

Katarzyna Żyłowska, Jerzy Kozyra

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

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

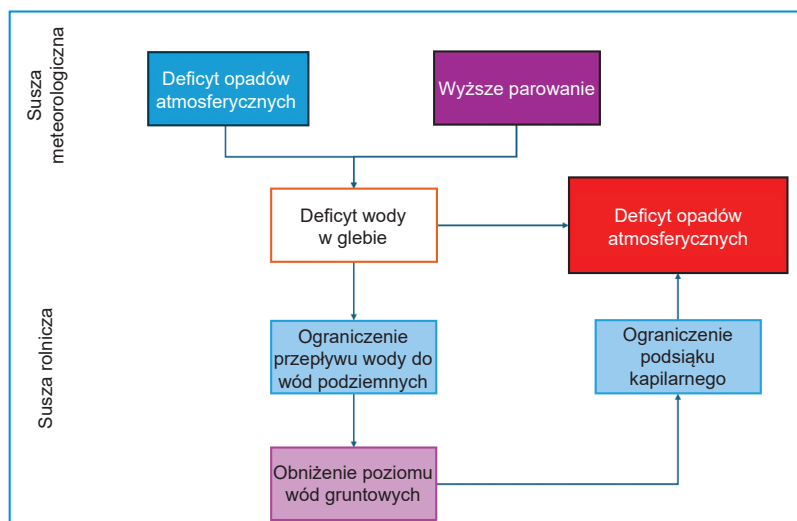
Słowa kluczowe: susza, systemy monitoringu, wskaźniki suszy meteorologicznej, wskaźniki suszy rolniczej

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 „nieznaczącej 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.

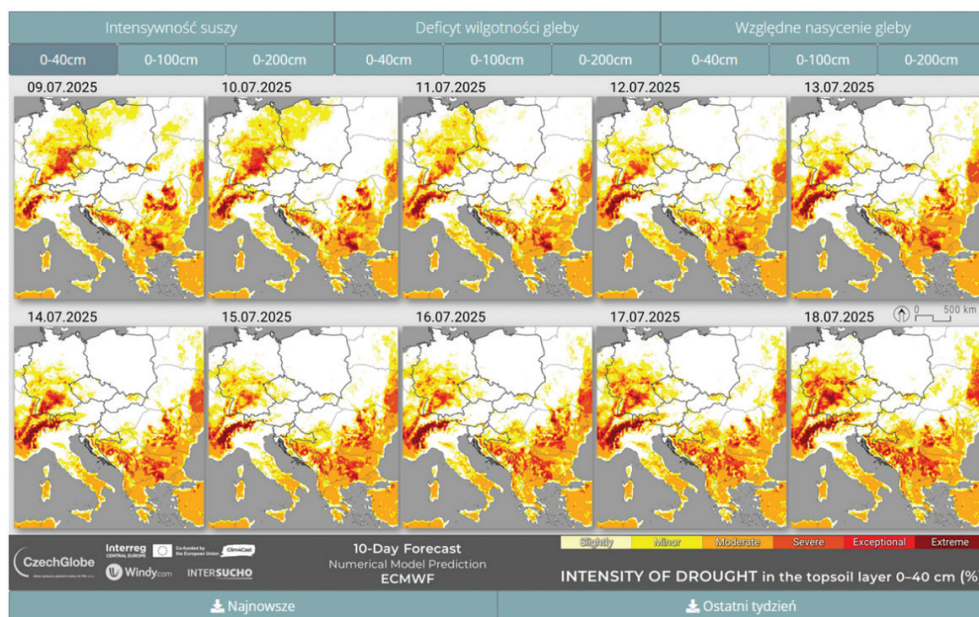
Monitoring suszy dla Europy Środkowo-Wschodniej – Clim4Cast

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.

