

# Wpływ mączniaka prawdziwego zbóż i traw na uprawy pszenicy w kontekście zmian klimatu

The impact of powdery mildew on cereals and grasses on wheat crops in the context of climate change

Aleksandra Pietrusińska-Radzio , Monika Żurek 

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin - Państwowy Instytut Badawczy

✉ a.pietrusinska@ihar.edu.pl

Pszenica (*Triticum aestivum* L.) to jedno z kluczowych zbóż na świecie. Z powodu ogromnej roli pszenicy w światowym systemie żywnościowym, zmiany w wolumenie jej produkcji, jakości oraz dostępności mogą mieć znaczący wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe na świecie. Wysokość globalnej produkcji i jakość plonów pszenicy jest silnie uzależniona od zmian klimatu, których efektem jest spadek areałów upraw zbóż i dostępności wody pitnej przy jednoczesnym spadku opłacalności produkcji rolniczej. Obserwowany wzrost temperatury i wilgotności powietrza wpływa na występowanie i rozwój w zasiewach pszenicy mączniaka prawdziwego zbóż i traw (*Blumeria graminis* f.sp. *tritici*). Choroba ta, występuje każdego roku, w różnym nasileniu, powodując straty w plonach sięgające 20-40%. Ze zmianami klimatu związana jest migracja mączniaka prawdziwego zbóż i traw w kierunku północnym, w strefę klimatu chłodniejszego i wilgotniejszego. W przeciwdziałaniu niekorzystnym zmianom klimatu na produkcję rolniczą ważną rolę odgrywa modelowanie matematyczne, które staje się kluczowym narzędziem stosowanym do prognozowania stabilnej produkcji roślinnej. Ponadto, ważnym kierunkiem badań obejmujących przeciwdziałanie negatywnym skutkom zmian klimatu na produkcję roślinną jest zrównoważone wykorzystanie zasobów genowych. Poszerzenie bazy genetycznej w dobie zmieniającego się klimatu jest istotnym aspektem dzisiejszej hodowli odpornościowej. W niniejszej publikacji przedstawiono doniesienia dotyczące wpływu zmian klimatu na mączniaka prawdziwego zbóż i traw, prognozowanie zagrożeń przy wykorzystaniu modeli matematycznych, jak również podkreślono znaczenie zasobów genetycznych w przeciwdziałaniu negatywnym skutkom zmian klimatu.

**Słowa kluczowe:** *Blumeria graminis*, mączniak prawdziwy zbóż i traw, modelowanie matematyczne, zasoby genetyczne, zmiany klimatu

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important cereal in the world. Because of wheat's substantial role in the global food system, changes in its production volume, quality and availability could have a significant impact on global food security. The amount of global wheat production and the quality of wheat yields are strongly influenced by climate change, which has resulted in a decrease in grain acreage and availability of potable water, with a concomitant decrease in the profitability of agricultural production. The observed increase in temperature and air humidity affects the occurrence and development in wheat crops of powdery mildew of cereals and grasses (*Blumeria graminis* f.sp. *tritici*). This disease, occurs every year, in varying degrees of severity, causing yield losses of up to 20-40%. The migration of powdery mildew of cereals and grasses northward, into a cooler and wetter climate zone is also associated with climate change. In counteracting adverse climate change on agricultural production, mathematical modeling plays an important role, becoming a key tool used to forecast stable crop production. In addition, an important direction of research involving countering the negative effects of climate change on crop production is the sustainable use of genetic resources. Expanding the genetic base in the era of a changing climate is an important aspect of today's resistance breeding. This publication presents reports on the impact of climate change on powdery mildew of cereals and grasses, forecasting risks using mathematical models, as well as highlighting the importance of plant genetic resources in countering the negative effects of climate change.

**Key words:** *Blumeria graminis*, climate change, genetic resources, mathematical modelling, powdery mildew cereal and grass

## Wstęp

Zmiany klimatu odgrywają istotny wpływ na środowisko naturalne, społeczeństwo oraz gospodarkę. Globalne ocieplenie obejmuje wzrost średniej temperatury, poziomu dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) w atmosferze, zmiany w opadach i wiele innych zjawisk, które mają potencjalnie poważne konsekwencje na zachowanie bezpieczeństwa żywnościowego.

Ilość dwutlenku węgla w atmosferze wzrosła o 80% w porównaniu z okresem, w którym życie rozpoczęło się na Ziemi. Za główną przyczynę tego wzrostu uznawana jest działalność człowieka.

Nagromadzenie dwutlenku węgla, przyczynia się do wzmocnienia efektu cieplarnianego (Elahi i in., 2022). Obecnie, podejmowane są działania mające na celu ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i dostosowanie się do zmian klimatu. Porozumienia międzynarodowe, są ważnymi krokami w tej dziedzinie.

