

THE MODERATING ROLE OF ICT IN CLIMATE-INDUCED FOOD INSECURITY: EVIDENCE FROM PAKISTAN

ROLA MODERUJĄCA ICT W SYTUACJI BRAKU BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOŚCIOWEGO WYWOŁANYM ZMIANĄ KLIMATU: PRZYKŁAD PAKISTANU

FAIZA AZHAR KHAN
QURBAN TABASSUM
SAIRA TUFAIL

Citation: Khan, F.A., Tabassum, Q., & Tufail, S. (2026). The moderating role of ICT in Climate-Induced Food Insecurity: Evidence from Pakistan / Rola moderująca ICT w sytuacji braku bezpieczeństwa żywnościowego wywołanym zmianą klimatu: przykład Pakistanu. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 386(1), 102–137. <https://doi.org/10.30858/zer/211830>

Abstract

Aim: Meteorological factors pose a significant threat to food security through disruptions in food availability, access, utilization, and stability. Extreme temperatures, erratic precipitation patterns, and extreme weather events adversely affect agricultural productivity, fisheries, and livestock, exacerbating inequalities in food access. This study examines the impact of meteorological factors on food security in Pakistan using the Food Insecurity Experience Scale (FIES) and investigates how household-level adoption of Information and Communication Technology (ICT) mitigates these effects across different climatic zones.

Material and methods: Using district-level climatic data from NASA Power and household-level ICT adoption indicators sourced from the Pakistan Social and Living Standards Measurement 2019–2020 survey, the study examines the impact of climate factors on food security and examines the moderating effect of ICT. The estimation is done at the national and climatic zones utilizing linear (OLS) and quantile regression. Moreover, the direct and indirect effects of meteorological factors are calculated, and the moderating role of ICT is computed.

Results: The findings reveal that all four meteorological variables negatively and significantly affect household food security. Among these, wind speed and precipitation exert the strongest adverse effects, particularly in tropical zones. The results also confirm regional heterogeneity, with the tropical zone being the most vulnerable. The quantile regression shows that the mitigation through ICT is most effective for households with a low level of food security.

Faiza Azhar Khan, PhD, International Islamic University, H-10, Islamabad, 44000, Pakistan. (faiza.azhar@iiu.edu.pk).

 <https://orcid.org/0000-0002-0859-7724>

Qurban Tabassum, Fatima Jinnah Women University The Mall, Rawalpindi, Punjab, Pakistan. (ali.tabasum88@gmail.com).

 <https://orcid.org/0009-0000-6612-4469>

Saira Tufail, PhD, Fatima Jinnah Women University The Mall, Rawalpindi, Punjab, Pakistan. (sairatufail@fjwu.edu.pk).

 <https://orcid.org/0000-0002-5871-1724>

Conclusions: *The findings of the study emphasize the need for ICT-driven policy interventions tailored to regional climate dynamics, positioning digitalization as important but not the only climate-resilient strategy for food security.*

Keywords: heating degree days, cooling degree days, direct and indirect impact, digitalization.

JEL codes: Q54, Q18, Q16, O13.

Abstrakt

Cel: Czynniki meteorologiczne stanowią poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa żywnościowego ze względu na zakłócenia w dostępności żywności, dostępie do żywności, wykorzystaniu i stabilności żywności. Ekstremalne temperatury, nieregularne wzorce opadów i ekstremalne zjawiska pogodowe negatywnie wpływają na produktywność rolną, rybołówstwo i hodowlę zwierząt, pogłębiając nierówności w dostępie do żywności. W niniejszym badaniu przeanalizowano wpływ czynników meteorologicznych na bezpieczeństwo żywnościowe w Pakistanie przy użyciu skali doświadczenia braku bezpieczeństwa żywnościowego (ang. Food Insecurity Experience Scale, FIES) oraz zbadano, w jaki sposób przyjęcie technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT) na poziomie gospodarstw domowych łagodzi te skutki w różnych strefach klimatycznych.

Materiał i metody: W niniejszym badaniu wykorzystano dane klimatyczne na poziomie dystryktów ze strony internetowej NASA Power oraz wskaźniki przyjęcia ICT na poziomie gospodarstw domowych, pochodzące z pakistańskiego badania pomiaru standardów społecznych i życiowych 2019–2020, do przeprowadzenia oceny wpływu czynników klimatycznych na bezpieczeństwo żywnościowe i analizy efektu moderującego ICT. Szacunki przeprowadzono na poziomie krajowym i stref klimatycznych, wykorzystując regresję liniową (MNK) oraz kwantylową. Ponadto obliczono bezpośrednie i pośrednie skutki czynników meteorologicznych, a także efekty związane z rolą moderującą ICT.

Wyniki: Wyniki wskazują, że wszystkie cztery zmienne meteorologiczne negatywnie i istotnie wpływają na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych. Spośród nich prędkość wiatru i opady wywierają najsilniejszy negatywny wpływ, szczególnie w strefach tropikalnych. Wyniki potwierdzają również zróżnicowanie regionalne, przy czym najbardziej narażona na negatywne skutki jest strefa tropikalna. Za pomocą regresji kwantylowej wykazano, że łagodzenie skutków z wykorzystaniem ICT przynosi najlepsze efekty w przypadku gospodarstw domowych o niskim poziomie bezpieczeństwa żywnościowego.

Wnioski: Wyniki badania zwracają uwagę na potrzebę interwencji politycznych opartych na ICT, dostosowanych do regionalnej dynamiki klimatycznej, co sprawia, że cyfryzacja staje się ważną, ale nie jedyną strategią zapewniającą bezpieczeństwo żywnościowe w obliczu zmian klimatu.

Słowa kluczowe: stopniodni grzania, stopniodni chłodzenia, wpływ bezpośredni i pośredni, cyfryzacja.

Kody JEL: Q54, Q18, Q16, O13.

Introduction

Climate change poses a significant threat to global food security. It could potentially disrupt progress toward a world without hunger by impacting all aspects of food security, including availability, access, utilization, and stability. Climate change influences agricultural productivity through changes in temperature, precipitation patterns, and the frequency of extreme weather events. Higher temperatures can lead to heat stress on crops and livestock, reducing crop yields and the availability and quality of food (Hasan & Hussain, 2020). These changes also impact fisheries and livestock, further compromising food security (Minaxi et al., 2011; Okoli & Ifeakor, 2014). Climate change can exacerbate existing inequalities in food access. Vulnerable populations, particularly in low-income countries, are disproportionately

Wstęp

Zmiana klimatu stanowi istotne zagrożenie dla globalnego bezpieczeństwa żywnościowego. Może ona potencjalnie zakłócić postępy w kierunku świata bez głodu, wpływając na wszystkie aspekty bezpieczeństwa żywnościowego, w tym dostępność, dostęp, wykorzystanie i stabilność. Zmiana klimatu wpływa na produktywność rolną poprzez zmiany temperatury, wzorców opadów oraz częstotliwość występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych. Wyższe temperatury mogą prowadzić do stresu termicznego dla upraw i zwierząt hodowlanych, zmniejszając plony oraz dostępność i jakość żywności (Hasan i Hussain, 2020). Zmiany te wpływają również na rybołówstwo i hodowlę zwierząt, dodatkowo zagrażając bezpieczeństwu żywnościowemu (Minaxi i in., 2011; Okoli i Ifeakor, 2014). Zmiana klimatu może pogłębiać

affected by climate-related disruptions. These populations often rely on subsistence farming and have limited resources to adapt to changing conditions (Muluneh, 2021; World Bank, 2022). Likewise, it can be anticipated that food access and utilization will be affected indirectly via collateral effects on household and individual incomes (Myers et al., 2017). The nutritional quality of food can also be affected by climate change. Changes in growing conditions can alter the nutrient content of crops, potentially leading to deficiencies in essential vitamins and minerals. Additionally, climate-related health issues, such as the increased prevalence of diseases, can impact people's ability to utilize the food they have access to (Muluneh, 2021). Finally, the stability of food supplies is threatened by climate change. Extreme weather events, such as hurricanes, floods, and droughts, can disrupt food production and supply chains. This instability can lead to fluctuations in food prices and availability, making it difficult for people to access food consistently.

Digitalization, particularly the adoption of Information and Communication Technologies (ICT) is not only the instrumental ingredient of the agricultural transformation process but also has broader implications for food security. The impact of ICT on food security is multifaceted. It primarily affects food availability by optimizing agricultural practices and facilitating market access. For farmers, ICT tools such as mobile applications and digital platforms have been instrumental in increasing productivity, income, and resilience, especially during crises like the COVID-19 pandemic. ICT platforms like online marketplaces and mobile applications connect farmers directly to buyers, enabling them to sell their produce at better prices. This increased market access leads to higher incomes for farmers, which in turn allows them to invest in better seeds, fertilizers, and equipment, thereby increasing agricultural productivity and food availability (Ferguson et al., 2024; Oparinde, 2023). Moreover, access to mobile banking, microloans, and insurance through ICT helps farmers secure financial resources to invest in their farming activities. This financial support reduces their vulnerability to economic shocks. ICT tools provide farmers with real-time information on weather forecasts, market prices, and best practices. Higher productivity translates to better income, which enhances food access and utilization (Sekabira et al., 2023).

Besides its direct effect on food security, ICT can be leveraged to mitigate the impact of climate change on food security. Digital agriculture technologies improve resilience by providing farmers with timely

istniejące nierówności w dostępie do żywności. Populacje wrażliwe, szczególnie w krajach o niskich dochodach, są w nieproporcjonalnie dużym stopniu dotknięte zakłóceniami związanymi z klimatem. Populacje te często utrzymują się z rolnictwa na własne potrzeby i dysponują ograniczonymi zasobami, które pozwalają dostosować się do zmiennych warunków (Muluneh, 2021; World Bank [Bank Światowy], 2022). Podobnie można przewidywać, że na dostęp do żywności i jej wykorzystanie wpłyną pośrednio efekty uboczne dotyczące dochodów gospodarstw domowych i jednostek (Myers i in., 2017). Zmiana klimatu może również mieć konsekwencje dla wartości odżywczej żywności. Zmiany warunków uprawy mogą wpływać na zawartość składników odżywczych w uprawach, potencjalnie prowadząc do niedoborów niezbędnych witamin i minerałów. Dodatkowo związane z klimatem problemy zdrowotne, takie jak częstsze występowanie chorób, mogą oddziaływać na zdolność ludzi do wykorzystania żywności, do której mają dostęp (Muluneh, 2021). Ponadto zmiana klimatu zagraża stabilności dostaw żywności. Ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak huragany, powodzie i susze, mogą zakłócać produkcję żywności i łańcuchy dostaw. Ta niestabilność może prowadzić do wahań cen żywności i jej dostępności, utrudniając ludziom stały dostęp do pożywienia.

Cyfryzacja, a w szczególności przyjęcie technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT), jest nie tylko kluczowym składnikiem procesu transformacji rolnictwa, ale ma również szersze implikacje dla bezpieczeństwa żywnościowego. Wpływ ICT na bezpieczeństwo żywnościowe jest wieloaspektowy. Technologie te przede wszystkim poprawiają dostępność żywności poprzez optymalizację praktyk rolniczych i ułatwianie dostępu do rynku. Dla rolników narzędzia ICT, takie jak aplikacje mobilne i platformy cyfrowe, odegrały kluczową rolę w zwiększeniu wydajności, dochodów i odporności, zwłaszcza podczas kryzysów takich jak pandemia COVID-19. Platformy ICT, np. internetowe platformy handlowe i aplikacje mobilne, łączą rolników bezpośrednio z nabywcami, umożliwiając sprzedaż produktów po lepszych cenach. Ten zwiększony dostęp do rynku prowadzi do wyższych dochodów rolników, co z kolei pozwala im inwestować w lepsze nasiona, nawozy i sprzęt, poprawiając tym samym produktywność rolną i dostępność żywności (Ferguson i in., 2024; Oparinde, 2023). Ponadto dostęp do bankowości mobilnej, mikropożyczek i ubezpieczeń za pośrednictwem ICT pomaga rolnikom zabezpieczyć zasoby finansowe na inwestycje w działalność rolniczą. To wsparcie finansowe zmniejsza ich podatność na wstrząsy gospodarcze. Narzędzia ICT zapewniają

climate data and forecasts, helping them adapt to changing weather patterns and reduce vulnerability to climate risks (Diyaol, 2025; Ferdinand et al., 2021). Household adoption of ICT can play a crucial role in mitigating the impact of climate change on food security, even for non-farming and non-agricultural households. One of the primary channels is improved access to information and financial services. ICT enables households to stay informed about climate-related disruptions, such as extreme weather events and food shortages, allowing them to make better financial and consumption decisions. Mobile banking, digital payment systems, and fintech solutions enhance financial resilience by facilitating savings, remittances, and access to credit. This financial stability allows households to maintain food security during climate-induced economic shocks, such as rising food prices due to supply chain disruptions (Anser et al., 2021). Additionally, ICT-based social protection programs, such as digital cash transfers and food assistance schemes, ensure that vulnerable households receive timely support in times of crisis (Li & Huo, 2023). Furthermore, ICT plays a role in enhancing health and nutrition awareness by providing access to online education, mobile health applications, and digital campaigns that promote climate-resilient diets (Hijriyati et al., 2025). By empowering households with financial, informational, and logistical tools, ICT adoption strengthens their ability to cope with climate-induced food insecurity both in agricultural and non-agricultural households (Nakasone & Torero, 2016).

Given the background, the study has threefold objectives. Firstly, to investigate the impact of climatic stressors, particularly cooling degree days (CDD), heating degree days (HDD), average precipitation (AP), and Windspeed (WS) on food security in Pakistan. Secondly, the study intends to assess the role of household ICT adoption in mitigating the impact of climatic factors on food security. Thirdly, the study seeks to examine the relationship across different climatic zones. The following two hypotheses are constructed in this regard:

- All meteorological factors have a significant negative impact on food security at the national level and across climatic zones.
- ICT moderates the negative effect of meteorological factors on food security at the national level and across climatic zones.

Pakistan presents an ideal case study for analysis of climate change and food security because of its high vulnerability to climate change, its reliance on agriculture, and existing challenges related to food

rolnikom informacje w czasie rzeczywistym o prognozach pogody, cenach rynkowych i najlepszych praktykach. Wyższa produktywność przekłada się na lepszy dochód, co poprawia dostęp do żywności i jej wykorzystanie (Sekabira i in., 2023).

Oprócz bezpośredniego wpływu na bezpieczeństwo żywnościowe, ICT można wykorzystać do łagodzenia wpływu zmian klimatu w tym obszarze. Cyfrowe technologie rolnicze poprawiają odporność, dostarczając rolnikom aktualnych danych klimatycznych i prognoz, pomagając im dostosować się do zmieniających się wzorców pogodowych i zmniejszyć podatność na czynniki ryzyka związane z klimatem (Diyaol, 2025; Ferdinand i in., 2021). Przyjęcie ICT przez gospodarstwa domowe może odgrywać kluczową rolę w łagodzeniu wpływu zmiany klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe, nawet w przypadku gospodarstw innych niż rolnicze. Jednym z głównych kanałów jest lepszy dostęp do informacji i usług finansowych. Rozwiązania ICT pozwalają gospodarstwom domowym pozostawać na bieżąco z informacjami dotyczącymi zakłóceń związanych z klimatem, takich jak ekstremalne zjawiska pogodowe i niedobory żywności, umożliwiając podejmowanie lepszych decyzji finansowych i konsumpcyjnych. Bankowość mobilna, cyfrowe systemy płatności i rozwiązania fintech zwiększają odporność finansową poprzez ułatwienie oszczędzania, przekazów pieniężnych i dostępu do kredytów. Ta stabilność finansowa pozwala gospodarstwom domowym utrzymać bezpieczeństwo żywnościowe podczas wstrząsów gospodarczych wywołanych czynnikami klimatycznymi, takich jak wzrost cen żywności spowodowany zakłóceniami w łańcuchach dostaw (Anser i in., 2021). Ponadto oparte na ICT programy ochrony socjalnej, takie jak cyfrowe transfery gotówkowe i systemy pomocy żywnościowej, zapewniają wrażliwym gospodarstwom domowym szybkie wsparcie w czasach kryzysu (Li i Huo, 2023). ICT odgrywają też rolę w zwiększaniu świadomości w zakresie zdrowia i żywienia dzięki możliwościom dostępu do zasobów edukacji online, mobilnych aplikacji zdrowotnych i kampanii cyfrowych promujących diety odporne na zmianę klimatu (Hijriyati i in., 2025). Dzięki wyposażeniu gospodarstw domowych w narzędzia finansowe, informacyjne i logistyczne, wprowadzenie ICT wzmacnia ich zdolność sprostania problemom związanym z brakiem bezpieczeństwa żywnościowego spowodowanym zmianą klimatu, zarówno w przypadku gospodarstw rolnych, jak i innych (Nakasone i Torero, 2016).

Biorąc pod uwagę powyższe, niniejszemu badaniu przyświecają trzy cele. Po pierwsze zbadać ma ono wpływ stresorów klimatycznych, w szczególności stopniodni chłodzenia (CDD), stopniodni grzania

security. Pakistan has been facing frequent extreme weather events such as rising temperatures, irregular rainfall patterns, and glacial melting. Global Climate Risk Index ranks Pakistan as the 5th most climate-vulnerable country in the world. Given its largely agrarian economy, these climate-related challenges pose serious threats to food security, water resources, and livelihoods, particularly in rural and agricultural regions. Over the years, Pakistan has faced significant challenges in maintaining food availability and accessibility due to natural disasters, conflicts, and economic downturns. It is important to note that Pakistan has a ranking of 109th out of 127 countries in the Global Hunger Index.

Previous studies have highlighted the challenges posed by climate change to food security in Pakistan. For instance, Shahzad and Amjad (2022) discuss the adverse effects of climate change on agricultural productivity and food accessibility, emphasizing the need for immediate action to address these challenges. Similarly, Ullah et al. (2024) explore the impact of climate change on food security, suggesting interventions for adaptation and mitigation. However, these studies are conducted at the aggregate level, identifying the macroeconomic impacts of climate change on food security without considering the issue at the household level and the specific role of ICT in mitigating these effects for heterogeneous households. Parveen et al. (2021) examined the impact of ICT on food security at the household level but did not incorporate the role of climate change.

Similarly, the role of ICT as a mitigating strategy for the impact of meteorological factors on food security is theoretically well established (Balasundran et al., 2023). However, despite its theoretical significance, the empirical exploration of this relationship remains limited. There is a scarcity of studies that quantitatively assess the extent to which ICT adoption mitigates the adverse effects of meteorological factors on food security. Given the aforementioned empirical gaps, the study is the first of its kind for Pakistan to not only analyse the impact of climate change on household food security but also measure the mitigating role of ICT. This study bridges these gaps by collecting data on climatic factors at the district level across different climatic zones and evaluating their impact on household food security, with ICT adoption as a moderating factor. By doing so, this research provides a comprehensive understanding of how ICT can mitigate the adverse effects of climatic factors on food security in Pakistan.

(HDD), średnich opadów (AP) i prędkości wiatru (WS) na bezpieczeństwo żywnościowe w Pakistanie. Po drugie badanie ma na celu ocenę roli przyjęcia ICT przez gospodarstwa domowe w łagodzeniu wpływu czynników klimatycznych na bezpieczeństwo żywnościowe. Po trzecie ma ono przeanalizować tę relację w różnych strefach klimatycznych. W związku z tym sformułowano dwie następujące hipotezy:

- Wszystkie czynniki meteorologiczne mają istotny negatywny wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe na poziomie krajowym i we wszystkich strefach klimatycznych.
- ICT moderuje negatywny wpływ czynników meteorologicznych na bezpieczeństwo żywnościowe na poziomie krajowym i we wszystkich strefach klimatycznych.

