

IMPACT OF WEATHER CONDITIONS ON CEREAL YIELDS IN POLAND

WPŁYW WARUNKÓW POGODOWYCH NA PLONY ZBÓŻ W POLSCE

MATEUSZ PALUSZKIEWICZ
MICHAŁ TORZYŃSKI
JAKUB BIELECKI
SABINA ABDULLAIEVA
ŁUKASZ KRYSZAK

Citation: Paluszkiewicz, M., Torzyński, M., Bielecki, J., Abdullaieva, S., & Kryszak, Ł. (2024). Impact of Weather Conditions on Cereal Yields in Poland / Wpływ warunków pogodowych na plony zbóż w Polsce. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 379(2), 1–18. <https://doi.org/10.30858/zer/187587>

Abstract

The aim of this study was to assess the impact of weather factors on the yield of selected cereals in the context of ongoing climate change. The study used variables specifying factors such as temperature, precipitation, as well as control variables, which were the share of medium and heavy soils in a given province and the consumption of mineral fertilizers in kg of NPK/ha. The dependent variables were yields of selected cereals. Data were collected from databases of the Polish Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute (IMGW PIB), Poland Statistics (GUS), and Institute of Soil Science and Plant Cultivation State Research Institute (IUNG PIB). The meteorological data came from 157 meteorological stations located in 14 provinces. Estimation was carried out for the 2013–2020 period. The study used the panel regression method. For all the models estimated, there was a significant effect of the number of days with precipitation on yields. While regularly occurring, moderate rainfall is undoubtedly favorable, large amounts of rainfall can adversely affect yields. Another statistically significant climatic factor is temperature during spring and summer, with moderate temperatures being the most favorable for yields. Changes in temperature affected yield changes in individual cereals with varying intensity, with the strongest effect recorded for wheat. On the basis of the research carried out, a conclusion was drawn that Polish agriculture

Mateusz Paluszkiewicz, BA, Poznan University of Economics and Business; Al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań, Poland. (89525@student.ue.poznan.pl). <https://orcid.org/0009-0000-1395-4338>

Michał Torzyński, BA, Poznan University of Economics and Business; Al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań, Poland. (mtorzynski@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0007-0248-4677>

Jakub Bielecki, BA, Poznan University of Economics and Business; Al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań, Poland. (89519@student.ue.poznan.pl). <https://orcid.org/0009-0009-4518-4169>

Sabina Abdullaieva, BA, Poznan University of Economics and Business; Al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań, Poland. (89743@student.ue.poznan.pl). <https://orcid.org/0000-0002-4451-8835>

Łukasz Kryszak, PhD, Poznan University of Economics and Business; Al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań, Poland. (lukasz.kryszak@ue.poznan.pl). <https://orcid.org/0000-0001-8660-9236>

will need to adapt to the new conditions by undertaking a number of measures, including changing the structure of crops, securing the irrigation of plants against possible droughts with efficient, modern irrigation systems, increasing the genetic diversity of plants, and using modern agrotechnics.

Keywords: climate change, crop production, cereals, yields, panel regression.

JEL codes: Q15, C23, Q10.

Abstrakt

Celem pracy była ocena wpływu czynników pogodowych na plonowanie wybranych zbóż w Polsce w kontekście postępujących zmian klimatu. Do badania wykorzystano zmienne charakteryzujące takie czynniki, jak temperatura, opady, a także zmienne kontrolne, którymi były udział gleb średnich i ciężkich w danym województwie oraz zużycie nawozów mineralnych w kg NPK/ha. Zmiennymi estymowanymi były zbiory wybranych zbóż. Dane uzyskano z baz danych IMGW PIB, GUS-u oraz IUNG PIB. Dane meteorologiczne pochodziły ze 157 stacji meteorologicznych rozlokowanych w 14 województwach. Estymację przeprowadzono dla okresu 2013–2020. W badaniu posłużono się metodą regresji panelowej. W przypadku wszystkich estymowanych modeli odnotowano istotny wpływ liczby dni z opadem na wielkość uzyskiwanych plonów. O ile regularnie pojawiające się umiarkowane opady są niewątpliwie sprzyjające, to duże ich ilości mogą niekorzystnie wpływać na plony. Kolejnym z istotnych statystycznie czynników klimatycznych jest temperatura w okresie wiosenno-letnim, przy czym najkorzystniejsze dla plonów są umiarkowane temperatury. Zmiany temperatury z różną intensywnością oddziaływały na zmiany plonów poszczególnych zbóż, przy czym najsilniejszy efekt odnotowano w przypadku pszenicy. Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto wnioski, że polskie rolnictwo powinno przygotować się do nowych warunków poprzez podjęcie szeregu działań, m.in. zmianę struktury upraw, zabezpieczenie nawodnienia roślin przed możliwymi suszami przy zastosowaniu wydajnych, nowoczesnych systemów nawadniania, zwiększenie zróżnicowania genetycznego roślin, a także wykorzystanie nowoczesnej agrotechniki.

Słowa kluczowe: zmiana klimatu, produkcja roślinna, zboża, plony, regresja panelowa.

Kody JEL: Q15, C23, Q10.

Introduction

Agriculture—both Polish and European—will need to meet global challenges in the near future: growing demand for food due to increasing human population and the increasingly severe effects of climate change and environmental degradation. Climate change could lead to the cessation, or at least a significant reduction, of agricultural production in tropical regions, and the lost production there will have to be compensated by more food produced in Europe, among other places. At the same time, agricultural production in Europe will also be subject to climatic pressures: in Poland, it will be primarily water scarcity and more frequent and longer heat waves. On the one hand, climate change is therefore of great importance for the development of agriculture, but on the other hand the agricultural sector also contributes to these changes. Hence, it can be expected that there will be increasing pressure for agriculture to participate to a greater extent than before in reducing greenhouse gas emissions, while implementing adaptation programs (WWF Poland, 2020). This is also manifested in the European Green Deal and in particular the Farm to Fork Strategy (European Commission, 2020a) and the Biodiversity Strategy

Wstęp

Rolnictwo – zarówno polskie, jak i europejskie – w niedalekiej przyszłości powinno być gotowe na globalne wyzwania: rosnący popyt na żywność, spowodowany zwiększającą się liczebnością populacji ludzkiej, oraz coraz bardziej dotkliwe skutki zmiany klimatu i degradacji środowiska. Zmiany klimatu mogą doprowadzić do zaprzestania, a co najmniej do istotnego zmniejszenia produkcji rolnej w rejonach tropikalnych. Utracona tam produkcja może zostać zrekompensowana większą ilością żywności wytwarzanej m.in. w Europie. Jednocześnie także tu produkcja rolna podlegać będzie presji klimatycznej: w Polsce będzie to przede wszystkim deficyt wody oraz częstsze i dłuższe fale upałów. Z jednej strony zmiany klimatu mają więc duże znaczenie dla rozwoju rolnictwa, ale z drugiej sektor rolniczy także do tych zmian się przyczynia. Stąd też można spodziewać się, że będzie rosła presja, aby rolnictwo w większym niż dotychczas stopniu uczestniczyło w redukcji emisji gazów cieplarnianych, wdrażając jednocześnie programy adaptacji (WWF Polska, 2020). Przejawem tego jest też Europejski Zielony Ład, a w szczególności strategia „Od pola do stołu” (Komisja Europejska, 2020a) i „Strategia

(European Commission, 2020b), which define the direction and level of ambition of the EU in making agriculture more climate-friendly.

In connection with progressing climate change, which will also bring changes in meteorological conditions in many countries, including Poland, it is worth analyzing the impact of climatic (weather) factors on crop yields. This will make it possible to predict the possible effects on crops, which will be caused by the aforementioned changes, so that agriculture can be appropriately adapted to the new conditions. A comprehensive study of the impact of weather factors on cereal crops in Poland in the medium term has not yet been conducted on a larger scale.

Climate change is not only about warming, which can be observed at every spatial scale, from global to point one. Indeed, all elements of the coupled climate and water resource systems are changing with temperature, and consequently so are many physical, biological, and human (socio-economic) systems. A range of extreme weather events (heat waves, droughts, intense rains and floods, strong winds) are occurring with increasing frequency and magnitude. In addition, agriculture should meet strict environmental standards, not only limiting the risk of nutrients entering surface or groundwater, but also reducing greenhouse gas emissions.

The effects of climate change will be very broad, but four aspects will be of key importance for Polish agriculture: a change in the frequency of precipitation and, as a consequence, the threat of drought, an increase in average air temperature and the associated lengthening of the growing season, an increase in the frequency of extreme weather events and an increase in the occurrence of new diseases and pests. Most scenarios predicting how precipitation will change in Poland indicate that the distribution of precipitation will change, although the total amount of precipitation will remain similar to the current level (average annual amount of 550–600 mm), there will be more precipitation in winter (i.e., in the non-vegetation period) and less in the other seasons (Karaczun, 2020). This will increase the risk of agricultural drought. The situation will be exacerbated by the fact that rains will be more abundant in spring and summer, but rain-free periods will become longer.

Combined with rising temperatures, this will put Poland even more at risk of drought. These changes are already occurring. Since the middle of the previous century, droughts have occurred with increasing frequency (Doroszewski et al., 2014). While between 1951 and 1980 they occurred, on average, every

na rzecz bioróżnorodności” (Komisja Europejska, 2020b), które określają kierunek i poziom ambicji Unii Europejskiej (UE) w zakresie uczynienia rolnictwa bardziej przyjaznym klimatowi.

