

**PATHWAYS TO A CIRCULAR ECONOMY IN THE AGRICULTURE-FOOD
SYSTEM: ACTOR-BASED ANALYSIS OF DIGITAL CAPACITY,
INSTITUTIONAL ALIGNMENT, AND COLLABORATION DYNAMICS
USING THE EDDU-M MODEL**

**ŚCIEŻKI DO GOSPODARKI O OBIEGU ZAMKNIĘTYM W SYSTEMIE
ROLNO-SPOŻYWCZYM. OPARTA NA PODMIOTACH ANALIZA ZDOLNOŚCI
CYFROWYCH, DOSTOSOWANIA INSTYTUCJONALNEGO I DYNAMIKI
WSPÓŁPRACY Z WYKORZYSTANIEM MODELU EDDU-M**

KEMALETTIN AĞIZAN
SÜHEYLA AĞIZAN

Citation: Ağızan, K., & Ağızan, S. (2026). Pathways to a Circular Economy in the Agriculture-Food System: Actor-Based Analysis of Digital Capacity, Institutional Alignment, and Collaboration Dynamics Using the EDDU-M Model / Ścieżki do gospodarki o obiegu zamkniętym w systemie rolno-spożywczym. Oparta na podmiotach analiza zdolności cyfrowych, dostosowania instytucjonalnego i dynamiki współpracy z wykorzystaniem modelu EDDU-M. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, 387(2), 55–87. <https://doi.org/10.30858/zer/221025>

Abstract

Background: This study addresses the transition to a circular economy (CE) in agri-food supply chains, focusing on how digitalization, institutional capacity, and collaboration shape CE practices. It highlights a research gap in existing literature, which often lacks multi-actor, multi-country perspectives. The paper introduces the EDDU-M model to analyze these dynamics in Türkiye and Italy – two countries with different digital and institutional maturity levels.

Material and methods: A mixed-methods design was used, combining Structural Equation Modeling (SEM) for hypothesis testing with fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA) and thematic analysis. Data were collected from 412 businesses across seven supply chain actors (e.g., producers, processors, exporters) through surveys and interviews. The study measured digitalization, CE practices, institutional capacity, and collaboration structures, with country context as a moderating variable.

Results: Digitalization significantly boosts CE performance in both countries, but its effect varies across actors. In Türkiye, logistics and exporters benefit most, while in Italy, the impact is more evenly distributed. Collaboration and institutional capacity also strongly influence CE outcomes. fsQCA revealed that different combinations of digital tools and collaborative dynamics can lead to high CE performance, depending on the national and actor context.

Kemalettin Ağızan, Asst. Prof., Aydın Adnan Menderes University; Zafer, 09010 Efeler/Aydın, Turkey.

(kagizan@adu.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-2340-2614>)

Süheyła Ağızan, Dr., Selçuk University; Arıçlı, İsmetpaşa Cad, 42250 Selçuklu/Konya, Turkey.

(suheyyla.agizan@selcuk.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-9210-1671>)

Conclusions: *The EDDU-M model provides a comprehensive framework for understanding CE transitions in agri-food systems. It shows that digital tools alone are not sufficient – contextual factors like cooperation quality and institutional support are equally vital. These insights offer practical guidance for policymakers aiming to promote sustainable transformation across diverse agricultural ecosystems.*

Keywords: circular economy, digitalization, agriculture-food supply chain, multi-actor analysis, EDDU-M model.

JEL codes: Q13, Q18, Q56, Q01.

Abstrakt

Kontekst: *Niniejsze badanie dotyczy przejścia do gospodarki o obiegu zamkniętym (circular economy; CE) w łańcuchach rolno-spożywczych, koncentrując się na tym, w jaki sposób cyfryzacja, zdolność instytucjonalna oraz współpraca kształtują praktyki w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym. Podkreśla ono lukę badawczą w istniejącej literaturze, która często nie uwzględnia perspektyw wielopodmiotowych i wielokrajowych. W badaniu wprowadzono model EDDU-M w celu analizy tych dynamik w Turcji i we Włoszech – dwóch krajach o różnym poziomie dojrzałości cyfrowej i instytucjonalnej.*

Materiał i metody: *Zastosowano podejście mieszane, łączące modelowanie równań strukturalnych (SEM) do testowania hipotez z rozmytą jakościową analizą porównawczą zbiorów (fsQCA) oraz analizą tematyczną. Dane zebrano od 412 przedsiębiorstw reprezentujących siedem typów podmiotów łańcucha dostaw (np. producentów, przetwórców, eksporterów) za pomocą ankiet i wywiadów. W badaniu mierzono poziom cyfryzacji, praktyki w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym, zdolność instytucjonalną oraz struktury współpracy, przy czym kontekst krajowy traktowano jako zmienną moderującą.*

Wyniki: *Cyfryzacja znacząco zwiększa efektywność w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym w obu krajach, jednak jej wpływ różni się w zależności od podmiotów. W Turcji największe korzyści odnotowała logistyka i eksporterzy, podczas gdy we Włoszech wpływ jest bardziej równomiernie rozłożony. Współpraca oraz zdolności instytucjonalne również silnie wpływają na wyniki w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym. fsQCA wykazała, że różne kombinacje narzędzi cyfrowych i dynamiki współpracy mogą prowadzić do wysokiej efektywności w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym, w zależności od kontekstu krajowego i podmiotowego.*

Wnioski: *Model EDDU-M zapewnia kompleksowe ramy zrozumienia transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym w systemach rolno-spożywczych. Pokazuje, że same narzędzia cyfrowe nie są wystarczające – czynniki kontekstowe, takie jak jakość współpracy i wsparcie instytucjonalne, są równie istotne. Spostrzeżenia te oferują praktyczne wskazówki dla decydentów dążących do propagowania zrównoważonej transformacji w różnych ekosystemach rolniczych.*

Słowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym, cyfryzacja, łańcuch rolno-spożywczy, analiza wielopodmiotowa, model EDDU-M.

Kody JEL: Q13, Q18, Q56, Q01.

Introduction

The agricultural sector is not only the cornerstone of food production but also a critical component of socio-economic development, rural employment, environmental sustainability and energy security. According to FAO (2023) data, the global agricultural sector provides livelihoods for approximately 1.1 billion people worldwide and accounts for approximately 10% of the global GDP, both directly and indirectly. In this regard, agriculture is not only an economic sector but also a fundamental balancing element of ecological and social systems. However, the global crises of the 21st century, such as climate change, natural resource scarcity, food price volatility,

Wstęp

Sektor rolniczy jest nie tylko fundamentem produkcji żywności, lecz także kluczowym elementem rozwoju społeczno-gospodarczego, zatrudnienia na obszarach wiejskich, zrównoważenia środowiskowego oraz bezpieczeństwa energetycznego. Zgodnie z danymi FAO (2023) globalny sektor rolniczy zapewnia źródła utrzymania dla około 1,1 miliarda ludzi na całym świecie oraz odpowiada za około 10% światowego PKB, zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio. W tym kontekście rolnictwo jest nie tylko sektorem gospodarczym, ale również podstawowym elementem równoważącym systemy ekologiczne i społeczne. Globalne kryzysy XXI wieku, takie jak zmiana

and post-pandemic supply chain fragility, have made it imperative to restructure agricultural systems.

In this context, agricultural supply chains, defined as an integrated network of activities, organizations, and processes involved in the transformation of agricultural products from their places of origin, such as farms or producer organizations, to their final destination, the consumers (ASCs) encompass production, processing, packaging, storage, transport and distribution, moving away from traditional linear structures towards a holistic, closed-loop and technology-supported transformation process. In particular, the principles of the circular economy (CE) are increasingly being applied in agriculture in line with sustainability goals such as reducing resource waste, reusing waste, and lowering the environmental footprint (De Angelis et al., 2018). Studies conducted in various countries, such as China, India, Nigeria, and Ukraine, have shown that circular economy applications in agriculture have increased resource use efficiency and reduced production costs by 15–30% (Dovhal et al., 2024; Odewole et al., 2024; Xu, 2024). However, the effective implementation of CE in agricultural supply chains is possible not only through the redesign of physical processes but also through the integration of digital technologies into these processes. This integration is referred to in the literature as the “digital circular supply chain”, with technologies such as sensor-based production, blockchain traceability, AI-supported logistics optimization, and big data analytics taking center stage (Ada et al., 2023; Farazi, 2024). These technologies not only increase input-output efficiency but also enable all actors in the supply chain (manufacturers, processors, logistics providers, warehouses, retailers, exporters, and cooperatives) to take more transparent, faster, and sustainable steps in their decision-making processes (Kyfyak & Oliinyk, 2025).