Pakistan stanowi idealne studium przypadku do analizy zmian klimatu i bezpieczeństwa żywnościowego ze względu na wysoką podatność na zmiany klimatu, zależność od rolnictwa i istniejące wyzwania związane z bezpieczeństwem żywnościowym. Kraj ten boryka się z częstymi ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi, takimi jak rosnące temperatury, nieregularne wzorce opadów i topnienie lodowców. W ramach globalnego indeksu ryzyka klimatycznego Pakistan sklasyfikowany jest jako piąty najbardziej narażony na zmianę klimatu kraj na świecie. Biorąc pod uwagę w dużej mierze rolniczą gospodarkę tego państwa, omawiane wyzwania związane z klimatem stanowią poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa żywnościowego, zasobów wodnych i źródeł utrzymania, szczególnie w regionach wiejskich i rolniczych. Przez lata Pakistan borykał się ze znacznymi wyzwaniami w utrzymaniu dostępności i dostępu do żywności z powodu klęsk żywiołowych, konfliktów i spowolnienia gospodarczego. Należy zauważyć, że Pakistan zajmuje 109. miejsce na 127 krajów monitorowanych w ramach wskaźnika głodu na świecie (GHI).

Wcześniejsze badania wskazywały na związane ze zmianą klimatu wyzwania dla bezpieczeństwa żywnościowego w Pakistanie. Na przykład Shahzad i Amjad (2022) omawiają negatywne skutki zmiany klimatu dla produktywności rolnej i dostępności żywności, podkreślając potrzebę podjęcia natychmiastowych działań w celu rozwiązania tych problemów. Podobnie Ullah i in. (2024) analizują wpływ zmiany klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe, sugerując interwencje w zakresie łagodzenia skutków zmiany klimatu i przystosowania się do niej. Jednak badania te są prowadzone na poziomie zagregowanym i identyfikują makroekonomiczne skutki zmiany klimatu dla bezpieczeństwa żywnościowego, nie uwzględniając kwestii na poziomie gospodarstw domowych oraz

konkretnej roli ICT w łagodzeniu tych skutków dla niejednorodnych gospodarstw domowych. Parveen i in. (2021) zbadali wpływ ICT na bezpieczeństwo żywnościowe na poziomie gospodarstw domowych, ale nie uwzględnili roli zmiany klimatu.

Podobnie rola ICT jako strategii łagodzącej wpływ czynników meteorologicznych na bezpieczeństwo żywnościowe jest teoretycznie dobrze ugruntowana (Balasundran i in., 2023). Jednak mimo teoretycznego znaczenia, empiryczne badanie tego związku pozostaje ograniczone. Brakuje badań, które w sposób ilościowy oceniałyby, w jakim stopniu wdrożenie ICT ogranicza negatywny wpływ czynników meteorologicznych na bezpieczeństwo żywnościowe. Biorąc pod uwagę wspomniane powyżej luki empiryczne, badanie to jest pierwszym tego rodzaju przedsięwzięciem dotyczącym Pakistanu, w ramach którego nie tylko przeanalizowano wpływ zmiany klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych, ale także zmierzono łagodzącą rolę ICT. Wypełnia ono te luki, gromadząc dane na temat czynników klimatycznych na poziomie dystryktów w różnych strefach klimatycznych i oceniając ich wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych, z uwzględnieniem ICT jako czynnika moderującego. Tym samym badanie pozwala w pełni zrozumieć, w jaki sposób ICT mogą złagodzić niekorzystny wpływ czynników klimatycznych na bezpieczeństwo żywnościowe w Pakistanie.

Literature Review

Several empirical studies have looked into the relationship between climate change and food security, specifically in the context of South Asia, because South Asia not only hosts one-fourth of the world population but also is one of the most vulnerable regions to climate change. Besides, the rate of poverty and food insecurity concerns is high for the region, making it a pertinent case for analysis. In a relatively different and comprehensive study, Alvi et al. (2021) have developed an integrated assessment model for food security under climate change for South Asia. Results have shown that climate change decreases both food production and consumption. In a related study, Yan and Alvi (2022) have examined the impact of climate-induced cereal productivity changes on food security in South Asian countries using the computable General Equilibrium (CGE) Model. Results have shown that climate change is reducing food security and welfare through reduced cereal production. In an earlier study, Alvi and Jamil (2018) have examined the impact of both climate change and technology adoption on cereal yields for South Asian countries and concluded the positive

Przegląd literatury

W szeregu badań empirycznych przeanalizowano związek między zmianą klimatu a bezpieczeństwem żywnościowym, szczególnie w kontekście Azji Południowej, ponieważ region ten nie tylko zamieszkuje jedna czwarta światowej populacji, ale jest on również jednym z najbardziej narażonych na skutki tej zmiany. Ponadto wskaźnik ubóstwa i obawy dotyczące braku bezpieczeństwa żywnościowego są w tym regionie wysokie, co sprawia, że jest to odpowiedni przypadek do analizy. W stosunkowo odmiennym i kompleksowym badaniu Alvi i in. (2021) opracowali zintegrowany model oceny bezpieczeństwa żywnościowego w warunkach zmiany klimatu dla Azji Południowej. Wyniki pokazały, że zmiana klimatu powoduje spadek zarówno produkcji, jak i konsumpcji żywności. W powiązanim badaniu Yan i Alvi (2022) przeanalizowali wpływ wywołanych klimatem zmian w wydajności upraw zbóż na bezpieczeństwo żywnościowe w krajach Azji Południowej, wykorzystując obliczeniowy model równowagi ogólnej (CGE). Zgodnie z uzyskanymi wynikami zmiana klimatu obniża bezpieczeństwo żywnościowe i dobrobyt ze względu na zmniejszoną produkcję zbóż. We wcześniejszym

and negative effects, respectively. However, the slow pace of technology adoption by South Asian countries poses a threat to sustainability in food production. The impact of climate change in the form of changing temperatures and precipitation on cereal production has also been confirmed by Alvi et al. (2020) in a macro data study for 55 developing countries. Authors have also found that farmers fail to adapt to climate change in Southern Asia and Central Africa. Similarly, Chandio et al. (2023) have examined the impact of climate change on crop production in South Asian countries over the period 1991–2016 using the panel dynamic least squares (PD-LS) approach. Results showed that while precipitation has a long-term beneficial effect on agricultural productivity, rising temperatures and CO₂ emissions have the opposite effect.

In a country study for Nepal, Poudel et al. (2020) have utilized household-level primary data to conclude that the variation in meteorological factors has threatened household food security through reduced crop production, dairy product yield, and increased household work. Moreover, the study noted that in the future food security of these households will be more vulnerable to climate change. While examining the impact of meteorological and non-climatic factors on global food security in a panel data study of 103 countries, Singh (2018) concluded that the global food security index is negatively impacted by mean temperature, although yearly precipitation improves food security. Moreover, high rates of population growth and inflation are also major causes of food insecurity in these countries. The positive impact of precipitation and negative impact of temperatures on food security are also confirmed by Mahrous (2019) in a panel data study of five East African countries from the years 2000–2014.

There are quite a number of studies analyzing food security in Ethiopia because the country is one of the most food insecure in the World. To begin with, Ayinu et al. (2022), using primary data, concluded that adverse climatic conditions with insufficient household resources significantly impact food security in the Godere District. The study utilized rotated empirical orthogonal functions to examine the pattern of rainfall variation and binary logistic regression for analysis. In a similar paper, Andarge (2022) using the Household Food Insecurity Assess Scale investigated how climate change affected food security in Mirab Abaya woreda, Gamo Zone. Results confirm that climate change is major contributing reason to food insecurity along with other household characteristics. Similarly, Mekonnen et al. (2021) also validated

badaniu Alvi i Jamil (2018) przeanalizowali wpływ zarówno zmiany klimatu, jak i przyjęcia technologii na plony zbóż w krajach Azji Południowej i stwierdzili odpowiednio negatywne i pozytywne skutki. Powolne tempo przyjmowania technologii przez kraje Azji Południowej stanowi jednak zagrożenie dla zrównoważonego rozwoju produkcji żywności. Wpływ zmiany klimatu w formie zmieniających się temperatur i opadów na produkcję zbóż został również potwierdzony przez Alviego i in. (2020) w badaniu danych makro dla 55 krajów rozwijających się. Autorzy stwierdzili również, że rolnicy w Azji Południowej i Afryce Środkowej nie potrafią przystosować się do zmiany klimatu. Podobnie Chandio i in. (2023) zbadali wpływ zmiany klimatu na produkcję roślinną w krajach Azji Południowej w latach 1991–2016, stosując dynamiczną metodę najmniejszych kwadratów z wykorzystaniem danych panelowych (PD-LS). Wyniki wykazały, że podczas gdy opady mają długoterminowy korzystny wpływ na produktywność rolną, rosnące temperatury i emisje CO₂ mają skutek odwrotny.

W badaniu krajowym dla Nepalu Poudel i in. (2020) wykorzystali pierwotne dane na poziomie gospodarstw domowych i doszli do wniosku, że zmienność czynników meteorologicznych zagraża bezpieczeństwu żywnościowemu gospodarstw domowych ze względu na zmniejszoną produkcję roślinną, wydajność produktów mlecznych i zwiększone nakłady pracy w gospodarstwie domowym. Ponadto w badaniu zauważono, że w przyszłości bezpieczeństwo żywnościowe tych gospodarstw domowych będzie bardziej podatne na zmianę klimatu. Analizując wpływ czynników meteorologicznych i pozaklimatycznych na globalne bezpieczeństwo żywnościowe, w badaniu danych panelowych dla 103 krajów Singh (2018) stwierdził, że średnia temperatura negatywnie wpływa na Światowy Indeks Bezpieczeństwa Żywnościowego, natomiast roczne opady poprawiają bezpieczeństwo żywnościowe. Co więcej, głównymi przyczynami braku bezpieczeństwa żywnościowego w tych krajach są również wysokie wskaźniki wzrostu populacji i inflacji. Pozytywny wpływ opadów i negatywny wpływ temperatur na bezpieczeństwo żywnościowe potwierdza również Mahrous (2019) w badaniu danych panelowych dla pięciu krajów Afryki Wschodniej w latach 2000–2014.

Istnieje wiele badań, których przedmiotem jest bezpieczeństwo żywnościowe w Etiopii, ponieważ kraj ten jest jednym z najbardziej zagrożonych brakiem bezpieczeństwa żywnościowego na świecie. Można tu wskazać Ayinu i in. (2022), którzy – wykorzystując dane pierwotne – stwierdzili, że niekorzystne warunki klimatyczne przy niewystarczających zasobach

the harmful impact of climate change on household food security over the decades in Ethiopia as crop production has been suffering from low/random rainfall, severe erosion, and rising temperatures.

There are few studies conducted for Pakistan such as Abbas et al. (2022), who analyzed the influence of climate change on food security in several locations in Punjab, Pakistan, from the period 1979–2020, using total production of wheat output as a proxy for food security. Results based on ARDL technique showed that all, average, maximum and minimum temperatures, wind speed and rainfall negatively affected food production in all regions of Punjab. However, Northern Punjab is an exception where maximum temperature affects food production positively, and wind speed also doesn't have a negative impact.

In another study for Pakistan, Ali and Erenstein (2017) analyzed the factors determining farmers' choice of climate change adaptation strategies and their impact on household food security and poverty levels using primary data from 950 farmers covering four provinces. It has been shown that most of the adaptation strategies among farmers included adjusting their sowing time, using drought-resistant crop varieties, and switching to different crops. Farmers adopting more adaptation practices experienced better food security and lower poverty. Similarly, Amjad (2023) established that climate change vulnerability adversely affects the agriculture sector in the arid and semi-arid regions of Pakistan.

As far as the role of ICT is concerned, the benefits of ICT can be materialized beyond the agriculture sector, contributing to the other dimensions of food security at a broader level (Ejemeyovwi et al., 2021). For instance, ICT can drive economic growth by creating new job opportunities and supporting e-commerce. Increased income at the national level enhances the purchasing power of households, allowing them to access and afford nutritious food, thereby improving food security (Leng et al., 2024). ICT also improves access to healthcare services by enabling telemedicine, online consultations, and health information dissemination. A healthier population can utilize food more effectively, leading to better nutritional outcomes and overall food security. ICT can enhance the effectiveness of social safety nets such as food assistance programs and unemployment benefits. By using digital platforms for distribution and monitoring, governments can ensure that vulnerable populations receive timely support, enhancing food stability and security. ICT facilitates better planning and management of infrastructure projects, such as roads, storage

gospodarstw domowych istotnie wpływają na bezpieczeństwo żywnościowe w dystrykcie Godere. W badaniu wykorzystano rotowane empiryczne funkcje ortogonalne do zbadania wzorca zmienności opadów oraz binarną regresję logistyczną do analizy. W podobnym artykule Andarge (2022), wykorzystując skalę oceny braku bezpieczeństwa żywnościowego gospodarstw domowych (HDIAS), zbadał, w jaki sposób zmiana klimatu wpłynęła na bezpieczeństwo żywnościowe w woredzie Mirab Abaya w strefie Gamo. Wyniki potwierdzają, że zmiana klimatu, wraz z innymi cechami gospodarstwa domowego, jest główną przyczyną braku bezpieczeństwa żywnościowego. Podobnie Mekonnen i in. (2021) potwierdzili szkodliwy wpływ zmiany klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych w ciągu dziesięcioleci w Etiopii, ponieważ produkcja roślinna cierpi z powodu niskich/przypadkowych opadów, silnej erozji i rosnących temperatur.

Istnieją nieliczne badania dotyczące Pakistanu, takie jak badanie Abbasa i in. (2022), którzy przeanalizowali wpływ zmiany klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe w kilku lokalizacjach w Pendżabie w latach 1979–2020, wykorzystując całkowitą produkcję pszenicy jako wskaźnik zastępczy bezpieczeństwa żywnościowego. Wyniki oparte na technice ARDL wykazały, że wszystkie temperatury – średnie, maksymalne i minimalne, prędkość wiatru i opady deszczu negatywnie wpłynęły na produkcję żywności we wszystkich regionach Pendżabu. Północny Pendżab jest jednak wyjątkiem, gdzie maksymalna temperatura wpływa pozytywnie na produkcję żywności, a prędkość wiatru również nie ma negatywnych skutków.

W innym badaniu dotyczącym Pakistanu Ali i Erenstein (2017) przeanalizowali czynniki determinujące wybór przez rolników strategii adaptacji do zmiany klimatu oraz ich wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych i poziom ubóstwa, wykorzystując dane pierwotne pochodzące od 950 rolników, obejmujące cztery prowincje. Pokazano, że większość strategii przystosowawczych wśród rolników obejmowała dostosowanie czasu siewu, wykorzystanie odmian roślin odpornych na suszę oraz przejście na inne uprawy. Rolnicy stosujący więcej praktyk adaptacyjnych doświadczali lepszego bezpieczeństwa żywnościowego i niższego ubóstwa. Podobnie Amjad (2023) ustalił, że podatność na zmianę klimatu negatywnie wpływa na sektor rolnictwa w suchych i półsuchych regionach Pakistanu.

Jeśli chodzi o rolę rozwiązań ICT, korzyści płynące z ich stosowania mogą wykraczać poza sektor rolniczy, przyczyniając się do poprawy innych aspektów bezpieczeństwa żywnościowego na szerszym poziomie (Ejemeyovwi i in., 2021). ICT mogą na przykład

facilities, and irrigation systems. Improved infrastructure enhances the efficiency of food production, distribution, and storage, reducing food losses and waste, and ensuring a stable food supply.

Different studies have been conducted to determine the role of ICT in food security. Gouvea et al. (2022) analyzed the impact of technology on food security in 180 different countries with separate analyses for developing and developed countries. Findings indicated that the adoption of new technologies and ICT use both improve global food security. To be more precise, technology mostly increases food availability in OECD nations, whereas it primarily increases food affordability in non-OECD countries. It's interesting to note that, in OECD countries, the role of technology in ensuring food security has increased recently, whereas in non-OECD countries, its role has been constant. This implies that in more developed areas, technology's role in guaranteeing food security is growing as it develops. In another panel data-based study for 15 West African countries, Anser et al. (2021) investigated how using ICT and having an efficient government may improve food security in West Africa, covering the years 2005–2018. Results explicated that not only is ICT instrumental in improving food security, but efficient governance and low levels of corruption also have a robust positive impact on food security.

Ejemeyovwi et al. (2021) investigated the relationship between Nigerian food security and ICT use utilizing household-level data. Food security is a binary variable, and ICT is measured by the mobile usage of households. Results indicated that ICT utilization improves food security only in male-headed households but not in female-headed households. In a similar study for Uganda, Picho et al. (2018) investigated the effect of ICT use on household food security. Findings revealed that 18.2% of households in the region used ICT tools to obtain food security information and the utilization of ICT tools to access food security information has a positive impact on food security status, resulting in a 38% improvement. Similar results of the positive impact of ICT on food security are validated by Hudson et al. (2017) for sub-Saharan Africa.

stymulować wzrost gospodarczy poprzez tworzenie nowych możliwości pracy i wspieranie handlu elektronicznego. Zwiększony dochód na poziomie krajowym wzmacnia siłę nabywczą gospodarstw domowych, pozwalając im na dostęp do wartościowej żywności i jej zakup, co poprawia bezpieczeństwo żywnościowe (Leng i in., 2024). ICT poprawiają również dostęp do usług opieki zdrowotnej, umożliwiając telemedycynę, konsultacje online i rozpowszechnianie informacji dotyczących zdrowia. Zdrowsza populacja może skuteczniej wykorzystywać żywność, co prowadzi do lepszych wyników żywieniowych i ogólnego bezpieczeństwa żywnościowego. ICT mogą podnosić skuteczność siatek bezpieczeństwa socjalnego, takich jak programy pomocy żywnościowej i zasiłki dla bezrobotnych. Korzystając z platform cyfrowych do dystrybucji i monitorowania, rządy mogą zadbać o to, aby grupy społeczne znajdujące się w trudnej sytuacji otrzymywały wsparcie w odpowiednim czasie, co poprawia stabilność i bezpieczeństwo żywnościowe. Technologie informacyjno-komunikacyjne usprawniają proces planowania i zarządzania projektami infrastrukturalnymi, takimi jak drogi, magazyny i systemy nawadniania. Rozwój infrastruktury podnosi efektywność produkcji, dystrybucji i przechowywania żywności, co ogranicza jej straty i marnotrawstwo oraz zapewnia stabilność dostaw.

Przeprowadzono różne badania mające na celu określenie roli ICT w zapewnianiu bezpieczeństwa żywnościowego. Gouvea i in. (2022) przeanalizowali wpływ technologii na bezpieczeństwo żywnościowe w 180 krajach, dokonując odrębnych analiz dla państw rozwijających się i rozwiniętych. Wyniki wskazały, że zarówno wdrażanie nowych technologii, jak i wykorzystanie ICT poprawiają globalne bezpieczeństwo żywnościowe. Ściślej rzecz ujmując, w krajach OECD technologia zwiększa głównie dostępność żywności, natomiast w krajach spoza OECD wpływa przede wszystkim na jej przystępność cenową. Warto zauważyć, że w tych pierwszych znaczenie technologii w zapewnianiu bezpieczeństwa żywnościowego ostatnio wzrosło, podczas gdy w tych drugich pozostaje ono na stałym poziomie. Sugeruje to, że w regionach bardziej rozwiniętych rola technologii w gwarantowaniu bezpieczeństwa żywnościowego rośnie wraz z jej rozwojem. W innym badaniu opartym na danych panelowych dla 15 krajów Afryki Zachodniej, obejmującym lata 2005–2018, Anser i in. (2021) zbadali wpływ wykorzystania ICT oraz sprawności administracji rządowej na bezpieczeństwo żywnościowe. Wyniki pokazały, że nie tylko ICT są instrumentem poprawy bezpieczeństwa żywnościowego – również sprawnie działająca administracja i niski poziom korupcji mają silny pozytywny wpływ w tym zakresie.