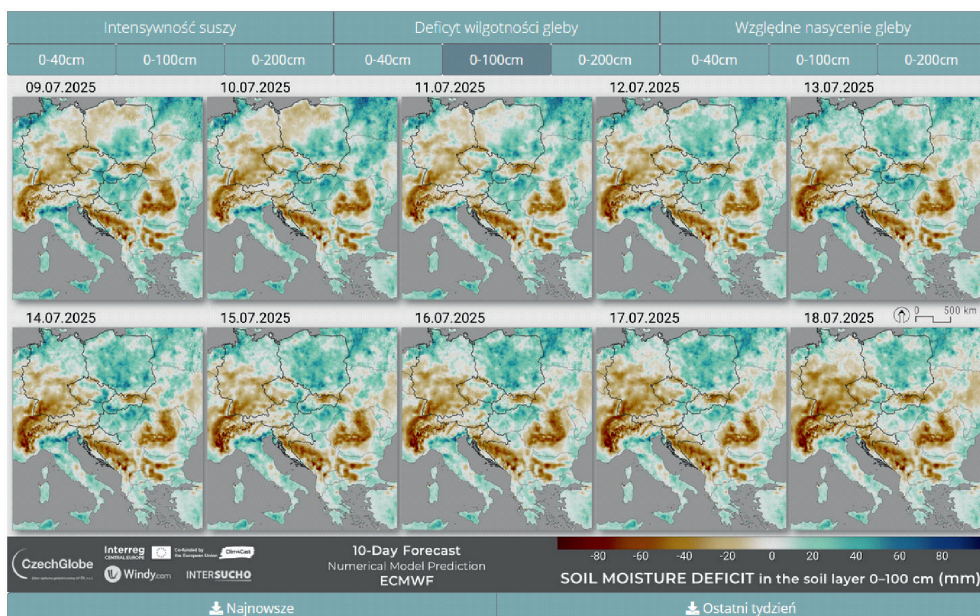


Rys. 2. Rozkład przestrzenny wskaźnika intensywności suszy w warstwie 0–40 cm w okresie od 8 do 17 lipca 2025 roku

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.



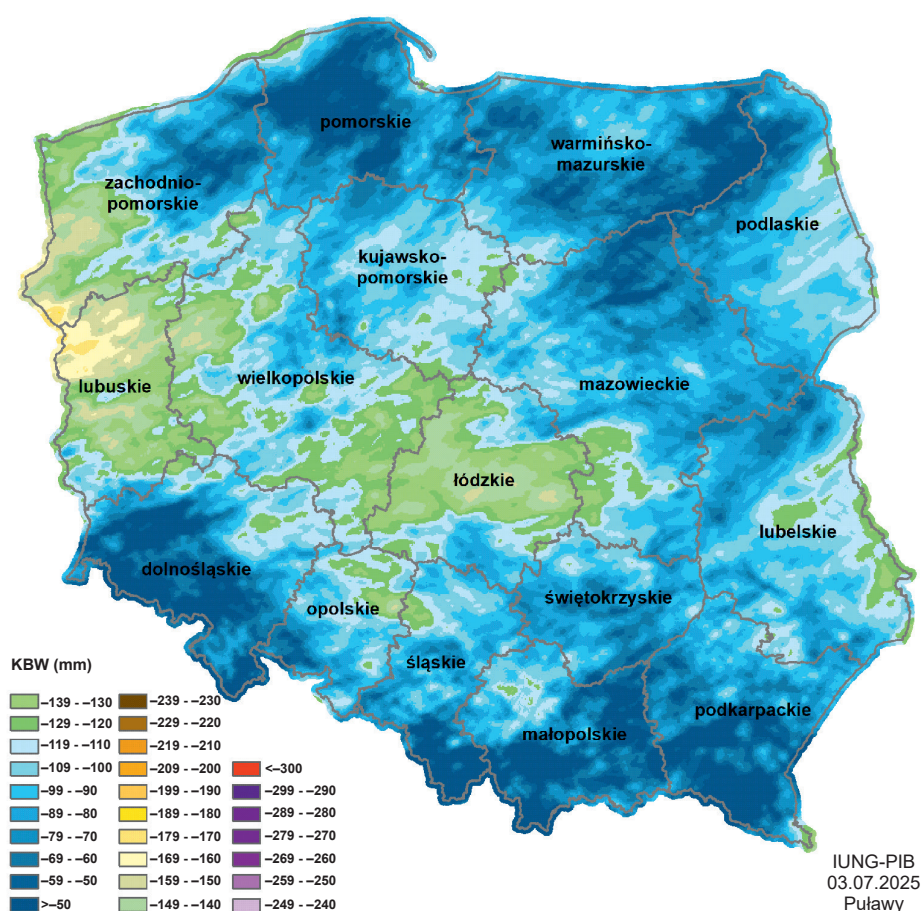
Rys. 3. Rozkład przestrzenny wskaźnika deficytu wilgotności gleby w warstwie 0–100 cm w okresie od 8 do 17 lipca 2025 roku