W związku z postępującymi zmianami klimatu, które przyniosą także zmiany warunków meteorologicznych w wielu krajach, w tym w Polsce, warto przeanalizować wpływ czynników klimatycznych (pogodowych) na plony roślin. Pozwoli to przewidzieć możliwe skutki dla upraw, jakie spowodują wspomniane wcześniej zmiany, by można było odpowiednio zaadaptować rolnictwo do nowych warunków. Kompleksowe badanie wpływu czynników pogodowych na uprawy zbóż w Polsce w średnim okresie czasowym nie były dotychczas prowadzone na szerszą skalę.

Zmiany klimatu polegają nie tylko na ociepleniu, które obserwowane jest w każdej skali przestrzennej, od globalnej do punktowej. W istocie wraz z temperaturą zmieniają się wszystkie elementy sprzężonych systemów klimatu i zasobów wodnych, a w konsekwencji – także wielu systemów fizycznych, biologicznych i ludzkich (społeczno-ekonomicznych). Szereg ekstremalnych zdarzeń pogodowych (fale upałów, susze, intensywne deszcze i powodzie, silne wiatry) występuje coraz częściej i przybiera większe rozmiary. Ponadto rolnictwo spełniać powinno rygorystyczne normy środowiskowe, nie tylko ograniczające ryzyko przedostania się substancji biogennej do wód powierzchniowych czy gruntowych, ale również ograniczające emisje gazów cieplarnianych.

Skutki zmiany klimatu będą bardzo szerokie, jednakże cztery z nich będą miały kluczowe znaczenie dla polskiego rolnictwa: zmiana częstotliwości opadów i – w konsekwencji – zagrożenie suszą, wzrost średniej temperatury powietrza i związane z tym wydłużenie okresu wegetacyjnego, wzrost częstotliwości ekstremalnych zdarzeń pogodowych oraz nasilenie się występowania nowych chorób i szkodników. Większość scenariuszy prognozujących zmiany opadów w Polsce wskazuje, że zmieni się ich rozkład, choć całkowita ich ilość pozostanie na poziomie zbliżonym do obecnego (średniorocznie 550–600 mm), więcej będzie ich w zimie (czyli w okresie pozawegetacyjnym), a mniej w pozostałych porach roku (Karaczun, 2020). Zwiększy to ryzyko występowania suszy rolniczej. Sytuację pogorszy jeszcze to, że wiosną i latem deszcze będą bardziej obfite, ale także wydłużać się będą okresy bezopadowe.

W połączeniu ze wzrostem temperatury jeszcze bardziej narazi to Polskę na ryzyko suszy. Zmiany te już występują. Od połowy poprzedniego wieku susze pojawiają się coraz częściej (Doroszewski in., 2014).

5 years, from 1980 to 2010 they occurred every two years, while since 2013 there has been a permanent summer drought in Poland. The aim of the study was to assess the impact of weather factors on the yield of selected cereals in Poland in the context of progressive climate change. The analysis was conducted by province for the 2013–2020 period.

Literature Review

Among the main factors influencing yields are natural and climatic factors, water conditions, temperature, soil pH or relief (Jędrzejkowski, 2022). Another group of factors is related to agrotechnics and includes the use of mineral fertilizers and the technologies applied, which is directly related to the amount of financial outlays incurred. Elements related to the structure of the farm may also include labor inputs or the human capital of farmers (Gołaś, 2010). According to Olesen et al. (2007), three effects of climate change on crops can be distinguished:

- increasing concentrations of CO₂ in the atmosphere, which affects the water resources and mineral elements used;
- changes in average temperature, precipitation, solar radiation and humidity that affect biomass development;
- increased frequency of extreme weather events.

Climate change also affects the frequency and intensity of rainfall. Rainfall occurs less frequently and is more intense, which directly affects plant development. A significant deterioration in agroclimatic conditions is also forecast, which may extend over many seasons. These factors generate many of the problems that modern agriculture has to face. Yield changes are also observed in Poland in crops such as wheat, rye, barley, and potatoes (Górski et al., 2008).

The length of the growing season has a clear impact on crop timing. However, its lengthening, which has been observed in recent years throughout Europe (including Poland), is not as important as the fact that air temperature rises during the growing season. The period in which plants reach full maturity, as a result of the increase in heat resources, shortens allowing farmers to cultivate the so-called catch crops.

The growing season in Poland (compared to the middle of the 20th century) has lengthened over the last 50 years by 20–30 days. It is forecast to lengthen by a further 25–30 days by the middle of this century (Kundzewicz & Kozyra, 2011). This

O ile w latach 1951–1980 występowały one średnio co pięć lat, to od roku 1980 do 2010 występowały średnio co dwa lata, natomiast od 2013 r. obserwuje się w Polsce permanentną suszę letnią.

Celem pracy była ocena wpływu czynników pogodowych na plonowanie wybranych zbóż w Polsce w kontekście postępujących zmian klimatu. Analizę prowadzono w układzie wojewódzkim w latach 2013–2020.

Przegląd literatury

Wśród głównych czynników wpływających na wielkość plonów wymienia się przede wszystkim czynniki przyrodnicze i klimatyczne, warunki wodne, temperaturę, nasłotnienie, odczyn gleby czy rzeźbę terenu (Jędrzejkowski, 2022). Kolejna grupa czynników związana jest z agrotechniką i zalicza się tutaj zużycie nawozów mineralnych oraz zastosowane technologie, co bezpośrednio związane jest wielkością ponoszonych nakładów finansowych. Do elementów związanych ze strukturą gospodarstwa można też zaliczyć nakłady pracy czy kapitał ludzki rolników (Gołaś, 2010). Według Olesena i in. (2007) można wyróżnić trzy efekty zmian klimatu wpływające na uprawy:

- rosnące stężenie CO₂ w atmosferze, które wpływa na wykorzystywane zasoby wodne i elementy mineralne;
- zmiany średnich temperatur, opadów, promieniowania słonecznego i wilgoci, które wpływają na rozwój biomasy;
- większa częstotliwość występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych.

Zmiany klimatu wpływają również na częstotliwość oraz intensywność opadów. Deszcze pojawiają się rzadziej oraz są bardziej intensywne, co wpływa bezpośrednio na rozwój roślin. Prognozuje się również znaczne pogorszenie się warunków agroklimatycznych, które może trwać przez wiele sezonów. Czynniki te generują wiele problemów, z którymi współczesne rolnictwo musi się mierzyć. Zmiany dotyczące plonowania obserwowane są również w Polsce na takich roślinach jak pszenica, żyto, jęczmień czy ziemniaki (Górski i in., 2008).

Długość okresu wegetacyjnego ma wyraźny wpływ na terminy upraw. Jego wydłużenie obserwowane w ostatnich latach w całej Europie (w tym także w Polsce) nie jest jednak tak istotne, jak fakt podnoszenia się temperatury powietrza podczas okresu wegetacji roślin. Okres, w którym rośliny osiągną pełną dojrzałość w wyniku wzrostu zasobów ciepła, skraca się, co pozwala rolnikom na uprawianie tzw. poplonów.

may appear to be a positive change, which will enable the cultivation of more thermophilic crops in Poland and, for others, create an opportunity to increase the number of production cycles per year, as well as enabling farmers to grow so-called catch crops. The increase in temperature during the growing season also means that crop maturation will be accelerated. According to Górski et al. (2008), the increase in temperature of the growing season has an important impact on cereals maturation. In the case of wheat, an increase of 10 degrees Celsius accelerates its maturation by one week, while in the case of maize it is as much as two weeks. However, the increase in average annual temperature and the lengthening of the growing season does not reduce the risk of late spring frosts. This is most dangerous for orchard plants, which—if the growing season starts earlier—are at the growth stage most vulnerable to cold stress if frosts occur in mid-May. A good example is 2007, when the weather pattern was similar to that described above. At that time, all orchard crops suffered and average apple yields were three times lower than the multi-year average (Karaczun, 2020).

It is forecast that potatoes will cease to be grown in Poland (it will be too warm for them), and winter crops will also become endangered. The area under maize, which can be grown for grain throughout Poland, will increase and sorghum will probably spread (Karaczun, 2020).

Another important phenomenon with a potential impact on cereal yields is the lengthening of periods without rainfall. Since the beginning of the 21st century, the number of days with high daily precipitation has in turn increased:

- for daily precipitation ≥ 10 mm by 20 days/year,
- for daily precipitation ≥ 30 mm by 6 days/year,
- for daily precipitation ≥ 50 mm by 4 days/year.

These changes increase the risk of not only drought but also floods. From this point of view, the most worrying is the increase in the frequency of catastrophic rainfall – above 70 mm/day. Already in the first years of the 21st century, an average of four days with such precipitation per year was observed in Poland (Górski et al., 2008).