Ejemeyovwi i in. (2021) zbadali związek między bezpieczeństwem żywnościowym w Nigerii a wykorzystaniem ICT, posługując się danymi na poziomie gospodarstw domowych. Bezpieczeństwo żywnościowe potraktowano jako zmienną binarną, a stopień przyjęcia ICT mierzono poprzez korzystanie z telefonów komórkowych przez gospodarstwa domowe. Wyniki wskazały, że wykorzystanie ICT poprawia bezpieczeństwo żywnościowe jedynie w gospodarstwach prowadzonych przez mężczyzn, a nie w tych prowadzonych przez kobiety. W podobnym badaniu dotyczącym Ugandy Picho i in. (2018) zbadali wpływ korzystania z ICT na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych. Ustalono, że 18,2% gospodarstw domowych w regionie wykorzystywało narzędzia ICT do pozyskiwania informacji o bezpieczeństwie żywnościowym, a działania te miały pozytywny wpływ na status bezpieczeństwa, poprawiając je o 38%. Zbliżone wyniki potwierdzające pozytywny wpływ ICT na bezpieczeństwo żywnościowe w Afryce Subsaharyjskiej uzyskali Hudson i in. (2017).

Methodology and Data

The current study aims to investigate the impact of meteorological factors on Pakistan's food security in a cross-sectional data study for the years 2019–2020. The general form of the model is written as:

$$FS = f(MF, ICT, (MF \times ICT), X_i, \varepsilon_i) \quad (1)$$

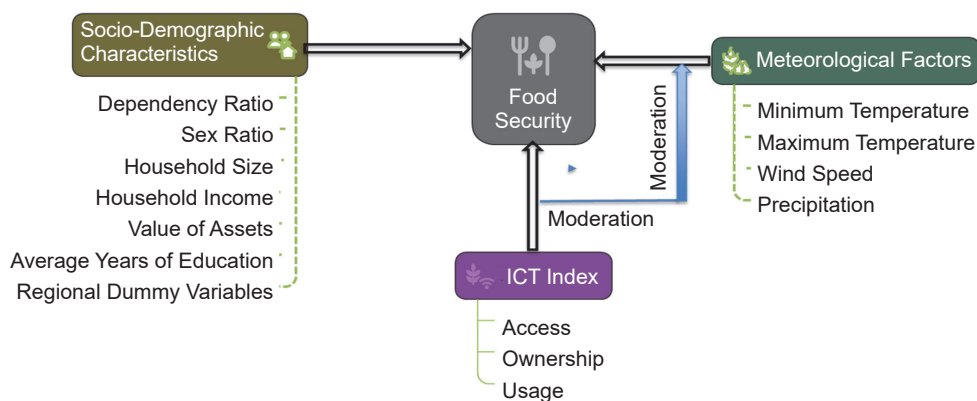
FS is food security, *MF* is the vector of Meteorological factors containing *CDD*, *HDD*, *AP*, and *WS*; *ICT* is Information and Communication Technology, and *MF* × *ICT* is the interaction term of meteorological factors and *ICT*. *X_i* represents control variables. The conceptual model of the study is given as follows:

Metodologia i dane

Niniejsze opracowanie ma na celu zbadanie wpływu czynników meteorologicznych na bezpieczeństwo żywnościowe Pakistanu w oparciu o dane przekrojowe za lata 2019–2020. Ogólna postać modelu przyjmuje postać wyrażenia:

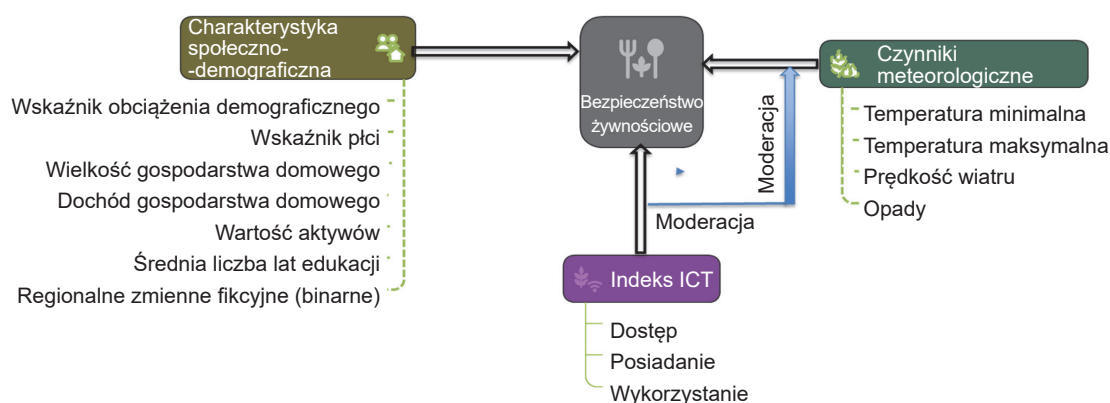
FS oznacza bezpieczeństwo żywnościowe, *MF* to wektor czynników meteorologicznych obejmujący *CDD*, *HDD*, *AP* i *WS*; *ICT* oznacza technologie informacyjno-komunikacyjne, a *MF* × *ICT* to wyraz interakcji tych czynników. *X_i* reprezentuje zmienne kontrolne. Model koncepcyjny badania przedstawia się następująco:

Figure 1. Conceptual Model



Source: authors' own study.

Rysunek 1. Model koncepcyjny



Źródło: opracowanie własne autorów.

Based on the conceptual model, the baseline model of the study is given as follows:

Na podstawie modelu koncepcyjnego model bazowy badania sformułowano następująco:

$$\begin{aligned}
 FS_{ij} = & \alpha_0 + \alpha_1 CDD_{1j} + \alpha_2 HDD_{2j} + \alpha_3 AP_{3j} + \alpha_4 WS_{4j} + \alpha_5 ICT_{ij} + \alpha_6 (ICT_{ij} \times \\
 & CDD_{1j}) + \alpha_7 (ICT_{ij} \times HDD_{2j}) + \alpha_8 (ICT_{ij} \times AP_{3j}) + \alpha_9 (ICT_{ij} \times WS_{4j}) + \alpha_{10} DR_{ij} + \\
 & \alpha_{11} SR_{ij} + \alpha_{12} HS_i + \alpha_{13} HI_i + \alpha_{14} VA_i + \alpha_{15} Edu_i + \alpha_{16} D_{1i} + \alpha_{17} D_{2i} + \alpha_{18} D_{3i} + \alpha_{19} D_{4i} + \varepsilon_i
 \end{aligned} \quad (2)$$

where: ij refers to the i^{th} household of j^{th} district of Pakistan. FS is our dependent variable representing household food security. It is calculated using the Food Insecurity Experience Scale (FIES), however, the scoring is reversed, where a high score shows higher food security. The independent variables include meteorological factors (CDD , HDD , AP , and WS), namely cooling degree days, heating degree days, precipitation, and wind speed, respectively, which are measured at the district level. ICT is Information and Communication Technology, DR is the age dependency ratio, SR is the sex ratio, HS is household size, HI is household income, and VA is the value of assets, while Edu is the average education of the household. Finally, D_{1-4} represent dummy variables of the model (see Table 1 for a detailed description of variables), and ε_i is the error term. The model is estimated separately for each climatic zone, including dry, temperate/continental, and tropical zones, which encompass several districts. The variant of the model for the climatic zone is presented as follows:

gdzie: ij odnosi się do i -tego gospodarstwa domowego w j -tym dystrykcie Pakistanu. FS jest zmienną zależną reprezentującą bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstwa domowego. Obliczono ją przy użyciu skali doświadczenia braku bezpieczeństwa żywnościowego (FIES), przy czym punktację odwrócono, tak aby wysoki wynik oznaczał wyższe bezpieczeństwo żywnościowe. Zmienne niezależne obejmują czynniki meteorologiczne (CDD , HDD , AP i WS), czyli odpowiednio stopniodni chłodzenia, stopniodni grzania, opady i prędkość wiatru, mierzone na poziomie dystryktu. ICT to technologie informacyjno-komunikacyjne, DR to wskaźnik obciążenia demograficznego, SR to wskaźnik płci, HS to wielkość gospodarstwa domowego, HI to dochód gospodarstwa, VA to wartość aktywów, a Edu to średnie wykształcenie w gospodarstwie. Ponadto D_{1-4} reprezentują zmienne fikcyjne (binarne) modelu (szczegółowy opis zmiennych znajduje się w tabeli 1), a ε_i jest składnikiem losowym. Model szacowany jest oddzielnie dla każdej strefy klimatycznej, w tym strefy suchej, umiarkowanej/kontynentalnej i tropikalnej, które obejmują po kilka dystryktów. Wariant modelu dla stref klimatycznych przedstawia się następująco:

$$\begin{aligned}
 FS_{ijc} = & \beta_{0c} + \beta_{1c}CDD_{1jc} + \beta_{2c}HDD_{2jc} + \beta_{3c}AP_{3jc} + \beta_{4c}WS_{4jc} + \beta_{5c}ICT_{ijc} \\
 & + \beta_{6c}(ICT_{ijc} \times CDD_{1jc}) + \beta_{7c}(ICT_{ijc} \times HDD_{2jc}) + \beta_{8c}(ICT_{ijc} \times AP_{3jc}) \\
 & + \beta_{9c}(ICT_{ijc} \times WS_{4jc}) + \beta_{10c}DR_{ijc} + \beta_{11c}SR_{ijc} + \beta_{12c}HS_{ic} + \beta_{13c}HI_{ic} \\
 & + \beta_{14c}VA_{ic} + \beta_{15c}Edu_{ic} + v_{ic}
 \end{aligned} \quad (3)$$

where: c represents climatic zones. The dry climatic zone experiences significant temperature fluctuations, whereas the temperate and continental climatic zones experience distinct seasons with variations in temperature throughout the year. Lastly, the tropical zone is characterized by consistently high temperatures and high humidity throughout the year. The moderating variable in Equation 3, ICT is a multidimensional variable; hence, included in the regression as an index. The ICT index was constructed using Principal Component Analysis (PCA) on seven standardized indicators related to digital access and usage. The steps of construction are given as follows. To construct the ICT Index, PCA was applied to seven observed variables representing different dimensions of household ICT access and usage: ICT1 – ownership of digital devices, ICT2 – degree of use, ICT3 – access to internet, ICT4 – use of internet, ICT5 – frequency of internet use, ICT6 – social and educational use of digital devices, and ICT7 – social and educational use of the internet. The variables were first standardized to ensure comparability.

PCA was conducted to reduce dimensionality and extract uncorrelated linear combinations (principal components) of the variables. The general form of the i^{th} principal component is given as follows:

$$PC_i = \alpha_{i1}ICT_1 + \alpha_{i2}ICT_2 + \dots + \alpha_{i7}ICT_7$$

where: α_{ij} denotes the loading of the variable j on the component i . Components with eigenvalues greater than one were retained, based on the Kaiser criterion. In this study, three such components were selected.

Each component was weighted by its proportion of variance explained. The composite ICT Index was constructed as the weighted sum of the retained components as follows:

gdzie: c oznacza strefy klimatyczne. Sucha strefa klimatyczna charakteryzuje się znacznymi wahaniami temperatury, podczas gdy strefy umiarkowana i kontynentalna cechują się wyraźnymi porami roku ze zmianami temperatury w ciągu roku. Natomiast strefa tropikalna charakteryzuje się stale wysokimi temperaturami i wysoką wilgotnością przez cały rok. Zmienna moderująca w równaniu 3, czyli ICT, jest wielowymiarowa, dlatego włączono ją do regresji w formie indeksu. Indeks ICT skonstruowano przy użyciu analizy głównych składowych (PCA) na podstawie siedmiu standaryzowanych wskaźników dotyczących dostępu do technologii cyfrowych i ich wykorzystania. Etapy konstrukcji przedstawiono poniżej. Aby skonstruować indeks ICT, zastosowano metodę PCA w odniesieniu do siedmiu zmiennych obserwowanych, reprezentujących różne wymiary dostępu do ICT i korzystania z nich: ICT1 – posiadanie urządzeń cyfrowych, ICT2 – stopień wykorzystania, ICT3 – dostęp do Internetu, ICT4 – korzystanie z Internetu, ICT5 – częstotliwość korzystania z Internetu, ICT6 – społeczne i edukacyjne wykorzystanie urządzeń cyfrowych oraz ICT7 – społeczne i edukacyjne korzystanie z Internetu. Zmienne zostały najpierw poddane standaryzacji w celu zapewnienia porównywalności.

Przeprowadzono analizę PCA w celu zmniejszenia wymiarowości i wyodrębnienia nieskorelowanych kombinacji liniowych (głównych składowych) zmiennych. Ogólna postać i -tej głównej składowej jest następująca:

gdzie: α_{ij} oznacza ładunek zmiennej j na składowej i . Na podstawie kryterium Kaisera zachowano składowe o wartościach własnych większych od jedności. W niniejszym badaniu wybrano trzy takie składowe.

Każdej składowej przypisano wagę odpowiadającą wyjaśnianej przez nią części wariancji. Złożony indeks ICT skonstruowano jako sumę ważoną zachowanych składowych w następujący sposób:

$$ICT\ index = w_1 PC_1 + w_2 PC_2 + w_3 PC_3$$

where:

gdzie:

$$w_j = \frac{\text{Variance Explained by } PC_j}{\sum \text{Variance Explained by retained PCs}}$$

$$w_j = \frac{\text{wariancja wyjaśniana przez } PC_j}{\sum \text{wariancja wyjaśniana przez zachowane główne składowe (PC)}}$$

To enhance interpretability and comparability, the ICT Index was normalized to lie between 0 and 1 using min–max normalization:

Aby zwiększyć interpretowalność i porównywalność, indeks ICT znormalizowano do przedziału od 0 do 1 przy użyciu normalizacji min–max:

$$\text{Normalized Index} = \frac{ICT\ Index - \min (ICT\ Index)}{\max (ICT\ Index) - \min (ICT\ Index)}$$

$$\text{Znormalizowany indeks} = \frac{\text{Indeks ICT} - \min (\text{indeks ICT})}{\max (\text{indeks ICT}) - \min (\text{indeks ICT})}$$

This ensured that higher values indicate greater levels of ICT access and usage across households. The Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) Measure of Sampling Adequacy was 0.763, indicating that the sample was appropriate for PCA. Bartlett's Test of Sphericity was highly significant ($\chi^2 = 354.41$ with $p < 0.001$), confirming that the correlation matrix was not an identity matrix and thus suitable for factor extraction.

Equation 4 calculates the total effect of meteorological factors on FS for the baseline model using the following formulas:

Dzięki temu wyższe wartości wskazują na większy dostęp do ICT i większe wykorzystanie tych technologii w gospodarstwach domowych. Miara adekwatności doboru próby Kaisera–Meyera–Olkina (KMO) wyniosła 0,763, co wskazuje, że próba była odpowiednia do analizy PCA. Test sferyczności Bartletta okazał się wysoce istotny ($\chi^2 = 354,41$ przy $p < 0,001$), co potwierdza, że macierz korelacji nie była macierzą jednostkową, a zatem nadawała się do wyodrębnienia czynników.

Równanie 4 pozwala na obliczenie całkowitego wpływu czynników meteorologicznych na bezpieczeństwo żywnościowe (FS) dla modelu bazowego przy użyciu następujących wzorów:

$$\frac{\partial FS_{ij}}{\partial MF_{ij}} = \alpha_m + \alpha_k \times ICT_i \quad (4)$$

where: $k = 6, 7, 8, 9$ retrieved from Equation 2.

gdzie: $k = 6, 7, 8, 9$ pochodzą z równania 2.

Equation 5 calculates the total effect of meteorological factors on FS for the variant of models constructed for different climatic zones:

Równanie 5 pozwala na obliczenie całkowitego wpływ czynników meteorologicznych na FS dla wariantu modeli skonstruowanych dla poszczególnych stref klimatycznych.

$$\frac{\partial FS_{ijc}}{\partial MF_{ijc}} = \beta_{mc} + \beta_{kc} \times ICT_i \quad (5)$$

where: c represents the climatic zone and $m = 6, 7, 8, 9$ retrieved from Equation 3.

The total effect is then decomposed into direct and moderated effects and presented in Table 1.

gdzie: c reprezentuje strefę klimatyczną, a $m = 6, 7, 8, 9$ pochodzą z równania 3.

Całkowity efekt rozłożono następnie na efekty bezpośrednie i moderowane, co przedstawiono w tabeli 1.

Table 1. Decomposition of the Effect of MF on FS**Tabela 1. Rozkład wpływu czynników meteorologicznych (MF) na bezpieczeństwo żywnościowe (FS)**

Baseline Model / Model bazowy				
Meteorological Variable / Zmienna meteorologiczna	Direct Effect (DE) / Efekt bezpośredni (DE)	Moderating Effect (ME) / Efekt moderujący (ME)	Total Effect (TE) / Efekt całkowity (TE)	Mitigation through ICT / Łagodzenie przez ICT
CDD	α_1	$\alpha_6 \times ICT$	$\alpha_1 + \alpha_6 \times ICT$	TE < DE
HDD	α_2	$\alpha_7 \times ICT$	$\alpha_2 + \alpha_7 \times ICT$	TE < DE
AP	α_3	$\alpha_8 \times ICT$	$\alpha_3 + \alpha_8 \times ICT$	TE < DE
WS	α_4	$\alpha_9 \times ICT$	$\alpha_4 + \alpha_9 \times ICT$	TE < DE
A variant of Model for Climatic Zone / Wariant modelu dla strefy klimatycznej				
CDD	β_{1c}	$\beta_{6c} \times ICT$	$\beta_{1c} + \beta_{6c} \times ICT$	TE > DE
HDD	β_{2c}	$\beta_{7c} \times ICT$	$\beta_{2c} + \beta_{7c} \times ICT$	TE > DE
AP	β_{3c}	$\beta_{8c} \times ICT$	$\beta_{3c} + \beta_{8c} \times ICT$	TE > DE
WS	β_{4c}	$\beta_{9c} \times ICT$	$\beta_{4c} + \beta_{9c} \times ICT$	TE > DE

Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne autorów.

These effects are analyzed to examine the following propositions:

1. If the direct effect is negative ($\beta_m > 0$ and $\alpha_m > 0$), meteorological stressors reduce households' food security, we will accept the hypothesis 1.
2. If the moderating effect is positive for FS and ($\beta_{kc} \times ICT < 0$ and $\alpha_{kc} \times ICT > 0$), households use ICT for mitigating the impact of meteorological factors to ensure food security, we will accept the hypothesis 2.

