

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. dawkowanie 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 – dawkowanie 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 bezprzewodową 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, zamglawiacze 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. A s s e n g S. i in.: Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 2015, **5(2)**: 143-147.
3. B e r e ś P.: Omacnica prosowianka – nowe zagrożenie dla upraw kukurydzy w Polsce. *Progress in Plant Protection*, 2015, **55(3)**: 231-238.
4. C h u k w u 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. G r i g o r i e v a E., Loubimtseva E., Urazmetova A.: Adaptation of Agriculture to Climate Change: A Scoping Review. *Climate*, 2023, **11(10)**, 202; DOI: 10.3390/cli11100202
7. I s l a m 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. J a n g 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. K o r d o w s k a 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. K o z y r a 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. K u n d z e w i c z 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. M e s í a s-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. N a r d o n e 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. Tembhurne 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., Kolasinśka 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