Such rainfall causes the phenomenon of the so-called flash flooding, i.e., a situation where even short periods of rainfall cause local flooding and waterlogging. In addition, during heavy rainfall, a larger amount of rainwater than during prolonged moderate rainfall runs off with surface runoff into watercourses instead of recharging groundwater. This increases the risk of hydrological drought. The phenomenon of flash flooding is particularly dangerous

Okres wegetacyjny w Polsce (w porównaniu z latami 50. XX wieku) wydłużył się na w trakcie ostatnich 50 lat o 20–30 dni. Prognozuje się, że do połowy obecnego wieku wydłuży się o kolejne 25–30 dni (Kundzewicz i Kozyra, 2011). Może wydawać się to pozytywną zmianą, która umożliwi uprawę w Polsce bardziej ciepłolubnych roślin, a w odniesieniu do innych stworzy szansę na zwiększenie liczby cykli produkcyjnych w ciągu roku, a także umożliwi rolnikom uprawianie tzw. poplonów. Wzrost temperatury w okresie wegetacyjnym oznacza ponadto przyspieszenie dojrzewania roślin. Zdaniem Górskiego i in. (2008) wzrost temperatury okresu wegetacyjnego ma istotny wpływ na przyspieszenie dojrzewania zbóż. W przypadku pszenicy wzrost o 10 stopni Celsjusza przyspiesza jej dojrzewanie o tydzień, natomiast w przypadku kukurydzy są to aż dwa tygodnie. Wzrost średniej temperatury rocznej i wydłużenie okresu wegetacyjnego nie zmniejsza jednak ryzyka wystąpienia późnowiosennych przymrozków. Jest to najbardziej niebezpieczne dla roślin sadowniczych, które – jeśli sezon wegetacyjny rozpoczyna się wcześniej – w przypadku wystąpienia przymrozków w połowie maja są one w fazie wzrostu najbardziej narażonej na stres zimna. Dobrym przykładem jest rok 2007, gdy przebieg pogody był podobny do opisanego powyżej. Ucierpiałły wówczas wszystkie uprawy sadownicze, a średnie plony jabłek były trzykrotnie niższe od średniej wieloletniej (Karaczun, 2020).

Prognozuje się, że w Polsce przestaną być uprawiane ziemniaki (będzie dla nich za ciepło), zagrożone staną się także uprawy ozime. Wzrośnie powierzchnia uprawy kukurydzy, która w całej Polsce będzie mogła być uprawiana na ziarno i zapewne rozpowszechni się sorgo (Karaczun, 2020).

Innym ważnym zjawiskiem mającym potencjalny wpływ na zbiory zbóż jest wydłużanie się okresów bez opadów. Od początku XXI wieku wzrosła z kolei liczba dni z dużym opadem dobowym:

- w przypadku opadu dobowego ≥ 10 mm o 20 dni/rok,
- w przypadku opadu dobowego ≥ 30 mm o 6 dni/rok,
- w przypadku opadu dobowego ≥ 50 mm o 4 dni/rok.

Zmiany te zwiększają ryzyko wystąpienia nie tylko suszy, ale także powodzi. Z tego punktu widzenia najbardziej niepokojący jest wzrost częstotliwości opadów katastrofalnych – powyżej 70 mm/dobę. Już w pierwszych latach XXI wieku obserwowano w Polsce średnio cztery dni z takimi opadami rocznie (Górski i in., 2008).

Takie opady powodują zjawisko tzw. błyskawicznej powodzi, tj. sytuację, gdy nawet krótkie opady wywołują lokalne podtopienia i powodzie. Ponadto w czasie intensywnych deszczy większa niż podczas

in urbanized areas, its occurrence in agricultural areas can cause significant crop losses, and lead to the death or maiming of people and livestock.

Equally dangerous for agriculture, as well as for other sectors of the economy and for the quality of life in Poland, is the increase in the frequency and strength of extreme weather events, such as hurricane winds, hail, violent storms, and intense precipitation. An increase in the frequency of hurricane winds has been observed in Poland since the second half of the 1990s. Since then, dozens of hurricanes with wind speeds in excess of 35 m/s have been recorded. The central and eastern parts of the Słowińskie coast—from Koszalin to Rozewie and Hel, the wide latitudinal belt of northern Poland to the Suwałki region, the region of Beskid Śląski and Beskid Żywiecki, the Silesian Foothills, Podhale and the Dynowskie Foothills, as well as the central part of Poland with Mazovia and the eastern part of Greater Poland—are most vulnerable to them (Karaczun, 2020).

Raimondo et al. (2021) demonstrated that with projected climate change and declines in land suitability, wheat production would decline by an average of 5.5%. Increases in wheat yields would be observed in Canada, Kazakhstan, the Russian Federation, while yields are projected to decrease in Argentina, Australia, Brazil, India, China, and the USA. A change in temperature and CO₂ concentrations alone would have a positive impact on yields. The results from the three scenarios clearly indicated a large impact of land degradation on overall wheat production, which is, however, partly offset by the positive impact of climate change on yields in some countries. The different effects of changes in temperature and precipitation on agricultural yields in different countries were also pointed out by Pirttioja et al. (2015). They demonstrated that, overall, yields are lower under a scenario of higher temperature and lower rainfall, and higher under higher rainfall.

Previous research indicates that meteorological factors have a significant effect on yield. Kołodziej and Kulig (2005) proved that the correlation coefficient between grain yield and total precipitation from panicle shedding to wax maturity was 0.591 and was significant at the $p = 0.01$ level. A similarly high statistical relationship was shown by the relationship between grain yield and the number of days with precipitation, the correlation coefficient was 0.428 and was significant at the $p = 0.02$ level. The average frequency of precipitation was determined for successive development periods, taking into account the length of the development period and the optimum number of days with precipitation at

długotrwałych opadów umiarkowanych ilość wody opadowej odpływa ze spływem powierzchniowym do cieków wodnych, zamiast zasilać wody podziemne. Zwiększa to ryzyko wystąpienia suszy hydrologicznej. Zjawisko powodzi błyskawicznej jest szczególnie niebezpieczne na terenach zurbanizowanych, jego wystąpienie na obszarach rolnych może spowodować znaczące straty plonów, a także prowadzić do śmierci lub okaleczenia ludzi i zwierząt gospodarskich.

Równie niebezpieczny dla rolnictwa, a także innych sektorów gospodarki oraz dla jakości życia w Polsce, jest wzrost częstości i siły ekstremalnych zdarzeń pogodowych, takich jak huraganowe wiatry, grad, gwałtowne burze oraz intensywne opady. Wzrost częstości występowania huraganowych wiatrów obserwuje się w Polsce od drugiej połowy lat 90. Od tego czasu zanotowano kilkadziesiąt huraganów, w których prędkość wiatru przekraczała 35 m/s. Najbardziej na nie narażone są środkowa i wschodnia część Pobrzeża Słowińskiego – od Koszalina po Rozewie i Hel, szeroki, równoleżnikowy pas Polski północnej po Suwalszczyznę, a także rejon Beskidu Śląskiego, Beskidu Żywieckiego, Pogórza Śląskiego i Podhala, Pogórza Dynowskiego oraz centralna część Polski z Mazowszem i wschodnią częścią Wielkopolski (Karaczun, 2020).

Raimondo i in. (2021) dowiedli, że przy przewidywanych zmianach klimatu i spadku przydatności gruntów produkcja pszenicy spadłaby średnio o 5,5%. Wzrosty plonów pszenicy będą obserwowane w Kanadzie, Kazachstanie, Federacji Rosyjskiej, podczas gdy przewiduje się spadek plonów w Argentynie, Australii, Brazylii, Indiach, Chinach i Stanach Zjednoczonych. Sama zmiana temperatury i stężenia CO₂ wpłynęłaby pozytywnie na wielkość plonów. Wyniki z trzech scenariuszy jednoznacznie wskazywały na duży wpływ degradacji gruntów na ogólną produkcję pszenicy, który jednak jest częściowo kompensowany przez pozytywny wpływ zmian klimatu na plony w niektórych krajach. Na odmienne skutki zmian w temperaturze i opadach na plony w rolnictwie w różnych krajach wskazywali też Pirttioja i in. (2015). Dowiedli oni, że ogółem plony są niższe w scenariuszu zakładającym wyższą temperaturę i mniejsze opady, a wyższe przy większych opadach.

Dotychczasowe badania wskazują na istotny wpływ czynników meteorologicznych na plony. Kołodziej i Kulig (2005) dowiedli, że współczynnik korelacji pomiędzy plonem ziarna a sumą opadów w czasie od wyrzucania wiech do dojrzałości woskowej wynosił 0,591 i był istotny przy poziomie $p = 0,01$. Podobnie wysoką zależność statystyczną wykazał związek plonu ziarna z liczbą dni z opadem, współczynnik korelacji wynosił 0,428 i był istotny

that time. The most frequent rainfall during the period from panicle shedding to wax maturity, occurring on average every two days, favored high oat grain yields. At other times, their distribution of two to five days with precipitation during the development stage was favorable.

The correlation coefficient between thousand seed weight and total rainfall and number of days with precipitation at this time was 0.343 and 0.344, respectively, and was significant at $p = 0.05$. In contrast, a rainfall deficit of 18.6 mm was recorded during the further development period from earing to wax maturity, and this was slightly lower than for high-yielding oat grain. The optimum number of days with precipitation was two days higher than the multi-year average. The value of the correlation coefficient was then 0.426 and 0.465, respectively.