Źródło: www.clim4cast.eu

Polskie systemy monitorowania suszy

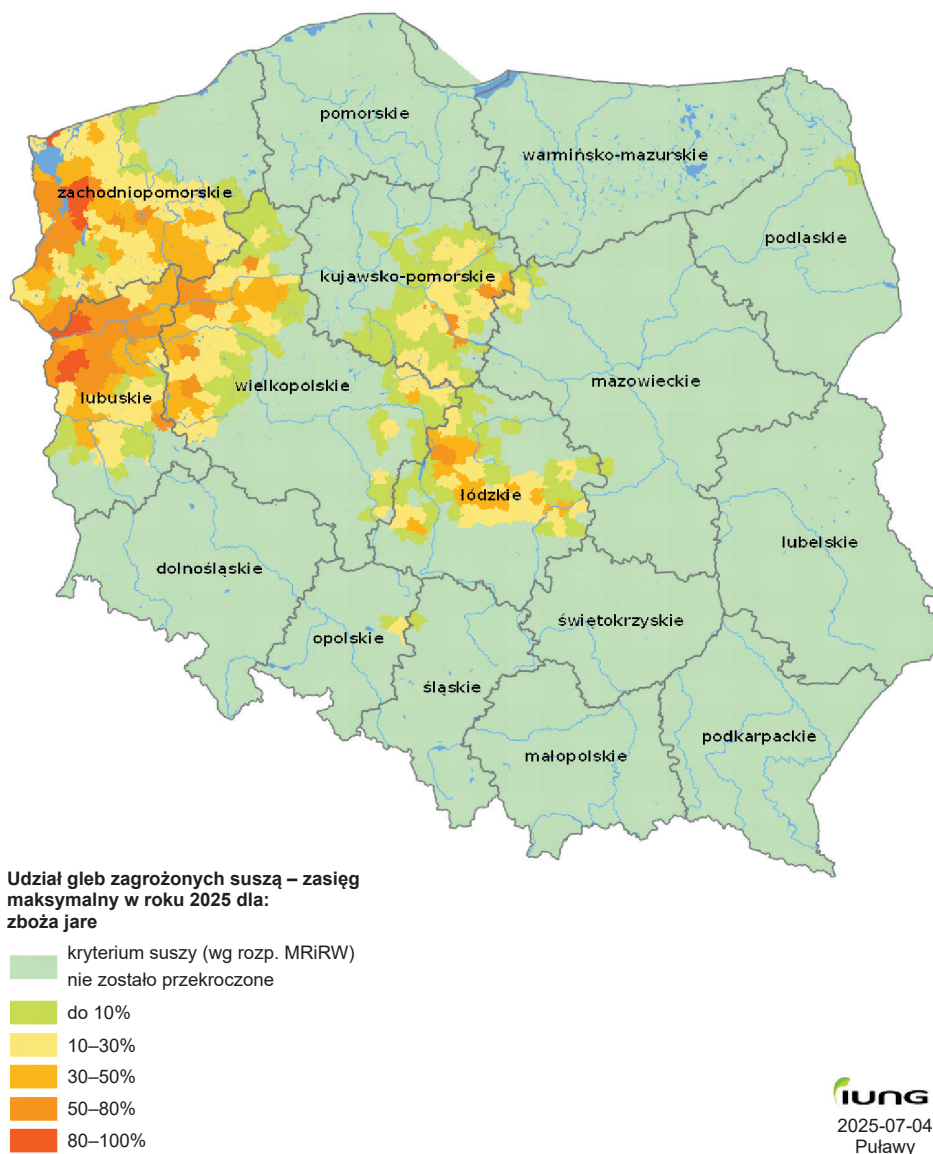
System Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR) to specjalistyczny system wspomagający rolnictwo w zakresie ubezpieczeń rolnych, którego głównym celem jest identyfikacja obszarów dotkniętych stratami plonów spowodowanymi suszą. System ten prowadzony jest przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy 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.