Pszenica zwyczajna (*Triticum aestivum* L.) jest jedną z najważniejszych roślin uprawnych na świecie. Wraz z kukurydzą (*Zea mays* L.) i ryżem (*Oryza* L.) pokrywa 30% zapotrzebowania kalorycznego 4,5 miliarda ludzi w 100 krajach rozwijających się. Ocena wpływu zmian klimatu na produkcję pszenicy ma kluczowe znaczenie dla utrzy-

mania globalnego łańcucha bezpieczeństwa żywnościowego na świecie (Farooq i in., 2023). Prognozy wskazują, że zmiany klimatyczne będą wywierały negatywny wpływ na produkcję pszenicy do roku 2050, z przewidywanym spadkiem w zakresie od 29% do 34% (Hellin i in., 2012). Inne badania sugerują, że skutki zmian klimatu mogą zmniejszyć produkcję pszenicy nawet o 50% do 2050 roku w Europie Południowej. Ponadto, znaczny spadek w produkcji tego zboża związany z negatywnymi skutkami zmian klimatycznych prawdopodobnie zbiegnie się w czasie ze znacznym wzrostem popytu na to zboże wynikającym ze wzrostu światowej populacji (Savary i in., 2011). Według badań Vollset i in. (2020) liczba ludności na świecie osiągnie szczyt około 2060 roku i wyniesie około 9,7 miliarda (Vollset i in., 2020).

Globalne ocieplenie w połączeniu ze wzrostem liczby ludności na świecie zmniejszy ilość wody dostępnej do wykorzystania w rolnictwie (Cammarano i in., 2016). W tym scenariuszu wpływ zmian klimatu na światową produkcję roślinną może stanowić dodatkowe zagrożenie dla bezpieczeństwa żywnościowego, związane z występowaniem niekorzystnych warunków temperaturowych i opadowych oraz wzrostem częstotliwości występowania ekstremalnych zdarzeń pogodowych tj.: upały, susze, powodzie, burze itp. (Rosenzweig i in., 2011).

### Czynniki abiotyczne i biotyczne

Zmiany klimatu wywierają negatywny wpływ na produkcję i jakość żywności głównie poprzez zwiększoną częstotliwość występowania stresów abiotycznych (wahania temperatur, długotrwałe susze w okresie wegetacji roślin, ulewne deszcze, podtopienia) oraz biotycznych (większa liczba nowych, bardziej agresywnych ras patogenów, migracja chorób grzybowych).

Największe straty w plonach występują na obszarach zagrożonych deficytem wody i na obszarach dotkniętych występowaniem nowych ras patogenów. Pojawienie się nowych ras patogenów związane jest między innymi z migracją patogenów grzybowych w kierunkach regionów chłodniejszych i wilgotnych (Kocmánková i in., 2009). Rozprzestrzenianie się zarodników grzybów na dalsze odległości w poszukiwaniu żywiciela jest jedną z przewidywanych konsekwencji zmian klimatu. Jest to związane z emisją dwutlenku węgla do atmosfery, która stymuluje produkcję biomasy przez roślinę żywicielską, na której zimują i namnażają się i tworzą zarodniki (Caubel i in., 2012). Nowe rasy patogenów mogą pojawiać się na nowych obszarach upraw, na których do tej pory nie występowały (Wheeler i Braun, 2013). Ponadto, ekstremalne zjawiska pogodowe mogą wywoływać epidemie patogenów (Xiao i in., 2022).

Szacunkowe dane dla 5 głównych upraw na świecie przedstawiają straty plonów związane ze patogenami występującymi na uprawach pszenicy, ryżu, kukurydzy, ziemniakach i soi. Spadek plonów waha się od 17% do 23% (pszenica 21,5%) dla wszystkich upraw, z wyjątkiem ryżu, dla którego straty oszacowano nawet na 30%. Zmiany klimatyczne w północno-zachodniej Europie będą miały negatywny wpływ na uprawę zbóż, a ciepła i sucha pogoda w okresie wegetacji roślin znacznie zmniejszy plony pszenicy w tym regionie (Miedaner i Juroszek, 2021).

### Potencjalny wpływ zmian klimatu na mączniaka prawdziwego zbóż i traw

Mączniaka prawdziwego zbóż i traw powoduje grzyb *Blumeria graminis* (DC) Speer (syn. *Erysiphe graminis* DC). Jest to choroba o dużym znaczeniu gospodarczym. Straty powodują znaczną utratę plonów na wielu obszarach uprawy pszenicy o wilgotnym oraz kontynentalnym klimacie (Griffey i in., 1993). Choroba ta, jest szczególnie rozpowszechniona na obszarach o wysokiej wilgotności powietrza i wysokich opadach deszczu, typowych dla klimatu morskiego i kontynentalnego (Bennett, 1984). Mączniak prawdziwy zbóż i traw występuje na obszarach uprawy pszenicy w całej Europie. Wilgotność powietrza w zakresie od 50% do 100% podczas opadów deszczu lub utrzymującej się rosy, odpowiednie nasłonecznienie i szeroki zakres temperatur zapewniają optymalne warunki do rozwoju grzyba od kiełkowania zarodników do tworzenia kolejnego pokolenia konidiów. Uprawy pszenicy ozimej zaatakowane wczesną wiosną przez patogen wykazują słabiej rozwinięte pędy i system korzeniowy, co skutkuje zmniejszeniem plonów (Simeone i in., 2020).

Suche i ciepłe lata ograniczać mogą rozwój mączniaka prawdziwego zbóż i traw, spowalniając lub całkowicie zahamowując rozprzestrzenianie się wektorów infekcyjnych w okresie wegetacji roślin uprawnych. Z drugiej strony, łagodne i wilgotne zimy sprzyjają optymalnemu rozwojowi różnych patogenów grzybowych na wiosnę (Juroszek i Tiedemann, 2013).