A study using polynomial regression (Radzka et al., 2015) showed the dependence of yielding of medium-early potato cultivars on the sum of precipitation. The sum of precipitation in May significantly parabolic influenced the yield of medium-early potato cultivars at the experimental stations of variety evaluation in Karżniczka, Słupia, and Sulejów. In Węgrzce, the relationship between total May precipitation and tuber yield was linear, and the determined regression equation indicated that an increase in precipitation by 1 mm caused a decrease in yield by 0.0485 t/ha. The article also included information on the variation in rainfall totals over the long term and the impact of climate change on this factor.

A study using panel data on the impact of weather factors on wheat yields in Serbia showed that this impact is significant (Jeločnik et al., 2019). The estimation of the impact was carried out by analyzing a panel of data including various weather factors (temperature, precipitation, solar radiation, evapotranspiration), altitude, yield and the share of land suitable for wheat in the total utilized agricultural land in the selected 14 Serbian municipalities over 14 years. The average daily water deficit was calculated as a single representative indicator of weather conditions. The results of the multivariate regression indicated a strong, statistically significant effect of a change in average daily water deficit on the decrease in wheat yields. A 0.1 mm increase in water deficit, between November 15 and April 1, resulted in 175.0 kg/ha lower yields, while higher deficit between April 1 and May 15 resulted in 45.0 kg/ha lower yields.

przy poziomie $p = 0,02$. Dla kolejnych okresów rozwojowych wyznaczono średnią częstotliwość opadów, biorąc pod uwagę długość okresu rozwojowego i optymalną liczbę dni z opadem w tym czasie. Najczęstsze opady w czasie od wyrzucania wiech do dojrzałości woskowej, występujące średnio co dwa dni, sprzyjały wysokiemu plonowaniu ziarna owsa. W pozostałym czasie korzystny był ich rozkład od dwóch do pięciu dni z opadem w fazie rozwojowej.

Współczynnik korelacji pomiędzy masą tysiąca ziaren (MTZ) a sumą opadów oraz liczbą dni z opadem wynosił w tym czasie odpowiednio 0,343 i 0,344 oraz był istotny przy poziomie $p = 0,05$. Z kolei w dalszym okresie rozwoju – od kłoszenia do dojrzałości woskowej – notowano niedobór opadów w wysokości 18,6 mm i był on nieco niższy niż dla wysokiego plonowania ziarna owsa. Optymalna liczba dni z opadem była wyższa o dwa dni od średniej wieloletniej. Wartość współczynnika korelacji wynosiła wtedy odpowiednio 0,426 i 0,465.

W badaniu z wykorzystaniem regresji wielomianowej (Radzka i in., 2015) wykazano zależność plonowania odmian ziemniaka średnio wczesnego od sumy opadów. Suma opadów w maju istotnie parabolicznie wpływała na plonowanie średnio wczesnych odmian ziemniaka w stacjach doświadczalnych oceny odmian w Karżniczce, Słupii i Sulejowie. W Węgrzcach zależność pomiędzy sumą opadów w maju a plonem bulw była liniowa, a wyznaczone równanie regresji wskazało, że wzrost opadów o jeden milimetr powodował spadek plonów o 0,0485 t/ha. W artykule uwzględniono również informację dotyczącą zróżnicowania sumy opadów w długim okresie i wpływu zmian klimatu na ten czynnik.

Badanie z wykorzystaniem danych panelowych dotyczące wpływu czynników pogodowych na plony pszenicy w Serbii pokazało, że ów wpływ jest istotny (Jeločnik i in., 2019). Oszacowanie wpływu zostało przeprowadzone poprzez analizę panelu danych obejmującego różne czynniki pogodowe (temperaturę, opady, promieniowanie słoneczne, ewapotranspirację), wysokość nad poziomem morza, plony i udział gruntów przydatnych pod pszenicę w całości użytkowanych gruntów rolnych w wybranych 14 serbskich gminach na przestrzeni 14 lat. Średni dobowy deficyt wody obliczono jako pojedynczy reprezentatywny wskaźnik warunków pogodowych. Wyniki regresji wielowymiarowej wskazały silny, statystycznie istotny wpływ zmiany średniego dobowego deficytu wody na spadek plonów pszenicy. Wzrost deficytu wody o 0,1 mm w okresie od 15 listopada do 1 kwietnia skutkował plonami niższymi o 175,0 kg/ha, natomiast w okresie od 1 kwietnia do 15 maja – plonami niższymi o 45,0 kg/ha.

Material and Methods

The meteorological data come from the databases of the Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute (IMGW PIB), which are collected at meteorological stations located throughout the country. They are collected on a daily basis. Measurements are taken regularly at set intervals. Data from 157 such stations located in the 14 provinces included in the study were used in the analysis. For each studied year in the 2013–2020 period data were obtained from a minimum of two meteorological stations for each province. The two provinces of Lower Silesia and Opole were omitted due to the fact that data was only available for them from one meteorological station. Data on the amount of yields obtained per hectare of crops and the amount of mineral fertilizers used according to the new definition come from data published by Statistics Poland (GUS), while data on soil classification come from the Institute of Soil Science and Plant Cultivation State Research Institute (IUNG PIB) and were published by Fotyma (2011). The data on soils are permanent.

Based on the literature (Kołodziej & Kulig, 2005; Skowera & Kołodziej, 2003) and authors' own observations, the following climatic variables (at the province level) were used for the final analysis: mean temperature from March to September, number of days with precipitation per year, and total precipitation falling from March to September. The effects of maximum temperature and the amount of precipitation in the sub-periods (from March to May and from June to September) were also tested, but no satisfactory results were obtained regarding the quality of the econometric models. The control variables are the share of medium and heavy soils in agricultural land stock of the province and the consumption of mineral fertilizers (phosphorus, nitrogen, and potassium) in kg of NPK per hectare. On the other hand, the estimated variables are total cereal yields and yields of major cereals such as wheat, rye, and barley in quintals (dt) per hectare.

The study uses panel data analysis to combine cross-sectional and temporal dimensions. The basic panel regression models include a fixed effects (FE) model and a random effects (RE) model. The difference between these models is the treatment of the individual effect, which includes unobservable factors that affect the level of the explanatory variable. In the case of the FE model, this effect is assumed to be constant over time and can be estimated as a parameter for each panel unit. In contrast, in the second case (RE), the individual effect is treated

Materiał i metody

Dane meteorologiczne pochodzą z baz danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW PIB), które zbierane są codziennie w stacjach meteorologicznych rozlokowanych na terenie całego kraju. Pomiarów są przeprowadzane regularnie w ustalonych interwałach czasowych. W analizie zostały wykorzystane dane ze 157 takich stacji rozlokowanych w 14 województwach, które zostały uwzględnione w badaniu. Dla każdego badanego roku z zakresu 2013–2020 dane pochodzą z minimum dwóch stacji meteorologicznych dla każdego województwa. Dwa województwa dolnośląskie i opolskie zostały pominięte ze względu na to, że dane dostępne były dla nich tylko z jednej stacji meteorologicznej. Informacje dotyczące ilości plonów uzyskiwanych z hektara upraw oraz ilości użytych nawozów mineralnych według nowej definicji pochodzą z danych publikowanych przez Główny Urząd Statystyczny (GUS), natomiast dane dotyczące klasyfikacji gleb pochodzą z Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa Państwowego Instytutu Badawczego (IUNG PIB) i zostały opublikowane przez Fotymę (2011). Dane o glebach mają charakter stały.

Na podstawie literatury (Kołodziej i Kulig, 2005; Skowera i Kołodziej, 2003) i własnych obserwacji do końcowej analizy wykorzystano następujące zmienne klimatyczne (na poziomie województw): średnia temperatura od marca do września, liczba dni z opadem w roku i suma opadów przypadająca od marca do września. Testowano także wpływ temperatury maksymalnej oraz ilości opadów w podokresach (od marca do maja i od czerwca do września), ale nie uzyskano zadowalających wyników od strony jakości modeli ekonometrycznych. Zmiennymi kontrolnymi są udział gleb średnich i ciężkich w zasobach ziemi rolniczej w danym województwie oraz zużycie nawozów mineralnych (fosforowych, azotowych i potasowych) w kg NPK/ha. Natomiast zmiennymi estymowanymi są plony zboża ogółem oraz plony głównych zbóż takich jak pszenica, żyto i jęczmień w kwintalach (dt) z hektara.

W badaniu posłużono się analizą danych panelowych, która pozwala połączyć wymiary przekrojowy i czasowy. Do podstawowych modeli regresji panelowej zalicza się model z efektami stałymi (ang. *fixed effects*, FE) oraz model z efektami losowymi (ang. *random effects*, RE). Różnica pomiędzy tymi modelami polega na potraktowaniu efektu indywidualnego, który obejmuje nieobserwowalne czynniki wpływające na poziom zmiennej objaśnianej. W przypadku modelu FE przyjmuje się,

as a random variable that has a normal distribution and is not directly estimable. An important advantage of the RE model over FE is also that it can include explanatory variables whose values are constant over time, such as the proportion of soils of a particular type in the present analysis. In a formal way, the appropriateness of using the FE or RE model was tested using the Hausman test. High p -values (above 0.05) indicate that there is no reason to reject the null hypothesis that the individual effect is not correlated with the matrix of explanatory variables. It is therefore not systematic and thus the RE model is preferred. Also given the intention to introduce average soil quality into the model, the RE model was chosen.