However, only a limited number of studies have empirically examined the integration of digitalization and the circular economy in agricultural food supply chains in a multi-actor and country-comparative manner. Most existing studies focus solely on the benefits of specific technological tools (e.g., IoT [Internet of Things], blockchain, and artificial intelligence) and lack systemic analysis. For example, demonstrated how digital technologies triggered CE applications during the COVID-19 process, specifically in Chinese SMEs, but focused solely on the production segment of the supply chain. Similarly, Yuan and Pan (2023) demonstrated the indirect effects of digitalization on CE capabilities, highlighting the importance of supply chain risk management and collaboration structures. However, such studies typically focus on individual

klimatu, niedobór zasobów naturalnych, zmienność cen żywności oraz kruchość łańcuchów dostaw po pandemii, sprawiły jednak, że restrukturyzacja systemów rolniczych stała się koniecznością.

W tym kontekście łańcuchy rolno-spożywcze, definiowane jako zintegrowana sieć działań, organizacji i procesów zaangażowanych w przekształcanie produktów rolnych od ich miejsc pochodzenia, takich jak gospodarstwa lub organizacje producentów, do ich ostatecznego miejsca przeznaczenia, czyli konsumentów, obejmują produkcję, przetwarzanie, pakowanie, magazynowanie, transport i dystrybucję, odchodząc od tradycyjnych struktur liniowych w kierunku holistycznego, zamkniętego i wspieranego technologicznie procesu transformacji. W szczególności zasady „gospodarki o obiegu zamkniętym” (circular economy; CE) są coraz częściej stosowane w rolnictwie zgodnie z celami zrównoważonego rozwoju, takimi jak ograniczanie marnotrawstwa zasobów, ponowne wykorzystanie odpadów oraz zmniejszenie śladu środowiskowego (De Angelis i in., 2018). Badania przeprowadzone w różnych krajach, takich jak Chiny, Indie, Nigeria i Ukraina, wykazały, że zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym w rolnictwie zwiększyły efektywność wykorzystania zasobów oraz obniżyły koszty produkcji o 15–30% (Dovhal i in., 2024; Odewole i in., 2024; Xu, 2024). Skuteczne wdrożenie gospodarki o obiegu zamkniętym w łańcuchach rolno-spożywczych jest jednak możliwe nie tylko poprzez przeprojektowanie procesów fizycznych, ale także poprzez integrację technologii cyfrowych z tymi procesami. Integracja ta jest w literaturze określana jako „cyfrowy zamknięty łańcuch dostaw”, przy czym kluczową rolę odgrywają technologie takie jak produkcja oparta na czujnikach, identyfikowalność oparta na blockchain, optymalizacja logistyki wspierana przez sztuczną inteligencję oraz analiza dużych zbiorów danych (Ada i in., 2023; Farazi, 2024). Technologie te nie tylko zwiększają efektywność relacji nakład–wynik, ale również umożliwiają wszystkim podmiotom w łańcuchu dostaw (producentom, przetwórcom, dostawcom logistycznym, magazynom, detalistom, eksporterom i spółdzielniom) podejmowanie bardziej przejrzystych, szybszych i bardziej zrównoważonych decyzji (Kyfyak i Oliinyk, 2025).

Tylko w ramach ograniczonej liczby badań analizowano jednak empirycznie integrację cyfryzacji i gospodarki o obiegu zamkniętym w łańcuchach rolno-spożywczych w ujęciu wielopodmiotowym i porównawczym między krajami. Większość istniejących badań koncentruje się wyłącznie na korzyściach wynikających z określonych narzędzi technologicznych (np. IoT [*Internet of Things*], blockchain i sztucznej

sectors, narrow sample groups, and a single country or region. Genovese et al. (2023) highlight the lack of empirical research on the transition to CE and note that most studies remain theoretical rather than practical. Farazi (2024) demonstrates how blockchain, artificial intelligence, and IoT support CE objectives but fails to explain how these technologies are integrated within different institutional structures and countries. Empirical comparisons regarding the extent to which circular economy strategies have been internalized are lacking, particularly in countries with high agricultural capacity but varying levels of digitalization, such as Italy, Türkiye, South Africa, India, China, and Nigeria (Ada et al., 2023; Bag et al., 2024; Boz & Martin-Ryals, 2023). Studies primarily identify the barriers to transitioning to a circular economy – high investment costs, regulatory gaps, and technological capability gaps – but fail to develop systematic strategies for addressing these challenges (Chiaraluce et al., 2021; Mehmood et al., 2021). However, it is emphasized that circular economy applications are not limited to technical transformation but also impact social sustainability and stakeholder interactions. A study conducted in South Africa demonstrated that food companies using big data and predictive analytics enhanced their social sustainability by increasing community trust (Bag et al., 2024). Similarly, research conducted in Pakistan and China has empirically proven that CE has a direct positive impact on companies' environmental and economic performance (Dieguez-Santana et al., 2025; Khan et al., 2022).

This study fills an important gap in the literature by examining how digitalization has shaped circular economy (CE) applications in agriculture-food supply chains through the examples of Türkiye and Italy, using a multi-actor and multi-level approach. Existing research mostly addresses the contribution of digital technologies to the circular economy in a limited manner, focusing on specific tools, and falls short in explaining the interactions between actors in different links of the supply chain, cross-country institutional differences, and forms of organisational collaboration. Consequently, the relationship between digitalization and sustainability in the agricultural sector is addressed separately. This study aims to address these shortcomings by examining the impact of digital transformation on circular economy applications not only through direct technological benefits but also through various factors such as institutional capacity, cooperation structures (CS), and managerial vision. Thus, the digitalization–CE interaction is expressed as a multidimensional transformation process. By integrating Structural Equation

inteligencji) i nie uwzględnia analizy systemowej. Na przykład wykazano, że technologie cyfrowe stymulowały zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym w trakcie procesu związanego z pandemią COVID-19, szczególnie w chińskich MŚP, jednak skupiono się wyłącznie na segmencie produkcyjnym łańcucha dostaw. Podobnie Yuan i Pan (2023) wykazali pośrednie efekty cyfryzacji na zdolności w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym, podkreślając znaczenie zarządzania ryzykiem w łańcuchu dostaw oraz struktur współpracy. Tego typu badania zazwyczaj koncentrują się jednak na pojedynczych sektorach, wąskich grupach próbek oraz jednym kraju lub regionie. Genovese i in. (2023) podkreślają brak badań empirycznych dotyczących transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym i wskazują, że większość analiz pozostaje raczej teoretyczna niż praktyczna. Farazi (2024) pokazuje, w jaki sposób blockchain, sztuczna inteligencja i IoT wspierają cele gospodarki o obiegu zamkniętym, ale nie wyjaśnia, w jaki sposób technologie te są integrowane w różnych strukturach instytucjonalnych i krajach. Brakuje empirycznych porównań dotyczących stopnia internalizacji strategii gospodarki o obiegu zamkniętym, szczególnie w krajach o wysokim potencjale rolniczym, ale zróżnicowanym poziomie cyfryzacji, takich jak Włochy, Turcja, RPA, Indie, Chiny i Nigeria (Ada i in., 2023; Bag i in., 2024; Boz i Martin-Ryals, 2023). W badaniach wskazano głównie bariery przejścia do gospodarki o obiegu zamkniętym – wysokie koszty inwestycji, luki regulacyjne oraz braki w zakresie kompetencji technologicznych – ale nie opracowano systemowych strategii ich przewyższania (Chiaraluce i in., 2021; Mehmood i in., 2021). Jednocześnie podkreśla się, że zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym nie ograniczają się do transformacji technicznej, lecz wpływają również na zrównoważenie społeczne oraz interakcje zainteresowanych stron. Badanie przeprowadzone w Republice Południowej Afryki wykazało, że przedsiębiorstwa spożywcze wykorzystujące big data i analitykę predykcijną zwiększyły swoje zrównoważenie społeczne poprzez wzrost zaufania społeczności (Bag i in., 2024). Podobnie badania przeprowadzone w Pakistanie i Chinach empirycznie dowiodły, że gospodarka o obiegu zamkniętym ma bezpośredni pozytywny wpływ na wyniki środowiskowe i ekonomiczne przedsiębiorstw (Dieguez-Santana i in., 2025; Khan i in., 2022).

Niniejsze badanie wypełnia istotną lukę w literaturze, analizując, w jaki sposób cyfryzacja kształtuje zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym w łańcuchach rolno-spożywczych na przykładzie Turcji i Włoch, z wykorzystaniem podejścia wielopodmiotowego i wielopoziomowego. Istniejące badania

Modelling (SEM) quantitatively and fsQCA thematic analysis qualitatively, the study comparatively reveals the effects of digitalization, institutional capacity, and collaboration structures on circular economy success. Thus, the research sought answers not only to the question whether digitalization increase the circular economy, but also to the question under what conditions, for which actors, and in which country contexts this relationship strengthens.