Globalne ocieplenie i przedłużające się susze w okresie wegetacji roślin w południowej Europie mogą spowodować znaczne ograniczenie występowania mączniaka prawdziwego zbóż i traw w uprawach pszenicy. Przewiduje się, że w zmieniającym się klimacie patogeny grzybowe, mogą być bardziej aktywne (agresywne) ze względu na presję selekcyjną, co z kolei może przyczynić się do zwiększenia zasięgu geograficznego występowania patogenów. W warunkach szczególnie sprzyjających rozwojowi *B. graminis*, redukcja plonu ziarna pszenicy jarej i ozimej może sięgać od 13% do 30% (Lackermann i in., 2011).

Matic i współpracownicy (2018) przeprowadzili, w warunkach kontrolowanych, badania doty-

często określenia potencjalnego wpływu różnych temperatur powietrza i poziomów CO<sub>2</sub> na patogenność mączniaka prawdziwego zbóż i traw oraz parametry fizjologiczne: zawartość chlorofilu i węglowodanów. Stwierdzono, że zarówno poziom CO<sub>2</sub>, jak i temperatura, a także ich interakcja znacząco wpływały na rozwój mączniaka prawdziwego zbóż i traw u badanych gatunków roślin uprawnych. Optymalne warunki dla rozwoju grzyba, czyli niska temperatura i niskie stężenie CO<sub>2</sub> (450 ppm CO<sub>2</sub> + 18°C do 22°C), wystąpiły w pierwszym układzie doświadczalnym. Wysokie temperatury, niezależnie od stężenia CO<sub>2</sub> hamowały rozwój tego patogena, natomiast wysokie stężenie CO<sub>2</sub> nie wpływało negatywnie na zdrowotność badanych roślin. Uzyskane wyniki potwierdzają wnioski dotyczące optymalnych warunków do infekcji grzybiczej *B. graminis* w zakresie od 12°C do 20°C i wilgotności od 50% do 100%. Dlatego przyszłe scenariusze globalnego ocieplenia przewidują ograniczenie rozwoju mączniaka prawdziwego zbóż i traw na pszenicy w basenie Morza Śródziemnego, pod warunkiem, że patogen nie dostosuje się do wyższych temperatur (Matić i in., 2018).

Ekstremalne warunki środowiskowe w okresie wegetacji, takie jak susza i upały, przyczyniają się do migracji patogena w kierunku północnym. W związku z tym przypuszcza się, że mączniak prawdziwy zbóż i traw w uprawach pszenicy może występować tylko lokalnie lub zanikać w Europie. Z kolei w Chinach mączniak prawdziwy zbóż i traw będzie stanowił prawdopodobnie jeszcze większe zagrożenie dla produkcji pszenicy ozimej niż obecnie (Tang i in., 2017). Patogen *B. graminis* f.sp. *tritici* jest istotnym ekonomicznie czynnikiem limitującym produkcję pszenicy w Chinach, a w warunkach sprzyjających rozwojowi patogena dochodzi do epidemii choroby (Zou i in., 2018). Przeprowadzone przez Zou i współpracowników (2018) badania obejmowały analizę korelacji między czynnikami meteorologicznymi a występowaniem choroby grzybowej. Ustalono, że temperatura 26,2°C była kluczowym czynnikiem meteorologicznym wpływającym na występowanie mączniaka prawdziwego zbóż i traw w regionach górskich oraz wysokogórskich. Model 26,2°C posłużył do wygenerowania map regionalizacji mączniaka prawdziwego zbóż i traw w Chinach (Zou i in., 2018).

### Prognozowanie zmian klimatu a produkcja pszenicy/plony pszenicy

Prognozowanie wpływu zmian klimatu na produkcję pszenicy w oparciu o różne parametry meteorologiczne tj.: temperatura, opady, uwilgotnienie gleby, dostępność CO<sub>2</sub> może stanowić dogodne narzędzie w racjonalnym planowaniu upraw od skali lokalnej do globalnej (Chenu i in., 2017). Warto zdawać sobie sprawę, że przewidywanie,

jak zmiany klimatu wpłyną na produkcję roślin uprawnych na całym świecie, jest zadaniem trudnym. Wynika to głównie z tego, że symulacje uwzględniają wiele zmiennych, takich jak właściwości gleby, specyfika lokalnego klimatu, sposób użytkowania ziemi oraz dostępność wody, w tym możliwość sztucznego nawadniania (Faber i in., 2019).

