

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 polegali 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).

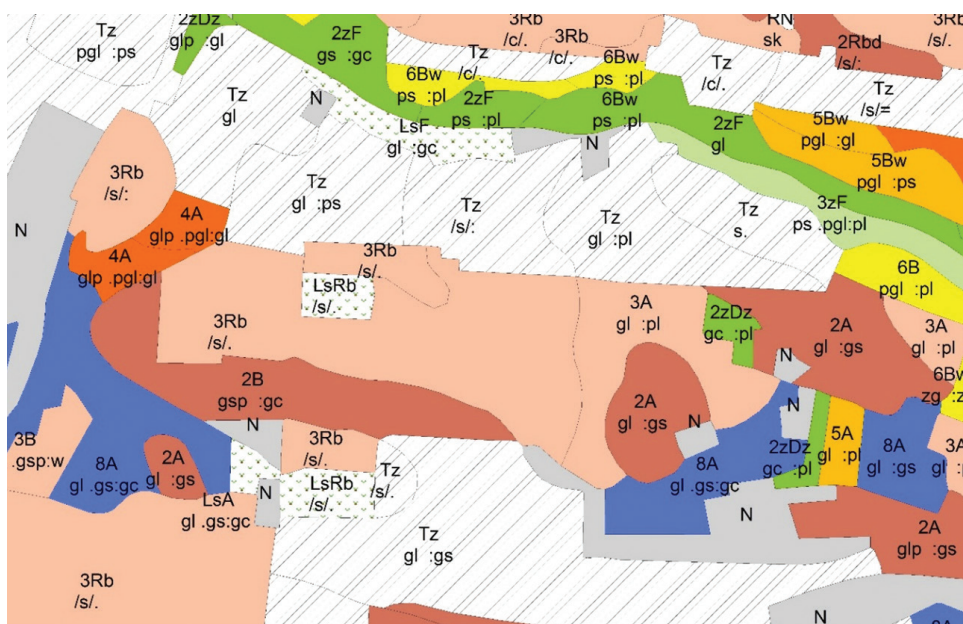
Susze to zazwyczaj wolno rozwijające się zjawiska, jednak w badaniach pojawia się pojęcie suszy błyskawicznej, która jest zjawiskiem krótkotrwałym, ale dotkliwym. Mogą one powodować poważne skutki dla środowiska i rolnictwa. Z uwagi na to, że mają nagły początek i szybką intensyfikację, mogą przynieść 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

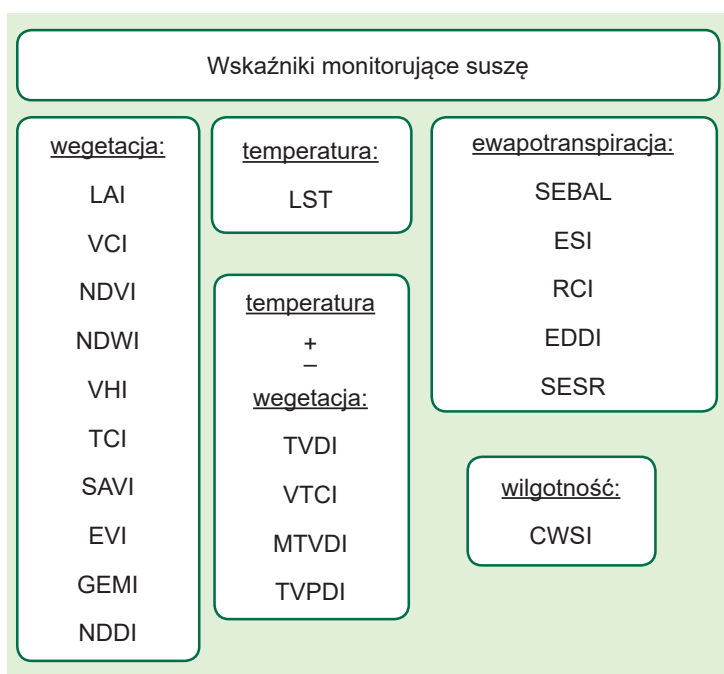
Oprócz map glebowych w rolnictwie coraz częściej wykorzystuje się mapowanie usług ekosystemowych gleb. Przy coraz częstszym niedoborze wody i występowaniu suszy na polach zdolność gleby do magazynowania i regulowania ilości wody oraz mikroklimatu jest szczególnie istotna. Równie ważna jest zdolność do 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, powodzie, 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 powodzie, 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