The inclusion of control variables in the Equation 2 is justified on strong theoretical and empirical underpinnings. Household income is another important variable that affects food security. Households with high levels of income can afford to buy enough food full of nutrients, whereas people with lower incomes might be forced to skip meals completely or rely on less expensive and low-nutritious food. The age dependency ratio is another control variable adversely impacting household food security. Because the greater number of unemployed people in a household decreases the amount of food consumed per person (Akbar et al., 2020). As far as the impact of education on food security is concerned, a higher level of education correlates with greater earnings and a lower chance of food insecurity. Parveen et al. (2021) placed education as social capital and showed that it enhances the household's ability to make informed decisions about production and nutrition. Moreover, household size has a direct impact

Efekty te poddano analizie w celu weryfikacji następujących tez:

1. Jeśli efekt bezpośredni jest ujemny ($\beta_m > 0$ oraz $\alpha_m > 0$), a stresory meteorologiczne obniżają bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych, przyjmujemy hipotezę 1.
2. Jeśli efekt moderujący jest dodatni dla FS oraz ($\beta_{kc} \times ICT < 0$ i $\alpha_{kc} \times ICT > 0$), a gospodarstwa domowe wykorzystują ICT do łagodzenia wpływu czynników meteorologicznych w celu zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego, przyjmujemy hipotezę 2.

Włączenie zmiennych kontrolnych do równania 2 jest uzasadnione silnymi przesłankami teoretycznymi i empirycznymi. Kolejną istotną zmienną wpływającą na bezpieczeństwo żywnościowe jest dochód gospodarstwa domowego. Gospodarstwa o wysokich dochodach mogą pozwolić sobie na zakup wystarczającej ilości pełnowartościowej żywności, podczas gdy osoby o niższych dochodach mogą być zmuszone do pomijania posiłków lub polegania na tańszej, mniej wartościowej żywności. Kolejną zmienną kontrolną negatywnie wpływającą na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstwa domowego jest wskaźnik obciążenia demograficznego. Większa liczba osób niepracujących w gospodarstwie domowym przekłada się bowiem na mniejszą ilość spożywanej żywności w przeliczeniu na osobę (Akbar i in., 2020). Jeśli chodzi o wpływ edukacji, wyższy poziom wykształcenia koreluje z wyższymi zarobkami i mniejszym ryzykiem braku bezpieczeństwa żywnościowego. Parveen i in. (2021) uznali edukację za kapitał społeczny i wykazali,

on food security as families with large household members usually need more food, which can burden their limited budget, especially if those households belong to low-income families.

The study has taken data from the Pakistan Social and Living Standard Measurement (PSLM) Survey 2019–2020. The sample size comprises 160 654 households from urban and rural areas across each province, covering different districts (the list of districts used in the analysis is given in Table A1 in the Appendix). The dependent variable of food security is measured by the Food Insecurity Experiences Scale (FIES), which ranges between 0 and 8. The data for meteorological factors, including HDD, CDD, WS, and AP, have been taken from the NASA POWER website (for details on variables and data sources, see Table 2). For estimation, Ordinary Least Squares (OLS) regression analysis and the quantile regression framework have been employed to examine the relationship between food security and its determinants. To explore the heterogeneous effects of climatic variables and ICT access on food security across different levels of climatic vulnerability, the study employed quantile regression in addition to the baseline OLS model. While average effects are calculated through OLS, it is also important to examine how climatic stressors and ICT infrastructure may affect food-insecure households (lower quantiles) differently than relatively secure ones (upper quantiles). Quantile regression estimates the conditional effects of predictors at various quantiles of the dependent variable, thus capturing nonlinearities and heteroskedasticity without requiring polynomial terms. The presence of heteroskedasticity in the baseline OLS (see Table 5) is validated using the Koenker–Bassett (KB) test (where KB is an appropriate test of heteroscedasticity useful when the relationship between variables differs across the distribution of the dependent variable) and the presence of heterogeneity is confirmed given a large sample size, both of which further justify the use of quantile regression. However, quantile regression has limitations. It assumes independence across quantiles and does not provide a global goodness-of-fit statistic like R^2 in OLS. Additionally, inference across quantiles may become sensitive in smaller subsamples, and model interpretation can be complex when interaction terms are present. Despite these caveats, quantile regression provides an analytically efficient framework specifically for this study to identify which segments of the population are most vulnerable to climate shocks and how ICT may serve as a resilience mechanism. Quantile regression is represented mathematically as:

że zwiększa ona zdolność gospodarstwa domowego do podejmowania świadomych decyzji dotyczących produkcji i żywienia. Ponadto bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe ma wielkość gospodarstwa domowego, ponieważ liczniejsze rodziny zazwyczaj potrzebują więcej żywności, co może obciążać ich ograniczony budżet, zwłaszcza w przypadku rodzin o niskich dochodach.

W badaniu wykorzystano dane z pakistańskiego badania standardów społecznych i życiowych (ang. *Pakistan Social and Living Standard Measurement*, PSLM) z lat 2019–2020. Próba obejmuje 160 654 gospodarstwa domowe z obszarów miejskich i wiejskich wszystkich prowincji, obejmując różne dystrykty (listę dystryktów uwzględnionych w analizie podano w tabeli A–1 w Aneksie). Pomiaru zmiennej zależnej, czyli bezpieczeństwa żywnościowego, dokonano za pomocą skali doświadczenia braku bezpieczeństwa żywnościowego (FIES), która przyjmuje wartości od 0 do 8. Dane dotyczące czynników meteorologicznych, w tym HDD, CDD, WS i AP, pobrano ze strony internetowej NASA POWER (szczegółowe informacje dotyczące zmiennych i źródeł danych znajdują się w tabeli 2). Do oszacowania relacji między bezpieczeństwem żywnościowym a jego determinantami wykorzystano analizę regresji metodą najmniejszych kwadratów (MNK) oraz regresję kwantylową. Aby zbadać niejednorodne skutki zmiennych klimatycznych i dostępu do ICT dla bezpieczeństwa żywnościowego na różnych poziomach wrażliwości klimatycznej, obok modelu bazowego MNK zastosowano regresję kwantylową. Podczas gdy MNK daje efekty średnie, istotne jest również zbadanie, jak stresory klimatyczne i infrastruktura ICT wpływają na gospodarstwa zagrożone brakiem bezpieczeństwa żywnościowego (dolne kwantyle) w porównaniu z tymi relatywnie bezpiecznymi (górne kwantyle). Regresja kwantylowa pozwala oszacować warunkowe efekty predyktorów dla różnych kwantyli zmiennej zależnej, wychwytyując nieliniowości i heteroskedastyczność bez konieczności stosowania składników wielomianowych. Obecność heteroskedastyczności w bazowym modelu MNK (zob. tab. 5) potwierdzono testem Koenkera–Bassetta (KB) (który jest odpowiednim testem heteroskedastyczności, przydatnym gdy relacje między zmiennymi różnią się w rozkładzie zmiennej zależnej), a obecność niejednorodności potwierdza duża liczebność próby, co dodatkowo uzasadnia użycie regresji kwantylowej. Ma ona jednak swoje ograniczenia. Zakłada niezależność między kwantylami i nie dostarcza globalnej statystyki dopasowania modelu, takiej jak R^2 w przypadku MNK. Dodatkowo wnioskowanie w poszczególnych kwantylach może stać się wrażliwe w mniejszych

podpróbach, a interpretacja modelu może być złożona w przypadku obecności składników interakcji. Mimo tych zastrzeżeń regresja kwantylowa stanowi analitycznie wydajne ramy, szczególnie dla tego badania, pozwalając zidentyfikować segmenty populacji najbardziej narażone na wstrząsy klimatyczne oraz sposób, w jaki ICT może służyć jako mechanizm odporności. Regresję kwantylową przedstawia się matematycznie jako:

$$Q_y\left(\frac{\tau}{X}\right) = X'\beta(\tau)$$

where: $Q_y\left(\frac{\tau}{X}\right)$ is the conditional τ^{th} quantile of the dependent variable Y (FS) given covariates X , $\beta(\tau)$ vector of quantile-specific coefficients, $\tau \in (0,1)$ indicates the quantile level (e.g. 0.25, 0.50, 0.75). This approach captures variation across the distribution of FS, identifying differential effects among the lower, middle, and upper levels of food security.

gdzie: $Q_y\left(\frac{\tau}{X}\right)$ jest warunkowym τ -tym kwantylem zmiennej zależnej Y (FS) dla zmiennych objaśniających X , $\beta(\tau)$ jest wektorem współczynników specyficznych dla danego kwantyla, $\tau \in (0,1)$ oznacza poziom kwantyla (np. 0,25, 0,50, 0,75). Podejście to pozwala uchwycić zmienność w rozkładzie FS, identyfikując zróżnicowane efekty dla niskiego, średniego i wysokiego poziomu bezpieczeństwa żywnościowego.

Table 2. Description of Variables and Data Sources

Variables	Description	Data Source
Cooling degree days (CDD)	Cooling degree days measure the external temperature rise over a base temperature, which shows how much cooling energy is needed when it is hot outside.	NASA POWER website
Heating degree days (HDD)	Heating degree days measure the extent to which outside temperatures drop below a base temperature, which shows how much heating energy is needed during cold weather.	
Precipitation (AP)	Any type of water, whether liquid or solid, that drops from the atmosphere and hits the earth is called precipitation.	
Wind speed (WS)	The rate at which winds blow horizontally past a location is known as wind speed. It is measured by units like kilometres per hour and miles per hour.	
Food security	Food security is measured by the Food Insecurity Experience Scale (FIES) on a scale of 0–8. The coding of the scale has been reversed, with 8 showing the highest food security.	PSLM (2019–2020)
Information and communication technology (ICT)	ICT is measured by the different questions related to households' ownership, access, and usage of computers, laptops, mobile phones, and the Internet. Ownership is measured by the count of owned devices, such as mobile, landline, computer, laptop, and tablet. While access is measured by type and number of internet connections. Finally, usage is measured by internet and device use, frequency of use, and purpose of use. All these indicators of ICT are standardized and converted into an index using Principal Component Analysis (PCA). The normalized form of the index is then used in regression.	
Age dependency ratio	The age dependency ratio measures the proportion of dependent individuals younger than 15 or older than 64, as a ratio to the working-age population.	
Sex ratio	The male-to-female ratio in a given household is known as the sex ratio.	
Household size	Number of people living in a house.	
Household income	Household income is the total income of a household from all sources over a specific period.	
Assets value	The value of assets shows the monetary worth of owned resources, including property, etc.	
Average Education	The average education of a household refers to the combined educational attainment of all individuals living in that household. This is calculated by the mean number of years of formal education the household members complete.	
D_{1i}	Dummy for region (1 = urban)	
D_{2i}	Dummy for province (1 = KPK)	
D_{3i}	Dummy for province (1 = Punjab)	
D_{4i}	Dummy for province (1 = Sindh)	

Source: authors' own study.

Tabela 2. Opis zmiennych i źródła danych

Zmienne	Opis	Źródło danych
Stopniodni chłodzenia (CDD)	Stopniodni chłodzenia wyrażają wzrost temperatury zewnętrznej powyżej temperatury bazowej, wskazując, ile energii chłodniczej potrzeba, gdy na zewnątrz jest gorąco.	Strona internetowa NASA POWER
Stopniodni grzania (HDD)	Stopniodni grzania wyrażają stopień spadku temperatury zewnętrznej poniżej temperatury bazowej, wskazując, ile energii grzewczej potrzeba podczas zimnej pogody.	
Opady (AP)	Opadem nazywany jest każdy rodzaj wody, w stanie ciekłym lub stałym, który spada z atmosfery i uderza w ziemię.	
Prędkość wiatru (WS)	Prędkość wiatru określana jest jako prędkość, z jaką wiatr wieje w poziomie w danym miejscu. Mierzona jest w jednostkach takich jak kilometry na godzinę czy mile na godzinę.	
Bezpieczeństwo żywnościowe	Bezpieczeństwo żywnościowe mierzone jest za pomocą skali doświadczenia braku bezpieczeństwa żywnościowego (FIES) i przyjmuje wartości od 0 do 8. Kodowanie skali zostało odwrócone: 8 oznacza najwyższe bezpieczeństwo żywnościowe.	PSLM (2019–2020)
Technologie informacyjno-komunikacyjne (ICT)	Wykorzystanie ICT mierzy się za pomocą różnych pytań dotyczących posiadania komputerów, laptopów, telefonów komórkowych dostępu do nich i wykorzystania ich, oraz dostępu do Internetu i korzystania z niego przez gospodarstwa domowe. Posiadanie mierzy się liczbą posiadanych urządzeń, takich jak telefon komórkowy, stacjonarny, komputer, laptop i tablet. Z kolei dostęp mierzy się rodzajem i liczbą łączy internetowych. Wykorzystanie określa się na podstawie używania Internetu i urządzeń, częstotliwości korzystania oraz celu użycia. Wszystkie te wskaźniki ICT są standaryzowane i przekształcane w indeks za pomocą analizy głównych składowych (PCA). Znormalizowana postać indeksu jest następnie wykorzystywana w regresji.	
Wskaźnik obciążenia demograficznego	Wskaźnik obciążenia demograficznego wyraża udział osób pozostających na utrzymaniu w wieku poniżej 15 lat lub powyżej 64 lat w stosunku do populacji w wieku produkcyjnym.	
Wskaźnik płci	Wskaźnikiem płci nazywany jest stosunek liczby mężczyzn do kobiet w danym gospodarstwie domowym.	
Wielkość gospodarstwa domowego	Liczba osób mieszkających w gospodarstwie.	
Dochód gospodarstwa domowego	Dochód gospodarstwa domowego to całkowity dochód gospodarstwa ze wszystkich źródeł w określonym czasie.	
Wartość aktywów	Wartość aktywów oznacza pieniężną wartość posiadanych zasobów, w tym nieruchomości itp.	
Średnie wykształcenie	Średnie wykształcenie gospodarstwa domowego odnosi się do łącznego poziomu wykształcenia wszystkich osób w nim mieszkających. Oblicza się je jako średnią liczbę lat edukacji formalnej ukończonej przez członków gospodarstwa.	
D_{1i}	Zmienna fikcyjna dla regionu (1 = miejski)	
D_{2i}	Zmienna fikcyjna dla prowincji (1 = KPK)	
D_{3i}	Zmienna fikcyjna dla prowincji (1 = Pendżab)	
D_{4i}	Zmienna fikcyjna dla prowincji (1 = Sindh)	

Źródło: opracowanie własne autorów.

The descriptive statistics of variables, including mean, standard deviation, minimum, and maximum values, are presented in Table 3. Table 4 reports the frequencies of categorical/dummy variables. The statistics show that 68.9% of households resided in rural areas. The provincial demographics show that around 17.8% of respondents are living in KPK, while 49.6 % of people belong to Punjab, 32.1% of households reside in Sindh, and 9.5% of respondents are living in Baluchistan province.

Statystyki opisowe zmiennych, w tym średnią, odchylenie standardowe oraz wartości minimalne i maksymalne, przedstawiono w tabeli 3. Tabela 4 przedstawia liczebności zmiennych kategorialnych/fikcyjnych. Statystyki pokazują, że 68,9% gospodarstw domowych znajdowało się na obszarach wiejskich. Na podstawie dane demograficznych dla prowincji można stwierdzić, że około 17,8% respondentów mieszka w Chajber Pasztunchwa (KPK), 49,6% pochodzi z Pendżabu, 32,1% osób zamieszkuje Sindh, a 9,5% respondentów zamieszkuje Beludżystan.

Table 3. Descriptive Statistics of Variables**Tabela 3. Statystyki opisowe zmiennych**

Variables / Zmienne	Obs. / Obs.	Mean / Średnia	Std. Dev. / Odch. std.	Min / Min.	Max / Maks.
Food Security / Bezpieczeństwo żywnościowe	160,654	6.6	2.10	0	8
CDD	160,658	4.2	2.00	0	7.08
HDD	160,658	0.7	1.79	0	14.02
WS	160,658	2.9	0.74	1.66	5.01
AP	160,658	1.4	0.72	0.20	3.08
ICT	160,653	0.02	0.03	0	1
Age dependency ratio / Wskaźnik obciążenia demograficznego	160,654	0.9	0.88	0	9
Household size / Wielkość gospodarstwa domowego	160,654	6	3	1	42
Sex ratio / Wskaźnik płci	160,654	1.1	0.91	0	10
Household income (000) / Dochód gospodarstwa domowego (tys.)	160,654	51.5	239.925	0	5.00e + 04
Average education / Średnie wykształcenie	160,654	4	3.4	0	21

Source: own calculations based on the data of PSLM 2019–2020.

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych PSLM 2019–2020.

Table 4. Frequency Distribution of Categorical Variables**Tabela 4. Rozkład częstości zmiennych kategorialnych**

Variables / Zmienne	Frequency / Częstość	Percentage / Procent
Urban / Miejskie	49,982	31.11
Rural / Wiejskie	110,674	68.89
KPK / KPK	28,633	17.82
Punjab / Pendżab	79,676	49.59
Sindh / Sindh	37,106	23.10
Baluchistan / Beludżystan	15,241	9.49

Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne autorów.

Results and Discussions

Results of OLS Regression

Table 5 presents the results of the regression analysis. The model is estimated at the national level and disaggregated by different climatic zones. All the models are overall significant at the one percent level of significance as confirmed by the F-Statistics. The standard errors are robust and corrected for heteroscedasticity. The correlation matrix presented in appendix does not reveal the presence of multicollinearity while Durbin–Wu test for endogeneity reveal that ICT is exogenous. At the national level, all meteorological variables have significant negative effects on food security. Specifically, increases in CDD and HDD reduce food security by 0.055 and 0.057 units, respectively,

Wyniki i ich omówienie

Wyniki regresji metodą najmniejszych kwadratów (MNK)

Tabela 5 przedstawia wyniki analizy regresji. Model oszacowano na poziomie krajowym oraz w podziale na poszczególne strefy klimatyczne. Wszystkie modele są ogólnie istotne na poziomie jednego procenta, co potwierdzają statystyki F. Błędy standardowe są solidne i skorygowane o heteroskedastyczność. Macierz korelacji przedstawiona w dodatku nie wykazuje występowania współliniowości, a test Durbin–Wu na endogeniczność ujawnia, że ICT ma charakter egzogeny. Na poziomie krajowym wszystkie zmienne meteorologiczne mają istotny negatywny wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe. W szczególności wzrosty CDD i HDD obniżają bezpieczeństwo

indicating that both heat and cold stress undermine food security. This finding is consistent with prior studies showing that temperature extremes reduce crop yields, disrupt food supply chains, and increase food insecurity, especially among vulnerable populations (Wheeler & von Braun, 2013; Ahmed et al., 2023). Similarly, higher precipitation and wind speed are associated with lower food security (-0.124 and -0.178 , respectively), aligning with evidence that excessive rainfall and wind events can cause flooding, crop damage, and infrastructure disruptions (Iqbal et al., 2018).

The adverse effects of CDD, HDD, AP, and WS are most pronounced in dry zones, with CDD and AP each having a coefficient of -0.288 . This increased sensitivity is expected, as arid regions are particularly vulnerable to temperature and precipitation variability due to limited water resources and fragile agroecosystems. Wind speed also has a strong negative effect, consistent with literature noting the destructive impact of wind erosion and dust storms in dry lands.

The negative effects of meteorological variables remain significant but are generally less severe in temperate and continental regions. For instance, CDD and HDD coefficients are -0.060 and -0.086 , respectively. The milder impacts may be attributed to more resilient agricultural systems, diversified livelihoods, and better infrastructure in these regions (Vermeulen et al., 2012). However, wind speed still poses a significant threat, reflecting vulnerability to wind-related crop losses (Thornton et al., 2014).

