślin ma na celu dostarczanie wody dokładnie wtedy, kiedy występuje aktualne, rzeczywiste zapotrzebowanie w ilościach minimalizujących jej straty przez ewaporację czy spływ powierzchniowy. Badania wykazują, że takie systemy są w stanie generować oszczędności na poziomie od 30% do nawet 50% wody w porównaniu z tradycyjnymi metodami nawadniania (Gulcay 2025). Dostarczanie mniejszych ilości wody w sposób precyzyjny może pozytywnie wpłynąć na zwiększenie oszczędności energii elektrycznej zużywanej do tłoczenia i przekazywania wody na duże odległości. Ponadto autonomiczne ciągniki czy roboty uprawowe, wykorzystujące nawigację GPS i algorytmy AI, mogą optymalizować trasy przejazdów po stworzeniu nowych ścieżek technologicznych, co pozwala na oszczędność paliwa, czasu i redukcję zużycia maszyn nawet do 10% (Labella-Fernandez 2021, LaFevor 2022). Przejście z tradycyjnego ciężkiego sprzętu rolniczego na lżejsze, w tym roboty i drony o napędzie elektrycznym, nie tylko bezpośrednio eliminuje emisje dwutlenku węgla generowanego przez silniki wysokoprężne, ale także zmniejsza zagęszczenie gleby, a tym samym jej degradację, co prowadzi do poprawy życia biologicznego i jej zdolności do sekwestracji węgla.

Oprócz ograniczania emisji gazów cieplarnianych algorytmy AI odgrywają kluczową rolę w zwiększaniu odporności rolnictwa na skutki zmian klimatu, które już dziś są odczuwalne zarówno przez rolników, jak i konsumentów. Jednym z największych wyzwań dla rolników są zmiany klimatu, a w związku z tym rosnąca nieprzewidywalność pogody. Modele sztucznej inteligencji, w szczególności te oparte na uczeniu maszynowym czy głębokim uczeniu, są w stanie analizować ogromne zbiory danych meteorologicznych zarówno historycznych, jak i aktualnych, zobrażenia satelitarne, dane z czujników terenowych, w celu tworzenia precyzyjnych, lokalnych prognoz pogody czy przewidywania ekstremalnych zjawisk meteorologicznych, takich jak susze czy powodzie. Badania wskazują, że takie modele mogą prognozować plony z niezwykle dokładnością (Goel i Pandey 2024, Vardhan i in. 2025). Daje to rolnikom czas na podjęcie działań adaptacyjnych, takich jak dostosowanie uprawy do warunków siedliskowych, zmiana terminów siewu, zabezpieczenie infrastruktury czy optymalizacja nawadniania przed nadejściem wspomnianych zjawisk. Wykorzystanie algorytmów jest w stanie zrewolucjonizować proces hodowli odmian roślin nowych, bardziej odpornych czy dostosowanych do aktualnych i przyszłych warunków meteorologicznych. Tradycyjne metody hodowlane są czasochłonne i kosztowne. Wykorzystanie sztucznej inteligencji, w tym algorytmów uczenia maszynowego, może przyspieszyć ten proces, analizując złożone dane genomiczne, fenotypowe i środowiskowe w celu identyfikacji genów i ścieżek molekularnych odpowiedzialnych za pożądane cechy, w tym tolerancję na suszę, zwiększone zasolenie gleby czy zwiększoną odporność na wysoką temperaturę. Po zidentyfikowaniu takich genów, narzędzia inżynierii genetycznej, jak precyzyjna technologia CRISPR-Cas9, mogą być wykorzystane do tworzenia odmian dostosowanych do pogarszających się warunków

klimatu w znacznie krótszym czasie. Przykładem udanych interwencji genetycznych jest edycja genu ARGOS8 w kukurydzy, która miała na celu zwiększenie plonów w warunkach suszy oraz modyfikacja genów z rodziny PYL w ryżu w celu nadania mu odporności na stres cieplny (Yu i in. 2024, Syeda 2025).

Plonowanie roślin w dużej mierze można zwiększyć poprzez zastosowanie algorytmów AI, natomiast jednym z głównych czynników kształtujących finalny plon roślin jest uprawa na glebie bogatej w materię organiczną. Uprawa na tego typu glebach jest znacznie wydajniejsza ze względu na większą tolerancję na suszę i erozję, a także stanowi ważny rezerwuuar wody, węgla i życia biologicznego. Technologie AI, analizując dane pozyskiwane z różnych sensorów i obrazów satelitarnych, mogą precyzyjnie monitorować wysokość wód gruntowych, poziom węgla organicznego w glebie, jej strukturę i aktywność mikrobiologiczną. Umożliwia to rolnikom wdrażanie i weryfikację skuteczności praktyk rolnictwa konserwującego (np. uprawa bezorkowa) i regeneratywnego, które w sposób aktywny zwiększają ilość materii organicznej oraz sekwestrację CO₂ z atmosfery, przyczyniając się zarówno do mitygacji, jak i adaptacji.

W tabeli 1 w sposób syntetyczny zostały przedstawione przykładowe podwójne zastosowania AI w kontekście klimatycznym oraz, jaką rolę odgrywa ona we współczesnym rolnictwie. Ze względu na korzyści działania podzielono na dwie grupy: adaptacyjną (A) oraz mitygacyjną (M). Adaptacyjna skupia się na zwiększaniu odporności różnych systemów gospodarowania na już zachodzące zmiany klimatu, takie jak susze i inne zjawiska ekstremalne oraz ich skutki. Mitygacja natomiast skupia się na redukcji wpływu rolnictwa na klimat w dużej mierze poprzez zmniejszenie emisji GHG i optymalizację zużycia zasobów naturalnych.

Tabela 1

Przegląd zastosowań AI w mitygacji i adaptacji rolnictwa do zmian klimatu

Domena technologiczna AI	Konkretnie zastosowanie	Potencjalna korzyść klimatyczna (mitygacja – M/adaptacja –A)	Powiązane technologie
Analityka predykcyjna/ML	prognozowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych (susze, powodzie)	A: wczesne ostrzeganie, minimalizacja strat w plonach, lepsze planowanie zasobów	big data, czujniki pogodowe, obrazowanie satelitarne
Analityka predykcyjna/ML	inteligentne nawadnianie	M: redukcja zużycia wody o 18–40%, oszczędność energii do pompowania; A: zwiększona odporność na suszę	IoT, czujniki wilgotności gleby

cd. tab. 1

Domena technologiczna AI	Konkretnie zastosowanie	Potencjalna korzyść klimatyczna (mitygacja – M/adaptacja –A)	Powiązane technologie
Widzenie komputerowe	precyzyjny oprysk herbicydami/pestycydami	M: redukcja zużycia środków ochronny roślin do 77%, mniejszy ślad węglowy produkcji i transportu	drony, roboty polowe
ML w genomice	identyfikacja genów odporności na stres abiotyczny	A: przyspieszenie hodowli odmian odpornych na suszę, upał, zasolenie	CRISPR-Cas9, sekwencjonowanie genomu
AI w robotyce	optymalizacja tras przejazdu maszyn autonomicznych	M: redukcja zużycia paliwa o ok. 10%, mniejsze emisje CO ₂	GPS, autonomiczne ciągniki
ML/AI	monitorowanie i zarządzanie zdrowiem gleby (sekwestracja węgla)	M: zwiększone magazynowanie węgla w glebie; A: poprawa retencji wody i odporności na erozję	czujniki gleby, obrazowanie satelitarne

Źródło: Wójcik-Gront i in. 2024; Arlanowa i in. 2025; Dulaney i in. 2023; Bedord 2022; Kalcevic 2022; Schrimpf 2022

Powyższa tabela w sposób skuteczny łączy abstrakcyjne domeny technologiczne, takie jak analityka predykcyjna czy widzenie komputerowe z ich docelowym zastosowaniem, jak np. inteligentne nawadnianie. Jednocześnie w tabeli 1 można zauważyć, jak poszczególne elementy technologii oraz ich zastosowania są powiązane technologicznie, np. IoT czy wykorzystanie dronów, które są niezbędne do wdrożeń przytoczonych rozwiązań. Można także stwierdzić, że AI nie jest pojedynczym narzędziem tylko ma cechy podobne do układu nerwowego, w którym mózgiem operacyjnym jest nowoczesne gospodarowanie. Sztuczna inteligencja pełni rolę integratora, który ma za zadanie powiązać dane ze wskazanymi technologiami, czego wynikiem jest decyzja.

Pomimo obiecującego potencjału AI w transformacji rolnictwa wdrożenie tych technologii w gospodarstwach rolnych nie jest obojętne i bezkosztowe dla środowiska. Pełna ocena wpływu zmian w gospodarowaniu wymaga zastosowania metodyki oceny cyklu życia (LCA), która pozwala na kwantyfikację śladu węglowego na wszystkich etapach transformacji – od produkcji sprzętu, przez jego użytkowanie, aż po utylizację. LCA jest ustandaryzowaną (ISO 14040 i ISO 14044) i międzynarodowo uznaną metodą kompleksowej analizy wpływu środowiskowego produktu, procesu lub usługi od jego początku aż do jego końca życia. Proces oceny składa się z czterech głównych, powiązanych ze sobą faz, takich jak: definicja celu i zakresu badania, analizy zbioru (inwentaryzacji) danych wejściowych i wyjściowych, ocena

wplywu na środowisko oraz końcowa interpretacja wyników. Celem oceny z wykorzystaniem LCA było oszacowanie śladu węglowego (wyrażonego w kilogramach ekwiwalentu dwutlenku węgla) generowanego przez kluczowe komponenty rolnictwa cyfrowego. Metoda ta jest coraz częściej stosowana do oceny zarówno pracy systemów rolniczych, jak i zaawansowanych technologii, w tym robotów i dronów. Ślad węglowy odnosi się do wszystkich emisji gazów cieplarnianych wygenerowanych przed rozpoczęciem użytkowania produktu. Jest to często dominujący składnik całkowitego śladu węglowego dla urządzeń elektronicznych. Faza produkcji sprzętu obejmuje energochłonne procesy wydobywania i przetwarzania surowców (metali, w tym pierwiastków ziem rzadkich, krzemu, tworzyw sztucznych), produkcję zaawansowanych komponentów elektronicznych (mikroprocesory, pamięci, czujniki) oraz montaż finalnych urządzeń. Dotyczy to całej gamy sprzętu wdrażanego w rolnictwie 4.0 (od prostych sensorów IoT przez kamery i moduły GPS, po skomplikowane drony i roboty polowe). Biorąc pod uwagę fakt, iż produkcja 1 kg włókna węglowego może generować od 20 do 30 kg CO₂, produkcja 1 kg stali – ok. 1,8 kg CO₂, a produkcja 1 kg aluminium (z surowców pierwotnych) – ok. 10–20 kg CO₂, wyprodukowanie maszyn rolniczych jest znaczącym źródłem emisji. Badania wskazują, że wyprodukowanie jednego robota przemysłowego o masie ok. 1000 kg może wygenerować nawet do 1,5 t CO₂ (Dahmus i Gutowski 2004, Ciceri i in. 2010). Kluczowe znaczenie ma tu rodzaj zastosowanych materiałów – lekkie kompozyty z włókna węglowego choć poprawiają wydajność operacyjną, to mają znacznie wyższy wbudowany ślad węglowy niż tradycyjna stal czy aluminium. Należy również uwzględnić emisje związane z produkcją elektroniki, takiej jak serwery, routery, kable światłowodowe oraz budowa fizycznych obiektów, w których mieszczą się centra danych i infrastruktura sieciowa. Emisja jest bezpośrednio związana ze zużyciem energii podczas działania technologii. Wielkość emisji zależy od wielu czynników, w tym od efektywności energetycznej sprzętu i oprogramowania oraz od architektury całego systemu. Proces uczenia modeli AI, zwłaszcza skomplikowanych modeli głębokiego uczenia, jest wysoce energochłonny. Wymaga on dostarczenia ogromnej ilości energii do wytwarzania mocy obliczeniowej, zazwyczaj dostarczanej przez klastry wyspecjalizowanych procesorów (GPU, TPU) w scentralizowanych centrach danych. Szacuje się, że sam proces treningu modelu językowego GPT-3 generuje ok. 552 t CO₂, co odpowiada rocznemu zużyciu energii przez ok. 120 amerykańskich gospodarstw domowych (Anthony i in. 2020). Globalne zużycie energii przez centra danych jest już porównywalne z konsumpcją energii przez całe państwa, takie jak Francja. Jednym z etapów trenowania jest proces inferencji. Jest to proces wykorzystania już wytrenowanego modelu do wykonania zadania (np. klasyfikacji obrazu, predykcji). Zużycie energii na pojedynczą inferencję jest znacznie niższe niż na sam trening, jednak proces ten jest wykonywany w sposób ciągły i na masową skalę, co sumarycznie generuje znaczące obciążenie energetyczne. Jedno zapytanie do ChatGPT może zużywać pięciokrotnie więcej energii niż standardowe wyszukiwanie w Google. W rolnictwie inferencja może zachodzić

w chmurze lub lokalnie, na urządzeniach polowych takich jak autonomiczne roboty czy drony. Zużycie energii przez maszyny autonomiczne zależy od ich masy, prędkości, od rodzaju terenu, przenoszonego ładunku, typu baterii oraz wielu innych czynników. Badania porównawcze wykazały, że zasilanie z wykorzystaniem pakietów litowo-polimerowych są znacznie bardziej wydajne energetycznie niż tradycyjne akumulatory kwasowo-ołowiowe ze względu na niższą masę i mniejszy opór wewnętrzny tych pierwszych. Wykorzystanie dronów rolniczych do oprysków czy nawożenia może być znacznie bardziej efektywne energetycznie niż metody konwencjonalne. Badanie Safaeinejada i in. (2025) wykazało niemal 2,5-krotnie niższe zużycie energii ($146,84 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$) w porównaniu z opryskiwaczem konwencjonalnym (zużycie na poziomie $365,26 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$) i niemal 3-krotnie niższy potencjał tworzenia efektu cieplarnianego przez drona ($14,48 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$) niż dla opryskiwacza ($41,28 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$). Sercem wielu inteligentnych maszyn rolniczych są komputery brzegowe, które są projektowane pod kątem wysokiej wydajności obliczeń AI przy relatywnie niskim poborze mocy (np. 15–60 W), co jest kluczowe dla urządzeń zasilanych za pomocą akumulatorów.

Podstawowe znaczenie dla generowanego śladu węglowego fazy użytkowania ma decyzja architektoniczna dotycząca tego, gdzie odbywa się przetwarzanie danych i inferencja AI. W modelu opartym na chmurze dane z sensorów (np. obrazy w wysokiej rozdzielczości z drona) są przesyłane do scentralizowanego centrum danych w celu analizy przez potężne modele AI. Generuje to wysokie koszty energetyczne związane z transferem danych przez sieci telekomunikacyjne oraz z działaniem i chłodzeniem serwerów. Zaletą jednak jest możliwość wykorzystania bardziej efektywnych energetycznie, zoptymalizowanych centrów danych, które mogą być zasilane ze źródeł odnawialnych. W modelu opartym na przetwarzaniu danych w urządzeniu końcowym (np. na robocie polowym) lub w jego pobliżu analiza odbywa się lokalnie. Znacząco redukuje to ilość danych przesyłanych do chmury, co obniża zużycie energii przez sieć i zmniejsza opóźnienia. Jednakże rozproszona flota mniej wydajnych energetycznie urządzeń brzegowych może sumarycznie zużywać więcej energii niż jedno wysoce zoptymalizowane centrum danych. Jedną z ciekawych opcji może być zastosowanie modelu opartego na lekkim uczeniu maszynowym. Jest to wydajna forma przetwarzania brzegowego, w której wysoce zoptymalizowane, „lekkie” modele uczenia maszynowego działają na mikrokontrolerach o bardzo niskim poborze mocy (rzędu miliwatów). Umożliwia to tworzenie tanich, zasilanych bateryjnie sensorów, które mogą działać autonomicznie przez miesiące lub lata, wykonując proste zadania analityczne (np. detekcja chorób roślin, monitorowanie wilgotności gleby) w odległych lokalizacjach bez stałego zasilania i łączności z Internetem. Jest to kluczowa strategia minimalizacji operacyjnego śladu węglowego AI w rolnictwie (Ihoume i in. 2022, Islam i in. 2025).