Based on these questions, the following hypotheses were developed:

- H1: As the level of digitalization increases, the level of circular economy implementation in businesses also increases.
- H2: Institutional capacity positively mediates the relationship between digitalization and CE application.
- H3: The effects of digitalization on the circular economy differ among supply chain actors.
- H4: The relationship between digitalization and CE is shaped by different institutional mechanisms in the Italian and Turkish contexts.

The findings show that countries' digital maturity levels, political orientation, institutional infrastructure, and sectoral strategies play a decisive role in this relationship, creating a sensitive and holistic analytical framework at the intersection of digital transformation and sustainability goals. This framework demonstrates the necessity of addressing digitalization and circular economy processes not only as a technical transformation mechanism but also in terms of institutional learning, stakeholder collaboration, and environmental governance. It provides both the literature and policymakers with a concrete strategic roadmap for accelerating sustainable development in the agricultural sector through digitalization.

w większości w ograniczony sposób odnoszą się do wkładu technologii cyfrowych w gospodarkę o obiegu zamkniętym, koncentrując się na pojedynczych narzędziach, i nie wyjaśniają interakcji między podmiotami w różnych ogniwach łańcucha dostaw, różnic instytucjonalnych między krajami oraz form współpracy organizacyjnej. W konsekwencji relacja między cyfryzacją a zrównoważonym rozwojem w sektorze rolniczym jest analizowana oddzielnie. Niniejsze badanie ma na celu wypełnienie tych luk poprzez analizę wpływu transformacji cyfrowej na zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym nie tylko poprzez bezpośrednie korzyści technologiczne, lecz także poprzez różne czynniki, takie jak zdolność instytucjonalna, struktury współpracy oraz wizja zarządzania. W ten sposób interakcja cyfryzacja–gospodarka o obiegu zamkniętym jest ujmowana jako wielowymiarowy proces transformacji. Poprzez integrację ilościowego modelowania równań strukturalnych (SEM) oraz jakościowej analizy tematycznej fsQCA, badanie w ujęciu porównawczym ujawnia wpływ cyfryzacji, zdolności instytucjonalnych oraz struktur współpracy na sukces gospodarki o obiegu zamkniętym. W związku z tym w badaniu poszukiwano odpowiedzi nie tylko na pytanie, czy cyfryzacja zwiększa poziom gospodarki o obiegu zamkniętym, ale także na kwestie tego, w jakich warunkach, dla jakich podmiotów oraz w jakich kontekstach krajowych relacja ta ulega wzmocnieniu.

Na podstawie tych pytań sformułowano następujące hipotezy:

- H1: Wraz ze wzrostem poziomu cyfryzacji wzrasta również poziom wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w przedsiębiorstwach.
- H2: Zdolność instytucjonalna pozytywnie pośredniczy w relacji między cyfryzacją a zastosowaniem gospodarki o obiegu zamkniętym.
- H3: Efekty cyfryzacji na gospodarkę o obiegu zamkniętym różnią się pomiędzy podmiotami łańcucha rolno-spożywczego.
- H4: Relacja między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym jest kształtowana przez różne mechanizmy instytucjonalne w kontekście włoskim i tureckim.

Wyniki pokazują, że poziom dojrzałości cyfrowej krajów, orientacja polityczna, infrastruktura instytucjonalna oraz strategie sektorowe odgrywają decydującą rolę w tej relacji, tworząc wrażliwe i holistyczne ramy analityczne na styku transformacji cyfrowej i celów zrównoważonego rozwoju. Ramy te pokazują konieczność ujmowania procesów cyfryzacji i gospodarki o obiegu zamkniętym nie tylko jako mechanizmu

transformacji technicznej, lecz także w kategoriach uczenia instytucjonalnego, współpracy zainteresowanych stron oraz zarządzania środowiskowego. Dostarczają one zarówno badaczom, jak i decydom politycznym konkretnego strategicznego planu działania przyspieszającego zrównoważony rozwój w sektorze rolniczym poprzez cyfryzację.

Theoretical Framework

Digitalization, sustainability, and CE concepts have become fundamental building-blocks for reshaping agricultural food supply chains. The inadequacy of the traditional linear production–consumption structure in terms of environmental and economic sustainability has led businesses and policymakers to seek alternatives to it. In this context, the CE represents a paradigm shift aimed at minimizing waste, reusing resources, and developing production cycles that are compatible with ecosystems.

While studies on CE applications in agri-food systems have increased in recent years, there are still uncertainties regarding how this transformation works. For example, topics such as waste reduction in food supply chains (Cahyadi et al., 2024), reuse strategies (Velošo et al., 2025), and recycling technologies (Dieguez-Santana et al., 2025) have been widely studied. In contrast, the role of digital technologies in CE applications has been addressed in a limited number of studies which often focus solely on the production phase. Examples include in particular, how Industry 4.0 components, such as artificial intelligence, the IoT, blockchain, digital twin technology, and big data analytics, can be integrated with CE remains an area awaiting clarification (Agrawal et al., 2023; Islam, 2024; Liu et al., 2020). The contributions of these technologies to CE in the agricultural food sector remain largely theoretical and lack a comprehensive framework (Nowicka, 2021).

Very few studies addressing these gaps have examined the relationship between digital transformation and CE at the supply chain level (Radavičius & Tvaronavičienė, 2021; Yuan & Pan, 2023). Although the contributions of digital solutions in areas such as resource efficiency, waste management, and traceability during the production phase have been emphasized, a systematic and comprehensive framework encompassing all links in the supply chain has rarely been addressed. Furthermore, the impact of digital technologies on circular transformation has mostly been examined within theoretical models, with empirical and comparative studies testing this interaction remaining limited. However, digitalization can enable the application of CE principles

Ramy teoretyczne

Cyfryzacja, zrównoważony rozwój oraz koncepcje gospodarki o obiegu zamkniętym stały się podstawowymi elementami przekształcania łańcuchów rolno-spożywczych. Nieadekwatność tradycyjnej liniowej struktury produkcja–konsumpcja w kontekście zrównoważenia środowiskowego i ekonomicznego doprowadziła przedsiębiorstwa oraz decydentów do poszukiwania alternatyw dla tego modelu. W tym kontekście gospodarka o obiegu zamkniętym stanowi zmianę paradygmatu, którego celem jest minimalizacja odpadów, ponowne wykorzystanie zasobów oraz rozwój cykli produkcyjnych zgodnych z ekosystemami.

Chociaż liczba badań dotyczących zastosowań gospodarki o obiegu zamkniętym w systemach rolno-spożywczych wzrosła w ostatnich latach, nadal istnieją niejasności dotyczące tego, w jaki sposób przebiega ta transformacja. Na przykład takie zagadnienia jak redukcja odpadów w łańcuchach żywnościowych (Cahyadi i in., 2024), strategie ponownego wykorzystania (Velošo i in., 2025) oraz technologie recyklingu (Dieguez-Santana i in., 2025) były szeroko badane. Natomiast rola technologii cyfrowych w zastosowaniach gospodarki o obiegu zamkniętym została poruszona w ograniczonej liczbie badań i często koncentruje się wyłącznie na fazie produkcji. Przykłady obejmują w szczególności sposób, w jaki komponenty Przemysłu 4.0, takie jak sztuczna inteligencja, internet rzeczy (IoT), blockchain, technologia cyfrowych bliźniaków oraz analiza dużych zbiorów danych, mogą być integrowane z gospodarką o obiegu zamkniętym – pozostaje to obszarem wymagającym wyjaśnienia (Agrawal i in., 2023; Islam, 2024; Liu i in., 2020). Wkład tych technologii w gospodarkę o obiegu zamkniętym w sektorze rolno-spożywczym pozostaje w dużej mierze teoretyczny i nie posiada kompleksowych ram analitycznych (Nowicka, 2021).