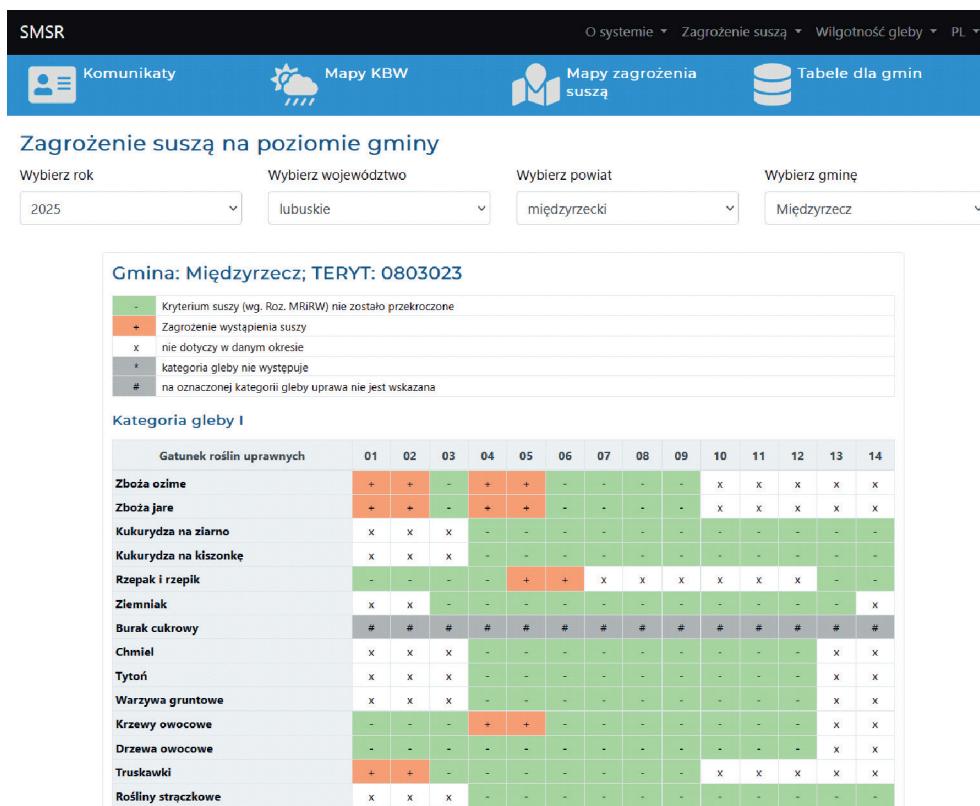
Rys. 4. Mapa klimatycznego bilansu wodnego (KBW) w okresie od 1 maja do 30 czerwca 2025 roku będąca podstawowym produktem Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej

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. Kasperska-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., Mozny 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-Serrano 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