Dodatkowym problemem cyfryzacji rolnictwa jest potrzeba utylizacji ogromnej ilości elektrośmieci, w tym zużytych materiałów wytworzonych na potrzeby sztucznej inteligencji, takich jak mikroprocesory, płyty główne itp. Wiąże się to z nieuchronnym

wzrostem ilości elektrośmieci (e-waste), co stanowi poważne wyzwanie ekologiczne. Szybki postęp technologiczny i cykle innowacji skracają żywotność urządzeń elektronicznych, prowadząc do ich częstej wymiany i generowania rosnącego strumienia odpadów w postaci zużytych sensorów, dronów, komputerów i baterii. Ponadto dużym problemem dla środowiska naturalnego jest niewłaściwa utylizacja e-odpadów, np. poprzez składowanie na wysypiskach. Może prowadzić to do uwalniania do gleby i wód gruntowych wysoce toksycznych substancji, takich jak metale ciężkie (ołów, rtęć, kadm, brom itp.). Stanowi to bezpośrednie zagrożenie dla ekosystemów rolniczych, zanieczyszczając glebę i wodę używaną do nawadniania, a także może stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi poprzez bezpośredni kontakt zanieczyszczonego środowiska z człowiekiem lub poprzez spożywanie żywności z dużą zawartością ww. metali. Wyzwaniem jest efektywne i bezpieczne zarządzanie e-odpadami rolniczymi, które wymaga ich specjalnego traktowania podczas utylizacji, obejmującego zbiórkę, bezpieczne usuwanie danych oraz odzysk cennych i rzadkich materiałów. Kluczowe staje się promowanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, w tym projektowanie urządzeń z myślą o trwałości, łatwości naprawy i recyklingu.

Tabela 2 przedstawia dekompozycję śladu węglowego dla wybranych technologii rolnictwa cyfrowego w ramach LCA. Analiza ta dowodzi, że technologie te nie są zeroemisyjne. Rzetelna ocena ich zrównoważonego charakteru wymaga uwzględnienia wszystkich faz cyklu życia: od pozyskania surowców i produkcji, poprzez eksploatację, aż po proces utylizacji.

Tabela 2
Komponenty śladu węglowego w cyklu życia dla wybranych technologii rolnictwa cyfrowego

Typ technologii	Faza produkcji (Embodied Carbon)	Faza użytkowania (emisje operacyjne)	Faza końca życia (e-waste)
Dron do oprysków precyzyjnych	bateria Li-Po, rama z włókna węglowego, silniki, elektronika (GPS, kamery)	zużycie energii elektrycznej do ładowania baterii (np. 147 MJ·h ⁻¹); zależne od miksu energetycznego	recykling baterii, utylizacja kompozytów, odzysk metali z elektroniki
Robot polowy do odchwaszczania	stalowa/aluminiowa rama, silniki elektryczne, baterie, system wizyjny (GPU, kamery), czujniki LiDAR	zużycie energii do ładowania baterii (np. 16–36 W w zależności od terenu i ładunku); zależne od miksu energetycznego	recykling baterii, odzysk metali, utylizacja elektroniki
Zestaw sensorów IoT z TinyML	mikrokontroler, czujniki (wilgotności, NPK), moduł komunikacji (np. LoRa), mała bateria/panel słoneczny	bardzo niskie zużycie energii (mW), często zasilane energią z otoczenia (energy harvesting); minimalne emisje operacyjne	duża liczba małych urządzeń rozproszonych w terenie, co utrudnia zbiórkę i recykling

Źródło: Safaeinejad i in. 2025, Seo i in. 2023; nVIDIA; Schizas i in. 2022; Cheen i in. 2025

Ostateczna ocena wpływu zastosowania AI w rolnictwie na klimat wymaga syntezy dwuwymiarowej – korzyści wynikających z optymalizacji oraz kosztów środowiskowych samej technologii. Taka analiza ujawnia, że bilans węgla netto jest dynamiczny i zależy od szeregu kluczowych zmiennych. Aby zobiektywizować analizę, można posłużyć się uproszczonym równaniem bilansu węglowego (Balafoutis i in. 2017), które porównuje scenariusz bazowy (rolnictwo konwencjonalne) ze scenariuszem wykorzystującym technologie AI. Zmianę netto w emisjach (ΔC) można wyrazić jako:

$$\Delta C = C_{\text{uniknięte}} - C_{\text{generowane}}$$

gdzie:

$C_{\text{uniknięte}}$ – to suma redukcji emisji wynikająca z zastosowania AI w działalności rolniczej (np. mniejsze zużycie nawozów, paliwa, pestycydów, zoptymalizowane zużycie wody i energii);

$C_{\text{generowane}}$ – to suma emisji wygenerowanych w pełnym cyklu życia wdrożonej technologii AI (produkcja sprzętu, zużycie energii operacyjnej, utylizacja).

Wynik dodatni ($\Delta C > 0$) oznacza korzyść klimatyczną netto, podczas gdy wynik ujemny ($\Delta C < 0$) wskazuje, że ślad węglowy technologii przewyższa osiągnięte dzięki niej oszczędności emisyjne.

Wynik powyższego równania nie jest stały. Jest on funkcją kilku kluczowych, współzależnych zmiennych, które mogą drastycznie zmienić ostateczny bilans. Źródło energii do przeprowadzenia analiz sztucznej inteligencji to prawdopodobnie najważniejsza zmienna. Ślad węglowy fazy użytkowania, zarówno dla centrów danych trenujących modele AI, jak i dla ładowania elektrycznych maszyn polowych, jest wprost proporcjonalny do emisyjności lokalnego miksu energetycznego. Wdrożenie tych samych technologii w regionie zasilanym energią z węgla będzie miało drastycznie wyższy ślad węglowy ($C_{\text{generowane}}$) niż w regionie opartym na energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, co może całkowicie zmienić wynik ΔC . W modułach i algorytmach AI obserwuje się dwa przeciwstawne trendy. Z jednej strony tzw. Red AI dąży do tworzenia coraz większych i bardziej złożonych modeli w celu osiągnięcia marginalnych przyrostów dokładności, co prowadzi do wykładniczego wzrostu zapotrzebowania na moc obliczeniową i w konsekwencji do ogromnego popytu na energię. Z drugiej strony na popularności zyskuje koncepcja Green AI, która promuje projektowanie lżejszych, bardziej wydajnych energetycznie algorytmów osiągających porównywalną skuteczność przy znacznie niższym koszcie obliczeniowym. Wykorzystanie takich technik, jak kwantyzacja czy kompresja modeli oraz rozwój lekkiego uczenia maszynowego są ważnymi narzędziami koncepcji Green AI. Wybór między tymi dwoma koncepcjami projektowania ma duże znaczenie dla wielkości $C_{\text{generowane}}$.

Wydłużenie cyklu życia urządzeń (sensorów, robotów) pozwala na amortyzację ich wbudowanego śladu węglowego ($C_{\text{generowane}}$ z fazy produkcji) na zwiększoną ilość

lat użytkowania, co zmniejsza jego roczny negatywny wpływ na środowisko i zmianę klimatu. Ponadto ogranicza to tempo i ilość generowania e-odpadów. Projektowanie tego typu modeli z myślą o łatwej naprawie i modułowości, w przeciwieństwie do modelu programowanej przestarzałości, może być priorytetową strategią zrównoważonego rozwoju. Wpływ technologii na generowanie śladu węglowego na klimat, będzie różny, jeśli zostanie wdrożona w małym, zdywersyfikowanym gospodarstwie agroekologicznym, a inny w wielkoobszarowym, monokulturowym rolnictwie przemysłowym. Istotne są również bariery adaptacyjne, takie jak wysokie koszty początkowe, brak wiedzy technicznej czy niedostateczna infrastruktura (Internet, stabilne zasilanie), które ograniczają dostęp do tych technologii, zwłaszcza dla mniejszych gospodarstw. Co ciekawe, bariery te mogą tworzyć nieoczekiwane sprzężenie zwrotne. Wysokie koszty i złożoność algorytmów systemów AI pracujących w chmurach, które hamują ich adaptację w mniej zamożnych regionach lub mniejszych gospodarstwach, mogą paradoksalnie stymulować popyt na tańsze, prostsze i bardziej autonomiczne rozwiązania. Technologie Green AI, które z definicji są projektowane do działania na tanim w produkcji sprzęcie oraz przy niskich nakładach energii, bez stałej łączności z siecią, dobrze wpisują się w te ograniczenia. Siły rynkowe i ograniczenia infrastrukturalne mogą stać się nieoczekiwanym motorem napędowym dla bardziej zrównoważonej ścieżki cyfryzacji rolnictwa, promując rozwiązania o niższym śladzie węglowym, przyjazne środowisku.

Aby zilustrować, jak te zmienne wpływają na bilans netto, można przeanalizować dwa skrajne scenariusze wdrożenia technologii AI przedstawione w tabeli 3. Porównanie to udowadnia, że technologia wykorzystania AI nie jest ani antyekologiczna, ani proekologiczna. Analizując przeciwstawne scenariusze, można zauważyć, że realny wpływ na klimat zależy od podstawy paradygmatu, w jakim jest zastosowana.

Tabela 3

Analiza porównawcza scenariuszy wdrożenia AI w rolnictwie

Parametr	Scenariusz A: Przemysłowy + Chmura + Red AI	Scenariusz B: Agroekologiczny + Edge + Green AI
Kluczowe założenia	wielkoobszarowa monokultura; miks energetyczny 500 g CO ₂ ^e ·kWh ⁻¹ ; żywotność sprzętu 5 lat; ciężkie roboty; duże modele AI w chmurze	małe; zdywersyfikowane gospodarstwo; energia z paneli słonecznych (50 g CO ₂ ^e ·kWh ⁻¹); żywotność sprzętu 10 lat; lekkie drony/roboty; TinyML/Edge AI
Szacowane emisje generowane (kg CO ₂ ^e ·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹)	wysokie; produkcja ciężkiego sprzętu + wysokie zużycie energii przez sieć i centra danych zasilane z emisyjnej sieci	niskie; produkcja lekkiego sprzętu + niskie zużycie energii zasilanej z OZE + minimalny transfer danych

cd. tab. 3

Parametr	Scenariusz A: Przemysłowy + Chmura + Red AI	Scenariusz B: Agroekologiczny + Edge + Green AI
Szacowane emisje uniknięte ($\text{kg CO}_2^{\text{e}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)	średnie; optymalizacja nawozów i paliwa w monokulturze, ale potencjalny efekt odbicia (dalsza intensyfikacja)	wysokie; optymalizacja zasobów połączona z praktykami regeneratywnymi (sekwestracja węgla), brak efektu odbicia
Wpływ netto (ΔC)	prawdopodobnie ujemny lub bliski zeru; $C_{\text{generowane}}$ może zniwelować lub przewyższyć $C_{\text{uniknięte}}$	prawdopodobnie dodatni; $C_{\text{uniknięte}}$ znacznie przewyższa niskie $C_{\text{generowane}}$

Źródło: <https://medium.com/@ciente/red-ai-vs-green-ai-d7c9e4c6e6af>; Jegadeeswari i Rathipriya 2025; Islam i in. 2025; Cheen i in. 2025)

Podsumowanie

Analiza tych scenariuszy wdrożenia AI w rolnictwie jednoznacznie pokazuje, że technologia ta jest jedynie narzędziem, a jej ostateczny wpływ na klimat nie jest cechą inherentną, lecz wynikiem kontekstu społeczno-ekonomicznego i technologicznego, w którym jest wdrażana.

Wyniki wskazują, że ostateczny bilans węglowy jest silnie uzależniony od kontekstu wdrożenia, w tym od źródeł energii, efektywności algorytmów (Green AI) oraz przyjętych modeli zarządzania e-odpadami. Na podstawie przeglądu badań można uznać, że maksymalizacja korzyści klimatycznych z cyfryzacji rolnictwa wymaga świadomych decyzji technologicznych i politycznych, promujących zrównoważone projektowanie i wdrażanie systemów AI. Sztuczna inteligencja posiada dwojaki i złożony wpływ na ślad węglowy rolnictwa. Z jednej strony jej potencjał do mitygacji emisji i wspierania adaptacji do zmian klimatu poprzez precyzyjną optymalizację zasobów jest ogromny i dobrze udokumentowany. Z drugiej zaś strony ten potencjał jest obciążony znaczącym kosztem węglowym generowanym w całym cyklu życia infrastruktury cyfrowej. Najważniejszy wniosek płynący z analizy netto jest taki, że nie istnieje jedna, uniwersalna odpowiedź na pytanie o bilans węglowy AI w rolnictwie. Wynik bilansu jest wysoce kontekstowy i zależy od świadomych wyborów dokonywanych na etapie projektowania technologii, jej wdrażania w gospodarstwie oraz kształtowania ram politycznych. Sztuczna inteligencja nie jest z natury ani „zielona”, ani „czerwona” – to sposób jej implementacji decyduje o pośrednim wpływie na efekt cieplarniany oraz jej ostatecznym wpływie na klimat.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury sformułowano następujące wnioski:

1. Sztuczna inteligencja odgrywa podwójną, paradoksalną rolę w kontekście zrównoważonego rolnictwa. Z jednej strony oferuje znaczący potencjał do redukcji emisji gazów cieplarnianych na poziomie gospodarstwa poprzez optymalizację

- zużycia zasobów (nawozów, pestycydów, paliwa), z drugiej zaś sama generuje znaczący ślad węglowy wynikający z energochłonnych procesów obliczeniowych.
2. Skala śladu węglowego AI nie jest stała i zależy od wielu czynników, w tym od złożoności modelu, etapu jego życia (trening vs. wnioskowanie), wydajności energetycznej sprzętu oraz, co kluczowe, od miksu energetycznego zasilającego centra danych.
 3. Istnieją skuteczne strategie mitygacji śladu węglowego AI zgodne z koncepcją Green AI. Obejmują one działania na poziomie algorytmicznym, sprzętowym oraz systemowym (korzystanie z centrów danych zasilanych energią odnawialną).
 4. Dalszy rozwój i wdrażanie AI w rolnictwie 4.0 i 5.0 musi odbywać się w sposób świadomy, z uwzględnieniem zarówno korzyści agronomicznych, jak i kosztów środowiskowych. Postuluje się konieczność transparentnego raportowania zużycia energii przez nowe modele AI, co umożliwi bardziej zrównoważony postęp technologiczny w sektorze rolnym.