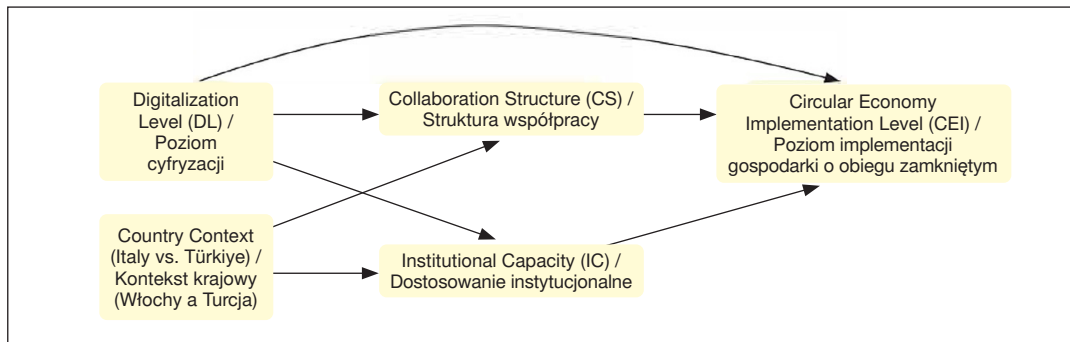
W bardzo niewielu badaniach odnoszących się do tych luk analizowano relację między transformacją cyfrową a gospodarką o obiegu zamkniętym na poziomie łańcucha dostaw (Radavičius i Tvaronavičienė, 2021; Yuan i Pan, 2023). Chociaż podkreślano wkład rozwiązań cyfrowych w obszarach takich jak efektywność wykorzystania zasobów, zarządzanie odpadami

not only in production but also in all stages, such as logistics, storage, processing, retail, and export (Ada et al., 2023). Additionally, various models have been proposed in the literature to explain the interaction between digitalization and the circular economy. For example, the model developed by Yuan and Pan (2023) emphasized the contribution of digitalization to CE in the context of supply chain risk management while focusing primarily on individual actors and micro-level interactions. Similarly, Kusumawardani et al. (2021) analyzed CE applications using a process-based approach but did not address the role of digital technologies in horizontal/vertical interactions among multiple actors. Radavičius and Tvaronavičienė (2021) evaluated CE using circularity indices but ignored actor differences. The theoretical approaches frequently used in the literature include the resource-based view (RBV), dynamic capability theory (DCT), institutional theory, actor-network theory (ANT), and sustainable supply chain management (SSCM) (Dwivedi & Paul, 2022; Zhang & Seuring, 2024). This study proposes a novel model (EDDU-M) to explain how CE applications are shaped by digitalization by integrating these theories under a multi-layered framework. The EDDU-M model aims to explain the effects of digital technologies on CE through variables such as organizational competence, collaboration structure, and regulatory environment. In this context, the EDDU-M model differs from previous models in three keyways: (i) it addresses the relationship between digitalization and CE across all supply chain links; (ii) it embeds actor-based differentiation into the model; and (iii) it defines the impact of national contexts as a regulatory variable. Thus, the EDDU-M provides a systematic response to the gaps in existing models, which either remain at the micro level or fail to consider contextual differences.

oraz identyfikowalność w fazie produkcji, systemowe i kompleksowe ramy obejmujące wszystkie ogniwa łańcucha dostaw były rzadko uwzględniane. Ponadto wpływ technologii cyfrowych na transformację w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym był najczęściej analizowany w modelach teoretycznych, natomiast badania empiryczne i porównawcze testujące tę interakcję pozostają ograniczone. Cyfryzacja może jednak umożliwić wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym nie tylko w produkcji, lecz także na wszystkich etapach, takich jak logistyka, magazynowanie, przetwarzanie, handel detaliczny oraz eksport (Ada i in., 2023). Ponadto w literaturze proponowano różne modele wyjaśniające interakcję między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym. Na przykład Yuan i Pan (2023) opracowali model, który podkreślał wkład cyfryzacji w gospodarkę o obiegu zamkniętym w kontekście zarządzania ryzykiem w łańcuchu dostaw, koncentrował się on jednak głównie na pojedynczych podmiotach i interakcjach na poziomie mikroekonomicznym. Podobnie Kusumawardani i in. (2021) analizowali zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym w podejściu procesowym, ale nie uwzględnili roli technologii cyfrowych w interakcjach poziomych i pionowych między wieloma podmiotami. Radavičius i Tvaronavičienė (2021) oceniali gospodarkę o obiegu zamkniętym przy użyciu wskaźników obiegu zamkniętego, lecz pominieli różnice między podmiotami. W literaturze często wykorzystywane podejścia teoretyczne obejmują podejście oparte na zasobach (RBV), teorię dynamicznych zdolności (DCT), teorię instytucjonalną, teorię sieci podmiotów (ANT) oraz zarządzanie zrównoważonym łańcuchem dostaw (SSCM) (Dwivedi i Paul, 2022; Zhang i Seuring, 2024). W niniejszym badaniu zaproponowano nowy model (EDDU-M), aby wyjaśnić, w jaki sposób zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym są kształtowane przez cyfryzację, integrując wymienione teorie w wielowarstwowych ramach. Model EDDU-M ma na celu wyjaśnienie wpływu technologii cyfrowych na gospodarkę o obiegu zamkniętym poprzez zmienne takie jak kompetencje organizacyjne i struktura współpracy oraz otoczenie regulacyjne. W tym kontekście EDDU-M różni się od wcześniejszych modeli na trzy kluczowe sposoby: (i) odnosi się on do relacji między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym we wszystkich ogniwach łańcucha dostaw; (ii) uwzględnia zróżnicowanie oparte na podmiotach w modelu; oraz (iii) definiuje wpływ kontekstów krajowych jako zmienną regulacyjną. W ten sposób model EDDU-M stanowi systemową odpowiedź na luki w istniejących modelach, które albo pozostają na poziomie mikroekonomicznym, albo nie uwzględniają różnic kontekstowych.

Figure 1. EDDU-M Model: Relationship between digitalization and circular economy in agri-food supply chains

Rysunek 1. Model EDDU-M: Relacja między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym w łańcuchach rolno-spożywczych



Source: authors' own elaboration.

Źródło: opracowanie własne autorów.

The original contributions of this study are threefold. First, it goes beyond singularly focused approaches in the literature by examining the relationship between digitalization and the circular economy not only at the production level but also at all stages of the supply chain, including processing, logistics, storage, distribution, retail, export, and cooperative management. (Chiaraluce et al., 2021; Dieguez-Santana et al., 2025). Second, its comparative analysis of two countries with distinct socio-economic, institutional, and agricultural structures – Italy and Türkiye – goes beyond the limited existing studies on how CE applications adapt to cultural and managerial contexts in the following ways (Kusumawardani et al., 2021; van Wassenauer et al., 2023). Third, it offers methodological innovation by combining multiple methodological approaches, such as qualitative case studies, survey-based quantitative analysis, and configurational fsQCA, to test theoretical models and provide a basis for policy recommendations (Liu et al., 2023). In conclusion, while some previous studies have explored the link between digitalization and the circular economy, they generally adopt a generalized perspective, lacking differentiation at the actor level or multi-dimensional integration. Table 1 systematically compares the fundamental conceptual and empirical frameworks with the EDDU-M model and highlights the model's unique contribution in combining digital, institutional, and collaborative dynamics through a practical, actor-based approach.

Oryginalny wkład niniejszego badania jest trojaki. Po pierwsze, wykracza ono poza podejścia skupione wyłącznie na jednym aspekcie w literaturze, analizując relację między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym nie tylko na poziomie produkcji, lecz także na wszystkich etapach łańcucha dostaw, w tym przetwarzaniu, logistyce, magazynowaniu, dystrybucji, handlu detalicznym, eksporcie oraz zarządzaniu spółdzielniami (Chiaraluce i in., 2021; Dieguez-Santana i in., 2025). Po drugie, analiza porównawcza dwóch krajów o odmiennych strukturach społeczno-ekonomicznych, instytucjonalnych i rolniczych – Włoch i Turcji – wykracza poza ograniczone dotychczas badania dotyczące tego, w jaki sposób rozwiązania gospodarki o obiegu zamkniętym dostosowują się do kontekstów kulturowych i zarządczych (Kusumawardani i in., 2021; van Wassenauer i in., 2023). Po trzecie, w badaniu wprowadzono innowację metodologiczną poprzez połączenie wielu podejść badawczych, takich jak jakościowe studia przypadków, ilościowa analiza oparta na ankietach oraz konfiguracyjna analiza fsQCA, w celu testowania modeli teoretycznych i tworzenia podstaw dla zaleceń politycznych (Liu i in., 2023). Podsumowując, choć niektóre wcześniejsze badania analizowały związek między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym, zazwyczaj przyjmowały one ujęcie ogólne, bez zróżnicowania na poziomie podmiotów oraz bez wielowymiarowej integracji. W tabeli 1 w systematyczny sposób porównano podstawowe ramy koncepcyjne i empiryczne z modelem EDDU-M, podkreślając jego unikalny wkład w łączenie dynamiki cyfrowej, instytucjonalnej i współpracy poprzez praktyczne, oparte na podmiotach podejście.