The panel data analysis method involves the possibility of heteroskedasticity and two types of autocorrelation (autocorrelation occurring over time and cross-sectional dependence). In relatively short panels (less than 10–15 years), the phenomenon of autocorrelation is difficult to estimate reliably. In contrast, the presence of cross-sectional correlation was diagnosed on the basis of the Pesaran test. Standard errors in the regression analysis were therefore estimated using the robust Driscoll and Kraay method.

In the case of average temperature and total precipitation from March to September, the squares of these variables were also introduced into the models. This is because in the case of cereal yields, it would be difficult to assume a purely linear relationship, whereby higher temperatures or higher rainfall would translate unambiguously into higher or lower yields. The introduction of squares allows us to verify the hypothesis that higher yields are obtained for higher temperatures and rainfall totals, but that this effect weakens at high levels of these variables, until it eventually becomes the opposite. In order to test the robustness of the models, two control variables were also introduced into each baseline model – mineral fertilizer use in kg of NPK/ha and the share of medium and heavy soils in agricultural land stock of the province (a time-invariant variable).

The panel regression equation can therefore be written in the following general way:

że efekt ten ma charakter stały w czasie i można go oszacować jako parametr dla każdej jednostki panelu. Natomiast w drugim przypadku (RE) efekt indywidualny traktowany jest jako zmienna losowa, która ma rozkład normalny i nie podlega bezpośredniej estymacji. Istotną zaletą modelu RE w porównaniu z FE jest też to, że można w nim uwzględnić zmienne objaśniane, których wartości są stałe w czasie, jak np. udział gleb określonego typu w niniejszej analizie. W sposób formalny adekwatność wykorzystania modelu FE lub RE testowano za pomocą testu Hausmana. Wysokie wartości p -value (powyżej 0,05) wskazują na przyjęcie hipotezy zerowej o tym, że efekt indywidualny nie jest skorelowany z macierzą zmiennych objaśniających. Nie ma on zatem charakteru systematycznego i co za tym idzie – model RE jest preferowany. Biorąc też pod uwagę zamiar wprowadzenia do modelu przeciętnej jakości gleb, zdecydowano się na model RE.

Metoda analizy danych panelowych wiąże się z możliwością wystąpienia heteroskedastyczności oraz dwóch typów autokorelacji (autokorelacji występującej w czasie oraz korelacji przekrojowej). W relatywnie krótkich panelach (poniżej 10–15 lat) zjawisko autokorelacji jest trudne do wiarygodnego oszacowania. Na podstawie testu Pesarana zdiagnozowano natomiast występowanie korelacji przekrojowej. Błędy standardowe w analizie regresji szacowano zatem za pomocą odpornej metody Driscolla i Kraaya.

W przypadku średniej temperatury oraz sumy opadów od marca do września do modeli wprowadzono też kwadraty tych zmiennych. W przypadku plonów zbóż trudno bowiem byłoby przyjąć jedynie liniową zależność, zgodnie z którą wyższa temperatura lub wyższe opady przekładałyby się jednoznacznie na zwiększenie lub obniżenie plonów. Wprowadzenie kwadratów pozwala zweryfikować hipotezę o tym, że wyższe plony uzyskuje się dla wyższych temperatur i sumy opadów, ale efekt ten słabnie przy wysokich poziomach tych zmiennych, aż w końcu staje się odwrotny. W celu zbadania odporności modeli do każdego modelu bazowego wprowadzono też dwie zmienne kontrolne – zużycie nawozów mineralnych w kg NPK/ha oraz udział gleb średnich i ciężkich w zasobach ziemi rolniczej w danym województwie (zmienna stała).

Równanie regresji panelowej można zatem zapisać w następujący ogólny sposób:

$$y_{it} = a + X'_{it}\beta + Z'_i\gamma + \alpha_i + u_{it} \quad (1)$$

where:

- i, t – subscripts denoting unit of analysis and time, respectively;
- Y_{it} – the explanatory variable (depending on the model, total cereal yield, wheat yield, rye yield, barley yield);
- X'_{it} – vector of explanatory variables whose values vary over time;
- Z'_{it} – vector of explanatory variables with constant values in addition to a constant in the model (here: the share of medium and heavy soils in the total stock of agricultural land);
- a – constant in the model;
- β, γ – vectors of parameters to be estimated;
- α_i – individual effect;
- u_{it} – “pure” random error.

gdzie:

- i, t – indeksy oznaczające odpowiednio jednostkę badania i czas;
- Y_{it} – zmienna objaśniana (w zależności od modelu plony zbóż ogółem, plon pszenicy, plon żyta, plon jęczmienia);
- X'_{it} – wektor zmiennych objaśniających, których wartości zmieniają się w czasie;
- Z'_{it} – wektor zmiennych objaśniających o stałych wartościach poza stałą w modelu (tu: udział gleb średnich i ciężkich w ogólnych zasobach ziemi rolniczej);
- a – stała w modelu;
- β i γ – wektory parametrów podlegające estymacji;
- α_i – efekt indywidualny;
- u_{it} – „czysty” błąd losowy.

More precisely, the regression model used in this paper can be written as follows:

Dokładniej rzecz ujmując, model regresji stosowany w niniejszym artykule można zapisać w sposób następujący:

$$y_{it} = a + V1_{it} + V1_{it}^2 + V2_{it} + V2_{it}^2 + V3_{it} + V4_{it} + V5_i + \alpha_i + u_{it} \quad (2)$$

where:

- $V1_{it}$ – the average temperature from March to September in a given province,
- $V2_{it}$ – total rainfall from March to September,
- $V3_{it}$ – the number of days with precipitation,
- $V4_{it}$ – mineral fertilizer consumption in kg NPK/ha,
- $V5_i$ – the share of medium and heavy soil in agricultural land stock of the province.

gdzie:

- $V1_{it}$ – średnia temperatura od marca do września w danym województwie;
- $V2_{it}$ – suma opadów od marca do września;
- $V3_{it}$ – liczba dni z opadem w roku;
- $V4_{it}$ – zużycie nawozów mineralnych w kg NPK/ha;
- $V5_i$ – udział gleb średnich i ciężkich w zasobach ziemi rolniczej w danym województwie.

Table 1. Descriptive statistics for variables used in study on the effect of weather factors on cereal yields
Tabela 1. Statystyki opisowe dla zmiennych wykorzystanych w badaniu dotyczącym wpływu czynników pogodowych na plony zbóż

Indicator / Wskaźnik	Cereals in dt/ha / Zboża (dt/ha)	Wheat in dt/ha / Pszenica (dt/ha)	Rye in dt/ha / Żyto (dt/ha)	Barley in dt/ha / Jęczmień (dt/ha)	V1	V2	V3	V4	V5
Average / Średnia	38.3	43.2	29.1	35.1	13.4	131.0	313.8	40.9	124.1
σ overall / σ ogólne	6.3	7.9	4.7	5.4	0.9	18.1	141.5	20.3	29.4
σ between / σ w przestrzeni	4.6	6.4	3.7	3.5	0.7	8.9	42.8	21.0	27.5
σ within / σ w czasie	4.4	4.9	3.09	4.2	0.7	16.0	135.3	0.00	12.5

σ – standard deviation / odchylenie standardowe

Source: authors' own calculations based on data from IMGW PIB (n.d.), GUS (n.d.), and Fotyma (2011).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW PIB (b.d.), GUS-u (b.d.) oraz Fotyma (2011).

Table 1 provides descriptive statistics for each variable distinguished by standard deviation in spatial and temporal distribution (between and within standard deviation). Table 2 shows the mean values of the variables studied by province.

The average cereal yield in the studied period in 14 provinces was 38.3 dt/ha, with the lowest recorded yield being 24.4 dt/ha and the highest 54.4 dt/ha. The analysis of the standard deviation in spatial and temporal distribution does not allow for a clear assessment whether the yields are more differentiated in time or space—similar values of both deviations were recorded. However, the situation is different for individual cereals. For rye and barley, the variation in both dimensions is similar, but for rye the variation in yields between provinces is slightly stronger and for barley over time. As for wheat, both the yields themselves were the highest and the variation in these yields was the strongest, with the variation being clearly greater spatially than temporally.

W tabeli 1 zamieszczono statystyki opisowe dla poszczególnych zmiennych z wyróżnieniem odchylenia standardowego w układzie przestrzennym i czasowym. W tabeli 2 zamieszczono średnie wartości badanych zmiennych w podziale na województwa.

Średni plon zbóż w badanym okresie w 14 województwach wynosił 38,3 dt/ha, przy czym najmniejszy notowany plon wyniósł 24,4 dt/ha, a najwyższy 54,4 dt/ha. Analiza odchylenia standardowego w układzie przestrzennym i czasowym nie pozwala jednoznacznie ocenić, czy plony są bardziej zróżnicowane w czasie czy przestrzeni – podobne wartości obu odchyleń. Sytuacja prezentuje się jednak odmiennie w przypadku poszczególnych zbóż. W przypadku żyta i jęczmienia zróżnicowanie w obu wymiarach jest podobne, przy czym w przypadku żyta nieco silniejsze jest zróżnicowanie plonów pomiędzy województwami, a w przypadku jęczmienia – w czasie. Jeśli chodzi o pszenicę, to zarówno same plony były najwyższe, jak i zróżnicowanie tych plonów było najsilniejsze, przy czym zróżnicowanie to było wyraźnie większe w układzie przestrzennym niż czasowym.