The strongest negative effects are observed in tropical zones, especially for wind speed and precipitation. Tropical regions are highly sensitive to climate extremes, with smallholder farmers and poor households suffering the most from heat stress, crop failure, and storm events (Ali et al., 2017). The steep negative slopes for CDD and HDD highlight the acute vulnerability of food-insecure households in these climates.

ICT access is consistently associated with improved food security across all zones, with the strongest effect in tropical areas (0.479) and at the national level (1.304). This supports findings that ICT facilitates access to climate information, early warnings, and adaptive agricultural practices, thereby enhancing food system resilience (Asfaw et al., 2019).

The interaction terms between ICT and meteorological variables reveal important mitigation effects. Nationally, ICT significantly moderates the negative impacts of CDD (0.342), HDD (0.401), and PR (0.151), suggesting that digital connectivity enables households to better anticipate and adapt to temperature and rainfall shocks (Sarkar et al., 2016).

żywnościowe odpowiednio o $0,055$ i $0,057$ jednostki, co wskazuje, że zarówno stres cieplny, jak i stres z powodu zimna osłabiają to bezpieczeństwo. Wynik ten jest zgodny z wcześniejszymi badaniami, które wykazały, że ekstremalne temperatury zmniejszają plony, zakłócają łańcuchy dostaw żywności i zwiększają brak bezpieczeństwa żywnościowego, zwłaszcza wśród wrażliwych populacji (Wheeler i von Braun, 2013; Ahmed i in., 2023). Podobnie wyższe opady i prędkość wiatru wiążą się z niższym bezpieczeństwem żywnościowym (odpowiednio $-0,124$ i $-0,178$), co pokrywa się z dowodami, że nadmierne opady i wiatr mogą powodować powodzie, zniszczenia upraw i uszkodzenia infrastruktury (Iqbal i in., 2018).

Niekorzystne skutki CDD, HDD, AP i WS są najbardziej widoczne w strefach suchych, gdzie zarówno dla CDD, jak i AP współczynnik wynosi $-0,288$. Ta zwiększona wrażliwość jest spodziewana, ponieważ regiony suche są szczególnie podatne na zmienność temperatury i opadów ze względu na ograniczone zasoby wodne i delikatne agroekosystemy. Prędkość wiatru ma również silny negatywny wpływ, co jest zgodne z literaturą, wskazującą na destrukcyjny wpływ erozji wietrznej i burz piaskowych na terenach suchych.

W regionach umiarkowanych i kontynentalnych negatywne skutki zmiennych meteorologicznych pozostają istotne, lecz są generalnie mniej dotkliwe. Na przykład współczynniki dla CDD i HDD wynoszą odpowiednio $-0,060$ i $-0,086$. Łagodniejsze skutki można przypisać bardziej odpornym systemom rolnym, zdywersyfikowanym źródłom utrzymania oraz lepszej infrastrukturze w tych regionach (Vermeulen i in., 2012). Jednak prędkość wiatru nadal stanowi istotne zagrożenie, odzwierciedlając podatność na straty w uprawach spowodowane wiatrem (Thornton i in., 2014).

Najsilniejsze negatywne skutki obserwuje się w strefach tropikalnych, szczególnie w przypadku prędkości wiatru i opadów. Regiony tropikalne są wysoce wrażliwe na ekstrema klimatyczne, przy czym drobni rolnicy i ubogie gospodarstwa domowe najbardziej cierpią z powodu stresu cieplnego, nieurodzaju i burz (Ali i in., 2017). Strome ujemne nachylenia dla CDD i HDD podkreślają silną podatność gospodarstw domowych zagrożonych brakiem bezpieczeństwa żywnościowego w tych warunkach klimatycznych.

Dostęp do ICT konsekwentnie wiąże się z poprawą bezpieczeństwa żywnościowego we wszystkich strefach, przy czym najsilniejszy efekt występuje w obszarach tropikalnych ($0,479$) i na poziomie krajowym ($1,304$). Potwierdza to ustalenia, że ICT ułatwia dostęp do informacji dotyczących klimatu,

In dry and temperate/continental zones, positive and significant interactions indicate that ICT completely mitigates the adverse effects of temperature extremes, likely by improving access to weather forecasts, agronomic advice, and market information (Bryan et al., 2013). In tropical zones, the interaction between ICT and CDD is negative and significant (-0.0273), possibly reflecting the overwhelming nature of heat stress in these regions, where even ICT-enabled adaptation may be insufficient. While the $ICT \times CDD$ coefficient is negative (-0.0273), its magnitude is notably smaller than the direct negative effect of CDD (-0.1483) on food security. This suggests that ICT access, although not fully offsetting the adverse impact of excessive heat (CDD), plays a moderating role by reducing its severity. Moreover, ICT still mitigates the negative effect of HDD ($ICT \times HDD = 0.132$; $HDD = -0.1808$) and offers complete protection against wind speed ($ICT \times WS = 0.0288$; $WS = -0.8111$).

The variation in effects across climatic zones is supported by literature emphasizing that climate impacts on food security are highly context-specific. Dry zones are more exposed to temperature and rainfall variability due to limited water and fragile soils. Temperate and continental regions benefit from greater infrastructure and diversification, moderating the impact of climate shocks (Vermeulen et al., 2012). Tropical zones, with their high exposure to extreme weather and socioeconomic vulnerability, experience the most severe food security impacts (Ali et al., 2017). The effectiveness of ICT as a mitigating factor also varies, being most pronounced where baseline vulnerability is high but can be overwhelmed in the face of extreme and frequent climatic hazards (Asfaw et al., 2019).

wczesnych ostrzeżeń i adaptacyjnych praktyk rolniczych, zwiększając tym samym odporność systemów żywnościowych (Asfaw i in., 2019).

Składniki interakcji między ICT a zmiennymi meteorologicznymi ujawniają istotne efekty łagodzące. W skali kraju ICT istotnie łagodzi negatywny wpływ CDD (0,342), HDD (0,401) i PR (0,151), co sugeruje, że łączność cyfrowa umożliwia gospodarstwom domowym lepsze przewidywanie wstrząsów temperaturowych i opadowych oraz przystosowanie się do nich (Sarkar i in., 2016). W strefach suchych oraz umiarkowanych/kontynentalnych dodatnie i istotne interakcje wskazują, że ICT całkowicie niweluje niekorzystne skutki ekstremalnych temperatur, prawdopodobnie poprzez poprawę dostępu do prognoz pogody, porad agronomicznych i informacji rynkowych (Bryan i in., 2013). W strefach tropikalnych interakcja między ICT a CDD jest ujemna i istotna ($-0,0273$), co może odzwierciedlać przytłaczający charakter stresu termicznego w tych regionach, gdzie nawet adaptacja wspierana przez ICT może być niewystarczająca. Chociaż współczynnik $ICT \times CDD$ jest ujemny ($-0,0273$), jego wartość jest znacznie niższa niż bezpośredni negatywny wpływ CDD ($-0,1483$) na bezpieczeństwo żywnościowe. Sugeruje to, że dostęp do ICT, choć nie w pełni równoważy niekorzystny wpływ nadmiernego ciepła (CDD), odgrywa rolę moderującą poprzez zmniejszenie jego dotkliwości. Ponadto ICT nadal łagodzi negatywny wpływ HDD ($ICT \times HDD = 0,132$; $HDD = -0,1808$) i zapewnia pełną ochronę przed prędkością wiatru ($ICT \times WS = 0,0288$; $WS = -0,8111$).

Różnice w skutkach w poszczególnych strefach klimatycznych potwierdzają publikacje podkreślające, że wpływ klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe jest w dużym stopniu uzależniony od konkretnego kontekstu. Strefy suche są bardziej narażone na zmienność temperatury i opadów ze względu na ograniczone zasoby wody i delikatne gleby. Regiony umiarkowane i kontynentalne korzystają z lepszej infrastruktury i dywersyfikacji, co łagodzi wpływ wstrząsów klimatycznych (Vermeulen i in. 2012). Strefy tropikalne, ze względu na wysoką ekspozycję na ekstremalne warunki pogodowe i wrażliwość społeczno-ekonomiczną, doświadczają najpoważniejszych skutków dla bezpieczeństwa żywnościowego (Ali i in., 2017). Skuteczność ICT jako czynnika łagodzącego również jest zróżnicowana, będąc najbardziej wyraźną tam, gdzie wyjściowa wrażliwość jest wysoka – może natomiast okazać się niewystarczająca w obliczu ekstremalnych i częstych zagrożeń klimatycznych (Asfaw i in., 2019).

Table 5. Regression Results on Determinants of Food Security**Tabela 5. Wyniki regresji dotyczące determinant bezpieczeństwa żywnościowego**

Variables / Zmienne	National level / Poziom krajowy	Dry / Suchy	Temperate and continental / Umiarkowany i kontynentalny	Tropical / Tropikalny
CDD _j	-0.055*** (0.005)	-0.2885*** (0.004)	-0.0600*** (0.006)	-0.1483*** (0.016)
HDD _j	-0.057*** (0.005)	-0.0883*** (0.011)	-0.0861*** (0.009)	-0.1808*** (0.022)
AP _j	-0.124*** (0.014)	-0.2880*** (0.005)	-0.0997*** (0.017)	-0.3145*** (0.035)
WS _j	-0.178*** (0.013)	-0.1773*** (0.012)	-0.1572*** (0.011)	-0.8111*** (0.037)
ICT _{ij}	1.304*** (0.772)	0.2082*** (0.032)	0.3893*** (0.028)	0.4794*** (0.093)
ICT _{ij} × CDD _j	0.342*** (0.0848)	0.0178** (0.008)	0.0366*** (0.005)	-0.0273*** (0.008)
ICT _{ij} × HDD _j	0.401*** (0.107)	0.1612** (0.092)	0.2842*** (0.091)	0.1320 (0.269)
ICT _{ij} × AP _j	0.151*** (0.051)	-0.0569 (0.142)	-0.1875 (0.138)	-0.0101*** (0.000)
ICT _{ij} × WS _j	-0.087 (0.229)	-0.0779 (0.007)	-0.0614*** (0.006)	0.0288* (0.016)
DR _i	-0.013* (0.006)	-0.01169 (0.008)	-0.0185** (0.007)	-0.0301* (0.017)
SR _i	-0.003*** (0.005)	-0.0020 (0.006)	0.0004 (0.006)	-0.0246* (0.012)
HS _i	0.008*** (0.002)	0.0056** (0.002)	0.0051** (0.002)	-0.0292*** (0.006)
HI _i	0.276*** (0.091)	0.2950*** (0.119)	0.3007*** (0.109)	-0.2153* (0.119)
VA _i	0.272*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.0072*** (0.001)	0.0035*** (0.001)
Edu _i	0.134*** (0.002)	0.1335*** (0.002)	0.1314*** (0.002)	0.1099*** (0.003)
D _{1i}	-0.076*** (0.012)	-0.2042*** (0.014)	-0.1240*** (0.014)	0.2500*** (0.028)
D _{2i}	0.313*** (0.027)	–	–	–
D _{3i}	0.150*** (0.025)	–	–	–
D _{4i}	0.171*** (0.025)	–	–	–
Constant	6.773*** (0.07)	6.6443*** (0.062)	6.6366*** (0.054)	9.3184*** (0.204)
R ²	0.070	0.0740	0.0686	0.0871
F-test / Test F	74 017***	701.99***	687.51***	267.34***
Obs. / Obs.	160,652	115,603	125,104	37,105
Durbin–Wu Test of Endogeneity (chi-square P value) / Test endogeniczności Durbina–Wu (wartość p chi-kwadrat)	0.218	1.262	0.19	1.355
KB test / Test KB Ho: No eteroscedasticity / Ho: Brak heteroskedastyczności	Chi-square / Chi-kwadrat: 3,218 (p = 0.000)	Chi-square / Chi-kwadrat: 450 (p = 0.000)	Chi-square / Chi-kwadrat: 733.61 (p = 0.000)	Chi-square / Chi-kwadrat: 593.60 (p = 0.000)

Note: *** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$; *** shows significance at 1%, ** shows significance at 5%, and * shows significance at 10%. Values in brackets show standard errors. The region dummy D1 is categorized as urban = 1 and 0 otherwise. Province dummies (KPK, Punjab, Sindh) categorized as 1 = living in that specific province, 0 = otherwise. /

Objaśnienia: *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$. *** oznacza istotność na poziomie 1%, ** oznacza istotność na poziomie 5%, a * oznacza istotność na poziomie 10%. () oznacza błędy standardowe. Zmienna fikcyjna regionu D1 jest kategoryzowana jako miejska = 1 i 0 w przeciwnym razie. Zmienne fikcyjne prowincji (KPK, Pendżab, Sindh) kategoryzowane jako 1 = zamieszkanie w danej prowincji, 0 = w przeciwnym razie

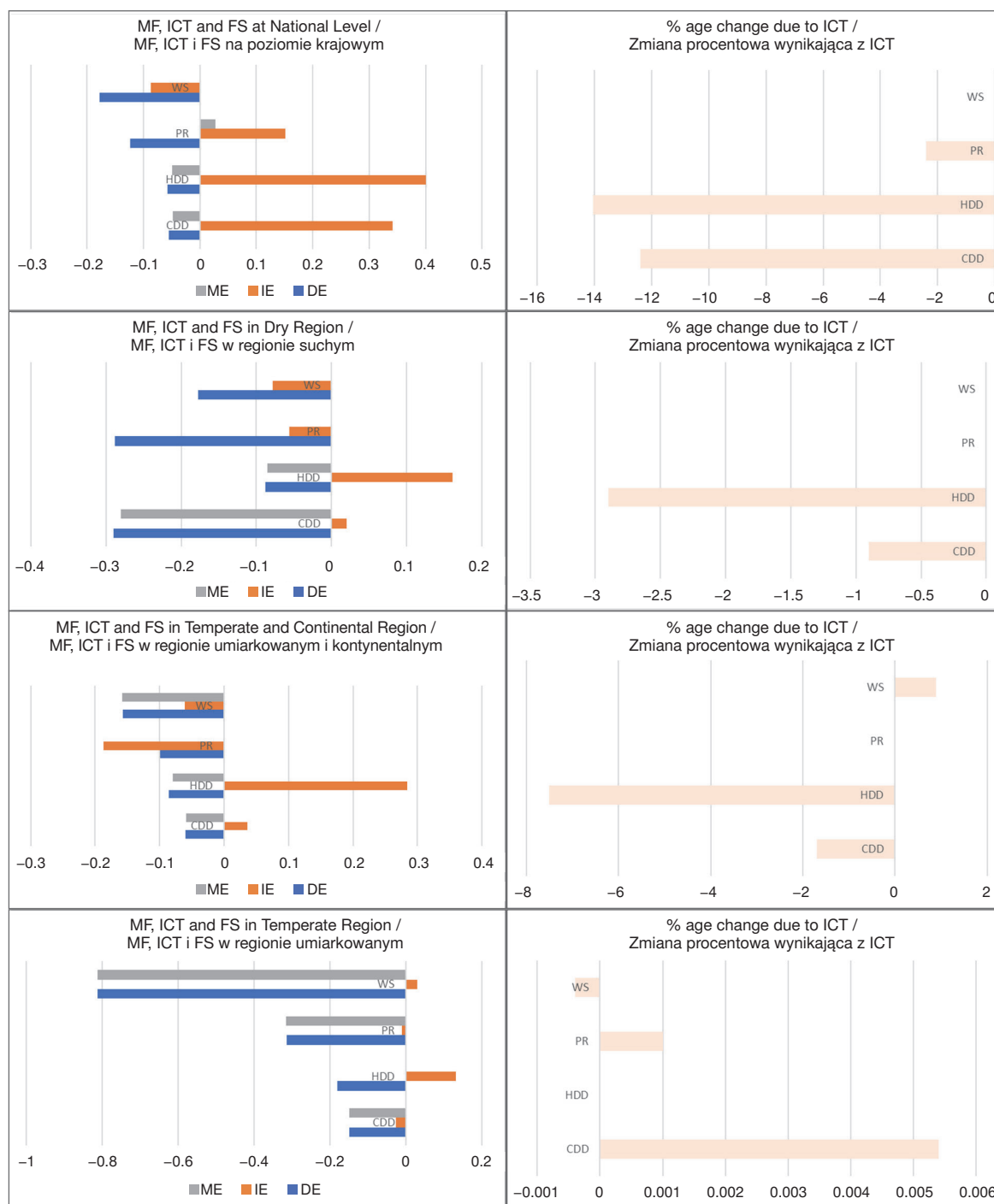
Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne autorów.

There are some variations in the results at the regional level regarding the role of ICT as their direct, indirect, and moderated effects are depicted in Figure 2 for Dry, Temperate/Continental, and Tropical regions, respectively.

Istnieją pewne różnice w wynikach na poziomie regionalnym dotyczące roli ICT, a bezpośrednie, pośrednie i moderujące efekty tych technologii przedstawiono na rysunku 2 odpowiednio dla regionów suchych, umiarkowanych/kontynentalnych i tropikalnych.

Figure 2. Moderating Role of ICT
Rysunek 2. Moderująca rola ICT



Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne autorów.

ICT is mitigating the negative impact of CDD and HDD in Dry regions, though the relative size is small, as shown by the percentage difference in Figure 2. Moreover, the interaction terms of ICT are insignificant for precipitation and wind speed. The relative sizes of coefficients for percentage difference are larger for the temperate/continental region, as ICT mitigates 1.7% and 7.5% of the negative impact of CDD and HDD, respectively. On the contrary, ICT does not mitigate the negative impact of wind speed in this region because the interaction term is negative. Moreover, the impact is insignificant for precipitation.

Relatively large in Table 5, but their interaction terms are also negative. Therefore, ICT is not mitigating the negative impacts of CDD and PR in the tropical region. The impact is insignificant for HDD. While the only case of positive interaction term is that for wind speed, but the percentage impact is very small (0.04).

The regression results in Table 5 reveal important insights about household characteristics influencing food security. The household age dependency ratio consistently exhibits a significant negative effect across all models. This aligns with Hendriks (2015), who notes that a higher ratio of dependents to working-age members strains household resources, limiting the ability to purchase sufficient nutritious food and thereby increasing food insecurity. Similarly, the sex ratio is negatively associated with food security, reflecting gender-based inequalities that disproportionately affect women. Studies show that male-biased household compositions intensify competition for limited resources, often prioritizing males' food consumption over females', which undermines women's nutrition and overall household food security (Lutomia et al., 2019).

In contrast, household size generally has a positive and significant impact on food security, except in tropical regions. Larger households benefit from economies of scale, reducing per capita food costs and enhancing resource efficiency. Moreover, diverse household labor skills support activities like gardening or small-scale farming, boosting food availability (Olayemi, 2012). Household income emerges as a robust positive determinant of food security in nearly all models, consistent with Katre and Raddatz (2023), who emphasize that higher income improves access to diverse, nutritious diets, reducing hunger risks.

Asset ownership also positively influences food security, confirming its role in providing financial stability and enabling productive activities such as farming. Households with greater asset values are

ICT łagodzą negatywny wpływ CDD i HDD w regionach suchych, chociaż względna wielkość tego wpływu jest niewielka, jak pokazuje różnica procentowa na rysunku 2. Ponadto składniki interakcji ICT są nieistotne dla opadów i prędkości wiatru. Względne wielkości współczynników różnicy procentowej są większe dla regionu umiarkowanego/kontynentalnego, ponieważ ICT łagodzą odpowiednio 1,7 i 7,5% negatywnego wpływu CDD i HDD. Z drugiej strony technologie te nie łagodzą negatywnego wpływu prędkości wiatru w tym regionie, ponieważ składnik interakcji jest ujemny. Ponadto wpływ ten jest nieistotny w przypadku opadów.

