

Trendy i ekstremalne zmiany klimatu w województwie podkarpackim (2002–2025) oraz ich wpływ na sałatę, marchew, pomidora i buraka cukrowego

Bartosz Krzysik

Abstract

Tło: Zrozumienie regionalnej zmienności klimatu wymaga analizy współzależności między globalnym ociepleniem a lokalnymi warunkami atmosferycznymi. W przypadku województwa podkarpackiego kluczowe jest poznanie dynamiki temperatury, opadów i ich wpływu na uprawy warzyw.

Metody: W badaniu wykorzystano dane reanalizy ERA5 w latach 2002–2025 dla lokalizacji 49.79°N, 21.69°E. Przeprowadzono eksploracyjną analizę danych (EDA) oraz testy statystyczne, koncentrując się na rozkładzie temperatur i opadów. Dane dotyczące wzrostu i rozwoju czterech gatunków roślin (sałata zwyczajna, marchew zwyczajna, pomidor zwyczajny, burak cukrowy) pochodzą z literatury naukowej.

Wyniki: Temperatura i nasłonecznienie pozostały stosunkowo stabilne, natomiast opady wykazywały większą koncentrację w krótkich okresach, przy ograniczonych opadach w czasie wysokich temperatur. Stosunek temperatury do opadów wskazuje na pogorszenie warunków wodnych w okresach upałów. Zaobserwowano również trend wzrostowy średniej intensywności opadów.

Wnioski: Analiza eksploracyjna (EDA) wskazuje, że techniki uczenia maszynowego mogą być wykorzystane do przewidywania przyszłych warunków w badanym obszarze. Potencjalnym targetem dla modeli mogą być wskaźniki stresu wodnego lub rozwój biomasy poszczególnych gatunków warzyw.

Wstęp

Globalne zmiany klimatu stanowią poważne wyzwanie dla rolnictwa na całym świecie, wpływając na dostępność wody, rozwój roślin oraz produktywność upraw. Wzrost średnich temperatur, zmienność opadów oraz częstsze występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak susze czy intensywne opady, zwiększa ryzyko dla lokalnych systemów rolniczych. Niniejsza praca prezentuje analizę danych klimatycznych dla województwa podkarpackiego w latach 2002–2025, opartą na reanalizie ERA5. Poprzez połączenie fizycznych danych klimatycznych z eksploracyjną analizą danych, badanie ma na celu zrozumienie dynamiki lokalnego klimatu i jej potencjalnych skutków dla rolnictwa w tym regionie.

Dane i Metodologia

Surowe zmienne ERA5

W badaniu wykorzystano dane reanalizy ERA5 udostępniane przez European Centre for Medium-Range Weather Fore-

casts (ECMWF) za pośrednictwem Copernicus Climate Data Store. Zestaw obejmuje dane w rozdzielcości godzinowej dla lat 2002–2025, które następnie zagregowano do wartości dziennych.

Dane były pobierane dla lokalizacji odpowiadającej położeniu czujnika meteorologicznego: **49.79°N, 21.69°E**.

Kluczowe surowe zmienne obejmowały:

- **Temperatura skóry (skt)** – temperatura powierzchni gruntu/warstwy wierzchniej gleby, wyrażona w stopniach Celsjusza.
- **Średni wskaźnik opadów (avg_tprate)** – wskaźnik intensywności opadów ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).
- **Promieniowanie krótkofalowe docierające do powierzchni (sw_radiation_down_W_per_m2)** – całkowite promieniowanie słoneczne w watach na metr kwadratowy, niezbędne do wyznaczenia ilości energii światelnej dla roślin.

Wyprowadzone zmienne i metodologia przeliczeń

Z powyższych surowych zmennych wyprowadzono zmienne bardziej odpowiednie dla analiz wpływu warunków klimatycznych na rolnictwo:

- **Opad w mm na godzinę (tprate_mm_per_h)** – przeliczono ze średniego wskaźnika opadów (avg_tprate) przy użyciu zależności:

$$\text{precipitacja [mm/h]} = \text{avg_tprate [kg/m}^2/\text{s}] \times 3600 \text{ s/h}$$

dzięki czemu uzyskano ilość wody w milimetmach opadającą w ciągu jednej godziny.