Produkcja pszenicy jest szczególnie zagrożona przez globalne ocieplenie w regionach, w których na przełomie kilku lat zaobserwowano wzrost temperatury powietrza, przy jednoczesnym obniżeniu sumy opadów. Taką sytuację zaobserwowano w północno-zachodnich Indiach. Badania nad wpływem zmian klimatu na plony pszenicy i ryżu przeprowadzone zostały przez zespół naukowców pod kierunkiem Lal'a (Lal i in., 1998). Jako materiał badawczy wykorzystano odmiany dobrze przystosowane do uprawy w tym regionie. Model CERES (ang. *Crop Environment Resource Synthesis*) dla pszenicy i ryżu pozwolił na efektywną symulację wpływu zmian klimatycznych na te uprawy w północno-zachodnich Indiach. Eksperyment polegał na zbadaniu wpływu CO<sub>2</sub> na plonowanie roślin przy różnych wartościach temperatury powietrza w połączeniu z niedoborem i nadmiarem wody. Badania symulacyjne koncentrujące się na warunkach klimatycznych w północno-zachodnich Indiach potwierdziły pozytywny wpływ na plon podwojenia stężenia CO<sub>2</sub>, zarówno dla pszenicy, jak i ryżu, odpowiednio o 28% i 15%. Jednak wzrost temperatury o 3°C przy podwyższonym poziomie CO<sub>2</sub> miał negatywny wpływ na uprawę pszenicy i ryżu, dając odpowiednio niższe plony dla obydwu zbóż (Lal i in., 1998). Wzrost temperatury powietrza negatywnie wpłynął na uprawę zarówno pszenicy, jak i ryżu w tym regionie. Ponadto umiarkowany niedobór wody w połączeniu ze stresem termicznym miał lepszy wpływ na plony pszenicy, nawet przy podwojonym poziomie CO<sub>2</sub>. Połączona symulacja z podwojonym efektem CO<sub>2</sub>, stresem termicznym i odpowiednim nawodnieniem skutkowałą wzrostem plonów pszenicy o 21%, a ryżu o 4% (Lal i in., 1998).

Efektywność wykorzystania wody w rolnictwie jest niezwykle ważnym aspektem w różnego rodzaju symulacjach/prognozach statystycznych. Cammarano i in. (2016) wykorzystali 16 modeli uprawy pszenicy uwzględniających wykorzystanie wody w warunkach podwyższonej temperatury i zwiększonego stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze. Na podstawie przeprowadzonych symulacji udowodniono, że efektywność wykorzystania wody w uprawach będzie spadać wraz ze wzrostem temperatury powietrza i krótszym okresem wegetacji (Cammarano i in., 2016).

Ze względu na malejącą dostępność słodkiej wody, zwłaszcza w regionach suchych i półsuchych, rośnie zainteresowanie nawadnianiem wo-

dą o marginalnej jakości (np. słoną lub słonawą). Wiedza na temat reakcji plonów oraz wydajności wody (WP) i wydajności wody do nawadniania (IWP) na nawadnianie słoną wodą jest kluczowa dla optymalnego zarządzania i długoterminowej produktywności. Przeprowadzono globalną metaanalizę 1151 porównań z 120 publikacji, analizując wpływ nawadniania słoną wodą na plony, WP i IWP. Nawadnianie słoną wodą zmniejszyło plony o 17,3%, WP o 12,4% i IWP o 10,8% w porównaniu z nawadnianiem słodką wodą. Nawadnianie wodą słoną powodowało większe zmniejszenie plonów, WP i IWP niż wodą słonawą. Bawełna radziła sobie najlepiej, następnie pszenica, kukurydza, pomidor i papryka. Zmniejszona gęstość gleby i zwiększone pH gleby poprawiały plony niezależnie od zasolenia wody. Rolnicy w regionach półwilgotnych i stosujący nawadnianie kropkowe mieli lepsze wyniki przy nawadnianiu słoną wodą. Wyniki te mogą pomóc w optymalizacji zarządzania nawadnianiem słoną wodą (Cheng i in., 2021).

Liu i współpracownicy (2019) przeprowadzili symulację wpływu wzrostu globalnej temperatury na uprawy pszenicy, badając wzrost o 1,5°C oraz 2,0°C. Modele obejmowały uprawy nawadniane i obszary o wysokich opadach deszczu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że globalna produkcja pszenicy wzrosła odpowiednio 2,3% do 7,0% przy wzroście temperatury o 1,5°C i 2,4% do 10,5% przy 2,0°C (Liu i in., 2019). Większość prognozowanego wzrostu globalnej produkcji pszenicy w scenariuszach 1,5°C i 2,0°C przypisuje się efektowi CO<sub>2</sub>, ale z różnicami regionalnymi (Liu i in., 2016).

Oczekuje się, że plony pszenicy wzrosną w chłodniejszych regionach klimatu umiarkowanego z wysokimi opadami deszczu, podczas gdy w przypadku upraw pszenicy w regionach klimatu umiarkowanego z wysoką temperaturą i stosunkowo niższymi opadami deszczu oraz obszarami nawadnianymi sztucznie, oczekuje się ich spadku. Przewidywany globalny wpływ ocieplenia poniżej 2°C na produkcję pszenicy jest nierównomierny i będzie miał wpływ na regionalne utrzymanie bezpieczeństwa żywnościowego na całym świecie (Liu i in., 2019). Liu i współpracownicy (2016) wykorzystali trzy niezależne modele dotyczące potencjalnego wpływu zmian temperatury na globalne zbiory pszenicy. Zastosowane symulacje dały podobne wyniki dotyczące wpływu temperatury na plony pszenicy w skali krajowej i lokalnej. Zmiany klimatyczne spowodują wzrost temperatury o 1°C i zmniejszenie globalnych plonów o 4,1% do 6,4%. Wartości te dotyczą wszystkich analizowanych regionów, z wyjątkiem chłodniejszych regionów Rosji, gdzie zmiany klimatu mogą pozytywnie wpłynąć na plony pszenicy, zakładając wyższą temperaturę podczas wegetacji roślin. Adaptacja do globalnego ocieplenia, wynikająca

z zastosowania innych terminów siewu lub odmian, jest alternatywą dla kompensacji negatywnego wpływu wzrostu temperatury na plony. Ponadto rosnący poziom CO<sub>2</sub> wraz z nadmiernym nawodnieniem i nawożeniem może mieć również pozytywny wpływ na łagodzenie negatywnych skutków globalnego ocieplenia (Liu i in., 2016).