Table 1. Comparative overview of circular economy and digitalization frameworks in relation to the EDDU-M model**Tabela 1. Przegląd porównawczy ram gospodarki o obiegu zamkniętym i cyfryzacji w odniesieniu do modelu EDDU-M**

Study / Badanie	Model/ framework / Model/ ramy	Actor- based / Oparcie na podmiotach	Dimensions / Wymiary	Method / Metoda	Application focus / Zakres zastosowa- wania	Research gap according to EDDU-M / Luka badawcza według EDDU-M
Geissdoerfer et al. (2018)	Circular Business Model Innovation / Innowacje modeli biznesowych gospodarki o obiegu zamkniętym	No / Nie	CE strategies / Strategie gospodarki o obiegu zamkniętym	Conceptual / Konceptyjna	Medium / Poziom średni	No actor differentiation, abstract level / Brak zróżnicowania podmiotów, poziom abstrakcyjny
Kamble et al. (2020)	Industry 4.0 – CE Framework / Przemysł 4.0 – ramy gospodarki o obiegu zamkniętym	No / Nie	Digitalization and CE / Cyfryzacja i gospodarka o obiegu zamkniętym	Conceptual and case / Konceptyjna i studium przypadku	Medium / Poziom średni	Business level but actor-independent / Poziom przedsiębiorstw, ale bez uwzględnienia podmiotów
Liu et al. (2020)	Digital Enablement of CE / Cyfrowe umożliwienie gospodarki o obiegu zamkniętym	No / Nie	Digital infrastructure, innovation / Infrastruktura cyfrowa, innowacje	Case study / Studium przypadku	Medium / Poziom średni	Lack of corporate and actor context / Brak kontekstu korporacyjnego i podmiotowego
Yuan & Pan (2023)	Institutional Pathways for CE / Instytucjonalne ścieżki gospodarki o obiegu zamkniętym	No / Nie	Institutional capacity / Zdolności instytucjonalne	Literature review / Przegląd literatury	Low / Poziom niski	No implementation practice, macro-focused / Brak wdrożenia praktycznego, podejście makroekonomiczne
Radavičius & Tvaronavičienė (2021)	Digital Transformation in CE / Transformacja cyfrowa w gospodarce o obiegu zamkniętym	No / Nie	Digital strategy / Strategia cyfrowa	Conceptual / Konceptyjna	Medium / Poziom średni	Lack of an implementer context in CE transformation / Brak kontekstu podmiotów wdrażających w transformacji gospodarki o obiegu zamkniętym
Kusumawardani et al. (2021)	Organisational Capabilities in CE / Zdolności organizacyjne w gospodarce o obiegu zamkniętym	No / Nie	Organisational and social dimensions / Wymiary organizacyjne i społeczne	Empirical / Empiryczna	Medium / Poziom średni	Sector-based but no actor breakdown / Podejście sektorowe bez rozróżnienia podmiotów
Papadopoulos et al. (2022)	Smart Sustainable CE / Inteligentna zrównoważona gospodarka o obiegu zamkniętym	No / Nie	IoT, data analytics / IoT, analiza danych	Systematic review / Przegląd systematyczny	Medium / Poziom średni	Technology-focused, outside the corporate structure / Podejście technologiczne, poza strukturą przedsiębiorstw
This study / Niniejsze badanie	EDDU-M / EDDU-M	Yes / Tak	Digital, corporate, collaboration / Wymiar cyfrowy, organizacyjny, współpracy	Mixed (SEM and fsQCA) / Mieszana (SEM i fsQCA)	High / Poziom wysoki	Actor-based, multi-level, contextual, practitioner-focused / Podejście wielopoziomowe, kontekstowe, oparte na podmiotach, praktyczne

Source: authors' own elaboration.

Źródło: opracowanie własne autorów.

Methodology

Research Design

This research is an explanatory, mixed-method study examining the impact of the level of digitalization in agriculture-food supply chains on circular economy (CE) applications. This study aims to reveal complex structural relationships by integrating quantitative analyses based on the positivist paradigm with qualitative findings based on an interpretive approach. To this end, both SEM, which allows for hypothesis testing, and fsQCA, which reveals contextual diversity, were used together. The combined use of these methods stems from the study's multi-actor, multi-dimensional, and context-sensitive structure. SEM enables the statistical validation of hypotheses by testing linear relationships between variables, whereas fsQCA reveals a multi-causal structure in which different condition combinations can produce the same outcome. Owing to the complex structure of the interaction between digitalization and the circular economy in agricultural-food supply chains, which includes both individual variable effects and contextual combinations, analysis using a single method could have led to limited and context-disconnected findings. While the SEM reveals the general validity of the model and the direction of relationships, the fsQCA identifies alternative roadmaps that achieve high CE performance across different countries and actor configurations, producing richer and more actionable results for policy and practice. This holistic approach, by integrating both confirmatory and exploratory analyses, provides a robust methodological foundation for understanding the digitalization–CE relationship within a multi-actor and comparative context.

Research Model and Variables

The theoretical framework of the research is based on the EDDU-M model, which is constructed within the framework of dynamic capability theory (RBV) and institutional theory. In the model, the Level of Digitalization (DD) is the primary independent variable, while the Level of Circular Economy Implementation (DEU) is the dependent variable. The mediating variables are Institutional Capacity (IC) and Cooperation Structure (CS); the moderating variable is Country Context (Italy vs. Türkiye).

Metodologia

Projekt badawczy

Niniejsze badanie ma charakter wyjaśniający i wykorzystuje podejście mieszane, analizując wpływ poziomu cyfryzacji w łańcuchach rolno-spożywczych na zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym. Celem badania jest ujawnienie złożonych relacji strukturalnych poprzez integrację analiz ilościowych opartych na paradygmacie pozytywistycznym z wynikami jakościowymi opartymi na podejściu interpretatywnym. W tym celu zastosowano zarówno SEM, umożliwiające testowanie hipotez, jak i fsQCA, ujawniającą zróżnicowanie kontekstowe. Łączne wykorzystanie tych metod wynika z wielopodmiotowej, wielowymiarowej i wrażliwej na kontekst struktury badania. SEM umożliwia statystyczną weryfikację hipotez poprzez testowanie liniowych zależności między zmiennymi, natomiast fsQCA ujawnia strukturę wieloprzyczynową, w której różne kombinacje warunków mogą prowadzić do tego samego rezultatu. Ze względu na złożony charakter interakcji między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym w łańcuchach rolno-spożywczych, obejmujący zarówno efekty pojedynczych zmiennych, jak i kombinacje kontekstowe, zastosowanie jednej metody mogłoby prowadzić do ograniczonych i oderwanych od kontekstu wyników. Podczas gdy SEM ujawnia ogólną poprawność modelu oraz kierunek zależności, fsQCA identyfikuje alternatywne ścieżki prowadzące do wysokiej efektywności w zakresie cyfryzacji i gospodarki o obiegu zamkniętym w różnych konfiguracjach krajowych i podmiotowych, co pozwala uzyskać bardziej pogłębione i użyteczne wyniki dla polityki i praktyki. To holistyczne podejście, poprzez integrację analiz confirmacyjnych i eksploracyjnych, zapewnia solidne podstawy metodologiczne do zrozumienia relacji między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym w kontekście wielopodmiotowym i porównawczym.

Model badawczy i zmienne

Ramy teoretyczne badania opierają się na modelu EDDU-M, który został skonstruowany w oparciu o teorię dynamicznych zdolności, podejście oparte na zasobach (RBV) oraz teorię instytucjonalną. W modelu „Poziom cyfryzacji” (DD) jest główną zmienną niezależną, natomiast „Poziom wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym” (DEU) stanowi zmienną zależną. Zmienne pośredniczące to „Zdolność przedsiębiorstwa” (CC) oraz „Struktura współpracy” (CS); zmienną moderującą jest „Kontekst krajowy (Włochy a Turcja)”.

Sample and Population

The sample for this study was selected from Türkiye and Italy based on: (i) significant differences in digitalization maturity levels; (ii) structural differences in institutional and policy frameworks; and (iii) diversity in the organizational structures of agriculture-food supply chains. The sample, consisting of 412 participants, was distributed across seven categories representing the key actors in the agriculture-food ecosystem in both countries. The Turkish sample included 38 producer associations, 46 agricultural cooperatives, 37 food processing facilities, 28 logistics companies, 20 storage facilities, 24 retail chains, and 12 exporters. The Italian sample included 35 producer associations, 42 agricultural cooperatives, 33 food processing facilities, 30 logistics companies, 18 storage facilities, 25 retail chains, and 24 exporters. This distribution enables a comparative analysis at both the country level and the level of supply chain actors. The adequacy of the sample size used in the study was tested using a power analysis performed using G*Power 3.1 software. The effect size $f^2 = 0.15$ (medium level), significance level $\alpha = 0.05$, and power $(1-\beta) = 0.95$ criteria were used as the basis. The minimum required sample size was calculated as 412 based on the number of independent variables in the structural equation model. The use of 412 valid survey data (Italy – 203, Türkiye – 209) in this study ensured the statistical power and reliability of our findings. The sample was structured to provide a balanced representation of different chain links.