Literatura

1. Anthony L.F.W., Kanding B., Selvan R.: Carbontracker: Tracking and predicting the carbon footprint of training deep learning models. Eprint arXiv:2007.03051. 2020 IEEE International Conference on Big Data; DOI: 10.48550/arXiv.2007.03051
2. Arlanova A., Hojamkuliyeva B.A., Babanazarov N.S., Arlanov M.S.: Artificial intelligence for smart irrigation: Reducing water consumption and improving agricultural output. E3S Web Conf. Volume 623, 2025 IV International Conference on Ensuring Sustainable Development: Ecology, Earth Science, Energy and Agriculture (AEES2024) **623**, 04001; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562304001>
3. Balafoitis A.T., Beck B., Fountas S., Vangeyte J., Van der Wal T., Soto I., Gomez-Barbero M., Barnes A., Eory V.: Precision agriculture technologies positively contributing to GHG Emissions Mitigation. Farm Productivity and Economics. Sustainability, 2017, **9**(8), 1339; DOI: <https://doi.org/10.3390/su9081339>
4. Bedford L.: John Deere Launches See & Spray select. Successful Farming. Retrieved March 28, 2022; <https://www.agriculture.com/news/technology/john-deerelaunches-see-spray-select>
5. Chen X., Han L., Bhagavatthula A., Gupta U.: CarbonClarity: Understanding and addressing uncertainty in embodied carbon for sustainable computing. arXiv:2507.01145, 2025; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.01145>
6. Ciceri N.D., Gutowski T.G., Garetti M.: A tool to estimate material and manufacturing Energy for a product. IEEE Xplore, Conference Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010; DOI: 10.1109/ISSST.2010.5507677
7. Dahmus J., Gutowski T.: An environmental analysis of machining. Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo. Anaheim, California 2004; <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-62600>
8. Dulaney P., Lowe J.W., Dodds D., Speights C.: See and spray technology control for sheep and goats. Mississippi State University. Publication 3904 (POD-06-23), 2023.
9. Goel M., Pandey M.: Crop Yield Prediction Using AI: A Review,” 2024 2nd International Conference on Disruptive Technologies (ICDT), Greater Noida, India, 2024, pp. 1547-1553; DOI: 10.1109/ICDT61202.2024.10489432

10. Gulcay E.O.: AI-driven irrigation systems for sustainable water management: A systematic review and meta-analytical insights. *Smart Agricultural Technology*, 2025, **11**, 100982; <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100982>
11. Gupta C., Johri I., Srinivasan K., Hu Y., Qaisar S.M., Huang K.: A Systematic review on machine learning and deep learning models for electronic information security in mobile networks. *sensors*. *Sensors*, 2022, **22(5)**; DOI: <https://doi.org/10.3390/s22052017>
12. Ihoume I., Tadili R., Arbaoui N., Benchrif M.: Developing a multi-label tinyML machine learning model for an active and optimized greenhouse microclimate control from multivariate sensed data. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2022, **6(1)**; DOI:10.1016/j.aia.2022.08.003
13. Islam M.B., Guerrieri A., Gravina R., Delaney D.T., Fortino G.: From traditional machine learning to fine-tuning large language models: A review for sensors-based soil moisture forecasting. *Sensors*, 2025, **25(22)**, 6903; <https://doi.org/10.3390/s25226903>
14. ISO14040: 2006; <https://www.iso.org/standard/37456.html>
15. ISO 14044: 2006; <https://www.iso.org/standard/38498.html>
16. Jegadeeswari K., Rathipriya R.: Minimizing the carbon footprint of machine learning techniques through sustainable AI training methods. *Sustainable Information Security in the Age of AI and Green Computing*. 2025; DOI: 10.4018/979-8-3693-8034-5.ch009
17. Joppa N.P., Borchers A., Boyle R., Cantin P.: In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit. In *ISCA 17 Proceedings of the 44th Annual International Symposium on Computer Architecture*, 2017, (1-12); DOI: 10.1145/3079856.3080246
18. Kalcevic A.: John Deere new see and spray technology. *4Rivers Equipment*. Retrieved March 28, 2022; <https://www.4riversequipment.com/john-deere-new-see-and-spray-technology/>
19. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F.X.: Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and electronics in agriculture*, 2018, **147(1)**: 70-90; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
20. Labella-Fernandez A.: Archetypes of green-growth strategies and the role of green human resource management in their implementation. *Sustainability*, 2021, **13(2)**, 836; <https://doi.org/10.3390/su13020836>
21. Lafavor C.M.: Crop species production diversity enhances revenue stability in low-income farm regions of Mexico. *Agriculture*, 2022, **12(11)**, 1835; <https://doi.org/10.3390/agriculture12111835>
22. Lucioni A.S., Viguiet S., Ligozat A.L.: Estimating the Carbon Footprint of BLOOM, a 176B Parameter Language Model. *arXiv preprint arXiv:2211.02001*, 2022, 1-10; DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02001>
23. Maldin J., Lundén D.: The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 2018, **10(9)**, 3027; DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093027>
24. Mogili U.R., Deepak B.B.V.L.: Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia computer science*, 2018, **133**: 502-509; <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>
25. nVIDIA; <https://www.nvidia.com/pl-pl/>
26. Patterson D., Gonzalez J., Le Q., Liang C., Munguia L., Rothchild D., So D., Texier M., Dean J.: Carbon emissions and large neural network training. *arXiv preprint arXiv:2104.10350*, 2021; DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.10350>
27. Red AI vs Green AI; <https://medium.com/@ciente/red-ai-vs-green-ai-d7c9e4c6e6af>
28. Saeinejad M., Ghasemi-Nejad-Raeini M., Taki M.: Reducing Energy and environmental footprint in agriculture: A study on drone spraying vs conventional methods. *PLoS One*, 2025, **20(6)**, e0323779; DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323779>
29. Schizas N., Karras A., Karras C., Sioutas S.: TinyML for ultra-low power AI and large scale IoT deployments: A systematic review. *Future Internet*, 2022, **14(12)**, 363; <https://doi.org/10.3390/fi14120363>
30. Schwartz R., Dodge J., Smith N.A., Etzioni O.: Green AI. *arXiv:1907.10597*, 2019; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.10597>

31. Schrimpf P.: Deere launches see & spray select technology. PrecisionAg. Retrieved March 29, 2022; <https://www.precisionag.com/market-watch/deere-see-spray-selectrelease/>
32. Seo Y., Umeda S., Yoshikawa N.: Environmental impact of agricultural sprayers used in Japanese rice farming. International Journal Of Agricultural Sustainability LOV 21, 2023, **1**, 2247803; DOI:10.1080/14735903.2023.2247803
33. Sokal K., Kachel M.: Impact of Agriculture on Greenhouse Gas Emissions – A review. Energies, 2025, **18(9)**, 2272 MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092272>
34. Strubell E., Ganesh A., McCallum A.: Energy and policy considerations for deep learning in NLP. arXiv preprint arXiv:1906.02243, 2019; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.02243>
35. Syeda A.: Harnessing multi-omics and genome-editing technologies for climate-resilient agriculture: bridging AI-driven insights with sustainable crop improvement. Springer Nature. Plant Molecular Biology, 2025, **115(120)**; <https://doi.org/10.1007/s11103-025-01650-1>
36. Wójcik-Gront E., Zieniuk B., Pawłkiewicz M.: Harnessing AI-powered genomic research for sustainable crop improvement. Agriculture, 2024, **14(12)**, 2299; <https://doi.org/10.3390/agriculture14122299>
37. Varghese B., De Lara E., Ding A.Y., Hong C.H., Bonomi F., Dustdar S., Harvey P., Hewkin P., Shi W., Tandur D.: Revisiting the arguments for Edge Computing Research. IEEE Internet Computing, 2021, **25(5)**: 36-42; 10.1109/MIC.2021.3093924
38. Vardhan P.N.H., Badavath A., Srivalli P.: Artificial intelligence and its applications in agriculture: A review. Environment Conservation Journal, 2025, **26(1)**: 274-280; DOI:10.36953/ECJ.28802904
39. Yu J., Wang R., Zhang X., Chen S.: Genome-wide analysis of the PYL gene family in *Betula platyphylla* and its responses to abiotic stresses. International Journal of Molecular Sciences, 2024, **25(24)**, 13728; <https://doi.org/10.3390/ijms252413728>

Adres do korespondencji:

mr inż. Tytus Berbeć
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 758
e-mail: tberbec@iung.pulawy.pl

AUTOR

Tytus Berbeć

ORCID

0000-0001-5183-5807

Tytus Berbeć

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WYKORZYSTANIE DRONÓW W ROLNICTWIE A PRZEPISY PRAWNE*

Słowa kluczowe: rolnictwo odporne na zmiany klimatu, innowacje technologiczne, rolnictwo 4.0, rolnictwo precyzyjne, drony w rolnictwie, przepisy prawne, prawo lotnicze

Wstęp

W ostatniej dekadzie rolnictwo w Polsce doświadczyło ogromnej rewolucji technologicznej dzięki zastosowaniu dronów do mapowania i dronów ciężkich. Drony lekkie (nazywane też BSP – bezzałogowymi statkami powietrznymi) w większości wyposażone są w zaawansowane systemy mapujące wykorzystywane na szeroką skalę w rolnictwie. W ostatnim czasie coraz większą popularność zyskują także drony ciężkie, czyli te służące zarówno do wykonywania oprysków, jak i rozsiewania nawozów, które mają szansę zrewolucjonizować podejście rolników do zarządzania uprawami poprzez doskonałą precyzję i wydajność, prowadząc do zrównoważonego środowiska. Postęp technologiczny obserwowany w rozwoju i doskonaleniu dronów, zwłaszcza zastosowanie ich w rolnictwie przynosi szereg możliwości w zakresie optymalizacji procesów produkcji w sektorze rolniczym (Berner i Chojnacki 2017).

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV, ang. *unmanned aerial vehicle*) wyposażone w zaawansowane czujniki optyczne stały się jednym z kluczowych narzędzi rolnictwa precyzyjnego. Przegląd literatury naukowej dostarcza licznych przykładów potwierdzających tezę o ogromnym potencjale tej technologii w diagnozowaniu i rozwiązywaniu problemów występujących w produkcji rolniczej. Możliwość pozyskiwania danych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej i czasowej zrewolucjonizowała sposób monitorowania upraw, ocenę zasobności gleby oraz zarządzanie zabiegami agrotechnicznymi.

W przeszłości do zobrazowań stanu upraw w rolnictwie wykorzystywano samoloty załogowe z podczepionymi instrumentami detekcyjnymi. Obecna technologia umoż-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

liwia pozyskiwanie danych na temat stanu zdrowia roślin czy ilości wody w glebie za pomocą kamer multispektralnych zamontowanych na bezzałogowych statkach powietrznych oraz poprzez zobrażenia satelitarne. Wykonane zobrażenia są dokładniejsze w porównaniu z tradycyjnymi metodami, a samo wykorzystanie BSP jest znacznie tańsze w eksploatacji.

Wykorzystanie wyspecjalizowanych bezzałogowych platform latających (służących do mapowania pól i przekazywania dokładnych informacji na temat potrzeb np. nawozowych do urzędów rolniczych wykorzystujących technologie rolnictwa 4.0) w rolnictwie przynosi znaczne korzyści finansowe poprzez obniżenie kosztów stosowania nawozów dolistnych. Do obniżenia kosztów przyczynia się również zmniejszone ryzyko wystąpienia strat niezamierzonych, niska awaryjność bezzałogowego statku powietrznego oraz możliwość mocowania różnych aparatów i kamer do jednego urządzenia (BSP). Odpowiednio przeszkolony operator BSP, posiadający świadectwo kwalifikacji uprawniające do wykonywania lotów, będzie w stanie w sposób bezpieczny i skuteczny wykonywać misje zobrażeń terenów rolniczych.

Jednym z pierwszych zastosowań teledetekcji niskopułapowej była identyfikacja gatunków upraw rolniczych na podstawie zróżnicowania w odbiciu spektralnym roślin (Park i Park 2015). Z czasem technologia ta znalazła znacznie szersze zastosowanie. Obecnie jest ona standardowo wykorzystywana do precyzyjnej oceny szkód w uprawach powstałych w wyniku niekorzystnych warunków pogodowych lub żerowania zwierzyny (Michez i in. 2016, Rutten i in. 2018), a także do bieżącego monitorowania dynamiki rozwoju i wzrostu roślin w sezonie wegetacyjnym (Reinecke i Prinsloo 2017).

Drony często wyposażone są dodatkowo w możliwość integracji z systemami informacji geograficznej (GIS, ang. *geographic information system*), skąd można je zintegrować z różnymi danymi i uzupełnić informację o skład gleby, wilgotność podłoża, odczyn gleby i inne parametry glebowe. Drony wyposażone w specjalne urządzenia służące do pobierania prób glebowych mogą na bieżąco zbierać, analizować i uzupełniać dane dotyczące składu gleby i uzupełniać w systemach GIS. Informacje pozyskane za pomocą dronów mogą być wykorzystane do opracowywania precyzyjnych planów nawozowych, uwzględniając mozaikę glebową na danym polu.

Zobrazowanie różnic stanu zdrowia roślin (wywołanych głównie niedoborem wody w środowisku glebowym) jest możliwe dzięki zestawieniu proporcji światła odbitego od roślin i przechwyconego w pasmach: czerwonym, zielonym, niebieskim oraz w bliskiej podczerwieni. Odbicie światła przez rośliny dobrze zaopatrzone w składniki pokarmowe i wodę różni się w stosunku do roślin niedostatecznie odżywionych lub chorych. Rośliny zdrowe, dobrze zaopatrzone w wodę i składniki odżywcze odbijają światło zielone oraz światło bliskiej podczerwieni (NIR, ang. *Near-infrared*) w większym stopniu niż rośliny słabiej odżywione czy chore.

Wykorzystanie bezzałogowego statku powietrznego z kamerą multispektralną o wysokiej rozdzielczości wykonującej dokładne zdjęcia (kamera RGB – Red Green

Blue ze zmodyfikowanymi filtrami NIR – near infrared), dzięki szybkiej interpretacji danych (poprzez wykorzystanie dedykowanych programów do ich obróbki), pozwala ocenić stan upraw i podjąć odpowiednią decyzję (np. czy dana uprawa wymaga dodatkowego nawadniania, interwencji wykonania oprysku czy jest gotowa do zbioru plonu itp.).

Dane z BSP służą również do oceny bardziej złożonych parametrów, takich jak monitorowanie biomasy upraw (Hunt i in. 2005), mapowanie wigoru winnic (Primicerio i in. 2012) czy lokalizacja i identyfikacja ognisk chwastów. Interesujący przykład integracji sensora hiperspektralnego i termicznego przedstawili Berni i in. (2009), którzy wykazali przydatność obrazów pozyskiwanych z BSP do wykrywania deficytu wodnego w uprawach. W swoich badaniach autorzy ci oprócz pomiaru temperatury wykorzystali liczne wskaźniki odbicia światła i fluorescencji, potwierdzając, że najlepsze rezultaty w ocenie stresu wodnego dają wskaźniki oparte na zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni.

Wskaźniki wegetacyjne obliczane na podstawie danych spektralnych znajdują szerokie zastosowanie również w prognozowaniu plonów. Gong i in. (2018) wykazali przydatność połączenia informacji o wskaźnikach, takich jak NDVI (znormalizowany wskaźnik różnicowy roślinności), NDRE (znormalizowany wskaźnik różnicy czerwonej krawędzi), TVI (ang. *Tasseled Cap Visual Index*) i SAVI (ang. *Soil Adjusted Vegetation Index*) z danymi o liczebności liści uzyskiwanymi za pomocą kamery hiperspektralnej do precyzyjnego szacowania plonu rzepaku. Podobnie badania nad efektywnością różnych strategii nawożenia azotowego w uprawach potwierdzają, że analiza danych z BSP pozwala na obiektywną ocenę reakcji roślin na zastosowane zabiegi (Hunt i in. 2005).