- **PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)** – gęstość strumienia fotonów fotosyntetycznie aktywnych, obliczona z promieniowania krótkofalowego docierającego do powierzchni (sw_radiation_down_W_per_m2) zgodnie ze standardowym przelicznikiem:

$$\text{PPFD} = \text{SW_down [W/m}^2] \times 4.57$$

gdzie współczynnik 4.57 konwertuje jednostki energii na strumień fotonów fotosyntetycznie aktywnych, odpowiedni do oceny światła dostępnego dla fotosyntezy.

Dane dotyczące wzrostu roślin

Na podstawie danych z badania *Optimizing Microclimatic Conditions for Lettuce, Tomatoes, Carrots, and Beets: Impacts on Growth, Physiology, and Biochemistry Across Green-*

house Types and Climatic Zones Oana Alina Nitu, n.d. utworzono uproszczony schemat optymalnych warunków klimatycznych dla każdego gatunku roślin: sałaty (*Lactuca sativa L.*), marchwi (*Daucus carota L.*), pomidora (*Solanum lycopersicum L.*) oraz buraka ćwikłowego (*Beta vulgaris L.*).

Schemat obejmuje następujące czynniki:

- **Temperatura** – zakresy temperatur
- **Natężenie światła (PPFD)** – graniczne wartości promieniowania fotosyntetycznego aktywnego w ciągu dnia w [$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
- **Fotoperiod** – liczba godzin dziennego oświetlenia.

Każdy wiersz posiada uproszczoną ocenę w skali 0-3

- 0 – warunki nieodpowiednie,
- 1 – stres dla rośliny,
- 2 – warunki akceptowalne,
- 3 – optymalne warunki dla wzrostu.

Sałata (*Lactuca sativa L.*)

Table 1: Zakresy temperatur dla sałaty (*Lactuca sativa L.*) w klimacie umiarkowanym

Zakres temperatur [°C]	Ocena
<15	0
15–20	3
20–22	2
22–24	1
>25	0

Table 2: Optymalne natężenie światła (PPFD) i fotoperiod dla sałaty (*Lactuca sativa L.*)

Zakres PPFD [$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Fotoperiod [h]	Ocena
<150	0–16	0
150–200	16	2
200	16	3
200–400	16–18	2
400–600	18	1
>600	18–24	0

Marchew (*Daucus carota L.*)

Table 3: Zakresy temperatur dla marchwi (*Daucus carota L.*) w klimacie umiarkowanym

Zakres temperatur [°C]	Ocena
<15	0
15–18	1
18–20	2
20–25	3
25–28	2
28–30	1
>30	0

Table 4: Optymalne natężenie światła (PPFD) i fotoperiod dla marchwi (*Daucus carota L.*)

Zakres PPFD [$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Fotoperiod [h]	Ocena
<200	0–12	0
200–250	12–16	2
250–400	16	3
400–800	16	2
>1000	16	0

Pomidor (*Solanum lycopersicum L.*)

Table 5: Zakresy temperatur dla pomidora (*Solanum lycopersicum L.*) w klimacie umiarkowanym

Zakres temperatur [°C]	Ocena
<18	0
18–20	2
20–24	3
24–26	2
26–30	1
>30	0

Table 6: Optymalne natężenie światła (PPFD) i fotoperiod dla pomidora (*Solanum lycopersicum L.*)

Zakres PPFD [$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Fotoperiod [h]	Ocena
170–249	16	1
250	16	3
251–520	16	1
>520	16–24	0

Burak ćwikłowy (*Beta vulgaris L.*)

Table 7: Zakresy temperatur dla buraka (*Beta vulgaris L.*) w klimacie umiarkowanym

Zakres temperatur [°C]	Ocena
<10	0
10–15	1
15–18	2
18–24	3
24–25	2
25–30	1
>30	0

Table 8: Optymalne natężenie światła (PPFD) i fotoperiod dla buraka (*Beta vulgaris L.*)

Zakres PPFD [$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Fotoperiod [h]	Ocena
<150	0–12	0
150–199	12–13	2
200	14	3
201–250	14	2
250–300	14–16	1
>300	16–24	0

Wyniki

Warunki cieplno-słoneczne

Na podstawie danych z badania *Optimizing Microclimatic Conditions for Lettuce, Tomatoes, Carrots, and Beets* Oana Alina Nitu, n.d. wyznaczono optymalne zakresy temperatur, PPFD i fotoperiodu dla badanych gatunków. Po porównaniu z rzeczywistymi danymi okazało się, że wyznaczone laboratoryjne przedziały są bardzo restrykcyjne – większość dni w badanym okresie plasuje się w najniższym przedziale oceny (0).