Data Collection Process

Data collection was conducted between January and June 2025 through an online survey form and face-to-face interviews. The reliability and clarity of the scales were tested in a pilot study with 12 participants during the pretest phase. The final survey was structured using a 5-point Likert-type scale and contained 42 items. In addition, in-depth semi-structured interviews were conducted with 20 business managers. Semi-structured interviews were conducted with 21 participants selected from seven key stakeholder groups (producers, processors, logistics, storage, cooperatives, traders, and retailers) in Türkiye and Italy. Participants were purposefully sampled based on their direct involvement in CE-related practices and their roles in digitalization initiatives. Ethical approval was obtained, and the participants provided informed consent, both verbally and in writing. The interviewees were anonymized, and all data

Próba i populacja

Próba w niniejszym badaniu została dobrana z Turcji i Włoch na podstawie: (i) istotnych różnic w poziomie dojrzałości cyfryzacji; (ii) strukturalnych różnic w ramach instytucjonalnych i politycznych; oraz (iii) zróżnicowania struktur organizacyjnych łańcuchów rolno-spożywczych. Próba licząca 412 uczestników została podzielona na siedem kategorii reprezentujących kluczowe podmioty ekosystemu rolno-spożywczego w obu krajach. Próba turecka obejmowała 38 stowarzyszeń producentów, 46 spółdzielni rolniczych, 37 zakładów przetwórstwa żywności, 28 firm logistycznych, 20 magazynów, 24 sieci detaliczne oraz 12 eksporterów. Próba włoska objęła 35 stowarzyszeń producentów, 42 spółdzielnie rolnicze, 33 zakłady przetwórstwa żywności, 30 firm logistycznych, 18 magazynów, 25 sieci detalicznych oraz 24 eksporterów. Taki podział umożliwi analizę porównawczą zarówno na poziomie krajów, jak i na poziomie podmiotów łańcucha dostaw. Adekwatność wielkości próby wykorzystanej w badaniu została zweryfikowana za pomocą analizy mocy przeprowadzonej w oprogramowaniu G*Power 3.1. Przyjęto następujące kryteria: wielkość efektu $f^2 = 0,15$ (poziom średni), poziom istotności $\alpha = 0,05$ oraz moc testu $(1-\beta) = 0,95$. Minimalna wymagana wielkość próby została obliczona jako 412 na podstawie liczby zmiennych niezależnych w modelu równań strukturalnych. Zastosowanie 412 poprawnych kwestionariuszy (Włochy – 203; Turcja – 209) zapewniło moc statystyczną oraz wiarygodność uzyskanych wyników. Próba została skonstruowana w sposób zapewniający zrównoważoną reprezentację różnych ogniw łańcucha.

Proces gromadzenia danych

Zbieranie danych zostało przeprowadzone w okresie od stycznia do czerwca 2025 r. za pomocą internetowego formularza ankietowego oraz wywiadów bezpośrednich. Rzetelność i klarowność skal zostało przetestowane w badaniu pilotażowym z udziałem 12 uczestników w fazie poprzedzającej badanie. Końcowa ankieta została skonstruowana w oparciu o pięciostopniową skalę Likerta i zawierała 42 pozycje. Ponadto przeprowadzono pogłębione, częściowo ustrukturyzowane rozmowy z 20 kierownikami przedsiębiorstw. Rozmowy częściowo ustrukturyzowane przeprowadzono z 21 uczestnikami, wybranymi spośród siedmiu kluczowych grup interesariuszy (producentów, przetwórców, logistyki, magazynowania, spółdzielni, handlowców oraz detalistów) w Turcji i we Włoszech. Uczestnicy zostali dobrani celowo na podstawie ich bezpośredniego zaangażowania w praktyki związane z gospodarką

were securely stored. The interviews were recorded to provide a foundation for qualitative data analysis and were coded thematically.

Measurement Tools and Validity

The level of digitalization was measured across four sub-dimensions: data sharing capacity, digital platform usage, production automation, and traceability tools (Ada et al., 2023; Farazi, 2024). Circular economy practices encompass waste reduction, reuse, recycling, closed-loop design, and resource efficiency (Cahyadi et al., 2024; Chiaraluce et al., 2021). The scales used in this study were adapted from previous studies in the international literature that demonstrated validity and reliability. The scales were adapted into Turkish using the translation–back-translation method (Brislin, 1970). Subsequently, two different academics translated the Turkish version into English. The back-translated version was compared with the original scale to assess meaning consistency. Clarity-enhancing revisions were made to short statements, and the items were tested for understandability in a pre-test ($n = 30$). The obtained data were tested using confirmatory factor analysis (CFA), and the model's suitability is shown in Table 4 with factor loadings, composite reliability (CR), average variance extracted (AVE), and Cronbach's alpha values. Factor loadings (λ) ranged from 0.72 to 0.83 across all subscales, exceeding the 0.70 threshold value recommended by Hair et al. (2019) and thus ensuring reliability. CR values indicate the internal consistency and measurement stability of each construct and were determined to be in the range of 0.84–0.87. AVE values were calculated to be between 0.61 and 0.63, exceeding 0.50 in each dimension according to the Fornell and Larcker (1981) criterion, thus ensuring test validity. Cronbach's alpha coefficients ranged from 0.81 to 0.92, exceeding the reliability threshold of 0.70 recommended by Nunnally and Bernstein (1994), indicating high internal consistency. These results demonstrate that both the digitalization and circular economy scales are statistically robust in terms of content validity, structural validity, and discriminant validity.

o obiegu zamkniętym oraz ich rolę w inicjatywach cyfryzacyjnych. Uzyskano zgodę komisji etycznej, a uczestnicy wyrazili świadomą zgodę, zarówno ustnie, jak i pisemnie. Tożsamość respondentów została zanonimizowana, a wszystkie dane były bezpiecznie przechowywane. Rozmowy zostały nagrane w celu umożliwienia analizy danych jakościowych i zakodowane tematycznie.

Narzędzia pomiarowe i ważność

Poziom cyfryzacji mierzono w czterech podwymiarach: zdolności do wymiany danych, wykorzystania platform cyfrowych, automatyzacji produkcji oraz narzędzi identyfikowalności (Ada i in., 2023; Farazi, 2024). Praktyki w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym obejmują redukcję odpadów, ponowne wykorzystanie, recykling, projektowanie w obiegu zamkniętym oraz efektywność wykorzystania zasobów (Cahyadi i in., 2024; Chiaraluce i in., 2021). Skale zastosowane w niniejszym badaniu zostały zaadaptowane z wcześniejszych badań w literaturze międzynarodowej, które wykazały ich trafność i rzetelność. Skale zostały przetłumaczone na język turecki przy użyciu metody tłumaczenie–tłumaczenie zwrotne (Brislin, 1970). Następnie dwóch różnych badaczy akademickich przetłumaczyło wersję turecką na język angielski. Wersję tłumaczoną wstecznie porównano z oryginalną skalą w celu oceny spójności znaczeniowej. Wprowadzono poprawki zwiększające klarowność w krótkich stwierdzeniach, a następnie pozycje testowano pod kątem zrozumiałości w badaniu wstępnym ($n = 30$). Uzyskane dane poddano analizie czynnikowej potwierdzającej (CFA), a dopasowanie modelu przedstawiono w tabeli 4 wraz z ładunkami czynnikowymi, rzetelnością kompozytową (CR), średnią wyodrębnioną wariancją (AVE) oraz wartościami współczynnika alfa Cronbacha. Ładunki czynnikowe (λ) mieściły się w zakresie od 0,72 do 0,83 dla wszystkich podskal, przekraczając zalecany próg 0,70 wskazany przez Haira i in. (2019), co zapewnia rzetelność pomiaru. Wartości CR wskazują na wewnętrzną spójność i stabilność pomiaru każdego konstruktów i wynosiły od 0,84 do 0,87. Wartości AVE mieściły się w przedziale od 0,61 do 0,63, przekraczając w każdym z wymiarów próg 0,50 zgodnie z kryterium Fornella i Larckera (1981), co zapewnia trafność pomiaru. Współczynniki alfa Cronbacha wynosiły od 0,81 do 0,92, przekraczając próg rzetelności 0,70, rekomendowany przez Nunnally'ego i Bernsteina (1994), co wskazuje na wysoką spójność wewnętrzną. Wyniki te pokazują, że zarówno skale cyfryzacji, jak i gospodarki o obiegu zamkniętym są statystycznie solidne pod względem trafności treści, trafności strukturalnej oraz trafności dyskryminacyjnej.