Table 2. Average values of variables included in the study by province

Tabela 2. Średnie wartości zmiennych uwzględnionych w badaniu w podziale na województwa

Province / Województwo	Cereals in dt/ha / Zboża (dt/ha)	Wheat in dt/ha / Pszenica (dt/ha)	Rye in dt/ha / Żyto (dt/ha)	Barley in dt/ha / Jęczmień (dt/ha)	V1	V2	V3	V4	V5
Kujawsko-pomorskie	43.8	47.5	30.0	36.8	13.8	144.7	274.0	30.2	180.9
Lubelskie	40.2	47.5	29.1	37.2	14.0	121.8	283.6	53.2	113.3
Lubuskie	39.4	44.9	31.6	36.2	14.3	134.0	270.0	27.8	139.3
Łódzkie	34.1	39.6	26.7	32.3	12.9	132.9	294.0	12.1	145.4
Małopolskie	39.1	38.6	29.2	35.8	12.3	129.5	369.7	86.6	84.9
Mazowieckie	31.8	36.3	25.0	31.2	14.4	108.4	262.2	18.9	112.6
Podkarpackie	38.2	36.8	27.0	33.1	12.4	127.1	308.9	57.0	81.0
Podlaskie	30.3	33.9	24.8	29.8	13.2	127.5	367.7	34.7	107.9
Pomorskie	41.5	53.8	30.9	36.5	12.7	138.4	311.1	39.7	144.4
Śląskie	41.3	45.8	29.1	36.8	13.3	131.7	406.4	54.7	125.8
Świętokrzyskie	31.3	34.6	24.3	31.3	13.6	129.6	317.3	57.7	111.5
Warmińsko-mazurskie	39.7	46.4	31.7	33.7	12.9	129.7	337.1	56.8	107.1
Wielkopolskie	42.0	47.5	30.2	38.6	14.2	137.8	279.4	13.7	158.3
Zachodniopomorskie	43.7	51.0	38.4	42.7	13.3	140.2	311.8	29.8	125.5
Average / Średnio	38.3	43.2	29.1	35.1	13.4	131.0	313.8	40.9	124.1

Source: authors' own calculations based on data from IMGW PIB (n.d.), GUS (n.d.), and Fotyma (2011).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW PIB (b.d.), GUS-u (b.d.) oraz Fotyma (2011).

The average temperature from March to September was 13.4 degrees, with a comparable standard deviation spatially and temporally. As far as rainfall is concerned, both when it comes to the amount of rainfall per year and the number of rainy days, there is definitely more variation in the temporal pattern than in the spatial pattern. This shows that, despite Poland being a relatively large country, the variation in rainfall conditions is not that great. The situation is different in terms of average soil quality. In the Łódzkie province, medium and heavy soils account for only 12.1%, while in the Małopolskie province this is 86.6%. However, this does not have a direct bearing on crop yields, as, for example, the Małopolskie province was ranked only ninth in terms of average cereal yields in the period under review. Mineral fertilizer consumption averaged 124 kg NPK/ha, with significant differences observed, mainly spatially. In the Kujawsko-Pomorskie province over 180 kg NPK/ha were used, while in the Podkarpackie province less than half of this value, i.e., about 81 kg/ha. The analysis of the data in Table 2 allows the conclusion that mineral fertilizer consumption was higher in provinces with worse soil conditions. Paradoxically, provinces with a smaller share of medium and heavy soils were at the same time the provinces with relatively high yields, however, this is mainly caused by the general level of agriculture development, which in turn is largely due to historical background.

Results and Discussion

Table 3 shows the results of the econometric modelling. The estimated models explained from about 27% of the variation in the dependent variable (yield) in the case of the model for wheat to 42–43% in the model for total cereals.

Średnia temperatura od marca do września wyniosła 13,4 stopnia, przy porównywalnym odchyleniu standardowym w układzie przestrzennym i czasowym. Jeśli chodzi o deszcz, to w przypadku ilości opadów w roku, jak i liczby dni deszczowych zdecydowanie większe zróżnicowanie dotyczy układu czasowego niż przestrzennego. Pokazuje to, że pomimo iż Polska jest relatywnie dużym krajem, to zróżnicowanie warunków w zakresie opadów deszczu nie jest aż tak duże. Inaczej przedstawia się sytuacja w zakresie przeciętnej jakości gleb. W województwie łódzkim gleby średnie i ciężkie stanowią tylko 12,1%, podczas gdy w województwie małopolskim jest to 86,6%. Nie ma to jednak bezpośredniego przełożenia na plony, gdyż przykładowo województwo małopolskie zajmowało dopiero dziewiąte miejsce, jeśli chodzi o średnie plony zbóż w badanym okresie. Zużycie nawozów mineralnych wyniosło średnio 124 kg NPK/ha, przy czym obserwowane były znaczące różnice, głównie w układzie przestrzennym. W województwie kujawsko-pomorskim zużywano ponad 180 kg NPK/ha, podczas gdy w podkarpackim mniej niż połowę tej wartości – około 81 kg/ha. Analiza danych w tabeli 2 pozwala wysnuć wniosek, że w województwach o gorszych warunkach glebowych zużycie nawozów mineralnych było wyższe. Paradoksalnie, województwa z mniejszym udziałem gleb średnich i ciężkich były jednocześnie województwami o relatywnie wysokich plonach – wynika to jednak głównie z ogólnego poziomu rolnictwa, który z kolei wynika w znacznej mierze z zaszłości historycznych.

Wyniki i dyskusja

W tabeli 3 zamieszczono wyniki modelowania ekonometrycznego. Oszacowane modele wyjaśniały od około 27% zmienności zmiennej zależnej (plonu) w przypadku modelu dla pszenicy do 42–43% w przypadku modelu dla zbóż ogółem.

Table 3. Panel model estimation results – random effects models

Tabela 3. Wyniki estymacji modeli panelowych – modele z efektami losowymi

Variables / Zmienne	(1) Cereals in dt/ha / Zboża w dt/ha	(2)* Cereals in dt/ha / Zboża w dt/ha	(3) Wheat in dt/ha / Pszenica w dt/ha	(4)* Wheat in dt/ha / Pszenica w dt/ha	(5) Rye in dt/ha / Żyto w dt/ha	(6)* Rye in dt/ha / Żyto w dt/ha	(7) Barley in dt/ha / Jęczmień w dt/ha	(8)* Barley in dt/ha / Jęczmień w dt/ha
V1	22.044 ^a (5.551)	22.279 ^a (5.613)	27.861 ^a (4.956)	28.102 ^a (5.185)	14.035 ^c (6.300)	14.155 ^c (6.664)	18.229 ^a (4.648)	18.657 ^a (5.130)
V1 ²	-0.868 ^a (0.207)	-0.877 ^a (0.208)	-1.085 ^a (0.176)	-1.098 ^a (0.186)	-0.555 ^b (0.234)	-0.561 ^c (0.248)	-0.722 ^a (0.173)	-0.740 ^a (0.192)
V2	0.157 ^a (0.015)	0.156 ^a (0.015)	0.159 ^a (0.023)	0.156 ^a (0.023)	0.106 ^a (0.011)	0.105 ^a (0.011)	0.149 ^a (0.015)	0.148 ^a (0.015)
V2 ²	-0.043 ^b (0.017)	-0.043 ^b (0.017)	-0.040 ^c (0.021)	-0.040 ^c (0.019)	-0.029 ^c (0.014)	-0.029 ^c (0.013)	-0.030 (0.018)	-0.031 (0.017)
V3	0.000 ^c (0.000)	0.000 ^c (0.000)	0.000 (0.000)	0.000 ^c (0.000)	0.000 (0.000)	0.000 ^c (0.000)	0.000 (0.000)	0.000 (0.000)
V4	– (0.097)	0.005 (0.097)	– (0.155)	-0.079 (0.155)	– (0.071)	-0.023 (0.071)	– (0.071)	-0.020 (0.075)
V5	– (0.007)	0.005 (0.007)	– (0.010)	-0.013 (0.010)	– (0.006)	-0.002 (0.006)	– (0.006)	0.005 (0.011)
Constans / Stała	-114.138 ^b (36.463)	-116.504 ^b (39.670)	-149.24 ^a (34.330)	-144.82 ^a (37.750)	-68.261 (41.544)	-67.541 (44.495)	-93.993 ^b (29.261)	-95.995 ^b (32.380)
Overall R-square / Ogólny R-kwadrat	42%	43%	27%	28%	33%	33%	38%	39%
Number of observations / Liczba obserwacji	112	112	112	112	112	112	112	112

– does not apply / nie dotyczy

* models with control variables included / modele uwzględniające zmienne kontrolne

Standard errors in parentheses, ^a $p < 0.01$, ^b $p < 0.05$, ^c $p < 0.1$ /

Błędy standardowe w nawiasach, ^a $p < 0.01$, ^b $p < 0.05$, ^c $p < 0.1$

Source: authors' own calculations based on data from IMGW PIB (n.d.), GUS (n.d.), and Fotyma (2011).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW PIB (b.d.), GUS-u (b.d.) oraz Fotyma (2011).