Asseng i współpracownicy (2018) przeprowadzili symulację wpływu zmian klimatycznych na plony i zawartość białka w ziarnie pszenicy. Badanie obejmowało 32 modele, które analizowały wpływ globalnego ocieplenia na plon i jakość pszenicy, w tym całkowitą zawartość białka w ziarnie oraz możliwości przystosowania się do zmian klimatu. Wyniki wykazały, że dostosowanie się do zmian klimatu może poprawić plony, ale niekoniecznie zwiększa zawartość białka w ziarnie, co jest typowe dla upraw niskonakładowych na terenach z minimalnymi opadami (Asseng i in., 2018).

Badania przeprowadzone przez Fuhrer'a (2006) podkreślają znaczenie zmian klimatycznych dla produkcji pszenicy. Ich praca szczegółowo analizuje trendy i przyszłe scenariusze dotyczące letnich fal upałów i intensywnych opadów. Wykorzystując symulacje oparte na modelach klimatycznych, autorzy wskazują na możliwe skutki globalnego ocieplenia dla upraw pszenicy w Szwajcarii. Prognozy sugerują, że w okresie wegetacyjnym zmniejszy się częstotliwość dni deszczowych, co zwiększy ryzyko wystąpienia suszy. Taki scenariusz niesie za sobą ryzyko obniżenia jakości i ilości zbiorów rolniczych (Fuher, 2006).

Przeprowadzono symulacje wpływu zmian temperatury na produkcję pszenicy jarej i ozimej na obszarach nawadnianych i z obfitymi opadami deszczu. Łącznie przetestowano 30 różnych modeli, obejmujących uprawę pszenicy jarej i ozimej na obszarach o średnich temperaturach wzrostu od 15°C do 32°C. W przypadku środowisk charakteryzujących się ograniczonymi opadami deszczu i niskim nawożeniem azotem stwierdzono, że wzrost temperatury o 2°C miał pozytywny wpływ na plony pszenicy poprzez uniknięcie stresu wodnego i cieplnego po zakończeniu wegetacji roślin. W pozostałych regionach doświadczalnych globalne ocieplenie miało negatywny wpływ na wysokość plonu pszenicy, nawet przy odpowiedniej ilości wody i nawożeniu N. Według szacunków, każdy stopień wzrostu temperatury na świecie przyczynia się do obniżenia globalnej produkcji pszenicy o 6%, co odpowiada spadkowi plonów pszenicy o 42 tony na każdy stopień Celsjusza (Asseng i in., 2015).

Negatywny wpływ zmian klimatu na plony pszenicy zwyczajnej i twardej (*T. durum*) został potwierdzony dla klimatu śródziemnomorskiego. Korzystając z modeli upraw dla pszenicy twardej, opracowano platformę cyfrową GIS-DSSAT (ang.

*Geographic Information System-Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), która uwzględnia różne prognozy klimatyczne dla Włoch w odniesieniu do przestrzennego rozmieszczenia różnych typów gleb wraz z rozmieszczeniem upraw pszenicy. Wyniki wskazują, że zmiany klimatu mogą wpływać na uprawy pszenicy w zależności od regionu: negatywnie na południu i pozytywnie w północnych Włoszech. Większa wrażliwość odmian pszenicy zwyczajnej na suchą i gorącą pogodę może przyczynić się do wzrostu areалу upraw pszenicy twardej durum we Włoszech. Wyższe poziomy CO<sub>2</sub> w atmosferze mogą częściowo zrównoważyć negatywne skutki zmian klimatu i zwiększyć korzyści w regionach północnych. Ponadto, według modelowania wpływu zmian klimatu na uprawy pszenicy zwyczajnej, zaobserwowano korzystny wpływ na uprawy form ozimych w porównaniu do upraw formy jarych (Mereu i in., 2021).

Wiadomo, że wzrost temperatury wpływa na wzrost i plon roślin, a także na interakcje roślin-patogen(y) (Lione i in., 2015). Wzrost średniej sezonowej temperatury o 1°C powyżej 16°C niekorzystnie wpłynął na plon ziarna i słomy roślin pszenicy (Ju i in., 2010, Ottman i in., 2012).

### Zmiany klimatu a różnorodność genetyczna

Zasoby genetyczne roślin rozumiane jako materiał reprodukcyjny znajdujący się w obecnej uprawie wraz z prymitywnymi, starymi oraz lokalnymi odmianami, a także elitarnymi liniami hodowlanymi gromadzone są w bankach genów na całym świecie. Zasoby genetyczne stanowią cenny materiał, który może być potencjalnie wykorzystywany przez ludzi teraz i w przyszłości (Maxted i Kell, 2003).