Na Rysunku 1 przedstawiono heatmapę, gdzie widać rozkład ocen warunków dla poszczególnych gatunków w kolejnych dniach. Kolory odpowiadają uproszczonej ocenie w skali 0–3:

- 0 – warunki nieodpowiednie
- 1 – stres dla rośliny
- 2 – warunki akceptowalne
- 3 – optymalne

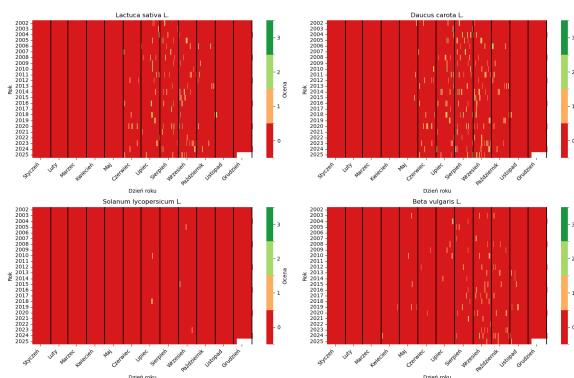


Figure 1: Heatmap pokazująca ocenę warunków cieplno-słonecznych dla badanych gatunków. Oś X: dni, Oś Y: gatunki roślin, kolory: ocena w skali 0–3.

Wyniki testu losowości (Run Test) Test losowości (*runs test*) przeprowadzono dla ocen warunków cieplno-słonecznych (0–3) dla badanych gatunków roślin. Wyniki przedstawiono w tabelach, z wartościami statystyki testu i odpowiadającym p-value dla poszczególnych ocen.

Table 9: Wyniki testu losowości dla sałaty

Ocena	Kolumna 0	Kolumna 1	Kolumna 2
Statystyka	1.81	0.63	0.56
p-value	0.07	0.53	0.58

Table 10: Wyniki testu losowości dla marchwi

Ocena	Kolumna 0	Kolumna 1	Kolumna 2
Statystyka	0.41	0.22	0.35
p-value	0.68	0.82	0.73

Table 11: Wyniki testu losowości dla pomidora

Ocena	Kolumna 0	Kolumna 1	Kolumna 2
Statystyka	0.41	0.12	$-\infty$
p-value	0.68	0.90	0

Table 12: Wyniki testu losowości dla buraka ćwikłowego

Ocena	Kolumna 0	Kolumna 1	Kolumna 2
Statystyka	0.32	-0.14	2.11
p-value	0.75	0.89	0.035

Analiza wyników testu losowości wskazuje, że wartości ocen 0 i 1 wykazują zazwyczaj losowy rozkład w czasie dla wszystkich badanych gatunków. Natomiast oceny 2, odpowiadające średniej jakości warunków, w przypadku pomidora i buraka ćwikłowego wykazują nielosowe rozmieszczenie, co może być związane zarówno z ograniczoną liczbą obserwacji, jak i sezonowym charakterem zmian warunków. Oceny 3 nie wystąpiły w badanych danych, dlatego nie można było obliczyć dla nich statystyk testu. Ogólnie wyniki sugerują, że większość ocen jest rozmieszczona losowo, co potwierdza brak systematycznych odchyleń w czasie dla dominujących wartości (0–1), natomiast oceny średnie (2) mogą ujawniać pewne wzorce sezonowe.

Opady

Dokładne oszacowanie zapotrzebowania roślin na wodę jest trudne, ponieważ zależy od wielu czynników, w tym temperatury, właściwości gleby oraz poziomu wód gruntowych. Ilość dostępnej wody w glebie zmienia się w czasie i przestrzeni w zależności od przepuszczalności podłoża oraz lokalnego poziomu wód gruntowych, co utrudnia precyzyjne modelowanie potrzeb wodnych roślin.