Stosunkowo duże w tabeli 5, ale ich składniki interakcji są również ujemne. ICT nie łagodzą zatem negatywnych skutków CDD i PR w regionie tropikalnym. Wpływ w przypadku HDD jest nieistotny. Jedyne wystąpienie dodatniego składnika interakcji dotyczy prędkości wiatru, ale wpływ procentowy jest bardzo mały (0,04).

Wyniki regresji w tabeli 5 dostarczają ważnych informacji na temat cech gospodarstw domowych wpływających na bezpieczeństwo żywnościowe. Wskaźnik obciążenia demograficznego gospodarstwa domowego konsekwentnie wykazuje istotny negatywny wpływ we wszystkich modelach. Jest to zgodne z ustaleniami Hendriksa (2015), który zauważa, że wyższy stosunek osób na utrzymaniu do osób w wieku produkcyjnym obciąża zasoby gospodarstwa domowego, ograniczając możliwość zakupu wystarczającej ilości wartościowej żywności, a tym samym zwiększając brak bezpieczeństwa żywnościowego. Podobnie wskaźnik płci jest negatywnie powiązany z bezpieczeństwem żywnościowym, co odzwierciedla nierówności ze względu na płeć, które nieproporcjonalnie dotyczą kobiet. Badania wskazują, że struktura gospodarstwa domowego z przewagą mężczyzn nasila konkurencję o ograniczone zasoby, często przedkładając spożycie żywności przez mężczyzn nad spożycie przez kobiety, co osłabia stan odżywienia kobiet i ogólne bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstwa domowego (Lutomia i in., 2019).

Z drugiej strony wielkość gospodarstwa domowego ma na ogół pozytywny i istotny wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe, z wyjątkiem regionów tropikalnych. Większe gospodarstwa domowe korzystają z efektu skali, co obniża koszty żywności na osobę i zwiększa efektywność wykorzystania zasobów. Ponadto zróżnicowane umiejętności siły roboczej w gospodarstwie domowym wspierają takie działania jak ogrodnictwo czy rolnictwo na małą skalę, zwiększając dostępność żywności (Olayemi, 2012). Dochód gospodarstwa domowego okazuje się silną pozytywną determinantą bezpieczeństwa

better positioned to secure food, while asset depletion during crises often leads to severe food insecurity (Shifat et al., 2025). Education plays a crucial role, with average household education positively and significantly linked to food security. Educated individuals make more informed nutritional choices and often have higher incomes, both of which enhance food security (Cheema et al., 2022; Ullah et al., 2024; Mahmood et al., 2023).

Regional dummies indicate that, on average, urban households have lower food security than rural ones, except in tropical zones. Rural households often benefit from direct access to land and natural resources, lower food prices, and reduced transportation costs, which improve food availability and affordability (Dehrashid et al., 2021). However, rural areas may also face higher food insecurity risks due to lower income, education, and labor participation rates (Beverly & Neill, 2022).

Provincial differences are pronounced: food security in Khyber Pakhtunkhwa (KPK) is 0.313 units higher than in Baluchistan, reflecting KPK's better infrastructure, market access, and agricultural conditions (Bublitz et al. 2019; Ishaq, Khalid, and Ahmad, 2018). Punjab and Sindh also report significantly higher food security than Baluchistan, attributed to Punjab's strong agricultural output and higher per capita income, and Sindh's diversified economy centered around Karachi's industrial and commercial activities. Baluchistan's chronic poverty, harsh climate, and limited access to essential services contribute to its persistently low food security (Anwar et al., 2024).

żywnościowego w niemal wszystkich modelach, co jest zgodne z badaniami Katre i Raddatza (2023), którzy podkreślają, że wyższy dochód poprawia dostęp do zróżnicowanej, wartościowej diety, zmniejszając ryzyko głodu.

Posiadanie aktywów również pozytywnie wpływa na bezpieczeństwo żywnościowe, potwierdzając swoją rolę w zapewnianiu stabilności finansowej i umożliwianiu działalności produkcyjnej, takiej jak rolnictwo. Gospodarstwa domowe o większej wartości aktywów są w lepszej sytuacji, jeśli chodzi o zapewnienie sobie żywności, podczas gdy wyczerpanie aktywów w czasie kryzysów często prowadzi do poważnego braku bezpieczeństwa żywnościowego (Shifat i in., 2025). Edukacja odgrywa kluczową rolę, przy czym średnie wykształcenie w gospodarstwie domowym jest pozytywnie i istotnie powiązane z bezpieczeństwem żywnościowym. Osoby wykształcone dokonują bardziej świadomych wyborów żywieniowych i często osiągają wyższe dochody, co w obu przypadkach zwiększa bezpieczeństwo żywnościowe (Cheema i in., 2022; Ullah i in., 2023; Mahmood i in., 2023).

Zmienne fikcyjne dla regionów wskazują, że średnio miejskie gospodarstwa domowe charakteryzują się niższym poziomem bezpieczeństwa żywnościowego niż wiejskie, z wyjątkiem stref tropikalnych. Wiejskie gospodarstwa domowe często korzystają z bezpośredniego dostępu do ziemi i zasobów naturalnych, niższych cen żywności oraz obniżonych kosztów transportu, co poprawia dostępność żywności i jej przystępność cenową (Dehrashid i in., 2021). Jednak obszary wiejskie mogą być również narażone na wyższe ryzyko braku bezpieczeństwa żywnościowego ze względu na niższe dochody, wykształcenie i wskaźniki aktywności zawodowej (Beverly i Neill, 2022).

Różnice między prowincjami są wyraźne: bezpieczeństwo żywnościowe w Chajber Pasztunchwa (KPK) jest o 0,313 jednostki wyższe niż w Beludżystanie, co odzwierciedla lepszą infrastrukturę, dostęp do rynku i warunki rolnicze w KPK (Bublitz i in., 2019; Ishaq i in., 2018). Pendżab i Sindh również odnotowują znacznie wyższy poziom bezpieczeństwa żywnościowego niż Beludżystan, co przypisuje się solidnej produkcji rolnej i wyższemu dochodowi na mieszkańca w Pendżabie oraz zdywersyfikowanej gospodarce Sindh, skoncentrowanej wokół działalności przemysłowej i handlowej Karaczi. Chroniczne ubóstwo, surowy klimat i ograniczony dostęp do podstawowych usług w Beludżystanie przyczyniają się do utrzymującego się tam niskiego poziomu bezpieczeństwa żywnościowego (Anwar i in., 2024).

Results of Quantile Regression

The quantile coefficient process illustrates the heterogeneous effects of meteorological variables CDD, HDD, AP, and WS on food security across different quantiles of the food security distribution and distinct climatic zones in Pakistan. The results are presented in Figure 3 and Figure 4.

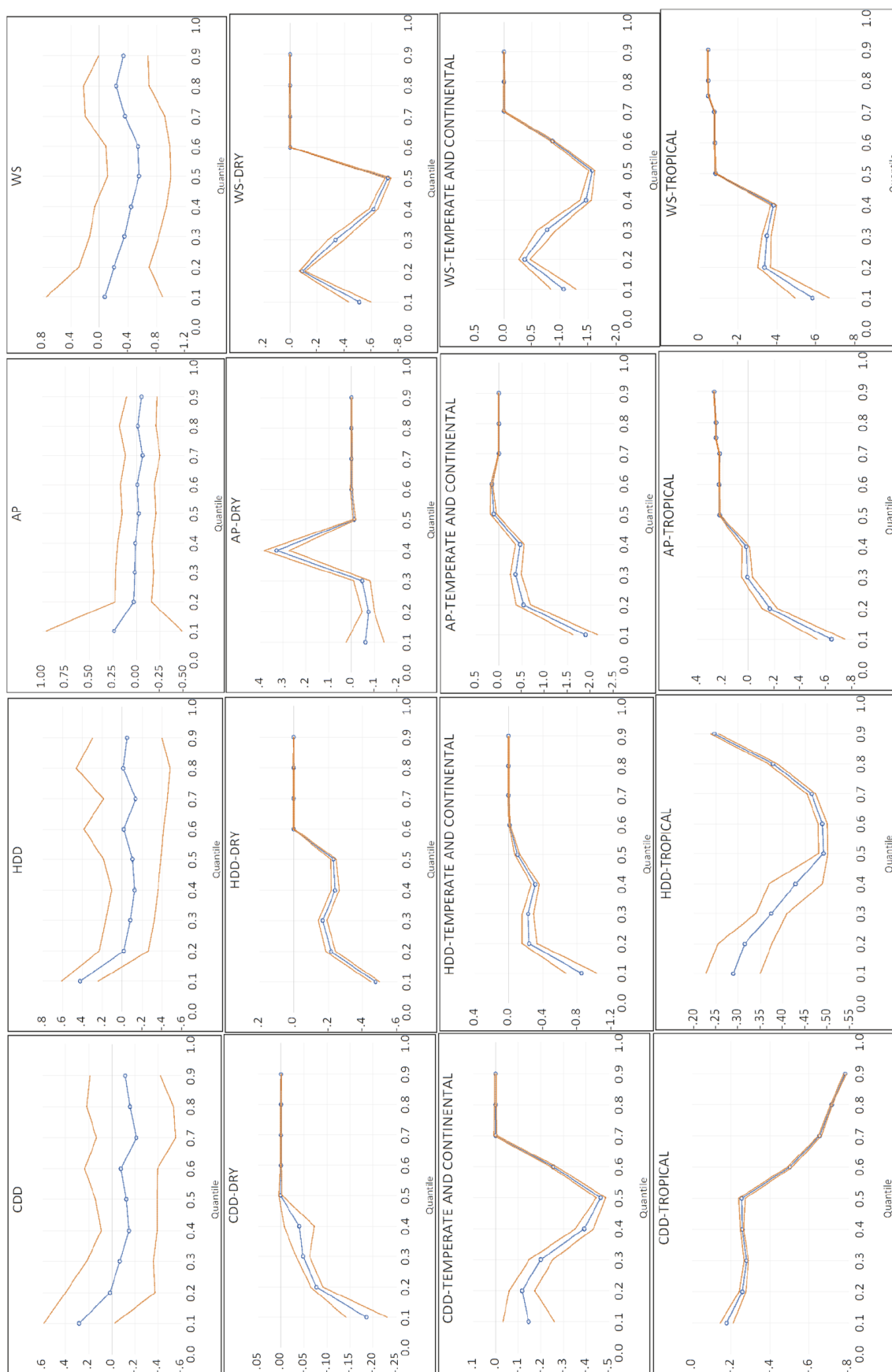
At the national level, CDD and HDD exhibit a negative impact on food security, particularly at the lower quantiles (poorer food security). As quantiles increase (i.e. higher levels of food security), the magnitude of these adverse effects tends to moderate, indicating that temperature stressors disproportionately affect more vulnerable populations. AP and WS show fluctuating but generally milder effects, with slightly positive slopes at higher quantiles for WS, suggesting some buffering capacity in better-off populations. Numerous studies confirm that both CDD and HDD, proxies for heat and cold stress, negatively affect food security, with the impact being most severe among poorer and more vulnerable populations (Wheeler & von Braun, 2013). Better-resourced households can buffer against climate shocks through savings, diversified income, or market access, which moderates the effect at higher quantiles (Challinor, 2014). Similarly, cold spells can damage crops, increase household energy costs, and reduce dietary diversity, again with the poorest being most affected (Mbow et al., 2020). The positive spike in AP at the median quantile aligns with studies from Pakistan and similar climates, where timely rains can temporarily alleviate food insecurity.

Wyniki regresji kwantylowej

Analiza współczynników kwantylowych ilustruje niejednorodne skutki zmiennych meteorologicznych CDD, HDD, AP i WS dla bezpieczeństwa żywnościowego w różnych kwantylach rozkładu bezpieczeństwa żywnościowego i poszczególnych strefach klimatycznych Pakistanu. Wyniki przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

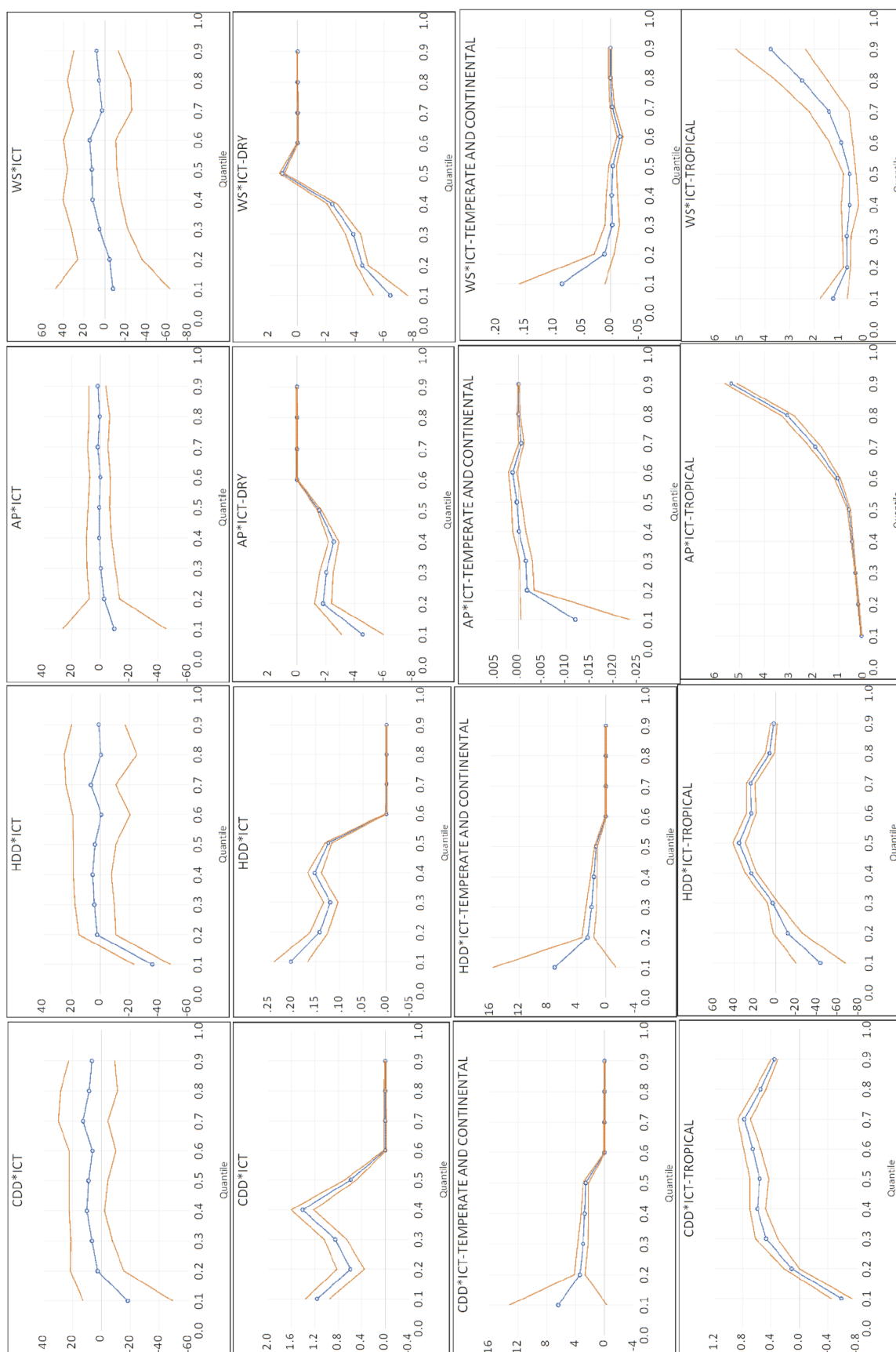
Na poziomie krajowym CDD i HDD wykazują negatywny wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe, szczególnie w niższych kwantylach (gorsze bezpieczeństwo żywnościowe). Wraz ze wzrostem kwantyli (tj. wyższym poziomem bezpieczeństwa żywnościowego) skala tych niekorzystnych skutków ulega złagodzeniu, co wskazuje, że stresory temperaturowe nieproporcjonalnie dotyczą populacje bardziej wrażliwe. AP i WS wykazują zmienne, lecz ogólnie łagodniejsze skutki, z lekko dodatnimi nachyleniami w wyższych kwantylach dla WS, co sugeruje pewną zdolność buforowania w zamożniejszych populacjach. Liczne badania potwierdzają, że zarówno CDD, jak i HDD, będące wskaźnikami zastępczymi stresu termicznego i stresu z powodu zimna, negatywnie wpływają na bezpieczeństwo żywnościowe, przy czym wpływ ten jest najpoważniejszy wśród populacji uboższych i bardziej wrażliwych (Wheeler i von Braun, 2013). Gospodarstwa domowe dysponujące lepszymi zasobami mogą chronić się przed wstrząsami klimatycznymi dzięki oszczędnościom, zdywersyfikowanym dochodom lub dostępowi do rynku, co łagodzi efekt w wyższych kwantylach (Challinor, 2014). Podobnie okresy chłodu mogą niszczyć plony, zwiększać koszty energii w gospodarstwach domowych i ograniczać różnorodność diety, przy czym najbardziej dotknięci są ponownie najbiedniejsi (Mbow i in., 2020). Dodatni skokowy wzrost AP w obrębie mediany jest zgodny z wynikami badań przeprowadzonych w Pakistanie i regionach o podobnym klimacie, gdzie pojawiające się w odpowiednim czasie opady deszczu mogą tymczasowo złagodzić problem braku bezpieczeństwa żywnościowego.

Figure 3. Meteorological Factors and Food Security
Rysunek 3. Czynniki meteorologiczne a bezpieczeństwo żywnościowe



Source: authors' own study.
 Źródło: opracowanie własne autorów.

Figure 4. Meteorological Factors, ICT and Food Security
Rysunek 4. Czynniki meteorologiczne, ICT a bezpieczeństwo żywnościowe



Source: authors' own study.
 Źródło: opracowanie własne autorów.

In dry zones, both CDD and HDD show initially strong negative effects on food security at lower quantiles but tend to flatten out at higher quantiles. AP has a positive spike at the median quantile (around 0.5), implying that moderate rainfall might temporarily improve food security in these regions. WS continues to show nonlinear, oscillating behavior, with strong negative effects around the mid-quantiles, likely reflecting localized vulnerabilities to wind-related disruptions in arid conditions. These effects are also mentioned in literature describing how windstorms can damage crops, erode soil, and disrupt agricultural livelihoods, especially for those lacking protective infrastructure (Sivakumar, 2020).