Data Analysis

Quantitative data were first subjected to descriptive and correlation analyses using SPSS v28, followed by hypothesis testing using SEM via AMOS software. Model fit indices (CFI, TLI, RMSEA) were interpreted within acceptable limits. Using fsQCA 4.0 software on the same data, cause-effect clusters were created, and business configurations that achieved high CE levels under different combinations were identified. The fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA) method used in this study is a comparative analysis technique that differs from traditional regression techniques by considering multiple causality and contextual diversity. fsQCA acknowledges that there may be multiple paths (configurations) leading to CE applications, given that each business has different levels of digitalization, organizational capacities, and collaboration structures. This method is particularly useful for analyzing businesses that achieve the same outcome through different means. For example, companies in Türkiye that have achieved CE applications, despite low digital infrastructure but with strong cooperative structures, represent different configurations compared to companies in Italy that have achieved the same outcome with high technology use. This diversity has been structurally examined through fsQCA, enhancing the contextual validity of the empirical model. Thus, the study seeks to answer not only what is effective, but also under what conditions is it effective. This approach strengthens the study's adaptability to field policies and different country contexts. Qualitative data were analyzed using thematic coding with MAXQDA software. The data were obtained from semi-structured interviews with 20 business managers and coded using thematic analysis with MAXQDA software. The coding process followed the sequence of open coding → axial coding → thematic consolidation, and three main themes emerged: (i) Access to and Perception of Digitalization, (ii) Institutional Adaptation Capacity; and (iii) Collaboration and Stakeholder Interaction. For example, while a cooperative manager in Türkiye emphasized that they "transformed resources through joint decision-making and collective awareness" despite the lack of digital infrastructure, a logistics manager in Italy stated that "Enterprise Resource Planning (ERP) systems significantly reduced waste rates by increasing supply chain transparency". These statements support structural differences between countries and actors, not only with numerical data but also with participant perspectives. These themes were

Analiza danych

Dane ilościowe w pierwszej kolejności poddano analizom opisowym oraz korelacyjnym z wykorzystaniem SPSS v28, a następnie testowaniu hipotez za pomocą SEM w oprogramowaniu AMOS. Wskaźniki dopasowania modelu (CFI, TLI, RMSEA) interpretowano w ramach akceptowalnych wartości. Wykorzystując fsQCA 4.0 na tych samych danych, utworzono klastry przyczynowo-skutkowe oraz zidentyfikowano konfiguracje biznesowe osiągające wysokie poziomy gospodarki o obiegu zamkniętym w różnych kombinacjach czynników. Metoda fsQCA zastosowana w niniejszym badaniu jest techniką analizy porównawczej, która różni się od tradycyjnych metod regresyjnych poprzez uwzględnienie wieloprzyczynowości oraz zróżnicowania kontekstowego. fsQCA zakłada, że może istnieć wiele ścieżek (konfiguracji) prowadzących do wdrożeń gospodarki o modelu zamkniętym biorąc pod uwagę, że każde przedsiębiorstwo charakteryzuje się różnym poziomem cyfryzacji, zdolności organizacyjnych oraz struktur współpracy. Metoda ta jest szczególnie użyteczna do analizy przedsiębiorstw, które osiągają ten sam wynik różnymi drogami. Na przykład firmy w Turcji, które wdrożyły gospodarkę o modelu zamkniętym pomimo niskiego poziomu infrastruktury cyfrowej, ale przy silnych strukturach współpracy, reprezentują inne konfiguracje niż firmy we Włoszech, które osiągnęły ten sam rezultat przy wysokim wykorzystaniu technologii. Różnorodność ta została strukturalnie przeanalizowana za pomocą fsQCA, co zwiększa kontekstową trafność modelu empirycznego. W związku z tym badanie ma na celu udzielenie odpowiedzi nie tylko na pytanie, co jest skuteczne, ale również na to, w jakich warunkach jest to skuteczne. Podejście to wzmacnia zdolność adaptacyjną badania do polityk sektorowych oraz różnych kontekstów krajowych. Dane jakościowe analizowano metodą kodowania tematycznego z wykorzystaniem oprogramowania MAXQDA. Dane jakościowe uzyskano z rozmów częściowo ustrukturyzowanych przeprowadzonych z 20 menedżerami przedsiębiorstw, a następnie zakodowano je z wykorzystaniem analizy tematycznej w oprogramowaniu MAXQDA. Proces kodowania przebiegał według sekwencji: kodowanie otwarte → kodowanie osiowe → konsolidacja tematyczna, w wyniku czego wyodrębniono trzy główne tematy: (i) dostęp do cyfryzacji i jej postrzeganie; (ii) zdolność adaptacji instytucjonalnej; oraz (iii) współpracę i interakcje ze stronami zainteresowanymi. Na przykład podczas gdy menedżer spółdzielni w Turcji podkreślał, że „przekształcono zasoby poprzez wspólne podejmowanie

cross validated with SEM and fsQCA findings to provide a comprehensive analysis. Thus, qualitative data strengthened the model's validity and offered field-specific insights for policymakers.

Results

The comparative analysis of Türkiye and Italy reveals significant differences in the demographic, economic, and behavioral characteristics of food supply chain actors (Table 2). Italian firms generally have a higher average age, more employees, and higher turnover, indicating that the sector is more institutionalized and better suited to economies of scale. In terms of attitudes toward CE practices and the number of actual CE applications, actors in Italy are more active, particularly processors, logistics companies, and exporters, who demonstrate a high integration into CE processes. In Türkiye, cooperatives and retailers exhibit relatively more positive attitudes toward the CE, whereas this level is lower among producer and trader groups. The usage rates of digital technology are higher in Italy than in Türkiye across all stakeholder groups, which can be attributed to the maturity level of the digital infrastructure. In Türkiye, the gap between positive attitudes towards digitalization and actual usage indicates a potential but untapped capacity for digital transformation.

Waste recycling practices in Türkiye are observed more intensively among certain actors in the supply chain, particularly processors (29.9%), traders (29%) and storage companies (28.2%), while the prevalence of these practices among producers (12.3%), cooperatives (12.2 %) and exporters (10.2%) is limited (Table 3). This indicates that actors in the middle of the supply chain are investing more in environmental sustainability practices; however, actors focused on production and foreign marketing lag in environmental transformation. A more balanced distribution was observed in Italy. The highest rates of environmental sustainability applications are seen in storage (27.4%), processing (17.5%), and trading (19.3%) actors; cooperatives (14.5%), producers (13.2%), and exporters (14.4%) show relatively higher rates than in Türkiye. The use of renewable

decyzji i zbiorową świadomość”, pomimo braku infrastruktury cyfrowej, menedżer logistyki we Włoszech powiedział, że „systemy planowania zasobów przedsiębiorstwa (ERP) znacząco obniżyły poziom odpadów poprzez zwiększenie przejrzystości łańcucha dostaw”. Stwierdzenia te wskazują na strukturalne różnice między krajami i podmiotami, nie tylko w danych liczbowych, ale również w perspektywach uczestników. Wyodrębnione tematy zostały zweryfikowane krzyżowo z wynikami SEM i fsQCA w celu zapewnienia kompleksowej analizy. W ten sposób dane jakościowe wzmocniły trafność modelu oraz dostarczyły specyficznych dla kontekstu wniosków dla decydentów politycznych.

Wyniki

Analiza porównawcza Turcji i Włoch ujawnia istotne różnice w charakterystyce demograficznej, ekonomicznej i behawioralnej podmiotów łańcucha dostaw żywności (tab. 2). Włoskie firmy mają generalnie wyższy średni wiek, większą liczbę pracowników oraz wyższe obroty, co wskazuje, że sektor jest bardziej zinstytucjonalizowany i lepiej dostosowany do korzyści skali. W odniesieniu do postaw wobec praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym oraz liczby rzeczywistych zastosowań gospodarki o obiegu zamkniętym, podmioty we Włoszech są bardziej aktywne – szczególnie przetwórcy, firmy logistyczne oraz eksporterzy, którzy wykazują wysoki poziom integracji z procesami gospodarki o obiegu zamkniętym. W Turcji spółdzielnie oraz detaliści wykazują relatywnie bardziej pozytywne postawy wobec gospodarki o obiegu zamkniętym, podczas gdy poziom ten jest niższy wśród producentów i grup handlowych. Poziom wykorzystania technologii cyfrowych jest wyższy we Włoszech niż w Turcji we wszystkich grupach interesariuszy, co można przypisać większej dojrzałości infrastruktury cyfrowej. W Turcji luka pomiędzy pozytywnymi postawami wobec cyfryzacji a jej rzeczywistym wykorzystaniem wskazuje na potencjalne, lecz niewykorzystane możliwości transformacji cyfrowej.