W związku z tym analiza skoncentrowano na warunkach ekstremalnych, które najlepiej obrazują ryzyko suszy lub nadmiaru wody. Zbadano zarówno intensywność opadów w dniach deszczowych, jak i liczbę dni z opadami silnymi lub ulewnymi. Pozwala to ocenić, czy opady mają charakter słaby, ale regularny, sprzyjający rolnictwu, czy też występują w postaci ulew skoncentrowanych w krótkim okresie, co może prowadzić do nadmiaru wody i erozji gleby.

Temperatura/opady jako współczynnik Przeprowadzono analizę trendu liniowego średniego rocznego współczynnika temperatura/opady w badanym okresie 24 lat. Współczynnik ten określa relację pomiędzy średnią temperaturą a sumą opadów w ciągu roku.

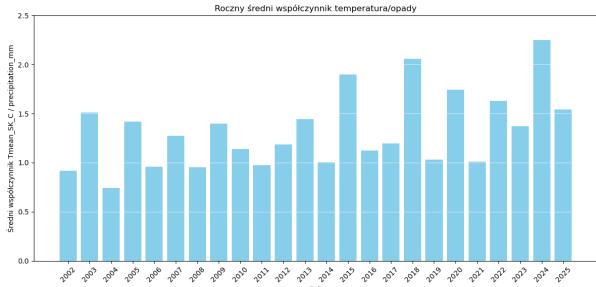


Figure 2: Średni roczny współczynnik temperatura/opady dla badanego okresu. Linia trendu wskazuje wzrost wartości współczynnika w czasie.

Table 13: Wyniki regresji liniowej współczynnika temperatura/opady względem lat

Parametr	Wartość	P-value
Stała (const)	1.015	0.000
Trend roczny (x1)	0.0269	0.014

Analiza wskazuje na umiarkowany trend wzrostowy średniego współczynnika temperatura/opady.

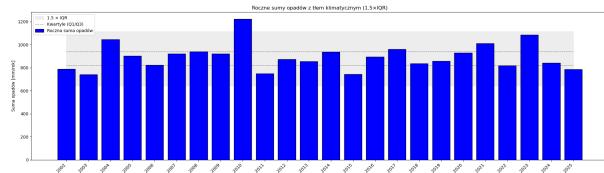


Figure 3: Roczne sumy opadów z tłem klimatycznym $1.5 \times \text{IQR}$. Szare tło pokazuje typowy zakres zmienności, a niebieskie słupki roczne sumy opadów.

Table 14: Wyniki analizy trendu rocznych sum opadów względem lat

Metoda / Parametr	Wartość	P-value
OLS – Stała (const)	-176.66	0.980
OLS – Trend roczny (x1)	0.532	0.879
Spearman ρ	0.043	0.84

Roczne sumy opadów Roczne sumy opadów pozostają w miarę stabilne, a obserwowany trend jest statystycznie niesignifikantny (OLS: nachylenie 0,532 mm/rok, $p = 0.879$; Spearman $\rho = 0.043$, $p = 0.84$).

SDII – średnia intensywność dni deszczowych (>1 mm) Na rysunku 4 przedstawiono SDII – średnią intensywność dni z opadem powyżej 1 mm. W analizie usunięto dwa lata odstające: 2010 (powódź – skrajna wartość) oraz 2025 (dane niepełne).

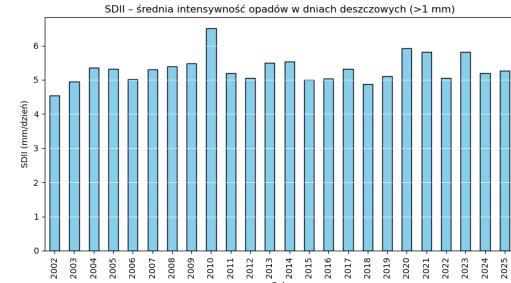


Figure 4: SDII – średnia intensywność opadów w dniach deszczowych (>1 mm).

Table 15: Wyniki regresji liniowej SDII względem lat (po usunięciu lat 2010 i 2025)

Parametr	Wartość	P-value
Stała (const)	1.234	0.002
Trend roczny (x1)	0.0184	0.0804

Trend roczny SDII wskazuje subtelną tendencję wzrostową, jednak nie jest istotny statystycznie. Dane wykazują dużą zmienność między latami.