In arid and semi-arid regions, moderate rainfall events are associated with improved food security due to their positive effect on crop yields and water availability (Iqbal et al., 2018). These plots for the temperate and continental regions show more complex nonlinearities, especially for CDD and WS. CDD exhibits a U-shaped relationship, with the strongest negative effects concentrated around the 0.5 quantile, suggesting middle-income or moderately food-secure households may be more sensitive to heat stress in these regions. HDD and AP both demonstrate increasing positive effects as quantiles rise, indicating better-off households in these zones may benefit from moderate cold or rain conditions. WS again shows a sharp drop around the median quantile, reinforcing its disruptive role at intermediate levels of food security. The U-shaped relationship for CDD, with the strongest negative impact around the median quantile, is consistent with research showing that moderately food-secure households in temperate climates may lack the adaptive capacity of the wealthiest but are also more exposed than the poorest, who may already employ coping strategies (Vermeulen et al., 2012; Bryan et al., 2013). Studies indicate that moderate cold and rainfall can benefit certain crops and livestock in temperate regions, improving food availability and dietary diversity for better-off households (Thornton et al., 2014). Tropical regions are well-documented as highly vulnerable to temperature extremes, with smallholder farmers and poor households suffering the most from heat stress, crop failure, and disease outbreaks (Ali et al., 2017; Morton, 2007). The steep negative slopes for CDD and HDD at lower quantiles highlight the severe vulnerability of food-insecure households to temperature extremes, consistent with the literature (Ahmed et al., 2023). Some studies find that, in tropical areas, wealthier households can capitalize

W strefach suchych zarówno CDD, jak i HDD wykazują początkowo silny negatywny wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe w niższych kwantylach, ale mają tendencję do wypłaszczania się w kwantylach wyższych. AP wykazuje dodatni skokowy wzrost w obrębie mediany (około 0,5), co sugeruje, że umiarkowane opady mogą tymczasowo poprawić bezpieczeństwo żywnościowe w tych regionach. WS nadal wykazuje nieliniowe, oscylacyjne zachowanie, z silnymi negatywnymi skutkami w okolicach środkowych kwantyli, co prawdopodobnie odzwierciedla lokalną podatność na zakłócenia związane z wiatrem w warunkach suchych. Efekty te są również wspomniane w literaturze opisującej, w jaki sposób burze wiatrowe mogą niszczyć uprawy, powodować erozję gleby i zakłócać funkcjonowanie rolnictwa, zwłaszcza w przypadku braku infrastruktury ochronnej (Sivakumar, 2020).

W regionach suchych i półsuchych umiarkowane opady wiążą się z poprawą bezpieczeństwa żywnościowego ze względu na ich pozytywny wpływ na plony i dostępność wody (Iqbal i in., 2018). Wykresy te dla regionów umiarkowanych i kontynentalnych wykazują bardziej złożone nieliniowości, zwłaszcza w przypadku CDD i WS. CDD wykazuje zależność w kształcie litery U, z najsilniejszymi negatywnymi skutkami skoncentrowanymi wokół kwantyla 0,5, co sugeruje, że gospodarstwa domowe o średnich dochodach lub umiarkowanie bezpieczne żywnościowo mogą być w tych regionach bardziej wrażliwe na stres termiczny. HDD i AP wykazują rosnące dodatnie efekty wraz ze wzrostem kwantyli, co wskazuje, że zamożniejsze gospodarstwa domowe w tych strefach mogą odnosić korzyści z umiarkowanych warunków pogodowych takich jak chłód lub deszcz. WS ponownie wykazuje gwałtowny spadek w okolicach mediany, co potwierdza jego destrukcyjną rolę na średnich poziomach bezpieczeństwa żywnościowego. Zależność w kształcie litery U dla CDD, z najsilniejszym negatywnym wpływem w okolicach mediany, jest spójna z badaniami pokazującymi, że gospodarstwom domowym o umiarkowanym bezpieczeństwie żywnościowym w klimacie umiarkowanym może brakować zdolności adaptacyjnych najbogatszych, a zarazem są one również bardziej narażone niż najbiedniejsi, którzy mogą już stosować strategie zaradcze (Vermeulen i in., 2012; Bryan i in., 2013). Badania wskazują, że umiarkowany chłód i umiarkowane opady mogą korzystnie wpływać na niektóre uprawy i zwierzęta hodowlane w regionach klimatu umiarkowanego, poprawiając dostępność żywności i różnorodność diety w zamożniejszych gospodarstwach domowych (Thornton i in., 2014). W przypadku regionów tropikalnych dobrze udokumentowano, że są one bardzo podatne na ekstremalne

on favorable rainfall and wind conditions through irrigation, mechanization, or storage, thus enhancing food security at higher quantiles.

Recent empirical work using quantile regression and spatially disaggregated data highlights that climate impacts on food security are not uniform but vary by household vulnerability and agro-ecological zone.

Figure 4 displays the moderating effects of ICT on the relationship between climate variables and food security across different quantiles of the food security distribution and across climatic zones. They complement the earlier set of plots by showing how ICT adoption modifies the impact of climate stressors, effectively indicating where ICT functions as a mitigation strategy. At the national level, interactions of ICT with CDD and HDD show increasing positive effects across quantiles, suggesting that ICT mitigates the negative impacts of temperature stress on food security. The moderating role is stronger at lower quantiles, where households are more vulnerable. Similarly, ICT appears to buffer the negative effects of precipitation and wind stress, with more stable and positive effects across quantiles. Again, the impact is more pronounced at the lower to middle quantiles, indicating strong mitigation potential for vulnerable households.

In the case of the dry zone, interactions of ICT with CDD and HDD show peak positive effects around the median quantile, suggesting that ICT use among moderately food-secure households in dry areas offers strong adaptive capacity. And the interaction of ICT with AP and WS displays consistent positive moderation across quantiles, especially notable for WS, where the earlier direct effect was sharply negative. For temperate and continental climatic zones, the interaction of ICT with HDD and CDD, the moderation effects are positive but limited to lower quantiles, declining rapidly as food security improves. This indicates that ICT provides initial buffers against temperature volatility, but structural improvements may be needed for longer-term resilience. ICT offers small but consistent positive effects across quantiles for food security against AP and WS. Notably, the interaction with WS neutralizes the earlier observed mid-quantile disruption. For tropical regions, ICT strongly mitigates the adverse impact of CDD and HDD, and the interaction term shows strong positive effects across all quantiles, especially pronounced at mid to upper quantiles. This contrasts with the severe negative direct effects of temperature extremes in these zones observed earlier, highlighting ICT's critical role in heat/cold mitigation. ICT also mitigates AP

temperature, a drobni rolnicy i ubogie gospodarstwa domowe najbardziej cierpią z powodu stresu termicznego, nieurodzaju i epidemii (Ali i in., 2017; Morton, 2007). Strome ujemne nachylenia dla CDD i HDD w niższych kwantylach podkreślają poważną podatność gospodarstw domowych zagrożonych brakiem bezpieczeństwa żywnościowego na ekstrema temperaturowe, co jest zgodne z literaturą (Ahmed i in., 2023). Niektóre badania wskazują, że w obszarach tropikalnych zamożniejsze gospodarstwa domowe mogą wykorzystywać sprzyjające warunki opadowe i wietrzne w drodze nawadniania, mechanizacji lub magazynowania, zwiększając tym samym bezpieczeństwo żywnościowe w wyższych kwantylach.

Niedawne prace empiryczne wykorzystujące regresję kwantylową i dane dezagregowane przestrzennie pokazują, że wpływ klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe nie jest jednolity, lecz różni się w zależności od podatności gospodarstwa domowego i strefy agroekologicznej.

Rysunek 4 przedstawia moderujące efekty ICT w relacji między zmiennymi klimatycznymi a bezpieczeństwem żywnościowym w poszczególnych kwantylach rozkładu bezpieczeństwa żywnościowego oraz w poszczególnych strefach klimatycznych. Uzupełniają one wcześniejszy zestaw wykresów, pokazując, w jaki sposób wdrożenie ICT modyfikuje wpływ stresorów klimatycznych, oraz skutecznie wskazując, gdzie ICT funkcjonuje jako strategia łagodząca. Na poziomie krajowym interakcje ICT z CDD i HDD wykazują rosnące pozytywne efekty we wszystkich kwantylach, co sugeruje, że ICT łagodzi negatywny wpływ stresu temperaturowego na bezpieczeństwo żywnościowe. Rola moderująca jest silniejsza w niższych kwantylach, gdzie gospodarstwa domowe są bardziej wrażliwe. Podobnie ICT wydają się buforować negatywne skutki opadów i stresu wiatrowego, wykazując bardziej stabilne i pozytywne efekty w poszczególnych kwantylach. Ponownie wpływ ten jest bardziej wyraźny w kwantylach niskich do średnich, co wskazuje na silny potencjał łagodzący w przypadku wrażliwych gospodarstw domowych.

W odniesieniu do strefy suchej interakcje ICT z CDD i HDD wykazują szczytowe pozytywne efekty w okolicach mediany, co sugeruje, że wykorzystanie ICT wśród gospodarstw domowych o umiarkowanym bezpieczeństwie żywnościowym na obszarach suchych zapewnia silną zdolność przystosowawczą. Natomiast interakcja ICT z AP i WS wykazuje spójną pozytywną moderację w poszczególnych kwantylach, szczególnie zauważalną w przypadku WS, gdzie wcześniejszy efekt bezpośredni był silnie ujemny. W przypadku stref klimatycznych umiarkowanych i kontynentalnych

and WS steadily across quantiles, peaking at higher quantiles, suggesting that ICT helps better-resourced households leverage weather improvements and mitigate extremes.

Conclusions and Policy Recommendations

The agriculture sector is the key to meeting the food demands of Pakistan's rapidly growing population. Despite its significance, Pakistan is facing a serious food security crisis. Recent floods and COVID-19 worsened this condition, as disruptions in the movement of essential goods like food and agricultural inputs, income losses, and rising food prices affected millions of people. This study investigates the impact of climate-induced meteorological stressors on household food security in Pakistan and assesses the moderating role of ICT using both OLS and quantile regression approaches. The analysis was conducted at the national level and across three distinct climatic zones, dry, temperate/continental, and tropical, using household-level cross-sectional data. Data is sourced from PSLM 2019–2020, encompassing all four provinces, including rural and urban regions of Pakistan.

The findings reveal that all four meteorological variables, CDD, HDD, AP, and WS, negatively and significantly affect household food security. Among these, wind speed and precipitation exert the strongest adverse effects, particularly in tropical zones, where the intensity and unpredictability of climatic events are higher. The results also confirm regional heterogeneity, with the tropical zone being

interakcja ICT z HDD i CDD daje pozytywne efekty moderujące, lecz ograniczone do niższych kwantyli, szybko malejące wraz z poprawą bezpieczeństwa żywnościowego. Oznacza to, że ICT zapewnia początkowe bufory przeciwko zmienności temperatury, ale w celu uzyskania długoterminowej odporności mogą być potrzebne ulepszenia strukturalne. ICT oferują niewielkie, lecz konsekwentnie pozytywne skutki dla bezpieczeństwa żywnościowego w poszczególnych kwantylach w odniesieniu do AP i WS. Co istotne, interakcja z WS neutralizuje wcześniej zaobserwowane zakłócenia w środkowych kwantylach. W regionach tropikalnych ICT zdecydowanie łagodzą niekorzystny wpływ CDD i HDD, a składnik interakcji wykazuje silne pozytywne efekty we wszystkich kwantylach, szczególnie wyraźne w średnich i górnych. Kontrastuje to z zaobserwowanymi wcześniej poważnymi negatywnymi efektami bezpośrednimi ekstremów temperatury w tych strefach i uwypatnia kluczową rolę ICT w łagodzeniu skutków ciepła/zimna. ICT łagodzą również stabilnie wpływ AP i WS w poszczególnych kwantylach, osiągając szczyt w kwantylach wyższych, co sugeruje, że technologie te pomagają lepiej wyposażonym gospodarstwom domowym odnosić korzyści z poprawy pogody i łagodzić ekstrema.

Wnioski i zalecenia dotyczące polityki

Sektor rolniczy ma zasadnicze znaczenie z punktu widzenia zaspokojenia potrzeb żywnościowych szybko rosnącej populacji Pakistanu. Pakistan boryka się jednak z poważnym kryzysem bezpieczeństwa żywnościowego. Niedawne powodzie i pandemia COVID-19 pogorszyły ten stan, gdyż zakłócenia w przepływie podstawowych towarów, takich jak żywność i środki produkcji rolnej, utrata dochodów oraz rosnące ceny żywności dotknęły milionów ludzi. W niniejszym badaniu poddano analizie wpływ wywołanych klimatem stresorów meteorologicznych na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych w Pakistanie oraz oceniono moderującą rolę rozwiązań ICT z wykorzystaniem MNK i regresji kwantylowej. Analizę przeprowadzono na poziomie krajowym oraz w trzech odrębnych strefach klimatycznych: suchej, umiarkowanej/kontynentalnej i tropikalnej, wykorzystując przekrojowe dane na poziomie gospodarstw domowych. Dane pochodzą z badania PSLM z lat 2019–2020, obejmującego wszystkie cztery prowincje, w tym wiejskie i miejskie regiony Pakistanu.

Wyniki ujawniają, że wszystkie cztery zmienne meteorologiczne: CDD, HDD, AP i WS, negatywnie i istotnie wpływają na bezpieczeństwo żywnościowe gospodarstw domowych. Spośród nich prędkość wiatru i opady mają najsilniejsze negatywne

the most vulnerable, followed by dry and temperate/continental regions.

Importantly, ICT adoption is found to play a statistically significant and positive role in enhancing food security at the national level and in most zones. Interaction terms in both OLS and quantile regressions show that ICT can mitigate the negative effects of meteorological factors, especially HDD and CDD, by providing timely weather information, facilitating adaptive farming decisions, and reducing uncertainty. However, this moderating effect is uneven across zones. ICT is least effective in tropical regions, where structural vulnerabilities, infrastructure deficits, and potentially lower ICT quality may constrain its mitigating role.

The quantile regression results further enrich the analysis by capturing distributional heterogeneity in climate-food security dynamics. The adverse effects of meteorological stressors and the benefits of ICT are more pronounced in lower quantiles of food security distribution, implying that poorer or more vulnerable households benefit more from ICT interventions and are disproportionately affected by climate variability.

Though ICT has the potential to mitigate climate risk for food security, persistent digital divide and weak digital infrastructure pose significant challenges. Large segments of rural and marginalized populations lack access to reliable internet, smartphones, or digital literacy programs. According to the Pakistan Telecommunication Authority, internet penetration remains below 55%, with disparities between urban and rural regions, and limited 4G or broadband access in climate-vulnerable areas like interior Sindh and parts of Baluchistan. Furthermore, frequent electricity outages and inconsistent connectivity undermine the reliability of digital platforms during extreme weather events. These infrastructural deficits severely constrain the capacity of ICT to serve as a dependable adaptation strategy to meteorological stressors.

Based on regional analysis and prevalent situation, it is suggested that policy responses must be climate-zone specific. In dry regions, where extreme temperatures significantly reduce food security and ICT plays a limited mitigating role, investments should focus on drought-resistant crops, solar-powered irrigation, and expanding mobile-based advisory services. For temperate and continental zones, where ICT effectively mitigates heat and cold impacts, strengthening digital infrastructure, promoting precision agriculture, and supporting agri-tech innovations can enhance resilience. In tropical zones, where ICT fails to offset climatic shocks due to infrastructural and digital

skutki, szczególnie w strefach tropikalnych, gdzie intensywność i nieprzewidywalność zdarzeń klimatycznych są większe. Wyniki potwierdzają również zróżnicowanie regionalne, przy czym najbardziej narażona jest strefa tropikalna, a następnie regiony suche i umiarkowane/kontynentalne.

Co istotne, stwierdzono, że przyjęcie ICT odgrywa statystycznie istotną i pozytywną rolę w poprawie bezpieczeństwa żywnościowego na poziomie krajowym i w większości stref. Składniki interakcji zarówno w regresji MNK, jak i kwantylowej pokazują, że ICT mogą łagodzić negatywne skutki czynników meteorologicznych, zwłaszcza HDD i CDD, dzięki dostarczaniu terminowych informacji pogodowych, ułatwianiu decyzji dotyczących przystosowania się do zmiany klimatu w rolnictwie i zmniejszaniu niepewności. Jednak ten efekt moderujący jest w poszczególnych strefach nierównomierny. ICT są najmniej skuteczne w regionach tropikalnych, gdzie podatność strukturalna, braki w infrastrukturze i potencjalnie niższa jakość ICT mogą ograniczać ich rolę łągodzącą.

Wyniki regresji kwantylowej dodatkowo wzbogacają analizę, odzwierciedlając niejednorodność rozkładu w dynamice relacji klimat-bezpieczeństwo żywnościowe. Niekorzystne skutki stresorów meteorologicznych oraz korzyści płynące z ICT są bardziej wyraźne w dolnych kwantylach rozkładu bezpieczeństwa żywnościowego, co sugeruje, że uboższe lub bardziej wrażliwe gospodarstwa domowe odnoszą większe korzyści z interwencji w zakresie ICT i są w nieproporcjonalnie dużym stopniu dotknięte zmiennością klimatu.

Choć ICT niosą potencjał łagodzenia ryzyka klimatycznego dla bezpieczeństwa żywnościowego, istotne wyzwania stanowią trwałe wykluczenie cyfrowe i słaba infrastruktura cyfrowa. Znaczne części populacji wiejskich i marginalizowanych nie mają dostępu do niezawodnego Internetu, smartfonów czy programów podnoszenia umiejętności cyfrowych. Według Pakistańskiego Urzędu Telekomunikacji penetracja Internetu pozostaje poniżej 55%, przy czym występują dysproporcje między regionami miejskimi i wiejskimi, a dostęp do sieci 4G lub szerokopasmowej w obszarach narażonych na zmianę klimatu, takich jak wewnętrzna część prowincji Sindh i części Beludżystanu, jest ograniczony. Ponadto częste przerwy w dostawie prądu i niestabilność łączności pogarszają działanie platform cyfrowych podczas ekstremalnych zjawisk pogodowych. Te deficyty infrastrukturalne poważnie ograniczają zdolność ICT do funkcjonowania jako niezawodna strategia adaptacji do stresorów meteorologicznych.

Na podstawie analizy regionalnej i panującej sytuacji sugeruje się, że interwencje polityczne muszą

access gaps, priority should be given to improving rural ICT connectivity, integrating digital tools with flood-resilient farming practices. Priority should be given to wind/precipitation disaster management instead of focusing solely on ICT-dependent solutions to offset WS/AP damage. Moreover, targeting poor households, such as redirecting ICT subsidies to the bottom 20% food-insecure households where ICT benefits are strongest, may establish climate-resilient communities.

This study has several limitations. First, the cross-sectional nature of the data restricts the ability to capture temporal dynamics and long-term adaptation behaviors. Second, although the study accounts for major meteorological variables, it does not incorporate the frequency or intensity of extreme weather events such as floods or droughts, which could further refine the understanding of climate shocks. Third, the ICT variable is constructed using principal component analysis and used as a general composite variable. Disaggregating the variable into its constructs and analyzing the role of food security will enable the researcher to propose more targeted digital interventions. Finally, while quantile regression addresses non-linearity and distributional differences, more advanced modelling techniques such as instrumental variable quantile regression or structural equation modelling could further validate the robustness of findings. Future research should utilize longitudinal datasets, integrate richer ICT indicators, and explore the impact of climate-related disasters and more advanced methodology to overcome the limitations of this research.

być specyficzne dla strefy klimatycznej. W regionach suchych, gdzie ekstremalne temperatury znacznie obniżają bezpieczeństwo żywnościowe, a ICT odgrywają ograniczoną rolę łagodzącą, inwestycje powinny koncentrować się na uprawach odpornych na suszę, nawadnianiu zasilanym energią słoneczną i rozszerzaniu usług doradczych opartych na technologiach mobilnych. W przypadku stref umiarkowanych i kontynentalnych, gdzie ICT skutecznie łagodzą skutki upałów i chłódów, odporność może się poprawić dzięki wzmocnieniu infrastruktury cyfrowej, promowaniu rolnictwa precyzyjnego i wspieraniu innowacji agrotechnicznych. W strefach tropikalnych, gdzie ICT nie równoważą wstrząsów klimatycznych z powodu luk infrastrukturalnych i w dostępie cyfrowym, priorytetem powinna być poprawa łączności ICT na obszarach wiejskich oraz integracja narzędzi cyfrowych z praktykami rolniczymi odpornymi na powodzie. Priorytetem powinno być zarządzanie klęskami żywiołowymi związanymi z wiatrem i opadami, zamiast skupiania się wyłącznie na rozwiązaniach zależnych od ICT w celu zrównoważenia szkód spowodowanych przez WS/AP. Ponadto kierowanie pomocy do ubogich gospodarstw domowych, np. poprzez przekierowanie dotacji na ICT do 20% gospodarstw domowych o najniższym poziomie bezpieczeństwa żywnościowego, gdzie korzyści z ICT są największe, może budować społeczności odporne na zmiany klimatu.