Rola i znaczenie zasobów genetycznych w zapewnieniu bezpieczeństwa żywnościowego dla szybko rosnącej światowej populacji jest niezaprzeczalna. Unikalna i zróżnicowana pula genowa roślin zapewnia zmienność wewnątrzgatunkową, niezbędną w procesie hodowli w celu dostosowania nowych odmian do zmieniających się warunków środowiskowych. Jest to szczególnie ważne dla produkcji rolnej w dobie globalnego ocieplenia. W wyniku zmian klimatycznych i selekcji hodowlanej skoncentrowanej na wielkości plonów, nastąpiło zawężenie cennej puli genowej w roślinach uprawnych. Zawężanie puli genetycznej przyczyniło się do stopniowej i nieodwracalnej utraty różnorodności wewnątrz i międzygatunkowej oraz do wzrostu zróżnicowania pomiędzy populacjami poprzez ich fragmentację oraz ograniczony przepływ genów między populacjami. Zachowanie wysokiego poziomu zmienności genetycznej jest niezmiernie ważnym aspektem, decydującym o zachowaniu zdolności adaptacyjnych populacji w dobie zmieniającego się klimatu. Dla

tego też, na całym świecie rozpoczęto ochronę zasobów genetycznych i działania badawcze mające na celu monitorowanie i zachowanie różnorodności biologicznej (Balvanera i in., 2006).

Utrzymanie bezpieczeństwa żywnościowego zależy również od zachowania różnorodności gatunkowej polegającej na adaptacji do funkcjonowania w zmieniających się warunkach klimatycznych (Hoisington i in., 1999). Zdolność genotypu do prawidłowego funkcjonowania w zmieniającym się klimacie jest ograniczona, dlatego badania mające na celu opracowanie zestawu odmian rolniczych o różnych reakcjach na warunki pogodowe są niezwykle ważne. Obecnie w większości krajów europejskich obserwuje się spadek różnorodności uprawianej pszenicy. Jedynymi krajami, w których obserwuje się wzrost bioróżnorodności są Finlandia, Belgia i Francja. Słowacja wydaje się być efektywnym źródłem bioróżnorodności. Adaptacja badanych odmian do dwóch zestawów warunków pogodowych, takich jak promieniowanie słoneczne, opady deszczu i ciepła jesień i zima (1) oraz wysokie opady deszczu (2) jest pozytywną reakcją odmian i ich adaptacją do zmian klimatu. Jednak cechy odmian przystosowanych do różnych warunków, tj. długość dnia, warunki morskie w porównaniu z kontynentalnymi oraz długość okresu wegetacji, są czynnikiem ograniczającym ich wykorzystanie w całej Europie (Hoisington i in., 1999).

W oparciu o dostępną literaturę naukową można stwierdzić, że zmiany klimatu mogą stanowić zagrożenie dla unikatowych gatunków. Na podstawie badań obejmujących 1100 dzikich gatunków roślin, Thomas i współpracownicy (2004) stwierdził, że od 15% do 37% z nich jest zagrożonych wyginięciem. Jarvis i in. (2008) szacują, że od 16% do 22% wszystkich dzikich krewnych gatunków o bezpośredniej wartości rolniczej może być zagrożonych wyginięciem.

Dziki gatunki i lokalne populacje mogą zapewnić utrzymanie bioróżnorodności i działać jako źródła odporności na stres abiotyczny i biotyczny (Hajjar i Hodgkin, 2007). Banki genów, które zapewniają ochronę *ex-situ* i *in-situ* zasobów genetycznych, odgrywają ważną rolę w ochronie różnorodności występującej w gatunkach roślin uprawnych (Singh i in., 2015). Ponadto dziki gatunki roślin i lokalne populacje reprezentują bogactwo genetyczne w naturalnych populacjach roślin. Ta różnorodność genetyczna umożliwia przystosowanie się roślin do zmieniających się warunków środowiskowych, co przyczynia się do zachowania różnorodności biologicznej oraz integralności w ekosystemach.

### Podsumowanie

Zmiany klimatu stwarzają coraz poważniejsze zagrożenie dla rolnictwa na świecie. Rosnąca liczba ludności może stanowić zagrożenie dla utrzy-

mania globalnego bezpieczeństwa żywnościowego. Zwiększona świadomość może przyczynić się do lepszego wykorzystania puli dostępnych odmian pszenicy dostosowanych do zmieniającego się klimatu i utrzymania bezpieczeństwa żywnościowego na świecie. Twórcze metody hodowli roślin uprawnych mogą przyczynić się do adaptacji odmian w warunkach szybko zmieniającego się klimatu (Kahiluoto i in., 2019).

W warunkach globalnych zmian klimatycznych mączniak prawdziwy zbóż i traw stanowi zagrożenie dla upraw pszenicy we wszystkich regionach. Uważa się, że choroba ta, będzie nadal występować w uprawach pszenicy, a rozszerzając swój zasięg występowania, będzie stanowić zagrożenie dla upraw, które wcześniej nie były nimi dotknięte. Ponadto presja środowiskowa jest odpowiedzialna za pojawienie się nowych patogenów o różnej patogeniczności, a tym samym za ewolucję nowych cech. Dlatego niewątpliwie trudnym wyzwaniem będzie stworzenie odmian odpornych i tolerancyjnych w ekstremalnych wa-

runkach środowiskowych. Konieczne jest zatem kontynuowanie badań nad tą problematyką oraz wdrażanie odpowiednich praktyk rolniczych, aby minimalizować skutki występowania mączniaka prawdziwego zbóż i traw dla produkcji rolnej i bezpieczeństwa żywnościowego.