Niezwykle ważnym zadaniem realizowanym z wykorzystaniem BSP jest mapowanie gleby, które dostarcza precyzyjnych informacji do wykorzystania przy ustalaniu płodozmianów, planu nawożenia i prognozowaniu plonów (Yu i in. 2016). Nowoczesne rolnictwo precyzyjne odchodzi od traktowania pól uprawnych jako jednorodnych powierzchni. Dzięki danym teledetekcyjnym możliwe jest wyznaczenie stref zarządzania o odmiennych właściwościach. Obrazy multispektralne pozwalają zidentyfikować obszary, gdzie rośliny wykazują objawy stresu, co może wskazywać na lokalne niedobory składników pokarmowych, złą strukturę gleby lub jej niewystarczającą wilgotność.

Drony wykorzystywane w sektorze rolniczym są często wyposażone w systemy do kartowania czy mapowania powierzchni, które umożliwiają tworzenie map terenowych i ich analizę za pomocą kamer multispektralnych. Za pośrednictwem kamer wielospektralnych oraz różnego rodzaju czujników, w które są wyposażane bądź wyposażane drony, można zbierać dane o zróżnicowanych parametrach wzrostu upraw, takich jak gęstość, zdrowotność czy podaż na stres. To pozwala na dokładniejsze monitorowanie stanu upraw i dostosowanie strategii nawożenia czy stosowania oprysków fungicydowych czy pestycydowych (Gabriel i in. 2017, Mazur i Chojnacki 2017).

Metoda mapowania obszarów rolniczych za pomocą kamer wielospektralnych pozwala na obrazowanie środowiska rolniczego dotyczącego zdrowotności roślin pod kątem występowania chorób, szkodników, potrzeb nawozowych oraz innych, jak np. uwilgotnienia gleby. Pozwala na precyzyjniejsze wyznaczenie zasięgu suszy w stosunku do metod tradycyjnych opartych na pomiarach punktowych, które podlegają interpolacji. Nowoczesna technologia zobrazowań multispektralnych pozwala w bardzo krótkim czasie na uzyskanie indeksów, takich jak NDVI, na podstawie których można zaobserwować zmiany zachodzące w uprawach rolnych. Dzięki wykorzystaniu zobrazowań multispektralnych można stworzyć mapę całej uprawy (wielohektarowej), która wskazuje różnice zdrowotne między roślinami spowodowane m.in. niedoborem wody z perspektywy innej niż z poziomu ziemi. Dodatkowo z wysokości przelotowej bezzałogowego statku powietrznego (do ok. 2800 m) możliwe jest obserwowanie różnic w odżywieniu roślin wynikających ze zmienności gleb, monitorowanie stanu zdrowia roślin, określanie szkód wyrządzonych przez agrofagi, grzyby czy szacowanie ilości biomasy. Dzięki temu można w krótkim czasie podjąć działania mające na celu poprawę stanu zdrowia upraw. Innowacyjna metoda teledetekcji stosowana szeroko w rolnictwie, wykorzystująca wskaźniki np. NDVI, umożliwia wykrywanie różnic w uprawach rolnych, oceniając stan zdrowia roślin w ciągu kilku minut od rozpoczęcia obrazowania. Pozwala to na tworzenie dokładnego zobrazowania na bardzo dużym obszarze. Takie podejście umożliwia wdrożenie strategii ukierunkowanego próbkowania gleby TSS (ang. *targeted soil sampling*). Zamiast pobierać próbki w sposób losowy lub w regularnej siatce, można je pobrać z miejsc reprezentatywnych dla wydzielonych stref o niskiej, średniej i wysokiej produktywności. Badania potwierdzają, że taka strategia jest bardziej efektywna kosztowo i dostarcza dokładniejszych danych do tworzenia map zasobności glebowej. Analiza próbek gleby, pobieranych najczęściej z głębokości do 30 cm, dostarcza informacji o jej strukturze, zawartości materii organicznej, pH, zasoleniu czy zasobności w kluczowe makro- i mikroelementy. Dane te sprzężone z systemem pozycjonowania GPS (ang. *Global Positioning System*) pozwalają na stworzenie precyzyjnych, cyfrowych map zmienności glebowej. Szczególne znaczenie w rolnictwie ma zarządzanie azotem, który jest podstawowym składnikiem plonotwórczym. Alternatywą dla tradycyjnych testów chemiczno-rolniczych staje się teledetekcyjna ocena stanu odżywienia roślin. Multispektralne sensory instalowane na dronach przechwytyują światło odbite od roślin, co pozwala obliczyć współczynniki odbicia i na ich podstawie ocenić zawartość chlorofilu, która jest silnie skorelowana ze stanem odżywienia azotem. Badania wykazują, że wykorzystanie wskaźników wegetacyjnych, zwłaszcza tych opartych na paśmie z pogranicza czerwieni i bliskiej podczerwieni (red edge), pozwala na ocenę zawartości azotu w roślinach z bardzo dużą dokładnością (Wang i in. 2019, Wesseling i in. 2020). Posiadając tak precyzyjne dane, możliwe jest zastosowanie technologii zmiennego dawkowania nawozów VRA (ang. *Variable Rate Application*). Mapa aplikacyjna wygenerowana na podstawie danych z drona jest wprowadzana do komputera ciągnika z rozsiewaczem lub opryskiwaczem, który automatycznie dostosowuje dawkę nawozu do potrzeb roślin

w konkretnym fragmencie pola. Takie rozwiązanie pozwala na znaczące ograniczenie kosztów związanych z zakupem nawozów, zwiększenie efektywności ich wykorzystania przez rośliny, a co najważniejsze, minimalizuje negatywny wpływ rolnictwa na środowisko poprzez redukcję ryzyka zanieczyszczenia wód gruntowych azotanami (Schirrmann i in. 2016). Ręczne opryskiwanie dużych obszarów produkcyjnych może być trudnym i czasochłonnym zadaniem. Drony używane do oprysków oferują znaczną przewagę pod względem wydajności i oszczędności czasu. Dzięki możliwości szybkiego i autonomicznego pokonywania rozległych obszarów drony te mogą zakończyć operacje wykonywania zadanego zadania, np. oprysku, w znacznie krótszym czasie niż tradycyjne metody. W wyniku użycia drona nie tylko zwiększa się produktywność, ale też rolnicy mają czas na skoncentrowanie się na innych zadaniach. Tradycyjne metody opryskiwania często powodują nierównomierne stosowanie pestycydów, nawozów lub herbicydów, co prowadzi do nieracjonalnego wykorzystania chemii w rolnictwie i potencjalnej szkody dla środowiska. Wykorzystanie do oprysku dronów, które będą wyposażone w zaawansowane sensory i technologię GPS-RTK (ang. *Global Positioning System- Real-Time Kinematic*) i podążają za wcześniej zdefiniowanymi trasami lotu z dokładnością na poziomie centymetrów, może znacznie ułatwić pracę rolników. Drony służące do oprysku wyposażone są w zaawansowane systemy nawigacji, które pozwalają na precyzyjne poruszanie się po polach uprawnych. Systemy te umożliwiają utrzymanie stabilnej pozycji drona w powietrzu i dokładne przemieszczanie się wzdłuż wyznaczonej trasy (zadanej misji). Dodatkowo drony są wyposażone w zaawansowane systemy rozsiewające nawozy, które umożliwiają równomierne i kontrolowane stosowanie wsadu. Zastosowanie tego typu systemów daje możliwość efektywnego rozprowadzania środków ochrony roślin lub nawozów, w tym precyzyjnego dawkowania nawozów bądź aplikacji środków z jej dostosowaniem do warunków panujących na polu produkcyjnym, w czasie rzeczywistym, w zależności od zdrowotności roślin, na wcześniej zmapowanych (optymalne pokrycie pola uprawnego) dużych obszarach, w krótkim czasie, w sposób bezszkodowy dla roślin uprawnych. Na podstawie wcześniej określonych planów nawozowych dron może automatycznie obliczyć optymalną trasę lotu, uwzględniając kształt pola i różne strefy nawożenia. Dzięki temu zapewnia się równomierne i skuteczne stosowanie nawozów. Drony mogą także automatycznie dostosować prędkość lotu, wysokość i sposób stosowania (dawkę) środków ochrony roślin w zależności od warunków panujących na polu produkcyjnym, stosując autonomiczne tryby pracy. Dzięki temu można precyzyjnie ukierunkować i równomiernie stosować środki ochrony roślin, redukując nadmierne opryskiwanie i minimalizując ryzyko zanieczyszczenia środowiska. Jedną z najważniejszych zalet stosowania dronów do oprysku jest poprawa bezpieczeństwa rolników, którzy mogą zachować bezpieczną odległość od wykonywanego oprysku. Zastępując konieczność obecności fizycznej rolnika podczas operacji opryskiwania, drony zmniejszają ryzyko kontaktu ze szkodliwymi substancjami chemicznymi. Ponadto dzięki precyzyjnemu stosowaniu zmniejsza się ilość ŚOR (środków ochrony roślin) wprowadzanych do środowiska. Czas lotu drona może się różnić w zależności od jego modelu, wielkości, rodzaju

napędu (spalinowe, elektryczne), zastosowanej baterii oraz obciążenia. Typowy czas lotu drona o napędzie elektrycznym wynosi od 20 do 50 min na jednym naładowaniu baterii, w zależności od wielu czynników, m.in. obciążenia, warunków pogodowych, prędkości lotu czy trybu pracy. Zasięg drona również zależy od konkretnego modelu. Przeważnie wynosi od kilku do kilkunastu kilometrów. Warto jednak zaznaczyć, że może być on ograniczony przez regulacje prawne dotyczące lotów dronów, warunki atmosferyczne oraz przeszkody na trasie lotu.

W analizie kosztów użytkowania bezzałogowych platform latających wskazano głównie na: niską cenę zakupu i koszty eksploatacji, niską awaryjność oraz możliwość prowadzenia działań w otwartym terenie, zdolność startu i lądowania z jednego punktu, zdolność do wykonywania tzw. „zawisu”, co może ułatwiać analizę wykonywania dokładnych zdjęć, niewielkie rozmiary oraz niską wrażliwość na warunki pogodowe, łatwość i szybkość przygotowania do lotu, łatwość transportu, wykonywanie lotów w trybie automatycznym, jak i manualnym.

Przykłady dronów wykorzystywanych do mapowania

JOUAV CW-15 wyróżnia się jako najwyższej klasy dron LiDAR przeznaczony do zadań mapowania dużych obszarów. JoLiDAR-120 oferuje imponujące specyfikacje, takie jak zakres pomiarowy 1430 m, maksymalna częstotliwość punktowa $1,8 \text{ mln pkt} \cdot \text{s}^{-1}$ i maksymalna liczba ech 15. Zapewnia to niezrównaną dokładność w pionie i poziomie, z precyzją lepszą niż odpowiednio: 3 cm i 5 cm. Jedną z wyróżniających się cech CW-15 jest zaawansowane oprogramowanie do przetwarzania chmur punktów, które zwiększa dokładność danych poprzez automatyczne dopasowywanie, segmentację, poziomowanie i nie tylko. Ten dron może pionowo startować i lądować nawet w ograniczonych przestrzeniach, takich jak klify i lasy, zapewniając doskonałe możliwości adaptacji. Przy maksymalnym czasie lotu wynoszącym 180 min zapewnia dłuższe misje, a funkcje RTK i PPK gwarantują autonomiczne lądowanie pionowe z dokładnością do centymetra oraz precyzyjne dane POS. Co więcej, może samodzielnie omijać przeszkody, dostosowywać się do zróżnicowanego terenu i wykrywać inne drony wyposażone w moduły ADS-B. Dzięki udźwigowi 3 kg i otwartej architekturze umożliwiającą dostosowywanie CW-15 jest odpowiedni dla profesjonalistów z takich dziedzin, jak geodezja, inspekcja infrastruktury, nadzór bezpieczeństwa i rolnictwo.

JOUAV CW-007 to wszechstronny dron VTOL (pionowy start i lądowanie) dostosowany do zadań mapowania GIS. Dzięki pełnoklatkowej kamerze RGB CA103 61 MP z podświetlanym czujnikiem CMOS i obiektywem 35 mm dron ten oferuje wyjątkową jakość i dokładność obrazu, co czyni go idealnym wyborem dla profesjonalistów zajmujących się geodezją, inspekcją infrastruktury, nadzorem bezpieczeństwa i rolnictwem. Osiągając absolutną dokładność do 1 cm, wyróżnia się dostarczaniem precyzyjnych danych mapowych. Dzięki wysokiej wydajności CW-007 może pokryć duże obszary podczas jednego lotu, co czyni go wysoce wydajnym narzędziem do

mapowania. Jego modułowa konstrukcja pozwala na łatwy montaż i demontaż bez użycia narzędzi w czasie krótszym niż 2 min. Dron posiada również możliwość lotu autonomicznego, co pozwala mu automatycznie omijać przeszkody w trakcie lotu i samodzielnie wracać w przypadku problemów. Zbudowany z solidnego płatowca z włókna węglowego zapewnia stabilność i trwałość nawet w trudnych warunkach, w tym w lekkim deszczu i śniegu.

WingtraOne Gen II wyróżnia się jako wyjątkowy dron do zadań fotogrametrycznych i mapowania. Wyposażony w kamerę Sony 61 MP RGB doskonale rejestruje obrazy o wysokiej rozdzielczości w celu precyzyjnego mapowania. Jest idealny do pomiarów geodezyjnych, rolnictwa precyzyjnego i kontroli infrastruktury. Dzięki platformie Tailsitter VTOL oferuje niezwykle czas lotu do 59 min, obejmujący rozległe obszary w jednym locie. Dron ma zasięg sterowania wynoszący 10 km i obsługuje PPK (ang. *post-processed kinematic*), zapewniając dokładne georeferencje bez naziemnych punktów kontrolnych. Dodatkowo może przenosić specjalistyczne kamery, takie jak kamera Oblique Sony a6100 do modelowania 3D i czujniki wielospektralne dla rolnictwa.

Sensefly eBee X stałopłat posiada unikalne rozszerzenie Endurance Extension zapewniające imponujący czas lotu do 90 min, co umożliwia rozległe pokrycie dużych obszarów bez konieczności częstych lądowań. Dzięki funkcji High Precision on Demand osiąga niezwykle dokładność do 3 cm bez konieczności stosowania naziemnych punktów kontrolnych. Ten dron jest lekki, waży zaledwie 700 g, co ułatwia transport. Nadaje się do pomiarów geodezyjnych, rolnictwa precyzyjnego i kontroli infrastruktury. eBee X może być również wyposażony w specjalistyczne kamery do rekonstrukcji 3D i tworzenia map termicznych, co czyni go wszechstronną opcją dla profesjonalistów zajmujących się mapowaniem.

DJI Matrice 300 RTK to potężny dron wielowirnikowy, który wyróżnia się nie tylko w misjach inspekcyjnych, poszukiwawczo-ratowniczych, ale także w różnych zastosowaniach mapowych. Dron ten jest wyposażony w najnowszą technologię RTK dzięki czemu oferuje niezrównaną precyzję i możliwości nawigacji, nawet w trudnych warunkach. Ze względu na imponujący czas lotu wynoszący 55 min może pokryć znaczne obszary podczas jednego lotu. Wytrzymała konstrukcja Matrice 300 RTK gwarantuje, że wytrzyma on trudne warunki, dzięki czemu nadaje się do szeregu zadań mapowych. Potrójnie redundantny system i zaawansowana technologia nawigacji gwarantują dokładność i niezawodność. Dodatkowo ten dron RTK jest wyposażony w wysokowydajny system gimbału zapewniający stabilne obrazowanie podczas lotu i umożliwia sterowanie kamerą w czasie rzeczywistym. Kompatybilność z LiDAR dodatkowo zwiększa możliwości mapowania.