Liczba dni ulewnych (opad > 10 mm/dzień) Analiza liczby dni z opadami powyżej 10 mm w latach 2002–2024 została przeprowadzona przy użyciu regresji liniowej OLS. Rok 2025 pominięto z powodu braków danych.

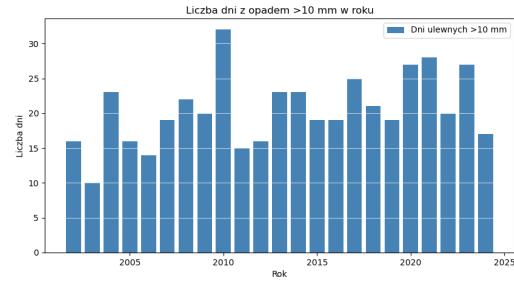


Figure 5: Liczba dni z opadem powyżej 10 mm w latach 2002–2024.

Table 16: Wyniki regresji liczby dni ulewnych względem lat

Parametr	Wartość	P-value
Stała (const)	-639.913	0.045
Trend roczny (x1)	0.328	0.039

Analiza wykazuje łagodny, ale statystycznie istotny trend wzrostowy liczby dni ulewnych. Test Kendalla potwierdza rosnący kierunek trendu ($\tau = 0.329$, $p = 0.031$). Zmienność między latami pozostaje jednak znacząca.

Wnioski ogólne dotyczące opadów

Analiza wszystkich wskaźników opadowych wskazuje, że roczne sumy opadów pozostają w zasadzie stabilne i nie wykazują statystycznie istotnych trendów, co potwierdzają zarówno test Spearmana ($\rho = 0.043, p = 0.84$), jak i regresja liniowa OLS (nachylenie 0.532 mm/rok, $p = 0.879$). Oznacza to, że całkowita ilość opadów w badanym okresie nie ulega znaczącym zmianom.

Z drugiej strony, zmiany w charakterze opadów są wyraźniejsze. Średnia intensywność dni deszczowych (SDII) wykazuje subtelną tendencję wzrostową (0,018 mm/dzień rocznie), choć nie jest ona statystycznie istotna ($p = 0.0804$). Wskazuje to na możliwe zwiększenie intensywności opadów w dniach deszczowych.

Najbardziej wyraźny trend dotyczy liczby dni ulewnych (opad > 10 mm/dzień), która rośnie średnio o 0,33 dnia rocznie, a trend jest statystycznie istotny ($p = 0.039$, Kendall $\tau = 0.329, p = 0.031$). Oznacza to, że ekstremalne zjawiska opadowe stają się coraz częstsze, mimo że suma roczna pozostaje stabilna.

Ogólnie wyniki te sugerują, że badany obszar doświadcza przesunięcia w stronę bardziej ekstremalnych warunków opadowych: wzrasta liczba i intensywność krótkotrwałych, silnych opadów, przy jednoczesnym utrzymaniu stabilnej rocznej sumy opadów. Taki kierunek zmian może mieć istotne znaczenie dla rolnictwa oraz ryzyka powodziowego i erozji gleby.

Dyskusja

Analiza warunków cieplno-słonecznych wykazała istotne ograniczenia wynikające z charakteru danych wejściowych. Zakresy temperatur, nasłonecznienia i fotoperiodu zostały opracowane dla produkcji przemysłowej w tunelach lub szklarniach, co uniemożliwia ich bezpośrednie zastosowanie do oceny warunków w naturalnym środowisku na świeżym powietrzu. W konsekwencji większość dni w badanym okresie otrzymała najniższą ocenę (0), co ograniczyło praktyczne wykorzystanie tych danych w analizie.

Pomimo krótkiego okresu obserwacji (24 lata), analiza wskaźników opadowych dostarczyła spójnych wniosków dotyczących zmian w charakterze opadów. Roczne sumy opadów pozostały stabilne, jednak średnia intensywność opadów w dniach deszczowych (SDII) wykazywała subtelną tendencję wzrostową, a liczba dni ulewnych zwiększała się średnio o 0,33 dnia rocznie.

Zmiany te wskazują na przesunięcie w kierunku bardziej ekstremalnych warunków opadowych, które mogą ograniczać wchłanianność wody przez glebę, zwiększać ryzyko erozji i lokalnych podtopień, a równocześnie utrudniać magazynowanie wody w glebie, sprzyjając suszom w okresach bezdeszczowych. Pomimo braku zmian w sumie rocznej opadów, przesunięcia w charakterze opadów mogą mieć istotne konsekwencje dla rolnictwa i zarządzania wodą.