Należy pamiętać, że w przypadku zmniejszenia różnorodności genetycznej, tj. nieodwracalnej utraty efektywnych i cennych genów/genotypów, ich odtworzenie będzie niemożliwe. Dlatego też, ważna jest ochrona oraz prowadzenie badań nad wykorzystaniem zasobów genetycznych w hodowli zbóż w celu opracowania wspólnej strategii minimalizowania negatywnego wpływu zmian klimatu na produkcję roślinną.

Zmiany klimatu są wieloaspektowym wyzwaniem, które wymaga wspólnego działania na skalę globalną. Przyjęcie zrównoważonych praktyk i działań, zarówno na poziomie jednostek, jak i społeczeństw, może pomóc w ograniczeniu negatywnych skutków zmian klimatu i ochronie przyszłych pokoleń.

## Literatura

- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, B.D., Cammarano, D., Kimball, B.A., i inni, 2015. Rising temperature reduces global wheat production. *Nat. Clim. Change* 5, 143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Asseng, S., Martre, P., Maiorano, A., Rötter, R.P., O’Leary, G.J., Fitzgerald, G.J., Girousse, C., i inni, 2018. Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global Change Biol.* 25, 155–173. <https://doi.org/10.1111/gcb.14481>
- Balvanera, P., Sterer, P.F., Buchmann, A.B., He, N., Nakashizuka, J.S., Raffaelli, T., Schmid, B., 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.* 9, 1146–1156. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x>
- Bennett, F.G.A., 1984. Resistance to powdery mildew in wheat: a review of its use in agriculture and breeding programmes. *Plant Pathol.* 33, 279–300.
- Cammarano, D., Rötter, R.P., Asseng, S., Ewert, F., Wallach, D., Martre, P., Hatfield, J.L., i inni, 2016. Uncertainty of wheat water use: Simulated patterns and sensitivity to temperature and CO<sub>2</sub>. *Field Crop Res.* 198, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.015>
- Caubel, J., Launay, M., Lannou, C., Brisson, N., 2012. Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens. *Ecol. Modell.* 242, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.012>
- Chen, J., Arsenault, R., Brissette, F. P., Zhang, S., 2021. Climate change impact studies: Should we bias correct climate model outputs or post-process impact model outputs? *Water Resour. Res.*, 57, e2020WR028638. <https://doi.org/10.1029/2020WR028638>
- Chenu, K., Porter, J.R., Martre, P., Basso, B., Chapman, S.C., Ewert, F., Bindi, M., Asseng, S., 2017. Contribution of crop models to adaptation in wheat. *Trends Plant Sci.* 22, 472–490. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.02.003>
- Elahi, I., Saeed, U., Wadood, A., Abbas, A., Nawaz, H., Jabbar, S., 2022. Effect of climate change on wheat productivity. *IntechOpen.* <https://doi.org/10.5772/intechopen.1037> [dostęp 17.04.2022]
- Faber, A., Jarosz, Z., Król, A., 2019. Wpływ zmian klimatu na efektywność wykorzystywania azotu oraz jego straty. *Zeszyty Naukowe SGGW W Warszawie - Problemy Rolnictwa Światowego*, 19(1): 37–46. <https://doi.org/10.22630/PRS.2019.19.1.3>
- Farooq, A., Farooq, N., Akbar, H., Hassan Z.U., Gheewala, S.H., 2023. A critical review of climate change impact at a global scale on cereal crop production. *Agronomy*, 13: 162. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010162>
- Fuhrer, J., 2006. Agricultural systems: sensitivity to climate change. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 1, 052. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20061052>
- Griffey, C.A., Das, M.K., Stromberg, E.L., 1993. Effectiveness of adult-plant resistance in reducing grain yield loss to powdery mildew in winter wheat. *Plant Dis.* 77(6), 618–622.
- Hajjar, R., Hodgkin, T., 2007. The use of wild relatives in crop improvement: a survey of developments over the last 20 years. *Euphytica* 156: 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9363-0>
- Hellin, J., Shiferaw, B., Cairns, J., Reynolds, M., Ortiz-Monasterio, I., Banziger, M., Sonder, K., Rovere, R., 2012. Climate change and food security in the developing world: Potential of maize and wheat research to expand options for adaptation and mitigation. *J. Dev. Agric. Econ.* 4(12), 311–321.
- Hoisington, D., Khairallah, M., Reeves, T., Ribaut, J.M., Skovmand, B., Taba, S., Warburton M., 1999. Plant genetic resources: what can they contribute toward increased crop productivity? *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A* 96(11): 5937–5943. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.59>
- Jarvis, A., Lane, A., Hijmans, R., 2008 The effect of climate change on crop wild relatives. *Agric. Ecosyst. Environ.* 126: 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.013>
- Ju, Z., Hu, C., Zhang, Y., Chen, S., 2010. Effects of temperature rising on soil hydrothermal properties, winter wheat growth and yield. 9<sup>th</sup> European IFSA Symposium; 4–7 July 2010; Vienna, Austria. 2010. pp. 1307–1316.