Freefly Alta X z RTK to doskonały wybór do zastosowań związanych z mapowaniem i modelowaniem 3D. Dron ten wyróżnia się modułową konstrukcją umożliwiającą łatwą integrację różnych systemów ładunku oraz dostosowanie go do szerokiego zakresu wymagań misji. Dzięki czterem mocnym silnikom o maksymalnej

mocy ciągłej 100 A Alta X może przenosić ładunki o masie do 16 kg. Jego czas lotu to 50 min, a prędkość maksymalna $137 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, dzięki czemu nadaje się do zadań związanych z dynamicznym mapowaniem. Dron jest kompatybilny z szeroką gamą ładunków, w tym z przegubowym czujnikiem podczerwieni, kamerami mapującymi, LiDAR, czujnikami hiperspektralnymi i systemami dostarczania. Zaawansowana konstrukcja ostrza redukuje wibracje, zapewniając czystsze gromadzenie danych i wysokiej jakości nagrania.

DJI Phantom 4 RTK posiada kilka niezwykłych funkcji, które zwiększają jego możliwości mapowania. Dzięki zintegrowanemu modułowi RTK Phantom 4 RTK dostarcza w czasie rzeczywistym dane o pozycji na poziomie centymetra, poprawiając absolutną dokładność metadanych obrazu. Zapewnia to precyzyjne wyniki mapowania, co czyni go idealnym rozwiązaniem dla geodetów i specjalistów GIS. Ponadto kompatybilność z kamerami termowizyjnymi 4K i FLIR Vue 336 zwiększa jego użyteczność podczas nalotów mapujących. Przyjazna dla użytkownika konfiguracja drona i niezawodny system autopilota sprawiają, że jest on dostępny zarówno dla początkujących, jak i ekspertów. Co więcej, zaawansowany system wykrywania i unikania przeszkód zapewnia bezpieczeństwo podczas skomplikowanych misji mapowych.

Autel EVO II Dual 640T Enterprise może być wykorzystywany głównie do mapowania z wykorzystaniem sensorów termalnych. Ten dron oferuje niezwykle zasięg transmisji wideo do 15 km i imponującą 8-stopniową odporność na wiatr, dzięki czemu może sprostać trudnym zadaniom związanym z mapowaniem. Dzięki dwóm kamerom obsługującym obrazowanie termowizyjne w podczerwieni w rozdzielczości do 640×512 przy $30 \text{ kl} \cdot \text{s}^{-1}$, EVO II Dual 640T przoduje w przechwytywaniu szczegółowych danych termowizyjnych. Dodatkowo jest wyposażony w kamerę wideo 8K, wideo 4K HDR, kamerę 48 MP i 4-krotny bezstratny zoom do zdjęć lotniczych w wysokiej rozdzielczości. Inteligentne planowanie tras, unikanie przeszkód i algorytmy AI dodatkowo zwiększają możliwości mapowania. Funkcja pozycjonowania Autel VIO zapewnia bezpieczne zwroty nawet w niesprzyjających warunkach, a moduł RTK zapewnia centymetrową dokładność. Dzięki 19 zestawom czujników, w tym czujnikom wizyjnym i podwójnemu IMU ten dron może z łatwością tworzyć mapy 3D i dane o terenie w czasie rzeczywistym.

Yuneec H520 RTK to niedrogie narzędzie do mapowania, które łączy w sobie przystępną cenę z funkcjami niezbędnymi do precyzyjnego mapowania z powietrza. Jest wyposażony w moduły GPS i GLONASS, które zapewniają bardzo dokładne pozycjonowanie, co czyni go niezawodnym wyborem do różnych zastosowań. Ten sześciowirnikowy Hexacopter ma chowane podwozie, co zwiększa jego stabilność podczas lotu. To, co wyróżnia H520 RTK, to wymienny system gimbała pozwalający na użycie jednej z trzech opcji z możliwością wymiany podczas pracy. Gimbal umożliwia ciągły obrót o 360 stopni i posiada 7-calowy wyświetlacz na kontrolerze, dzięki czemu uzyskuje się wyraźny widok danych map.

DJI Mavic 3 Enterprise wyróżnia się jako najlepszy dron DJI do celów mapowania. Jest wyposażony w najnowocześniejszą kamerę z hybrydowym zoomem, oferującą zoom do 56x i mechaniczną migawkę, która zapobiega rozmyciu obrazu w ruchu podczas szybkich pomiarów. Dron ten można dodatkowo ulepszyć za pomocą opcjonalnego modułu RTK zapewniającego dokładność na poziomie centymetra. Dzięki niezwykle maksymalnemu zasięgowi sterowania wynoszącemu 15 km, Mavic 3 Enterprise wyróżnia się w lotach na duże odległości i utrzymuje stabilny sygnał nawet na maksymalnych dystansach. System DJI AirSense zapewnia bezpieczeństwo, ostrzegając pilotów o pobliskich samolotach i zwiększając ogólne bezpieczeństwo podczas misji.

Przykłady dronów opryskowych i/lub rozsiewających nawóz, które mają zastosowanie w rolnictwie:

DJI Agras T25/50 jest jednym z najbardziej zaawansowanych modeli dostępnych na rynku. Wyposażony jest w system opryskowy i dużą pojemność zbiornika na ciecz, dzięki któremu może efektywnie opryskiwać duże obszary bez konieczności częstego uzupełniania zbiornika. Posiada także zaawansowany system pozycjonowania RTK, który umożliwia precyzyjne i zaplanowane operacje oprysku. Agras oferuje imponujący zasięg, umożliwiający długie misje lotów. Dron może pracować na odległość do 3 km od operatora, co zapewnia szerokie pokrycie pola uprawnego. Co więcej, czas lotu wynosi ok. 10 min z pełnym obciążeniem, co pozwala na efektywne wykorzystanie czasu podczas operacji opryskiwania. Ponadto oferuje funkcje automatyzacji i programowalności, które znacznie ułatwiają proces opryskiwania. Dron może być zaprogramowany do wykonywania konkretnych tras lotu, ustalania parametrów opryskiwania i kontrolowania dawek stosowanych substancji. Możliwość automatycznego powtarzania misji pozwala na precyzyjne i spójne opryskiwanie całego pola. DJI Agras T25/50 jest wyposażony w intuicyjny system sterowania, który umożliwia łatwe i precyzyjne prowadzenie drona. Ponadto dron posiada wiele zaawansowanych systemów bezpieczeństwa, takich jak czujniki przeszkód, alarmy niskiego poziomu baterii i funkcje automatycznego powrotu w przypadku utraty sygnału lub niskiego stanu baterii.

Yamaha R-MAX (dron o napędzie spalinowym) jest szeroko stosowany w rolnictwie i ma długą historię użytkowania. Zaprojektowany specjalnie do celów rolniczych, oferuje dużą wydajność i trwałość. Posiada system opryskowy o dużej pojemności oraz zaawansowane funkcje nawigacyjne, które umożliwiają precyzyjne operacje opryskiwania. R-MAX jest wyposażony w duży zbiornik na ciecz roboczą o pojemności 16 litrów. Dzięki temu dron może opryskiwać większe obszary bez konieczności częstego uzupełniania płynu. Jest także wyposażony w zaawansowany system opryskiwania, który zapewnia równomierne rozpraszanie oprysków na polu. Dysze i system rozpylania zostały zoptymalizowane w celu minimalizacji strat i zapewnienia skuteczności aplikacji. R-MAX osiąga wysoką prędkość lotu, co

umożliwia szybkie i efektywne pokrycie obszaru uprawnego. Dzięki temu dron może skutecznie opryskiwać duże pola w krótkim czasie. R-MAX oferuje imponujący zasięg umożliwiający prowadzenie operacji na znacznej odległości od operatora. Może działać na odległość do 1,5 km od pilota. Co więcej, czas lotu wynosi ok. 60–90 min w zależności od warunków lotu i obciążenia. R-MAX oferuje funkcje programowalności, które umożliwiają zaprogramowanie drona do wykonywania konkretnych tras lotu i ustalania parametrów opryskiwania. Dron może również automatycznie powtarzać misje, zapewniając precyzyjne i spójne aplikacje na całym polu. Yamaha R-MAX został zaprojektowany z myślą o bezpieczeństwie i niezawodności. Dron posiada zaawansowane systemy bezpieczeństwa, takie jak czujniki przeszkód, alarmy niskiego poziomu paliwa i funkcje automatycznego powrotu w przypadku utraty sygnału lub niskiego stanu paliwa.

XAG P30 to kompaktowy model drona, łatwy do obsługi. Wyposażony w system opryskowy i inteligentne funkcje sterowania, co zapewnia precyzyjne opryskiwanie przy jednoczesnym minimalnym wpływie na środowisko. Posiada także technologię rozpoznawania przeszkód, pozwalając na bezpieczne manewrowanie w trudnych warunkach terenowych. P30 jest wyposażony w duży zbiornik na ciecz roboczą o pojemności 30 litrów. Oferuje on duży zasięg, umożliwiający prowadzenie operacji na większych obszarach. Dron może działać na odległość do 3 km od operatora. Co więcej, czas lotu wynosi ok. 30–40 min w zależności od warunków lotu i obciążenia. P30 jest wyposażony w inteligentne funkcje, takie jak czujniki i kamery, które umożliwiają zbieranie danych dotyczących zdrowotności roślin i przesyłanie ich do systemów analizy, co pozwala na szybkie wykrywanie obszarów wymagających interwencji.

XAG V40 to innowacyjny dron rolniczy opryskowy, który oferuje zaawansowane możliwości techniczne. Posiada pojemny zbiornik na ciecz roboczą o pojemności 40 litrów. Oferuje także duży zasięg umożliwiający prowadzenie operacji na rozległych obszarach. Dron może działać na odległość do 3 km od operatora, co zapewnia szerokie pokrycie pola uprawnego. Co więcej, czas lotu wynosi ok. 30–40 min w zależności od warunków lotu i obciążenia. V40 oferuje funkcje automatyzacji i programowalności, które ułatwiają proces opryskiwania. Dron może być zaprogramowany do wykonywania określonych tras lotu, ustawiania parametrów opryskiwania i kontrolowania dawek stosowanych substancji. Możliwość automatycznego powtarzania misji pozwala na precyzyjne i spójne opryskiwanie całego pola.

DJI Agras MG-1S oferuje doskonałą kombinację wydajności i precyzji. Dron wyposażony jest w silny system opryskowy, co umożliwia równomierne i precyzyjne stosowanie agrochemikaliów. Posiada również zaawansowane systemy nawigacyjne i funkcje inteligentnego planowania trasy, które pozwalają na skuteczne i efektywne opryskiwanie. Agras MG-1 posiada duży zbiornik na ciecz roboczą o pojemności 10 litrów i oferuje imponujący zasięg umożliwiający prowadzenie operacji na rozległych obszarach. Dron może działać na odległość do 3 km od operatora. Co więcej, czas lotu wynosi ok. 10–15 min, w zależności od warunków lotu i obciążenia.

AGRICULTURE X6 to zaawansowany dron rolniczy opryskowy, który oferuje imponujące możliwości techniczne. X6 posiada duży zbiornik na ciecz roboczą o pojemności, która może wynosić nawet do 16 litrów. Oferuje również duży zasięg działania umożliwiający prowadzenie operacji na rozległych obszarach. Dron może działać na odległość do 2 km od operatora. Co więcej, czas lotu wynosi ok. 15–20 min, w zależności od warunków lotu i obciążenia.

Przepisy i ograniczenia prawne

Dron jest to zwyczajowo używana nazwa bezzałogowego statku latającego, urządzenia przystosowanego do lotów bez załogi. Prawidłowe nazewnictwo tej zwyczajowej nazwy to:

- bezzałogowy statek powietrzny;
- bezzałogowy system powietrzny (UAS, ang. *unmanned aerial system*);
- bezzałogowy system latający (BSL);
- system bezzałogowego statku powietrznego (SBSP – używany dla całości systemu, wliczając drona wraz z urządzeniami wspomagającymi lot, takie jak przekaźniki, nadajniki RC, stacje do generowania i przetwarzania misji, anteny itp.).

Drony można podzielić na 2 grupy ze względu na sposób pilotowania, tj.:

- pilotowane ręcznie przez pilota lub pilota wykorzystującego operatora znajdującego się na ziemi w czasie rzeczywistym w celu zwiększenia zasięgu lotu VLOS (ang. *Visual Line of Sight*). To standardowa i domyślna forma operacji. Można zaplanować i uruchomić misję autonomiczną, ale wymaga to przez cały czas trwania misji utrzymywania drona w zasięgu wzroku pilota/obserwatora i gotowości do przejęcia kontroli;
- wykonujące lot automatycznie, pilotowane przez komputer poprzez wcześniej zaprogramowaną przez pilota (obserwatorów) misję; dotyczy lotów BVLOS (ang. *Beyond Visual Line of Sight*), planowania misji FIR (ang. *Flight Information Region*; Rejon Informacji Lotniczej) itp.

Dodatkowo drony pilotowane przez pilota poprzez nadajnik możemy podzielić na:

- loty VLOS, czyli loty w zasięgu wzroku (pilot/obserwator drona nie traci kontaktu wzrokowego z maszyną i jest zobligowany do utrzymywania zadanych odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem);
- loty BVLOS, czyli loty poza zasięgiem wzroku, czyli loty w których pilot kontroluje maszynę poprzez sygnał wizyjny przekazywany drogą radiową przez obserwatora i/lub sygnał pozycjonowania bez kontaktu wzrokowego z odbiornikiem. Wykonywanie lotu, w którym pilot nie widzi drona jest operacją BVLOS. Takie loty są obciążone znacznie większym ryzykiem i w Polsce (oraz całej Unii Europejskiej) wymagają uzyskania specjalnego zezwolenia Urzędu Lotnictwa Cywilnego (ULC), najczęściej po przeprowadzeniu oceny

ryzyka SORA (ang. *Specific Operations Risk Assessment*; Analiza Ryzyka dla Specyficznej Operacji Lotniczej). Wykonanie takiego lotu bez odpowiednich uprawnień i zgód jest nielegalne.

Drony ze względu na rodzaj, przeznaczenie oraz konstrukcję można podzielić na kilka typów i kategorii, wskazując na ich przeznaczenie bądź charakterystykę. Najczęściej jednak drony dzielimy na:

- wielowirnikowce;
- stałopłaty (płatowce);
- jednowirnikowce (helikoptery);
- aerostaty (sterowce);
- miękkołaty;
- konstrukcje hybrydowe (np. połączenie dronów elektrycznych z napędem spalinowym, drony pionowego startu i lądowania z przejściem w lot poziomy);
- eksperymentalne (np. drony z napędem rakietowym).

Najczęściej wykorzystywaną konstrukcją używaną w lotach sportowych i rekreacyjnych (w lotach cywilnych) są systemy wielowirnikowe z napędem elektrycznym. Drony te są chętnie wybierane zarówno przez amatorów, jak i użytkowników profesjonalnych ze względu na lekkość konstrukcji przy zachowaniu wysokiej stabilności podczas lotu. Dużą zaletą tego typu konstrukcji jest fakt, iż mogą startować i lądować w pionie, co jest ważne w ciasnych przestrzeniach np. miasta.

Drony mogą też być klasyfikowane ze względu na masę, co jest istotne zwłaszcza w stosowanych regulacjach prawnych oraz ze względu na pułap, w którym operują:

- niskopułapowe (do 120 m AGL, ang. *Above Ground Level*, co w tłumaczeniu na polski oznacza wysokość nad poziomem terenu);
- operujące na pułapach odpowiadających misjom załogowym (powyżej 120 m AGL);
- operujących w górnych pułapach atmosfery i w stratosferze (np. balony meteorologiczne).