Mean temperature from March to September proved statistically significant in all models analyzed. The positive regression coefficient on the variable $V1$ indicates that yields increase with an increase in mean temperature. In the case of total cereals, an increase of 1 degree in average temperature translated into an increase in yield of approximately 22 dt/ha. As far as individual cereals are concerned, the effect of the temperature increase was by far the strongest for wheat—the marginal effect is about twice that for rye. On the other hand, the negative coefficient at variable $V2$ indicates that the relationship between average temperature and yield is not a simple linear relationship, but rather takes on the character of a parabola with the arms pointing downwards. It can be therefore concluded that initially yields increase as

Średnia temperatura od marca do września okazała się istotna statystycznie we wszystkich analizowanych modelach. Dodatni współczynnik regresji przy zmiennej $V1$ wskazuje, że wraz ze wzrostem średniej temperatury plony również rosną. W przypadku zbóż ogółem wzrost średniej temperatury o jeden stopień przekładał się na wzrost plonu o ok. 22 dt/ha. Jeśli chodzi o poszczególne zboża, to efekt wzrostu temperatury był zdecydowanie najsilniejszy w przypadku pszenicy – efekt marginalny jest około dwukrotnie wyższy niż w przypadku żyta. Ujemny współczynnik przy zmiennej $V2$ wskazuje natomiast, że relacja między średnią temperaturą a plonem nie jest prostą zależnością liniową, a raczej przyjmuje charakter paraboli z ramionami skierowanymi w dół. Można zatem stwierdzić, że początkowo plony rosną

average temperature increases, but that excessively high temperatures are associated with a decrease in yields. In other words, higher average yields are associated with moderately high temperatures. Both temperatures significantly lower than the panel mean and significantly higher are associated with lower yields. As with variable *V1*, the regression coefficient (in absolute value) for variable *V2* is by far the highest for wheat. The results obtained correspond with the previously cited work of Raimondo et al. (2021), who showed that an increase in average temperature can lead to an increase in wheat yields in countries with previously cooler climates. Polish cereal producers (especially wheat) may be the beneficiaries of the temperature increase trend, as long as the increase is not excessive.

Interesting results were obtained when analyzing the effect of rainfall on cereal yields. In all models, the number of rainy days (which is a proxy for the rainfall distribution) affected cereal yields in a positive and statistically significant way. For total cereals, wheat, and barley, the marginal effect was 0.15–0.16, which meant that as the number of rainy days increased by 10, yields increased on average by 1.5–1.6 dt/ha. This effect was slightly weaker for rye (approximately 0.11). At the same time, increased rainfall between March and September negatively influenced yields in all models, and only for barley was this effect statistically insignificant. As for the square of the amount of rain between March and September, results were obtained at the edge of statistical significance for total cereals and for wheat and rye (only models with a control variable). The main conclusion that can be drawn, however, is that although the amount of rainfall is important for yield, simply increasing the average amount of rainfall does not translate into an increase in yield, but actually results in a decrease. The key is that rain should fall more frequently, but in smaller single amounts (which improves the potential for soaking), and thus that the total amount of rainfall should not increase, but that the distribution of rainfall should even out throughout the growing season. The results obtained therefore confirm the conclusions of earlier studies (Olesen et al., 2007; Rosenzweig et al., 2007).

In order to assess the robustness of the estimated models, two control variables were also introduced into the modelling, controlling for average soil quality, and the level of fertilization, which is one of the main determinants of the agrotechnology used. However, the influence of these variables did not prove statistically significant. This may be due to the degree of aggregation adopted in the article (provincial level). Studies at the farm level based on

wraz ze wzrostem średniej temperatury, ale zbyt wysokie temperatury wiążą się ze spadkiem plonów. Innymi słowy, wyższe średnie plony związane są z umiarkowanie dużymi temperaturami. Zarówno temperatury znacznie niższe niż średnia dla panelu, jak i znacznie wyższe, wiążą się z mniejszymi plonami. Podobnie jak w przypadku zmiennej *V1*, tak też w przypadku zmiennej *V2* współczynnik regresji (w wartości bezwzględnej) jest zdecydowanie najwyższy w przypadku pszenicy. Otrzymane wyniki korespondują z cytowaną wcześniej pracą Raimondo i in. (2021), według których wzrost średniej temperatury może doprowadzić do zwiększenia plonów pszenicy w krajach o dotychczas chłodniejszym klimacie. Polscy producenci zbóż (w tym szczególnie pszenicy) mogą być beneficjentami trendu wzrostu temperatury, o ile wzrost ten nie będzie nadmierny.

Interesujące wyniki otrzymano w przypadku analizy wpływu opadów na plony zbóż. We wszystkich modelach liczba dni deszczowych (stanowiąca przybliżenie dla rozkładu opadów) w dodatni i istotny statystycznie sposób wpływała na plony zbóż. Dla zbóż ogółem, pszenicy i jęczmienia efekt marginalny wynosił 0,15–0,16, co oznaczało, że wraz ze wzrostem liczby dni deszczowych o 10 plony wzrastały średnio o 1,5–1,6 dt/ha. Efekt ten był nieco słabszy w przypadku żyta (ok. 0,11). Jednocześnie zwiększona suma opadów między marcem a wrześniem ujemnie wpływała na plony we wszystkich modelach, a jedynie w przypadku jęczmienia efekt ten był nieistotny statystycznie. Jeśli chodzi o kwadrat ilości deszczu od marca do września, to otrzymano wyniki na granicy istotności statystycznej w przypadku zbóż ogółem oraz w przypadku pszenicy i żyta (tylko modele ze zmienną kontrolną). Głównym wnioskiem jest jednak to, że chociaż ilość opadów ma znaczenie dla wielkości plonów, to samo zwiększenie średniej ilości opadów nie przekłada się na wzrost plonów, a wręcz skutkuje ich spadkiem. Kluczowe jest, żeby deszcz padał częściej, ale w mniejszych jednorazowych ilościach (co poprawia możliwości wsiąkania) i tym samym, żeby nie wzrastała łączna ilość opadów, tylko żeby wyrównywał się ich rozkład w całym okresie wegetacyjnym. Otrzymane wyniki potwierdzają zatem wnioski z wcześniejszych badań (Olesen i in., 2007; Rosenzweig i in., 2007).

W celu oceny odporności estymowanych modeli do badania wprowadzono też dwie zmienne kontrolujące przeciętną jakość gleb oraz poziom nawożenia będący jednym z głównych wyznaczników stosowanej agrotechniki. Wpływ tych zmiennych nie okazał się jednak istotny statystycznie. Może to wynikać z przyjętego w artykule stopnia agregacji (poziom województwa). Badania na poziomie gospodarstwa

a production function usually indicate the important role of the fertilization level for production output (Lu et al., 2018).

Conclusions

In this study, yield levels of major cereals in 14 provinces from 2013 to 2020 were estimated using panel regression models. The analyses carried out proved the significant influence of weather variables on yield formation, also against control variables. For all estimated models, the variable number of days with precipitation proved to be statistically significant. While regularly occurring, moderate rainfall is undoubtedly favorable, too much rainfall can adversely affect yields. Another of the statistically significant climatic factors is temperature in spring and summer, with moderately high temperatures being the most favorable for yields. Overall, it can therefore be concluded that moderate is the safest situation for climatic factors in Poland. Through the analysis, it was also noted that an increase in temperature had a varying intensity effect on yield changes for individual cereals, with a much stronger effect for wheat (compared to rye and barley).

Among the main limitations of the study is the level of analysis carried out (provinces). On the one hand, it makes it possible to carry out analyses with a wide spatial and temporal range, but on the other, it makes it difficult to assess the influence of certain other factors, e.g., those related to the agrotechnology used. Another limitation may be the use of average temperatures, which do not fully capture phenomena such as locally occurring frosts. Analogous studies at the level of farms or lower-level administrative units may provide an interesting direction for further research.

Due to the significant impact of climatic factors on crop yields and unavoidable climate changes in the future, Polish agriculture will have to adapt to new conditions by taking a number of measures, e.g., changing the structure of crops (including new plant species better adapted to the changed climate, increasing the sowing of well-adapted ones, limiting or eliminating the less well-adapted ones), protecting plant irrigation against possible droughts by using efficient, modern irrigation systems, increasing genetic diversity of plants, as well as using modern technologies. The improvement of small-scale retention in Poland, which is related to the previously used method of draining both agricultural land, pastures and meadows, also seems to be crucial. The modern environment transformed by man is characterized by a much shorter rainwater cycle. The above-mentioned measures should become the subject of broader support in the cycle of successive agricultural policy reforms.

oparte o funkcję produkcji zazwyczaj wskazują na istotną rolę poziomu nawożenia dla wyników produkcyjnych (Lu i in., 2018).