- Juroszek, P., Tiedemann, A., 2013. Climate change and potential future risks through wheat diseases: A review. *Eur. J. Plant Pathol.* 136, 21–33. <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0144-9>
- Kahiluoto, H., Kaseva, J., Balek, J., Olesen, J.E., Ruiz-Ramos, M., Gobin, A., Kersebaum, K.C., i inni, 2019. Decline in climate resilience of European wheat. *Proc Natl. Acad. Sci. USA* 116: 123–128. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804387115>
- Kocmánková, E., Trnká, M., Juroch, J., Dubrovský, M., Semerádová, D., Možný, M., Žalud, Z., 2009. Impact of climate change on the occurrence and activity of harmful organisms. *Plant Prot. Sci.* 45, 48–52.
- Lackermann, K.V., Conley, S.P., Gaska, J.M., Martinka, M.J., Esker, P.D., 2011. Effect of location, cultivar, and diseases on grain yield of soft red winter wheat in Wisconsin. *Plant Dis.* 95, 1401–1406. <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-11-0005>
- Lal, M., Singh, K.K., Rathore, L.S., Srinivasan, G., Saseendran, S.A., 1998. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agri. For Meteorol.* 89, 101–114. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00064-6)
- Lione, G., Giordano, L., Sillo, F., Gonthier, P., 2015. Testing and modelling the effects of climate on the incidence of the emergent nut rot agent of chestnut *Gnomoniopsis castanea*. *Plant Pathol.* 64: 852–863. <https://doi.org/10.1111/ppa.12319>
- Liu, B., Asseng, S., Müller, C., Ewert, F., Elliott, J., Lobell, D.B., Martre, P., i inni, 2016. Similar negative impacts of temperature on global wheat yield estimated by three independent methods. *Nat. Clim. Change* 6, 1130–1136. <https://doi.org/10.1038/nclimate3115>
- Liu, B., Martre, P., Ewert, F., Porter, J.R., Challinor, A.J., Mueller, C., Ruane, A.C., i inni, 2019. Global wheat production with 1.5 and 2.0 degrees C above pre-industrial warming. *Global Change Biol.* 25, 1428–1444. <https://doi.org/10.1111/gcb.14542>
- Matić, S., Cucu, M.A., Garibaldi, A., Gullino, M.L., 2018. Combined effect of CO<sub>2</sub> and temperature on wheat powdery mildew. *Plant Pathol. J.* 34, 316–326. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.11.2017.0226>
- Maxted, N., Kell, S., 2003. Biodiversity and conservation. *Plant Diversity, conservation and use. Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, Elsevier, 25–48. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227050-9/00001-6>
- Mereu, V., Gallo, A., Trabucco, A., Gianluca, T., Carboni, G., Spano, D., 2021. Modeling high-resolution climate change impacts on wheat and maize in Italy. *Clim. Risk Manag.* 33: 100339. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100339>
- Miedaner, T., Juroszek, P., 2021. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theor. Appl. Genet.* 134, 1771–1785. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03807-0>
- Ottman, M.J., Kimball, B.A., White, J.W., Wall, G.W., 2012. Wheat growth response to increased temperature from varied planting dates and supplemental infrared heating. *Agron. J.* 104:7–16.
- Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X.B., Epstein, P., Chivian, E., 2011. Climate change and extreme weather events: implications for food production, plant disease, and pests. *Global Change and Human Health*, 2, 90–104. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1023&context=nasapub>
- Savary, S., Nelson, A., Sparks, A.H., Willocquet, L., Duveiller, E., Mahuku, G., Forbes, G., i inni, 2011. International agricultural research tackling the effects of global and climate changes on plant diseases in the developing world. *Plant Dis.* 95, 1204–1216. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-11-0316>
- Simeone, R., Piarulli, L., Nigro, D., Signorile, M.A., Blanco, E., Mangini, G., Blanco, A., 2020. Mapping powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) resistance in wild and cultivated tetraploid wheats. *Int J Mol Sci.* 24, 21(21): 7910. <https://doi.org/10.3390/ijms21217910>
- Singh, R.P., Prasad, P.V.V., Reddy, K.R., 2015. Climate change: implications for stakeholders in genetic resources and seed sector. *Adv. Agron.* 129:117–180. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.09.002>
- Tang, X., Cao, X., Xu, X., Jiang, Y., Lou, Y., Ma, Z., Fan, J., Zhou, Y., 2017. Effects of climate change on epidemics of powdery mildew in winter wheat in China. *Plant Dis.* 101, 1753–1760. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-17-0168-RE>
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., i inni, 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145–148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- Vollset, S.E., Goren, E., Yuan, C.W., Cao, J., Smith, A.E., Hsiao, T., Bisignano, C., i inni, 2020. Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the global burden of disease study. *The Lancet* 396 (10258), 1285–1306. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30677-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30677-2)
- Wheeler, T., Braun, J., 2013. Climate change impacts on global food security. *Science* 341, 508–513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>
- Xiao, Y., Wang, M., Song, Y., 2022. Abiotic and biotic stress cascades in the era of climate change pose a challenge to genetic improvements in plants. *Forests* 13(5): 780. <https://doi.org/10.3390/f13050780>
- Zou, Y., Qiao, H., Cao, X., Liu, W., Fan, J., Song, Y., Wang, B., Zhou, Y., 2018. Regionalization of wheat powdery mildew overwintering in China based on digital elevation. *J. Integr. Agric.* 17, 4: 901–910. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61851-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61851-3)