Prawo lotnicze – ograniczenia i bezpieczeństwo lotów z wykorzystaniem dronów opryskowych

Wykorzystanie dronów cywilnych przez osoby cywilne m.in. w rolnictwie, reguluje prawo lotnicze (Dz.U. z 2012 r. poz. 933 z późn. zm.; Dz.U. z 2022 r. poz. 1235). Wprowadzenie i stosowanie ustawy ma na celu zachowanie bezpieczeństwa. W 2021 r. zaczęły obowiązywać przepisy prawa zawarte w wytycznych nr 7 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego¹ ujednolicające korzystanie z dronów na terytorium całej

¹Urzędem odpowiedzialnym za stosowanie regulacji z ww. ustawy jest Urząd Lotnictwa Cywilnego, czyli państwowa jednostka budżetowa kierowana przez prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego, będącego organem centralnej administracji rządowej właściwym w sprawach lotnictwa cywilnego.

Unii Europejskiej. Przepisy te umożliwiają pilotom i operatorom dronów pilotowanie w krajach członkowskich UE na podstawie uprawnień uzyskanych w danym kraju.

Bezzałogowe statki powietrzne w zależności od rodzaju aktu prawnego najczęściej są definiowane jako: *dowolny statek powietrzny eksploatowany lub przeznaczony do eksploatacji bez pilota na pokładzie, który może działać automatycznie lub być pilotowany zdalnie* (Dz.U. z 2018 r. art. 3 pkt 30).

Według wytycznych należy rozróżniać pojęcia: operator i pilot. Operatorem SBSP jest dowolna osoba prawna lub fizyczna eksploatująca lub zamierzająca eksploatować co najmniej jeden system bezzałogowego statku powietrznego, natomiast pilotem BSP (pilot bezzałogowego statku powietrznego) jest osoba fizyczna odpowiedzialna za bezpieczne wykonanie lotu przez bezzałogowy statek powietrzny poprzez ręczne sterowanie lotem lub automatyczne, w przypadku gdy bezzałogowy statek powietrzny wykonuje lot automatycznie. W przypadku lotu automatycznego lub autonomicznego pilot powinien monitorować lot i mieć możliwość ewentualnej zmiany kursu, anulacji misji i powrotu drona do miejsca startu.

Loty bezzałogowymi statkami powietrznymi mogą być wykonywane w trzech kategoriach:

- otwartej;
- szczegółowej;
- certyfikowanej.

Niezależnie od kategorii wykonywania lotów uprawnienia do sterowania dronami może uzyskać osoba, która ukończyła 16 rok życia, posiadająca odpowiednie kompetencje. Aby pilotować bezzałogowe statki powietrzne o wadze nieprzekraczającej 250 g, wystarczy zapoznać się z instrukcją obsługi danego drona. W przypadku dronów o masie przekraczającej 250 g konieczne jest zarejestrowanie pilota na stronie ULC, następnie ukończenie bezpłatnego szkolenia oraz zdanie egzaminu online z wiedzy teoretycznej potwierdzającej nabycie kompetencji do latania w podkategorii A1 i A3 (wyjaśnienia w dalszej części pracy).

Loty w kategorii otwartej (OPEN) odnoszą się głównie do większości lotów rekreacyjnych, sportowych i działań komercyjnych niskiego ryzyka. Są loty wykonywane w formule VLOS, czyli takie, podczas których pilot jest w stanie utrzymać stały kontakt wzrokowy z dronem nieuzbrojonym okiem w odległości nie większej niż 120 m od najbliższego punktu na powierzchni ziemi i dronami nieprzekraczającymi masy startowej MTOM 25 kg. Podczas lotu wykonywanego w kategorii otwartej obowiązkowe jest dokonanie rejestracji operatora/pilota drona wyposażonego w kamerę i/lub cięższego niż 250 g na stronie Urzędu Lotnictwa Cywilnego, posiadanie odpowiednich kwalifikacji, między innymi ukończenie szkolenia oraz zgłoszenie lotu w darmowej, mobilnej aplikacji (DroneTower), która jest częścią systemu koordynacji lotów dronów.

W zależności od ograniczeń danej operacji (misji) i wymogów, jakim podlegają piloci dronów oraz bezzałogowych statków powietrznych w kategorii otwartej występują trzy podkategorie:

- A1 – dopuszczone są przeloty nad osobami postronnymi, ale nie można wlatywać nad zgromadzenia osób (zalicza się tu zgromadzenia, w przypadku których zagęszczenie obecnych tam osób uniemożliwia im przemieszczanie się);
- A2 – nie można wlatywać nad osoby i zgromadzenia osób. Minimalna odległość pozioma od osób to 30 m lub 5 m, jeżeli dron posiada funkcję ograniczającą prędkość lotu;
- A3 – nie wolno wlatywać nad osoby i zgromadzenia osób. Minimalna odległość pozioma od terenów mieszkaniowych, użytkowych, przemysłowych lub rekreacyjnych to 150 m.

Drony wykonujące loty w kategorii otwartej również muszą spełniać odpowiednie wymagania, tj.:

- lot wykonywany jest w oparciu o przepisy art. 20 i 22 rozporządzenia UE 2019/947 (okres przejściowy trwający do 31 grudnia 2023 r.);
- należą do jednej z klas „C” określonych w rozporządzeniu delegowanym (UE) 2019/945 lub zostały skonstruowane do użytku własnego;
- mają masę startową mniejszą niż 25 kg.

Zasady wykonywania lotów opisano w tabeli 1 natomiast wszystkie wymagania, jakie muszą być spełnione podczas lotów w kategorii otwartej, znajdują się w art. 4 rozporządzenia Komisji Europejskiej (UE) 2019/947 oraz wytycznych nr 7 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 9 czerwca 2021 r.

Tabela 1

Zasady wykonywania lotów w kategorii otwartej od 1 stycznia 2024 roku

Operacje			Operatora Drona/Pilot			
Klasa „C”	MTOM (Maksymalna Masa Startowa)	Podkategoria	Zasady wykonywania lotów	Czy wymagana jest rejestracja	Kompetencje pilota	Minimalny wiek pilota
Skonstruowane do użytku prywatnego	<250 g	A1	szczegółowe zasady zostały opisane poniżej	TAK (nie jest wymagane, jeśli dron jest zabawką lub nie ma kamery)	przeczytaj instrukcję obsługi drona	brak minimalnego wieku (obowiązują pewne warunki)
C0						
C1	<900 g	A2			A1/A3	16
C2	<4 kg				A2	
C3	<25 kg	A3		TAK	A3	
C4						
Skonstruowane do użytku prywatnego						
Określone w art. 20						

Źródło: <https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-otwarta-informacje>

Obowiązek rejestracji operatora dotyczy przypadków, gdy:

- masa drona wynosi 250 g lub więcej lub w przypadku drona, który podczas uderzenia może przekazać człowiekowi energię kinetyczną o wartości powyżej 80 J (jednostka energii);
- dron wyposażony jest w czujnik zdolny do zbierania danych osobowych (np. kamerę), chyba że dany dron zgodnie z dyrektywą 2009/48/WE jest uznany za zabawkę, czyli jest przeznaczony dla dzieci w wieku poniżej 14 roku życia.

W przypadku lotów odbywających się w kategorii otwartej istnieją pewne ograniczenia, do których zalicza się między innymi konieczność przestrzegania zachowania wymaganych odległości od osób i zabudowy określonych w zapisach rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) 2019/947 oraz brak możliwości wykonania lotu w strefach DRA-RL CTR < 1KM, co oznacza Strefę Geograficzną Ograniczoną (DRA-R) o niskim prawdopodobieństwie zgody na lot (RL), która znajduje się w obrębie strefy kontrolowanej lotniska (CTR) i jest oddalona od jego ogrodzenia o mniej niż 1 kilometr.

Wszystkie podstawy prawne zostały zapisane i ogłoszone w poniższych aktach prawnych:

1. Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. (wersja skonsolidowana z dnia 4 kwietnia 2022 r.) w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych;
2. Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r. (wersja skonsolidowana z dnia 9 sierpnia 2020 r.) w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich;
3. Wytyczne nr 7 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 9 czerwca 2021 r. w sprawie sposobów wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych w związku z wejściem w życie przepisów rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) nr 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych;
4. Wytyczne nr 24 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 30 grudnia 2020 r. w sprawie wyznaczania stref geograficznych dla systemów bezzałogowych statków powietrznych.

Loty średniego ryzyka, których parametry wychodzą poza kategorię otwartą zaliczane są do kategorii szczególnej. Loty zakwalifikowane w kategorii szczególnej oparte są na ocenie ryzyka ze strony operatora, jak również Urzędu Lotnictwa Cywilnego. Wykonując loty w tej kategorii, wymagana jest rejestracja wszystkich operatorów bezzałogowych statków powietrznych bez względu na masę eksploatowanego drona. Operator BSP zobowiązany jest do złożenia w ULC oświadczenia o zgodności operacji lotniczej zgodnej z krajowym scenariuszem standardowym i otrzymania od prezesa ULC potwierdzenia odbioru i kompletności oświadczenia i zgodności operacji z krajowym scenariuszem standardowym. Pilot wykonujący loty w tej kategorii

musi posiadać certyfikat wiedzy teoretycznej oraz potwierdzenie ukończenia szkolenia praktycznego z zakresu pilotażu bezzałogowych statków powietrznych. Przed wykonaniem każdego lotu pilot zobowiązany jest do jego zgłoszenia w darmowej, mobilnej aplikacji DroneTower (Check-In).

Narodowe scenariusze standardowe (NSTS) to zasady wykonywania lotów BSP w kategorii szczególnej oraz zasady uzyskiwania uprawnień przez pilotów BSP, które zostały opublikowane przez prezesa ULC i są ważne 2 lata (jednak nie dłużej niż do 1 stycznia 2026 r.); są to następujące dokumenty:

1. Wytyczne nr 15 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-01 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) lub z widokiem z pierwszej osoby (FPV), wykonywanych z użyciem bezzałogowego statku powietrznego o masie startowej mniejszej niż 4 kg.
2. Wytyczne nr 16 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-02 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) z użyciem bezzałogowego statku powietrznego kategorii wielowirnikowiec (MR), o masie startowej mniejszej niż 25 kg.
3. Wytyczne nr 17 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-03 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii stałopłat (A) o masie startowej mniejszej niż 25 kg.
4. Wytyczne nr 18 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-04 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii helikopter (H), o masie startowej mniejszej niż 25 kg.
5. Wytyczne nr 19 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-05 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych o masie startowej mniejszej niż 4 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego.
6. Wytyczne nr 20 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-06 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii wielowirnikowiec (MR), o masie startowej mniejszej niż 25 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego.
7. Wytyczne nr 21 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-07 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii stałopłat (A), o masie startowej mniejszej niż 25 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego.

8. Wytyczne nr 22 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-08 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii helikopter (H) o masie startowej mniejszej niż 25 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego.

W przypadku, gdy operacja wykracza poza założenia scenariusza standardowego i nie mieści się w kategorii otwartej, jest ona wykonywana na podstawie zgody uzyskanej od prezesa ULC. W tym przypadku operator składa wniosek wraz z przeprowadzoną oceną ryzyka operacji.

Loty w kategorii szczególnej mogą odbywać się także na podstawie certyfikatu operatora lekkich systemów bezzałogowych statków powietrznych (LUC). Wydanie tego certyfikatu następuje na wniosek osoby prawnej nie cywilnej i ma na celu ocenę przez ULC prowadzonej organizacji i wykazanie, że operator jest w stanie samodzielnie ocenić ryzyko operacji. Warunki, jakie muszą być spełnione przez wnioskodawcę są zawarte w rozporządzeniu 2019/947/UE (Dz.U. UE L 152 z 11.06.2019, z późn. zm.).

W ramach kategorii szczegółowej mogą być realizowane następujące operacje:

- loty w ustalonej przez pilota bezpiecznej odległości od innych statków powietrznych, przeszkód, pojazdów, osób lub zwierząt na wypadek awarii lub utraty kontroli nad BSP;
- loty różnorodnymi BSP bez względu na ich masę/rozmiar (na podstawie NSTS-ów, zezwolenia prezesa ULC, certyfikatu LUC).

Wszystkie podstawy prawne, na których dokonywane są loty BSP w kategorii szczególnej znajdują się w poniższych aktach:

1. Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. (wersja skonsolidowana z dnia 4 kwietnia 2022 r.) w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych;
2. Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r. (wersja skonsolidowana z dnia 9 sierpnia 2020 r.) w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich;
3. Wytyczne nr 15 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 1 czerwca 2023 r. w sprawie sposobów wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych w związku z wejściem w życie przepisów rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) nr 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych (Dz. Urz. ULC z 2023 r. poz. 25);
4. Wytyczne nr 17 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 6 czerwca 2023 r. w sprawie wyznaczania stref geograficznych dla systemów bezzałogowych statków powietrznych (Dz. Urz. ULC z 2023 r. poz. 42).

Na podstawie analizy dokumentów prawnych dotyczących wykonywania lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi można stwierdzić, że większość lotów realizowanych na potrzeby obserwacji upraw mogą być wykonywane w kategorii otwartej. Co za tym idzie, rolnik chcący samodzielnie prowadzić takie obserwacje, powinien przejść szkolenie i zdać egzamin w formie zdalnej, nie ponosząc z tego tytułu żadnych kosztów, nie licząc kosztów zakupu lub wypożyczenia drona.

Regulacje prawne dotyczące dronów ciężkich (opryskowych oraz o maksymalnej masie startowej MTOM <25 kg)

Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych do aplikacji środków ochrony roślin (SOR), potocznie zwane opryskami, jest jedną z najbardziej obiecujących technologii w rolnictwie precyzyjnym. Umożliwia ona precyzyjne, celowane dostarczanie substancji aktywnych, redukcję zużycia pestycydów, ograniczenie ugniatania gleby oraz interwencję w uprawach wysokich, niedostępnych dla tradycyjnego sprzętu naziemnego. Mimo tych zalet wdrożenie dronów opryskowych na szeroką skalę w Unii Europejskiej napotyka na znaczące bariery prawne wynikające z konieczności jednoczesnego spełnienia wymogów prawa lotniczego i restrykcyjnych przepisów dotyczących stosowania pestycydów.

Kluczową trudnością w legalnym stosowaniu dronów opryskowych jest fakt, że podlegają one dwóm niezależnym reżimom prawnym. Operator musi nawigować w gąszczu przepisów lotniczych, które dbają o bezpieczeństwo operacji w przestrzeni powietrznej oraz przepisów rolno-środowiskowych, które regulują sam proces aplikacji pestycydów. Spełnienie wymogów jednej jurysdykcji nie zwalnia z obowiązków wynikających z drugiej, co czyni cały proces skomplikowanym i wymagającym.