Niniejsze badanie ma kilka ograniczeń. Po pierwsze, przekrojowy charakter danych ogranicza możliwość uchwycenia dynamiki czasowej i długoterminowych zachowań przystosowawczych. Po drugie, chociaż badanie uwzględnia główne zmienne meteorologiczne, nie obejmuje częstotliwości ani intensywności ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak powodzie czy susze, co mogłoby zapewnić bardziej precyzyjne zrozumienie wstrząsów klimatycznych. Po trzecie, zmienna ICT została skonstruowana przy użyciu analizy głównych składowych i wykorzystana jako ogólna zmienna złożona. Dezagregacja zmiennej na jej składowe i analiza roli bezpieczeństwa żywnościowego pozwoliłaby badaczom na zaproponowanie bardziej celowanych interwencji cyfrowych. Ostatecznie, podczas gdy regresja kwantylowa uwzględnia nieliniowość i różnice w rozkładzie, bardziej zaawansowane techniki modelowania, takie jak regresja kwantylowa ze zmiennymi instrumentalnymi lub modelowanie równań strukturalnych, mogłyby dodatkowo potwierdzić solidność wyników. W przyszłych badaniach należy wykorzystać dane z badań longitudinalnych, uwzględnić bogatsze wskaźniki ICT oraz zbadać wpływ katastrof klimatycznych i bardziej zaawansowaną metodologię, aby przezwyciężyć ograniczenia niniejszego badania.

Appendix / Aneks

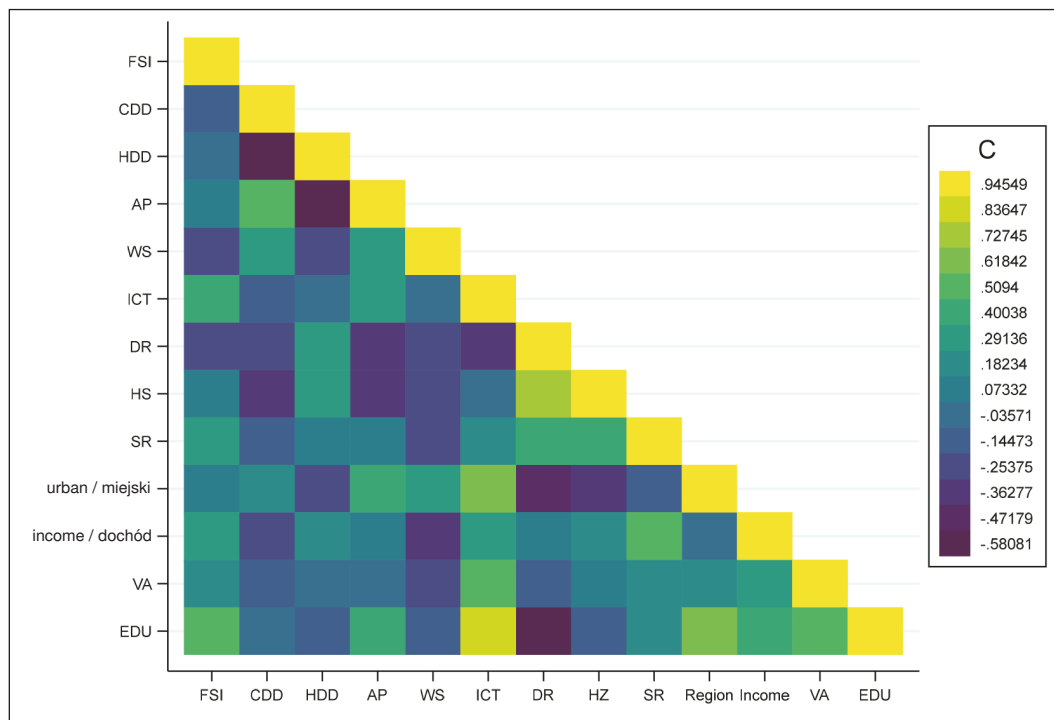
Table A1. List of Districts in the sample

Tabela A1. Lista dystryktów w próbie

Abbottabad	Mardan	Faisalabad
Bajur	Mohmand	Gujranwala
Batagram	North Waziristan	Gujrat
Bunair	Nowshera	Hafizabad
Charsadas	Orakai	Islamabad
Chitral	Peshawar	Jhelum
D. I. khan	Shangla	Jhang
Bannu	South Waziristan	Kasur
Hangu	Swabi	Khanewal
Haripur	Tank	Khushab
Karak	Tor Ghar	Lahore
Khaybar	Upper dir	Layyah
Kohat	Attack	Lodhran
Kohistan	Bahawalnagar	Mandi Bahauddin
Kurram	Bahawalpur	Mianwali
Lakki Marwat	Bhakhar	Multan
Lower dir	Chakwal	Muzaffarabad
Malakhand	Chiniot	Nankana
Mansehra	D.G. Khan	

Correlation Matrix

Macierz korelacji



Source: authors' own study.

Źródło: opracowanie własne autorów.

References / Bibliografia

- Ahmed, M., Asim, M., Ahmad, S., & Aslam, M. (2023). Climate Change, Agricultural Productivity, and Food Security. In: M. Ahmed (Ed.), *Global Agricultural Production: Resilience to Climate Change* (pp. 31–72). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14973-3_2
- Akbar, M., Niaz, R., & Amjad, M. (2020). Determinants of Households' Food Insecurity with Severity Dimensions in Pakistan: Varying Estimates Using Partial Proportional Odds Model. *Health & Social Care in the Community*, 28(5), 1698–1709. <https://doi.org/10.1111/hsc.12995>
- Ali, A., & Erenstein, O. (2017). Assessing Farmer Use of Climate Change Adaptation Practices and Impacts on Food Security and Poverty in Pakistan. *Climate Risk Management*, 16, 183–194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2016.12.001>
- Ali, S., Liu, Y., Ishaq, M., Shah, T., Abdullah, I.A., & Din, I.U. (2017). Climate Change and Its Impact on the Yield of Major Food Crops: Evidence from Pakistan. *Foods*, 6(6). <https://doi.org/10.3390/foods6060039>
- Alvi, S., & Jamil, F. (2018). Impact of Climate Change and Technology Adoption on Cereal Yields in South Asian Countries. *European Journal of Sustainable Development*, 7(3). <https://doi.org/10.14207/ejsd.2018.v7n3p237>
- Alvi, S., Jamil, F., Roson, R., & Sartori, M. (2020). Do farmers Adapt to Climate Change? A Macro Perspective. *Agriculture*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/agriculture10060212>
- Alvi, S., Roson, R., Sartori, M., & Jamil, F. (2021). An Integrated Assessment Model for Food Security under Climate Change for South Asia. *Heliyon*, 7(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06707>
- Amjad, A.I. (2023). Implications of Climate Change on Agriculture Sector of Pakistan. *Journal of Public Policy Practitioners*, 2(1), 98–125. <https://doi.org/10.32350/jppp.21.04>
- Andarge, L.T. (2022). Assessing Impact of Climate Variability on Food Security Using Household Food Insecurity Access Scale (HFIS): Case Study from Mirababaya Woreda Gamo Zone Ethiopia. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 13, 633.
- Anser, M.K., Osabohien, R., Olonade, O., Karakara, A.A., Olalekan, I.B., Ashraf, J., & Igbino, A. (2021). Impact of ICT Adoption and Governance Interaction on Food Security in West Africa. *Sustainability*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/su13105570>
- Anwar, A., Ayyubi, M.S., Riaz, F., & Mustafa, G. (2024). Regional Disparities in Food Security: An Empirical Analysis of Pakistan's Provinces and Region. *The Journal of Research Review*, 1(4), 502–511. <https://thejrr.com/index.php/39/article/view/69>
- Asfaw, A., Simane, B., Bantider, A., & Hassen, A. (2019). Determinants in the Adoption of Climate Change Adaptation Strategies: Evidence from Rainfed-Dependent Smallholder Farmers in North-Central Ethiopia (Woleka Sub-Basin). *Environment, Development and Sustainability*, 21, 2535–2565. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0150-y>
- Ayinu, Y.T., Ayal, D.Y., Zeleke, T.T., & Bektie, K.T. (2022). Impact of Climate Variability on Household Food Security in Godere District, Gambella Region, Ethiopia. *Climate Services*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100307>
- Balasundram, S.K., Shamshiri, R.R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/su15065325>
- Beverly, M., & Neill, C.L. (2022). Differences in Food Insecurity across the Rural/Urban Spectrum – The Role of Trade Flows. *Journal of the Agricultural and Applied Economics Association*, 1(1), 93–107. <https://doi.org/10.1002/jaa2.11>
- Bryan, E., Ringler, C., Okoba, B., Roncoli, C., Silvestri, S., & Herrero, M. (2013). Adapting Agriculture to Climate Change in Kenya: Household Strategies and Determinants. *Journal of Environmental Management*, 114, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.036>
- Bublitz, M.G., Peracchio, L.A., Dadzie, C.A., Escalas, J.E., Hansen, J., Hutton, M., Nardini, G., Absher, C., & Tangari, A.H. (2019). Food Access for All: Empowering Innovative Local Infrastructure. *Journal of Business Research*, 100, 354–365. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.12.027>
- Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R., & Chhetri, N. (2014). A Meta-Analysis of Crop Yield under Climate Change and Adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287–291. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2153>
- Chandio, A.A., Jiang, Y., Amin, A., Ahmad, M., Akram, W., & Ahmad, F. (2023). Climate Change and Food Security of South Asia: Fresh Evidence from a Policy Perspective Using Novel Empirical Analysis. *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(1), 169–190. <https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1980378>
- Diyaol, M. (2025). Revolutionizing Smallholder Agriculture with AI: Intelligent Sensor Networks for Real-Time Climate. *American Journal of Agriculture*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.47672/aja.2592>
- Ejemeyowwi, J.O., Osabohien, R., Adeleye, B.N., & De Alwis, T. (2021). Household ICT Utilization and Food Security Nexus in Nigeria. *International Journal of Food Science*, 5551363. <https://doi.org/10.1155/2021/5551363>
- Ferdinand, T., Illick-Frank, E., Postema, L., Stephenson, J., Rose, A., Petrovic, D., Migisha, C., Fara, K., Zebiak, S., Siantonas, T., & Pavese, N. (2021). *A Blueprint for Digital Climate-Informed Advisory Services: Building the Resilience of 300 Million Small-Scale Producers by 2030*. Working Paper (vol. 20). <https://doi.org/10.46830/wriwp.20.00103>

- Ferguson, R., Mishra, S., Qureshi, S., Injac, L., Talukder, B., & Orbinski, J. (2024). Digital Technologies and Food Security During Crisis: COVID-19 Experiences from Smallholder Farmers in Odisha, India. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1150197>
- Gouvea, R., Kapelianis, D., Li, S., & Terra, B. (2022). Innovation, ICT & Food Security. *Global Food Security*, 35, 100653. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100653>
- Hasan, A., & Hussain, Z. (2020). Climate Change and Its Impact on Food Security. *Research Journal of Humanities and Social Sciences*, 11(1), 91–96. <https://doi.org/10.5958/2321-5828.2020.00016.9>
- Hendriks, S.L. (2015). The Food Security Continuum: A Novel Tool for Understanding Food Insecurity as a Range of Experiences. *Food Security*, 7, 609–619. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0457-6>
- Hijriyati, Y., Saputri, A.R., Erlyn, P., Murti, N.N., & Maulina, R. (2024). The Role of Information and Communication Technology in Increasing Awareness and Practice of Healthy Nutrition in the Community. *Miracle Get Journal*, 1(4), 7–15. <http://doi.org/10.69855/mgj.v1i4.70>
- Hudson, H.E., Leclair, M., Pelletier, B., & Sullivan, B. (2017). Using Radio and Interactive ICTs to Improve Food Security among Smallholder Farmers in Sub-Saharan Africa. *Telecommunications Policy*, 41(7–8), 670–684. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.05.010>
- Iqbal, M.S., Dahri, Z.H., Querner, E.P., Khan, A., & Hofstra, N. (2018). Impact of Climate Change on Flood Frequency and Intensity in the Kabul River Basin. *Geosciences*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/geosciences8040114>
- Ishaq, A., Khalid, M., & Ahmad, E. (2018). *Food Insecurity in Pakistan: A Region-Wise Analysis of Trends*. Working Papers, 157 (pp. 1–26). Pakistan Institute of Development Economics (PIDE). <http://www.pide.org.pk/>
- Katre, A., & Raddatz, B. (2024). Low-Income Families' Direct Participation in Food-systems Innovation to Promote Healthy Food Behaviors. *Nutrients*, 15(5), 1271. <https://doi.org/10.3390/nu15051271>
- Leng, X., Zhang, Y., & Cheng, R. (2024). Digital Technology, Labor Allocation, and Nutrition Intake: Evidence from China. *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123228. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123228>
- Li, X., & Huo, X. (2025). Impact of ICT Adoption on Household Consumption: Evidence From Apple Growers in China. *Electronic Commerce Research*, 25(4), 2673–2697. <https://doi.org/10.1007/s10660-023-09763-9>
- Lutomia, C.K., Obare, G.A., Kariuki, I.M., & Muricho, G.S. (2019). Determinants of Gender Differences in Household Food Security Perceptions in the Western and Eastern Regions of Kenya. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1694755>
- Mahmood, T., Kumar, R., Ali, T.M., Naem, N., & Pongpanich, S. (2023). Determinants of the Food Insecurity at Household Level in Pakistan: A Multilevel Model Approach. *PLOS One*, 18(10), e0291343. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291343>
- Mahrous, W. (2019). Climate Change and Food Security in EAC Region: A Panel Data Analysis. *Review of Economics and Political Science*, 4(4), 270–284. <https://doi.org/10.1108/REPS-12-2018-0039>
- Mbow, C., Toensmeier, E., Brandt, M., Skole, D., Dieng, M., Garrity, D., & Poulter, B. (2020). Agroforestry as a Solution for Multiple Climate Change Challenges in Africa. In: D. Deryng (Ed.), *Climate Change and Agriculture* (pp. 339–374). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003047704>
- Mekonnen, A., Tessema, A., Ganewo, Z., & Haile, A. (2021). Climate Change Impacts on Household Food Security and Farmers Adaptation Strategies. *Journal of Agriculture and Food Research*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100197>
- Muluneh, M.G. (2021). Impact of Climate Change on Biodiversity and Food Security: A Global Perspective – A Review Article. *Agriculture & Food Security*, 10(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00318-5>
- Myers, S.S., Smith, M.R., Guth, S., Golden, C.D., Vaitla, B., Mueller, N.D., Dangour, A.D., & Huybers, P. (2017). Climate Change and Global Food Systems: Potential Impacts on Food Security and Undernutrition. *Annual Review Public Health*, 38, 259–277. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031816-044356>
- Nakasone, E., & Torero, M. (2016). A Text Message Away: ICTs as a Tool to Improve Food Security. *Agricultural Economics*, 47(S1), 49–59. <https://doi.org/10.1111/agec.12314>
- Okoli, J.N., & Ifeakor, A.C. (2014). An Overview of Climate Change and Food Security: Adaptation Strategies and Mitigation Measures in Nigeria. *Journal of Education and Practice*, 5(32), 13–19.
- Olayemi, A.O. (2012). Effects of Family Size on Household Food Security in Osun State, Nigeria. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 2(2), 136–141. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.197951>
- Oparinde, L.O. (2023). ICTs Use, Agroforestry Technologies' Adoption and Crop Farmers' Welfare: An Empirical Evidence from Southwest, Nigeria. *AGRIS on-line Papers in Economics and Informatics*, 15(4), 79–95. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.348956>
- Parveen, A., Tufail, S., & Salman, V. (2024). Impact of Demographic Vulnerabilities and Socio-Economic Resilience on Food Insecurity in Pakistan. *Journal of Asian and African Studies*, 59(4), 1054–1077. <https://doi.org/10.1177/00219096221130349>

- Picho, E.O., Namubiru, M., & Ngaka, W. (2018). The Effect of ICT on Households' Food Security in Uganda. Evidence from Acholi Sub Region in Northern Uganda. *International Journal of Technology and Management*, 3(1). <http://jotm.utamu.ac.ug/>
- Poudel, S., Funakawa, S., Shinjo, H., & Mishra, B. (2020). Understanding Households' Livelihood Vulnerability to Climate Change in the Lamjung District of Nepal. *Environment, Development and Sustainability*, 22(8), 8159–8182. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00566-3>
- Sarker, M.N.I., Yang, B., Yang, L., Huq, M.E., & Kamruzzaman, M.M. (2020). Climate Change Adaptation and Resilience through Big Data. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(3). <http://www.ijacsa.thesai.org/>
- Sekabira, H., Tapa-Yotto, G.T., Ahouandjinou, A.R., Thunes, K.H., Pittendrigh, B., Kaweesa, Y., & Tamò, M. (2023). Are Digital Services the Right Solution for Empowering Smallholder Farmers? A Perspective Enlightened by COVID-19 Experiences to Inform Smart IPM. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.983063>
- Shahzad, N., & Amjad, M. (2022). Climate Change and Food Security in Pakistan. In: W.L. Filho, M. Kovaleva, E. Popkova (Eds.), *Sustainable Agriculture and Food Security* (pp. 579–594). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98617-9_33
- Shifat, Z.F., Alam, M.J., Begum, I.A., Iqbal, M.A., Sarma, P.K., & McKenzie, A.M. (2025). The Association between Household's Asset Ownership and Food Security: Panel Data Evidence from Bangladesh. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1479410>
- Singh, A.K. (2018). Influence of Climate and Non-Climatic Factors on Global Food Security Index: A Cross-Sectional Country-Wise Analysis. *SOCIALSCI Journal*, 1(1), 22–35. <https://purkh.com>
- Sivakumar, M.V. (2020). Climate Extremes and Impacts on Agriculture. *Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate*, 60, 621–647. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr60.2016.0003>
- Thornton, P.K., Ericksen, P.J., Herrero, M., & Challinor, A.J. (2014). Climate Variability and Vulnerability to Climate Change: A Review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313–3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>
- Ullah, R.M., Mao, J., & Nasrullah, M. (2024). Climate Change Awareness and Adoption Measurements of Respondents toward Food Security in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Journal of Water and Climate Change*, 15(9), 4699–4712. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.275>
- Vermeulen, S.J., Campbell, B.M., & Ingram, J.S. (2012). Climate Change and Food Systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 195–222. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608>
- Wheeler, T., & von Braun, J. (2013). Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science*, 341(6145), 508–513. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608>
- Yan, S., & Alvi, S. (2022). Food Security in South Asia under Climate Change and Economic Policies. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 14(3), 237–251. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-10-2021-0113>

Submission date / Data nadesłania: 30.04.2025.

Final revision date / Data ostatniej recenzji: 25.07.2025.

Acceptance date / Data akceptacji: 8.10.2025.

© 2026 Khan, F.A., Tabassum, Q., & Tufail, S. 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: Khan, F.A., Tabassum, Q. i Tufail, S. (2026). Niniejszy artykuł został opublikowany w otwartym dostępie na licencji Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