Podsumowanie

W niniejszym badaniu estymowano poziomy plonów głównych zbóż w 14 województwach w latach 2013–2020 za pomocą modeli regresji panelowej. Przeprowadzone analizy dowiodły istotnego wpływu zmiennych pogodowych dla kształtowania się plonów, także na tle zmiennych kontrolnych. Dla wszystkich estymowanych modeli zmienna liczba dni z opadem okazała się istotna statystycznie. O ile regularne pojawiające się umiarkowane opady są niewątpliwie sprzyjające, tak zbyt duże ich ilości mogą niekorzystnie wpływać na plony. Kolejnym z istotnych statystycznie czynników klimatycznych jest temperatura w okresie wiosenno-letnim, przy czym najkorzystniejsze dla plonów są umiarkowane wysokie temperatury. Ogólnie można zatem stwierdzić, że w przypadku czynników klimatycznych w Polsce najbezpieczniejsza jest sytuacja umiarkowana. Dzięki przeprowadzonej analizie zauważono też, że wzrost temperatury z różną intensywnością oddziaływał na zmiany plonów poszczególnych zbóż, przy czym znacznie silniejszy efekt odnotowano w przypadku pszenicy (w porównaniu z żytem i jęczmieniem).

Wśród głównych ograniczeń badania wymienić można poziom prowadzonej analizy (układ wojewódzki). Z jednej strony pozwala on dokonać analiz o szerokim zakresie przestrzennym i czasowym, z drugiej zaś utrudnia ocenę wpływu niektórych czynników, np. związanych ze stosowaną agrotechniką. Innym ograniczeniem może być wykorzystanie średnich temperatur, które nie pozwalają w pełni uchwycić takich zjawisk jak lokalnie występujące przymrozki. Analogiczne badania na poziomie gospodarstw rolnych lub jednostek administracyjnych niższego szczebla mogą stanowić interesujący kierunek dla dalszych badań.

W związku ze znaczącym wpływem czynników klimatycznych na plonowanie i nieuniknionymi zmianami klimatu w przyszłości polskie rolnictwo powinno przygotować się do nowych warunków poprzez podjęcie szeregu działań, m.in. zmianę struktury upraw (włączenie nowych gatunków roślin lepiej przystosowanych do zmienionego klimatu, zwiększenie zasiewu tych dobrze przystosowanych, ograniczenie lub eliminacja gorzej przystosowanych), zabezpieczenie nawodnienia roślin przed możliwymi suszami poprzez stosowanie wydajnych, nowoczesnych systemów nawadniania, zwiększenie różnicowania genetycznego roślin, a także wykorzystanie

nowoczesnej agrotechniki. Kluczowa również wydaje się poprawa małej retencji na obszarach Polski, która związana jest z wcześniej stosowaną metodą drenażu zarówno gruntów rolnych, pastwisk, jak i łąk. Współczesne środowisko przekształcone przez człowieka cechuje się znacznie krótszym cyklem obiegu wód opadowych. Wymienione działania powinny stać się przedmiotem szerszego wsparcia w cyklu kolejnych reform polityki rolnej.

References/Bibliografia

- Doroszewski, A., Józwicki, T., Wróblewska, E., & Kozyra, J. (2014). *Susza rolnicza w Polsce w latach 1961–2010*. IUNG PIB. <http://www.iung.pulawy.pl/images/wyd/Susza%20rolnicza%20w%20Polsce.pdf>
- Fotyma, M. (2011). Wskaźniki chemicznej żyzności gleby. *Nawozy i Nawożenie*, 45, 79–128.
- Główny Urząd Statystyczny [GUS]. (n.d.) Bank Danych Lokalnych. Retrieved May 19, 2023, from <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/start>
- Gołaś, Z. (2010). Wydajność i dochodowość pracy w rolnictwie w świetle rachunków ekonomicznych dla rolnictwa. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 324(3), 19–42. <http://www.zer.waw.pl/WY-DAJNOSC-I-DOCHODOWOSC-PRACY-W-ROLNICTWIE-W-SWIETLE-RACHUNKOW-EKONOMICZNYCH-DLA.83389.0.1.html>
- Górski, T., Kozyra, J., & Doroszewski, A. (2008). Field Crop Losses in Poland Due to Extreme Weather Conditions – Case Studies. In: S. Liszewski (Ed.), *The Influence of Extreme Phenomena on the Natural Environment and Human Living Conditions* (pp. 35–49). Łódzkie Towarzystwo Naukowe.
- Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy [IMGW PIB]. (n.d.) Dane meteorologiczne. Retrieved May 19, 2023, from https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/dane_meteorologiczne/miesieczne/klimat/
- Jeločnik, M., Zubović, J., & Zdravković, A. (2019). Estimating Impact of Weather Factors on Wheat Yields by Using Panel Model Approach—The Case of Serbia. *Agricultural Water Management*, 221, 493–501. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.015>
- Jędrzejkowski, J. (2022, April 27). *Nowe technologie coraz odważniej wkraczają do rolnictwa*. Rzeczpospolita. <https://www.rp.pl/perspektywy-dla-polski/art36169061-nowotechnologie-coraz-odwazniej-wkraczaja-do-rolnictwa>
- Karaczun, Z. M. (2020). Polskie rolnictwo wobec skutków zmiany klimatu. In: R. Borek, A. Furdyna, A. Makowska, J. Perzyna, M. Staniszevska, & J. Zwolińska (Eds.), *Ekspertyza: Woda w rolnictwie* (pp. 12–15). Koalicja Żywa Ziemia. Polski Klub Ekologiczny Koło Miejskie w Gliwicach. https://koalicjazywaziemia.pl/wp-content/uploads/2020/11/Ekspertyza_Woda-w-rolnictwie.pdf
- Kołodziej, J., & Kulig, B. (2005). Wpływ pogody na kształtowanie się plonu i wybranych cech owsa. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 235, 269–280.
- Komisja Europejska. (2020a). Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Strategia „Od pola do stołu” na rzecz sprawiedliwego, zdrowego i przyjaznego dla środowiska systemu żywnościowego. COM(2020) 381 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0381>
- Komisja Europejska. (2020b). Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Unijna strategia na rzecz bioróżnorodności 2030. Przywracanie przyrody do naszego życia. COM(2020) 380 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:52020DC0380>
- Kundzewicz, Z.W., & Kozyra, J. (2011). Ograniczanie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. *Polish Journal of Agronomy*, 7, 68–81. http://www.iung.pulawy.pl/PJA/wydane/7/PJA7_7.pdf
- Lu, H., Xie, H., He, Y., Wu, Z., & Zhang, X. (2018). Assessing the Impacts of Land Fragmentation and Plot Size on Yields and Costs: A Translog Production Model and Cost Function Approach. *Agricultural Systems*, 161, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.001>
- Olesen, J.E., Carter, T.R., Diaz-Ambrona, C.H., Fronzek, S., Heidmann, T., Hickler, T., Holt, T., Miguez, M.I., Morale, P., Palutikof, J.P., Quemada, M., Ruiz-Ramos, M., Rubaek, G.H., Sau, F., Smith, B., & Sykes, M.T. (2007). Uncertainties in Projected Impacts of Climate Change on European Agriculture and Terrestrial Ecosystems Based on Scenarios from Regional Climate Models. *Climatic Change*, 81, 123–143. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9216-1>
- Pirttioja, N., Carter, T. R., Frozek, S., Bindi, M., Hoffmann, H., Palosuo, T., Ruiz-Ramos, M., Tao, F., Trnka, M., Acutis, M., Asseng, S., Baranowski, P., Basso, B., Bodin, P., Buis, S., Cammarano, D., Deligios, P., Destain, M-F., Dumont, B., ..., Rötter, R.P. (2015). Temperature and Precipitation Effects on Wheat Yield Across a European Transect: A Crop Model Ensemble Analysis Using Impact Response Surfaces. *Climate Research*, 65, 87–105. <https://doi.org/10.3354/cr01322>
- Radzka, E., Rymuza, K., & Lenartowicz, T. (2015). Precipitation Impact on Yields of Medium-Early Cultivars of Edible Potato in Various Regions of Poland. *Acta Agrophysica*, 22(4), 421–432. <http://www.acta-agrophysica.org/Precipitation-impact-on-yields-of-medium-early-cultivars-of-edible-potato-in-various.104971.0.2.html>
- Raimondo, M., Nazzaro, C., Marotta, G., & Caracciolo, F. (2021). Land Degradation and Climate Change: Global Impact on Wheat Yields. *Land Degradation & Development*, 32(1), 387–398. <https://doi.org/10.1002/ldr.3699>
- Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D.J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., Root, T.L., Seguin, B., & Tryjanowski, P. (2007). Assessment of Observed Changes and Responses in Natural and Managed Systems. In: M.L. Parry et al. (Eds.), *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 79–131). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.5167/uzh-33180>

Skowera, B., & Kolodziej, J. (2003). Wpływ czynników termiczno-opadowych na plonowanie owsa w Kotlinie Orawsko-Nowotarskiej. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 229, 185–192.

WWF Polska. (2020). *Zeroemisyjna Polska 2050*. <https://www.wwf.pl/ZeroemisyjnaPolska>

Submission date / Data nadesłania: 16.08.2023.

Final revision date / Data ostatniej recenzji: 13.10.2023.

Acceptance date / Data akceptacji: 18.04.2024.

© 2024 Paluszkiewicz, M., Torzyński, M., Bielecki, J., Abdullaieva, S. & Kryszak, Ł. This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Autorskie prawa osobiste: Paluszkiewicz, M., Torzyński, M., Bielecki, J., Abdullaieva, S. i Kryszak, Ł. (2024).

Niniejszy artykuł został opublikowany w otwartym dostępie na licencji Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