Wymogi prawa lotniczego: kategoria szczególna i ocena ryzyka SORA

Zgodnie z jednolitymi przepisami Unii Europejskiej (Dz.U. UE L 152 z 11.06.2019, s. 45, z późn. zm.) każda operacja lotnicza, która zakłada zrzut jakiegokolwiek materiału z drona jest automatycznie wykluczona z najprostszej kategorii otwartej. Oznacza to, że oprysk z powietrza zawsze klasyfikowany jest jako operacja w kategorii szczególnej. Wymaga to od operatora uzyskania indywidualnego zezwolenia na operację od krajowego organu nadzoru lotniczego Urzędu Lotnictwa Cywilnego. Podstawą do wydania takiego zezwolenia jest analiza ryzyka przygotowana przez operatora zgodnie z metodyką SORA. Proces SORA to szczegółowa, wieloetapowa ocena zagrożeń dla bezpieczeństwa osób trzecich na ziemi oraz dla innego ruchu lotniczego. Operator musi zidentyfikować potencjalne ryzyka (np. awaria drona, utrata łączności, wlot w niekontrolowany sposób w inną strefę) i zaproponować skuteczne środki ich mitygacji zarówno na poziomie technicznym (np. systemy awaryjne, spadochron), jak i operacyjnym (np. procedury awaryjne, odpowiednie kompetencje pilota) (Villa i in. 2016). Przygotowanie dokumentacji SORA jest zadaniem złożonym i kosztownym, co stanowi pierwszą istotną barierę wdrożeniową.

Regulacje dotyczące aplikacji pestycydów

Nawet po uzyskaniu zgody lotniczej, operator napotyka na drugą, często trudniejszą do pokonania barierę wynikającą z przepisów o zrównoważonym stosowaniu pestycydów. Głównym aktem prawnym w tym zakresie jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/128/WE (Dz.U. UE L 309 z 24.11.2009, s. 71, z późn. zm.). Artykuł 9 tej dyrektywy ustanawia fundamentalną zasadę: generalny zakaz wykonywania oprysków z powietrza. Użycie drona do aplikacji środków ochrony roślin jest jednoznacznie interpretowane jako oprysk z powietrza. Dyrektywa przewiduje możliwość uzyskania odstępstwa (derogacji) od tego zakazu, jednak państwa członkowskie mogą na to zezwolić tylko w wyjątkowych, ściśle określonych przypadkach. Zgoda może być wydana, jeżeli wnioskodawca udowodni, że zastosowanie metody lotniczej przynosi jednoznaczne korzyści dla środowiska lub zdrowia ludzi w porównaniu z metodami naziemnymi lub gdy metody naziemne nie są w ogóle możliwe do zastosowania (np. w terenie górzystym, w uprawach wysokich w późnych fazach wzrostu). W Polsce organem odpowiedzialnym za wydawanie takich zezwoleń jest Państwowa Inspekcja Ochrony Roślin i Nasiennictwa (PIORiN). Proces uzyskania zgody jest odrębny od procedury w ULC i wymaga złożenia szczegółowego wniosku uzasadniającego konieczność zastosowania metody lotniczej. Jak wskazują badania, ta restrykcyjna polityka wynikająca z troski o potencjalny znoś pestycydów jest głównym czynnikiem hamującym rozwój rynku dronów opryskowych w Unii Europejskiej (Toscano in. 2024).

Analiza regulacji prawnych wskazuje, że legalne wykorzystanie dronów do oprysków w rolnictwie jest procesem złożonym i obciążonym wysokimi barierami wejścia. Operator musi nie tylko posiadać zaawansowaną wiedzę z zakresu prawa lotniczego i oceny ryzyka SORA, ale również uzyskać odrębne zgody od instytucji rolnych, udowadniając wyższość metody lotniczej nad naziemną. Perspektywy na uproszczenie tych procedur leżą w tworzeniu przez EASA (Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego) i krajowe urzędy lotnicze standardowych scenariuszy (STS) lub predefiniowanych ocen ryzyka (PDRA), które mogłyby objąć typowe operacje opryskowe i zwolnić operatorów z konieczności przechodzenia pełnej ścieżki SORA.

Przełomem w wykorzystaniu dronów opryskowych stał się fakt wprowadzenia nowych przepisów prawnych w formie odstępstwa **LBSP/SPEC/O/2025-02**, dzięki którym Polska została pierwszym krajem w Unii Europejskiej dopuszczającym możliwość wykonywania dronem rolniczym (o masie do 105 kg) oprysków w kategorii otwartej A3 bez konieczności każdorazowego uzyskiwania pozwolenia. Dotyczy to konkretnie lotów w kategorii Open A3, czyli z dala od ludzi, nad obszarami niezamieszkanymi i zachowując odpowiednie odległości od budynków. Według przepisów należy bezwzględnie unikać latania nad ludźmi, którzy nie biorą udziału w operacji lotniczej, a operatorzy muszą być zarejestrowani, ukończyć szkolenie online i zdać test A1/A3, a w przypadku podkategorii A2 dodatkowo zdać egzamin teoretyczny

i praktyczny. Nowe przepisy mają na celu wsparcie rolnictwa wykorzystującego drony rolnicze (drony ciężkie), ułatwiając dostęp rolnikom czy producentom rolnym do nowoczesnych technologii. Jest to wyraźny sygnał, że Polska staje się liderem w zakresie przepisów dotyczących lotów bezzałogowych statków powietrznych wykorzystywanych w rolnictwie. Nowe przepisy wprowadzają istotne uproszczenie polegające na tym, że operator planujący wykonać operację z wykorzystaniem BSP o masie do 105 kg (MTOM) w celach rolniczych, ochrony zwierząt lub prezentacji sprzętu z wyłączeniem lotów sportowych i rekreacyjnych, może skorzystać ze wspomnianego odstępstwa i przeprowadzić operację w kategorii Open A3 bez potrzeby składania indywidualnych wniosków o zgodę na każdy lot. Ze względów technicznych konieczne jest spełnienie konkretnych warunków, które szczegółowo określa dokument LBSP/SPEC/O/2025-02. Pilot musi udowodnić posiadanie odpowiednich kompetencji (co najmniej certyfikat NSTS-01, NSTS-02 lub STS-01), przejść specjalistyczne szkolenie (naziemne i praktyczne) w zakresie operowania ciężkimi dronami zgodnie z procedurą odstępstwa, a także musi wykazać, że dron spełnia wymagania techniczne (m.in. posiada systemy bezpieczeństwa Geocage i RTH). Pilot podczas misji musi przestrzegać szczególnych zasad odległości, wysokości lotu i procedur bezpieczeństwa (np. maksymalna wysokość operacji to 30 m nad poziomem gruntu). Jego obowiązkiem jest również zgłoszenie misji poprzez aplikację DroneTower i wykonanie zgłoszenia lotu poprzez przejście procedury „Check-in”, co stanowi formę powiadomienia służb ruchu lotniczego. Dron podczas prowadzenia misji musi znajdować w zasięgu wzroku (VLOS), należy zachować minimum 30 metrów od zabudowań, ludzi i obiektów niekontrolowanych, a prowadzenie operacji w miejscach zgromadzeń osób jest zabronione.

Od 2024 r. w Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowym Instytucie Badawczym w Puławach prowadzone są badania nad wykorzystaniem dronów opryskowych w rolnictwie. Badania skupiają się głównie na znoszeniu cieczy roboczej w różnych warunkach pogodowych oraz nad optymalną wysokością nanoszenia cieczy na rośliny (wydajność vs efektywność). Prowadzone doświadczenia w roślinach wysokorosnących (chmiel, tytoń) oraz na poligonach doświadczalnych jasno pokazują, że zastosowanie dronów do wykonywania zabiegów agrolotniczych, głównie w postaci aplikacji środków ochrony roślin, niesie za sobą wiele korzyści, takich jak precyzja, efektywność i minimalizacja negatywnego wpływu na środowisko naturalne oraz bezpieczeństwo osoby wykonującej oprysk. W tabeli 2 ukazano różnice w znosach cieczy roboczej pomiędzy wykonywanym opryskiem metodą tradycyjną a dronem po pierwszym roku prowadzonych badań.

Tabela 2

Różnice w znosie cieczy roboczej

Wyniki uśrednione	Dolne partie liści	Środkowe partie liści	Górne partie liści	Procentowa objętość cieczy, która trafia poza roślinę właściwą	Różnica w krotności cieczy, która trafia poza roślinę opryskiwaną (metoda tradycyjna vs alternatywna)
Znos (procentowa różnica pomiędzy znosem a rośliną właściwą)	22,10%	23,80%	11,30%	19%	1
	1,6% (325%)	2,3% (678%)	2,3% (700%)	2%	9,5 × mniej cieczy przy zastosowaniu metody alternatywnej
	0,9% (467%)	1,2% (1000%)	1,6% (1331%)	1,20%	16 × mniej cieczy przy zastosowaniu metody alternatywnej
	0,2% (1200%)	0,3% (1833%)	0,5% (2120%)	0,30%	63 × mniej cieczy przy zastosowaniu metody alternatywnej

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

W wykorzystaniu dronów opryskowych kluczowe jest podejście do kwestii bezpieczeństwa. Każdy zabieg powinien być poprzedzony dobrym przygotowaniem, począwszy od zaplanowania odpowiedniego dnia do wykonywania oprysków, odpowiedniego przygotowania cieczy roboczej, zaplanowania misji do wykonania oprysku i bezpiecznego przeprowadzenia misji z wykorzystaniem chemii.

Aby bezpiecznie przeprowadzać zabiegi ochrony roślin z wykorzystaniem dronów, należy respektować następujące zalecenia:

1. Przestrzeganie przepisów prawa lotniczego:

- upoważnienie pilotów/operatorów do przeprowadzenia misji agrolotniczych – piloci powinni posiadać odpowiednie uprawnienia i certyfikaty, które uprawniają do przeprowadzenia lotów opryskowych;
- kwalifikacja drona opryskowego do przeprowadzenia oprysku – wydanie pozwolenia na zastosowanie danej maszyny do prowadzenia oprysków (podobnie jak z opryskiwaczami naziemnymi);
- potwierdzenie wykonania wytycznych od podmiotów odpowiedzialnych za wprowadzenie na rynek do zastosowań rolniczych środków ochrony roślin, a następnie odpowiednich pozwoleń na wykonywanie oprysków cieczami niezarejestrowanymi do zabiegów agrolotniczych;
- wykonywanie lotów w strefach powietrznych ograniczonych, w których loty dronami są ograniczone lub zakazane. Piloci wykonujący loty muszą posiadać

odpowiednie kwalifikacje uprawniające do wykonywania lotów w strefach ograniczonych.

2. Przestrzeganie przepisów BHP:

- zapoznanie się z konstrukcją, obsługą i konserwacją drona służącego do wykonywania oprysków. Piloci muszą dokładnie zapoznać się z instrukcją obsługi maszyny i przestrzegać wytycznych i zaleceń producenta;
- przestrzeganie zaleceń producenta dotyczących długości czasu lotu i zaleceń dla maksymalnego rozładowania baterii. Piloci powinni regularnie sprawdzać stan pakieta baterii i ładować zgodnie z zaleceniami producenta;
- piloci podczas planowania misji agrolotniczej powinni na bieżąco weryfikować warunki pogodowe, aby uniknąć sytuacji, w których znoszenie cieczy lub jej działanie mogłoby być inne niż zaplanowane podczas misji.

3. Zachowanie bezpieczeństwa lotów dla ochrony środowiska naturalnego:

- stosowanie środków ochrony roślin lub innych zabiegów agrolotniczych musi być poprzedzone sprawdzeniem, czy dany środek został dopuszczony do użytku do zastosowań agrolotniczych i powinny być stosowane zgodnie z ulotką;
- w celu uniknięcia zanieczyszczenia środowiska podczas wykonywania zabiegów należy unikać lub maksymalnie ograniczyć prowadzenie misji w pobliżu cieków i zbiorników wodnych;
- w celu uniknięcia zanieczyszczenia środowiska glebowego należy dostosować ilość aplikowanej cieczy do potrzeb danej rośliny, aby uniknąć nadmiernego stosowania środków i negatywnego wpływu na organizmy żywe.

4. Zapewnienie bezpieczeństwa osób trzecich:

- podczas wykonywania oprysków należy bezwzględnie zapewnić bezpieczeństwo osobom postronnym, zwierzętom oraz mieniu. Podczas prowadzenia misji zarówno autonomicznej, jak i manualnej należy obserwować otoczenie na obszarze zaplanowanej misji, a w razie potrzeby przerwać ją w sposób bezpieczny;
- piloci i osoby znajdujące się w obszarze działań dronów opryskowych muszą być zaopatrzeni w odpowiednią odzież i maski ochronne dostosowane do wykonywanego oprysku.

Komercyjnie dostępne drony opryskowe w dużej mierze są wyposażone w różne systemy bezpieczeństwa, takie jak automatyczne lądowanie w przypadku awarii czy utraty sygnału, jednak ze względu na gabaryty dronów opryskowych podczas prowadzenia misji warto wykupić ubezpieczenie OC i/lub AC, które pokryje ewentualne szkody wyrządzone przez drona (ubezpieczenie OC na korzystanie z dronów powyżej 25 kg jest obowiązkowe). Ponadto drony opryskowe warto poddawać regularnym przeglądom technicznym przez wykwalifikowany personel. Prawo lotnicze (dronowe) dotyczące zarówno lotów sportowych, jak i komercyjnych zmienia się bardzo dynamicznie, w głównej mierze ze względu na postęp w technologii, dlatego też piloci wykonujący misje opryskowe powinni regularnie uczestniczyć w szkoleniach,

które pozwolą na zdobywanie niezbędnej wiedzy i umiejętności lub przynajmniej obligatoryjnie na bieżąco śledzić zmiany w przepisach dotyczących lotów dronami.

Bezpieczeństwo jest priorytetem przy zastosowaniu ciężkich bezzałogowych statków powietrznych, jakimi są drony opryskowe. Przestrzeganie przepisów, właściwa obsługa, konserwacja oraz ciągle doskonalenie umiejętności jako pilota są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa zarówno dla użytkownika, jak i środowiska.