Ograniczenia analizy i możliwe sposoby poprawy

Analiza przedstawiona w pracy posiada kilka istotnych ograniczeń, które warto uwzględnić przy interpretacji wyników. Poniżej przedstawiono główne kwestie w formie punktowanej z opisem:

- Ograniczona reprezentatywność przestrzenna danych:** Badanie opierało się na pojedynczym szeregu czasowym pochodząącym z jednej lokalizacji, co ogranicza możliwość odwzorowania zróżnicowania mikroklimatycznego w terenie. Rozszerzenie pomiarów o kilka lub kilkanaście czujników rozmieszczonych w różnych punktach pozwoliłoby na bardziej kompleksową ocenę warunków klimatycznych oraz ich wpływu na rośliny.
- Zakresy temperatur i nasłonecznienia dostosowane do produkcji tunelowej:** Przedziały temperaturowe i natężenia promieniowania użyte w analizie były opracowane dla upraw tunelowych lub szklarniowych, przez co nie odzwierciedlają w pełni rzeczywistych warunków w otwartym terenie. Zastosowanie szerszych i bardziej dopasowanych zakresów umożliwiłoby skuteczniejsze wykorzystanie tych danych przy ocenie warunków dla upraw na świeżym powietrzu.
- Brak uwzględnienia właściwości gleby i poziomu wód gruntowych:** Aktualna analiza nie obejmowała parametrów glebowych ani poziomu wód podziemnych, które mają kluczowe znaczenie dla dostępności wody dla roślin. Włączenie tych danych w modelowanie zapotrzebowania wodnego pozwoliłoby na bardziej precyzyjne określenie ryzyka suszy lub nadmiaru wody w glebie, a tym samym lepsze prognozowanie warunków upraw.
- Krótki okres obserwacji:** Analizowany szereg czasowy obejmuje stosunkowo krótki okres, co ogranicza możliwość wykrywania długoterminowych trendów klimatycznych. Wydłużenie czasu obserwacji pozwoliłoby lepiej odróżnić naturalne fluktuacje od rzeczywistych zmian w intensywności i charakterze opadów oraz umożliwiłoby bardziej wiarygodną ocenę ryzyka ekstremalnych zjawisk pogodowych.

Konkluzje

Analiza danych klimatycznych wskazuje, że roczna suma opadów w badanym obszarze pozostaje stabilna, jednak charakter opadów ulega zmianie. Średnia intensywność dni deszczowych (SDII) wykazuje subtelny wzrost, a liczba dni ulewnych rośnie istotnie statystycznie o około 0,33 dnia rocznie. Oznacza to, że ekstremalne opady stają się częstsze, co może zwiększać ryzyko lokalnych powodzi i erozji gleby, mimo braku zmiany w sumie rocznej.

Ograniczenia w analizie warunków cieplno-słonecznych wynikają z użycia zakresów opracowanych dla produkcji tunelowej, które nie przekładają się wprost na warunki w otwartym terenie.

Na podstawie dostępnych danych można rozważyć próby estymacji zapotrzebowania roślin na wodę przy użyciu technik uczenia maszynowego (ML). Potencjalnym celem modelu

mogłyby być wskaźniki ekstremalnych opadów (np. SDII lub liczba dni ulewnych), a jako cechy wejściowe można wykorzystać temperaturę, sumy opadów i inne zmienne meteorologiczne. Taka analiza mogłaby wspierać planowanie upraw i zarządzanie wodą w kontekście zmieniających się warunków klimatycznych.

References

- ECMWF Copernicus Climate Change Service (C3S). (n.d.).
Era5 hourly data on single levels from 1940 to present.
- Oana Alina Nitu, A. A., Elena Stefania Ivan. (n.d.). Optimizing microclimatic conditions for lettuce, tomatoes, carrots, and beets: Impacts on growth, physiology, and biochemistry across greenhouse types and climatic zones. <https://doi.org/10.3390/ijpb16030100>
- Overleaf. (2026). Cognitive science society conference (cogsci) latex template [Dostęp pobrany: 2026-01-05].