Literatura

1. Berner B., Chojnacki J.: Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych do opryskiwania upraw rolniczych. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 2017, **2**: 23-25.
2. Berni J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Suarez L., Fereres E.: Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(3): 722-738; DOI: 10.1109/TGRS.2008.2010457.
3. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/128/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania na rzecz osiągnięcia zrównoważonego stosowania pestycydów (Dz.U. UE L 309 z 24.11.2009, s. 71, z późn. zm.); <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0128>
4. Gabriel J.L., Zarco-Tejada P.J., Lopez-Herrera P.J., Perez-Martin E., Alonso-Ayuso M., Quemada M.: Airborne and ground level sensors for monitoring nitrogen status in a maize crop. *Biosystems Engineering*, 2017, **160**: 124-133; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.003>
5. Gong Y., Duan B., Fang S., Zhu R., Wu X., Ma Y.: Remote estimation of rapeseed yield with unmanned aerial vehicle (UAV) imaging and spectral mixture analysis. *Plant Methods*, 2018, **14**(1): 70; DOI: 10.1186/s13007-018-0338-z.
6. Hunt E.R., Cavigelli M., Daughtry C.S.T., McMurtrey J.E., Walthall C.L.: Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 2005, **6**(4): 359-378; DOI: 10.1007/s11119-005-2324-5.
7. Mazur P., Chojnacki J.: Wykorzystanie dronów do teledetekcji multispektralnej w rolnictwie precyzyjnym. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 2017, **1**: 25-28.
8. Miché A., Morelle K., Lehaire F., Widar J., Authélet M., Vermeulen C., Lejeune P.: Use of unmanned aerial system to assess wildlife (*Sus scrofa*) damage to crops (*Zea mays*). *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2016, **4**(4): 266-275; DOI: 10.1139/juvs-2016-0014.
9. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 22 maja 2012 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo lotnicze (Dz.U. z 2012 r. poz. 933).
10. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 28 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo lotnicze (Dz.U. z 2022 r. poz. 1235).
11. Park J.K., Park J.: Crop Classification Using Imagery of Drone. *EERS 2015 International Conference on Environmental Engineering and Remote Sensing* (online). 2015, p. 91-94; DOI: 10.2991/eers-15.2015.22.
12. Primicerio J., Gennaro S.F.D., Fiorillo E., Genesio L., Lugato E., Matese A.: A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture* (online first). 2012, **13**: 517-523; DOI: 10.1007/s11119-012-9257-6.
13. Reinecke M., Prinsloo T.: The influence of drone monitoring on crop health and harvest size (online). *IEEE. Conference NextComp IEEE Mauritius*. 2017; DOI: 10.1109/NEXTCOMP.2017.8016168

14. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/1139 z dnia 4 lipca 2018 r. w sprawie wspólnych zasad w dziedzinie lotnictwa cywilnego i utworzenia Agencji Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego oraz zmieniające rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 2111/2005, (WE) nr 1008/2008, (UE) nr 996/2010, (UE) nr 376/2014 i dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE i 2014/53/UE, a także uchylające rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 552/2004 i (WE) nr 216/2008 i rozporządzenie Rady (EWG) nr 3922/91 (Tekst mający znaczenie dla EOG.) (Dz.U. z 2018 r. art. 3 pkt 30).
15. Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r. w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzech (Dz.U. UE L 152 z 11.06.2019, s. 1, z późn. zm.).
16. Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych (Dz.U. UE L 152 z 11.06.2019, s. 45, z późn. zm.); <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32019R0947>
17. Rutt en A., Casaer J., Vogels M.F.A., Addink E.A., Vanden Borre J., Leirs H.: Assessing agricultural damage by wild boar using drones: wild boar damage assessment. *Wildlife Society Bulletin*, 2018, **42(4)**: 568-576; DOI: 10.1002/wsb.916.
18. S c h i r r m a n n M., Giebel A., Gleiniger H., Pflanz M., Lentschke J., Dammer K.H.: Monitoring agronomic parameters of winter wheat crops with low-cost UAV imagery. *Remote Sensing*, 2016, **8(9)**; DOI: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/9/706>
19. T o s c a n o F., Fiorentino C., Capece N., Erra U.: Unmanned Aerial Vehicles for Precision Agriculture: A review. 2024, *IEEE Access* PP 99; DOI:10.1109/ACCESS.2024.3401018
20. Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. Prawo lotnicze (Dz.U. z 2012 r. poz. 933 z późn. zm.).
21. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Kategoria otwarta – informacje; <https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-otwarta-informacje> (dostęp: 15.12.2025).
22. Y u N., Li L., Schmitz N., Tian L., Greenberg J.A., Diers B.W.: Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **187**: 91-101; DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.005.
23. W e s s e l i n g J., Kroes J., Oliveira T.C., Damiano F.: The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Elsevier. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 170; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105054>
24. W a n g X., Miao Y., Dong L., Zhichao C.: Developing Active Canopy Sensor-Based Precision Nitrogen Management Strategies for Maize in Northeast China. *Sustainability*, 2019, **11(3)**; DOI: 10.3390/su11030706
25. Wytyczne nr 7 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 9 czerwca 2021 r. w sprawie sposobów wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych w związku z wejściem w życie przepisów rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) nr 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych (Dz. Urz. ULC z 2021 r. poz. 34).
26. Wytyczne nr 24 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 30 grudnia 2020 r. w sprawie wyznaczania stref geograficznych dla systemów bezzałogowych statków powietrznych (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 78).
27. Wytyczne nr 15 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-01 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) lub z widokiem z pierwszej osoby (FPV), wykonywanych z użyciem bezzałogowego statku powietrznego o masie startowej mniejszej niż 4 kg (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 69)
28. Wytyczne nr 16 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-02 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) z użyciem bezzałogowego statku powietrznego kategorii wielowirnikowiec (MR), o masie startowej mniejszej niż 25 kg (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 70).

29. Wytyczne nr 17 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-03 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii stałopłat (A) o masie startowej mniejszej niż 25 kg (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 71).
30. Wytyczne nr 18 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-04 dla operacji w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii helikopter (H), o masie startowej mniejszej niż 25 kg. (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 72).
31. Wytyczne nr 19 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-05 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych o masie startowej mniejszej niż 4 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego. (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 73).
32. Wytyczne nr 20 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-06 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii wielowirnikowiec (MR), o masie startowej mniejszej niż 25 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego. (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 74).
33. Wytyczne nr 21 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-07 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii stałopłat (A), o masie startowej mniejszej niż 25 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego. (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 75).
34. Wytyczne nr 22 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-08 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych kategorii helikopter (H) o masie startowej mniejszej niż 25 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego (Dz. Urz. ULC z 2020 r. poz. 76).
35. Villa T.F., Gonzalez F., Miljievic B., Ristovski Z., Morawska L.: An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospectives. *Sensors*, 2016, **16**(7), 1072; <https://doi.org/10.3390/s16071072>
36. Odstępstwo nr LBSP/SPEC/O/2025-02 https://ulc.gov.pl/_download/Wymagania_dla_operatora_S BSP.pdf

Adres do korespondencji:

mgr inż. Tytus Berbec
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 758
e-mail: tberbec@iung.pulawy.pl

AUTOR

Tytus Berbec

ORCID

0000-0001-5183-5807

W serii wydawniczej „RAPORTY PIB”, a od 2007 r. „STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB” ukazały się następujące pozycje:

1. *Wybrane aspekty agrochemicznych badań gleby*. Puławy, 2006.
2. *Zasady wprowadzania nawozów do obrotu*. Puławy, 2006.
3. *Regionalne zróżnicowanie produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2006.
4. *Monitoring skutków środowiskowych planu rozwoju obszarów wiejskich*. Puławy, 2007.
5. *Sprawdzenie przydatności wskaźników do oceny zrównoważonego gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach i województwach*. Puławy, 2007.
6. *Możliwości rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2007.
7. *Współczesne uwarunkowania organizacji produkcji w gospodarstwach rolniczych*. Puławy, 2007.
8. *Efektywne i bezpieczne metody regulacji zachwaszczenia, nawożenia i uprawy roli*. Puławy, 2007.
9. *Wybrane elementy technologii produkcji roślinnej*. Puławy, 2007.
10. *Problem erozji gleb w procesie przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2008.
11. *Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce*. Puławy, 2008.
12. *Wybrane zagadnienia systemów informacji przestrzennej i obszarów problemowych rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2008.
13. *Tworzenie postępu biologicznego w hodowli tytoniu i chmielu*. Puławy, 2008.
14. *Kierunki zmian w produkcji roślinnej w Polsce do roku 2020*. Puławy, 2009.
15. *Wybrane elementy regionalnego zróżnicowania rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2009.
16. *Systemy wspomagania decyzji w zrównoważonej produkcji roślinnej*. Puławy, 2009.
17. *Stan i kierunki zmian w produkcji rolniczej (wybrane zagadnienia)*. Puławy, 2009.
18. *Produkcyjne i środowiskowe aspekty współczesnych metod nawożenia i regulacji zachwaszczenia*. Puławy, 2009.
19. *Oddziaływanie rolnictwa na środowisko przyrodnicze w warunkach zmian klimatu*. Puławy, 2010.
20. *Ocena zrównoważenia gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach, powiatach i województwach*. Puławy, 2010.
21. *Możliwości rozwoju obszarów problemowych rolnictwa (OPR) w świetle PROW 2007–2013*. Puławy, 2010.
22. *Możliwości rozwoju gospodarstw o różnych kierunkach produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2010.
23. *Związki fitogeniczne jako naturalna alternatywa antybiotykowych promotorów wzrostu*. Puławy, 2010.
24. *Wybrane aspekty przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2010.
25. *Stan obecny i perspektywy nawożenia roślin w Polsce w aspekcie regulacji prawnych*. Puławy, 2010.
26. *Stan obecny i perspektywy rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2010.
- 27(1). *Środowiskowe skutki działalności rolniczej i wdrażania PROW na obszarach problemowych rolnictwa*. Puławy, 2011.

- 28(2). *Techniki i technologie stosowane w produkcji roślinnej a środowisko przyrodnicze*. Puławy, 2012.
- 29(3). *Problemy zrównoważonego gospodarowania w produkcji rolniczej*. Puławy, 2012.
- 30(4). *Doskonalenie integrowanych technologii produkcji zbóż jarych i roślin pastewnych ze szczególnym uwzględnieniem początkowych elementów agrotechniki*. Puławy, 2012.
- 31(5). *Rola badań naukowych w kształtowaniu postępu w produkcji chmielu i tytoniu*. Puławy, 2012.
- 32(6). *Wybrane aspekty zrównoważonego rozwoju i specjalizacji gospodarstw rolniczych*. Puławy, 2013.
- 33(7). *Działalność Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa-PIB w Puławach w zakresie wspierania doradztwa i praktyki rolniczej*. Puławy, 2013.
- 34(8). *Problemy gospodarki nawozowej w Polsce*. Puławy, 2013.
- 35(9). *Zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania gleb użytkowanych rolniczo – wybrane zagadnienia*. Puławy, 2013.
- 36(10). *Zmiany w technologiach produkcji roślinnej – oceny i wpływ na środowisko rolnicze*. Puławy, 2014.
- 37(11). *Dobre praktyki w nawożeniu*. Puławy, 2014.
- 38(12). *Jakość informacji w systemach wspomagania decyzji*. Puławy, 2014.
- 39(13). *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii pochodzenia rolniczego i ich wpływ na środowisko*. Puławy, 2014.
- 40(14). *Wybrane problemy rolnictwa polskiego z uwzględnieniem stanu jego zrównoważenia*. Puławy, 2014.
- 41(15). *Technologie produkcji zbóż i roślin pastewnych warunkujące wysoki plon i dobrą jakość*. Puławy, 2014.
- 42(16). *Podstawy nowoczesnego doradztwa nawozowego w Polsce*. Puławy, 2015.
- 43(17). *Wybrane problemy produkcji rolniczej z uwzględnieniem aspektu dóbr publicznych*. Puławy, 2015.
- 44(18). *Wybrane zagadnienia produkcji roślinnej w Polsce*. Puławy, 2015.
- 45(19). *Kształtowanie żyzności gleby*. Puławy, 2015.
- 46(20). *Wybrane zagadnienia związane z ochroną gleb przed degradacją*. Puławy, 2015.
- 47(1). *Problemy produkcji rolniczej w Polsce w kontekście ich oddziaływania na środowisko*. Puławy, 2016.
- 48(2). *Innowacje w nawożeniu*. Puławy, 2016.
- 49(3). *Siedliskowe i agrotechniczne uwarunkowania produkcji roślinnej w Polsce*. Puławy, 2016.
- 50(4). *Technologie produkcji roślinnej w warunkach zmieniającego się klimatu*. Puławy, 2016.
- 51(5). *Krajowe bazy danych o glebach*. Puławy, 2017.
- 52(6). *Redukcja emisji gazów cieplarnianych i amoniaku oraz metody adaptacji do zmian klimatu (wybrane zagadnienia)*. Puławy, 2017.
- 53(7). *Nawożenie a środowisko*. Puławy, 2017.
- 54(8). *Jakość gleb użytkowanych rolniczo i wskaźniki jej oceny*. Puławy, 2017.
- 55(9). *Uwarunkowania i kierunki zmian produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2018.
- 56(10). *Aktualne problemy nawożenia*. Puławy, 2018.
- 57(11). *Technologie produkcji roślinnej w warunkach zmieniającego się klimatu*. Puławy, 2018.

- 58(12). *Stan zagrożeń dla jakości gleb w Polsce*. Puławy, 2018.
- 59(13). *Środowiskowe aspekty gospodarki nawozowej*. Puławy, 2019.
- 60(14). *Znaczenie postępu biologicznego i technologicznego w produkcji zbóż i roślin strączkowych*. Puławy, 2019
- 61(15). *Wybrane zagadnienia agrotechniki roślin uprawnych*. Puławy, 2020.
- 62(16). *Uwarunkowania i perspektywy rozwoju produkcji rolniczej w różnych regionach Polski*. Puławy, 2020.
- 63(17). *Nawożenie – aspekty produkcyjne i środowiskowe*. Puławy, 2020.
- 64(18). *Zagrożenia dla jakości gleb w Polsce – część II*. Puławy, 2020.
- 65(19). *Teoretyczne podstawy racjonalnego nawożenia*. Puławy, 2021.
- 66(20). *Zrównoważone użytkowanie i ochrona gleb jako element Europejskiego Zielonego Ładu*. Puławy, 2021.
- 67(21). *Rolnictwo polskie wobec wyzwań klimatycznych*. Puławy, 2022.
- 68(22). *Osiągnięcia i wyzwania produkcji chmielu i tytoniu*. Puławy, 2022.
- 69(23). *Możliwości ograniczenia strat składników pokarmowych w perspektywie wdrażania wybranych strategii Europejskiego Zielonego Ładu*. Puławy, 2022.
- 70(24). *Rolnictwo ekologiczne w Polsce*. Puławy, 2023.
- 71(25). *Gospodarka wodna w rolnictwie jako element adaptacji do zmian klimatu*. Puławy, 2024.
- 72(26). *Chwasty pól uprawnych – występowanie, zwalczanie, gatunki „problemowe” i inwazyjne*. Puławy, 2024.
- 73(27). *Zmiany w rolnictwie po 20 latach członkostwa Polski w UE*. Puławy, 2024.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej „STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB” publikowane są recenzowane prace wykonane w ramach dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

W zeszytach problemowych o charakterze monografii, wydawanych w ramach tej serii, mogą być zamieszczane również prace autorów spoza IUNG-PIB, które merytorycznie mieszczą się w tematyce zadań programu wieloletniego. **Publikowane są prace problemowe, głównie mające charakter przeglądowy, z podkreśleniem znaczenia omawianych zagadnień dla rolnictwa polskiego.**

Wydruk tekstu do recenzji:

czcionka 12 p., z odstępem 1,5-wierszowym

Przygotowanie do druku:

- tekst i tabele w programie Word,
- czcionka – Times New Roman
- układ pracy: słowa kluczowe, wstęp, wyniki i dyskusja bądź omówienie wyników, podsumowanie lub wnioski, literatura, dane kontaktowe, nr ORCID

tekst

- czcionka – 11 p. (spis pozycji literatury – 9 p.)
- wcięcie akapitowe – 0,5 cm

tabele

- podział na wiersze i kolumny (z funkcji tworzenia tabel)
- szerokość dokładnie 13 cm (tabele w pionie) lub 19 cm (tabele w poziomie)
- czcionka 9 p., pojedyncze odstępy międzywierszowe
- pod tabelą przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

rysunki/fotografie

- czarno-białe/kolorowe (możliwie duża rozdzielczość)
- wykresy w programie Word, Excel lub Corel
- wymiary w zakresie 13 cm×19 cm
- w podpisach czcionka 9 p.
- na nośniku lub w oddzielnych plikach
- pod rysunkiem przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

jednostki miary

- system SI
- jednostki zapisywać potęgowo (np. t·ha⁻¹)

literatura

- spis literatury na końcu pracy w układzie alfabetycznym wg nazwisk autorów, w kolejności: nazwisko (pismo rozstrzelone), pierwsza litera imienia, tytuł pracy, miejsce publikacji: tytuł wydawnictwa (pełna nazwa), rok, numer (pismo pogrubione), strony,
- cytowanie w tekście – jako nazwisko autora (autorów) i rok wydania (w nawiasach okrągłych).

Pracę do recenzji należy złożyć w 1 egzemplarzu. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany złożyć/przesłać do Redakcji, a ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, przesłać e-mailem.

Dane kontaktowe:

mgr Katarzyna Mikulska
Dział Komunikacji Nauki IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
e-mail: kmikulska@iung.pulawy.pl