Praktyki recyklingu odpadów w Turcji są obserwowane intensywniej wśród niektórych podmiotów łańcucha dostaw, w szczególności przetwórców (29,9%), handlowców (29%) oraz firm magazynowych (28,2%), podczas gdy występowanie tych praktyk wśród producentów (12,3%), spółdzielni (12,2%) oraz eksporterów (10,2%) jest ograniczone (tab. 3). Wskazuje to, że podmioty znajdujące się w środkowej części łańcucha dostaw inwestują więcej w praktyki z zakresu zrównoważenia środowiskowego, jednak podmioty skoncentrowane na produkcji i sprzedaży zagranicznej pozostają w tyle w zakresie transformacji

energy, on the other hand, is particularly prominent among producers (14.3%) and retailers (15.3%) in Italy, whereas this rate is only 3.3% among producers in Türkiye. Italy's high implementation levels in redesign and waste recycling, particularly in retail (23%) and storage (20.9%), are noteworthy, whereas these rates are low in Türkiye. These differences can be explained by the impact of EU policies, environmental regulations, and financing availability. EU policies are enhancing companies' capacity for transformation through legal frameworks and incentive mechanisms that mandate the integration of circular economy principles into the agriculture and food sector. In contrast, the fact that environmental regulations and financing instruments are not yet sufficiently institutionalized in Türkiye creates significant differences in the prevalence of these practices (Bozatli & Akca, 2024; Habeşoğlu et al., 2022).

Digitalization applications in Türkiye are generally at a low level. ERP systems are only implemented in the 1.6–6.5% range, whereas IoT systems are at just 1.2–8.9%. Data analytics and blockchain applications are also limited. The most notable actor is the retail group, which shows higher levels of use of all digitalization tools (especially ERP – 4.6%, and IoT – 8.9%) compared to other actors. This indicates that companies in direct contact with consumers adopt digital technologies more quickly. In contrast, digitalization applications in Italy are more advanced. For example, ERP systems are most widely used by traders (24%) and retailers (27%), while data analytics is particularly widespread among logistics (20.2%) and export (15.4%) companies. IoT technologies generally range between 7% and 14% in Italy and are significantly more widespread than in Türkiye. Blockchain technology is used at low rates in both Türkiye and Italy, but Italian retail (13.2%) and export (13.9%) actors are prominent. This indicates that Italy has made greater progress in supporting digitalization with elements such as supply chain transparency and traceability.

środowiskowej. W przypadku Włoch obserwuje się bardziej zrównoważony rozkład. Najwyższe wskaźniki zrównoważenia środowiskowego występują wśród magazynierów (27,4%), przetwórców (17,5%) oraz handlowców (19,3%); spółdzielnie (14,5%), producenci (13,2%) oraz eksporterzy (14,4%) wykazują relatywnie lepsze wyniki niż w Turcji. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii jest szczególnie widoczne wśród producentów (14,3%) oraz detalistów (15,3%) we Włoszech, podczas gdy w Turcji wskaźnik ten wynosi jedynie 3,3% wśród producentów. Wysoki poziom wdrożeń w zakresie przeprojektowania procesów oraz recyklingu odpadów we Włoszech, szczególnie w handlu detalicznym (23%) oraz magazynowaniu (20,9%), jest godny uwagi, podczas gdy w Turcji wartości te są niskie. Różnice te można wyjaśnić wpływem polityk UE, regulacji środowiskowych oraz dostępności finansowania. Polityki UE zwiększają zdolność przedsiębiorstw do transformacji poprzez ramy prawne i mechanizmy zachęt, które wymuszają integrację zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze rolnictwa i żywności. Z kolei fakt, że regulacje środowiskowe oraz instrumenty finansowe nie są jeszcze w Turcji wystarczająco zinstytucjonalizowane, tworzy istotne różnice w rozpowszechnieniu tych praktyk (Bozatli & Akca, 2024, Habeşoğlu i in., 2022).

Zastosowania cyfryzacji w Turcji są ogólnie na niskim poziomie. Systemy ERP wdrażane są jedynie wśród 1,6–6,5% firm, podczas gdy systemy IoT osiągają wartość tylko 1,2–8,9%. Analiza danych oraz zastosowania blockchain również pozostają ograniczone. Najbardziej wyróżniającą się grupą są detaliści, którzy wykazują wyższy poziom wykorzystania wszystkich narzędzi cyfryzacji (szczególnie ERP – 4,6% oraz IoT – 8,9%) w porównaniu z innymi podmiotami. Wskazuje to, że przedsiębiorstwa mające bezpośredni kontakt z konsumentami szybciej wprowadzają technologie cyfrowe. Z kolei we Włoszech zastosowania cyfryzacji są bardziej zaawansowane. Na przykład systemy ERP są najszerzej stosowane przez handlowców (24%) oraz detalistów (27%), podczas gdy analiza danych jest szczególnie rozpowszechniona wśród firm logistycznych (20,2%) oraz eksportowych (15,4%). Technologie IoT we Włoszech mieszczą się zazwyczaj w przedziale 7–14% i są znacząco bardziej rozpowszechnione niż w Turcji. Technologia blockchain jest stosowana na niskim poziomie zarówno w Turcji, jak i we Włoszech, jednak włoscy detaliści (13,2%) oraz eksporterzy (13,9%) wyróżniają się na tle pozostałych. Wskazuje to, że Włochy poczyniły większe postępy w zakresie wspierania cyfryzacji poprzez elementy takie jak przejrzystość łańcucha dostaw oraz identyfikowalność.

Table 2. Demographic and technological characteristics of supply chain actors in Türkiye and Italy
Tabela 2. Charakterystyka demograficzna i technologiczna podmiotów łańcucha dostaw w Turcji i we Włoszech

Country / Kraj	Supplier type / Typ dostawcy	Average firm age (years) / Średni wiek firmy (lata)	Number of employees / Liczba pracowników	Annual turnover (EUR million) / Roczny obrót (mln EUR)	Number of CE applications / Liczba zastosowań CE	Digital technology usage rate (%) / Wskaźnik wykorzystania technologii cyfrowych (%)
Türkiye / Turcja	Manufacturer / Producent	3.12	3.8	2.91	3.37	3.64
	Processor / Przetwórcza	4.85	4.12	3.57	4.36	2.55
	Logistics / Logistyka	4.2	2.06	3.3	2.6	4.91
	Storage / Magazynowanie	3.8	4.91	2.87	3.54	4.33
	Cooperative / Spółdzielnia	2.47	4.5	3.84	3.78	4.82
	Merchant / Handlowiec	2.47	2.64	2.42	2.14	4.68
	Retail / Detalista	2.17	2.55	2.88	3.82	3.79
	Exporter / Eksporter	4.6	2.55	3.1	2.51	4.77
Italy / Włochy	Manufacturer / Producent	3.77	4.34	3.52	6.09	6.22
	Processor / Przetwórcza	4.09	5.13	5.95	5.37	4.25
	Logistics / Logistyka	3.64	3.92	5.62	4.49	4.73
	Storage / Magazynowanie	4.48	5.91	5.69	3.69	5.77
	Storage / Magazynowanie	4.67	3.72	5.81	4.43	4.19
	Merchant / Handlowiec	4.31	6.46	3.72	4.48	3.73
	Retail / Detalista	5.99	5.82	4.58	5.69	4.37
	Exporter / Eksporter	4.57	4.1	3.85	5.41	3.9

Source: authors' own elaboration based on the empirical analysis conducted in this study.

Źródło: opracowanie własne autorów na podstawie analizy empirycznej przeprowadzonej w niniejszym badaniu.

Comparative data and fsQCA findings reveal that the different levels of digitalization and circular economy (CE) implementation at different levels are shaped not only by differences in technological infrastructure but also by factors such as the government's approach to environmental policy, access to public financial incentives, institutional awareness of sustainability goals, and sector-specific strategic priorities (Table 3). The analysis results obtained

Dane porównawcze oraz wyniki fsQCA wskazują, że zróżnicowane poziomy wdrożeń cyfryzacji oraz gospodarki o obiegu zamkniętym na różnych poziomach są kształtowane nie tylko przez różnice w infrastrukturze technologicznej, ale również przez takie czynniki jak podejście rządu do polityki środowiskowej, dostęp do publicznych zachęt finansowych, instytucjonalna świadomość celów zrównoważonego rozwoju oraz sektorowe priorytety strategiczne (tab. 3).

are consistent with previous studies highlighting the impact of policy support and institutional maturity on the digital-circular transition in agriculture-food systems (Dieguez-Santana et al., 2025; Krstić et al., 2024; Gkountani et al., 2021).

Otrzymane wyniki analizy są zgodne z wcześniejszymi badaniami podkreślającymi wpływ wsparcia politycznego oraz dojrzałości instytucjonalnej na transformację cyfrowo-cyrkularną w systemach rolno-spożywczych (Dieguez-Santana i in., 2025; Krstić i in., 2024; Gkountani i in., 2021).

Table 3. Circular economy and digital technology adoption rates by supply chain actors (%)
Tabela 3. Wskaźniki wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz technologii cyfrowych według podmiotów łańcucha dostaw (%)

Country / Kraj	Supplier / Dostawca	Waste recycling (%) / Recykling odpadów (%)	Redesign (%) / Przeprojek- towanie (%)	Energy efficiency (%) / Efektywność energetyczna (%)	Renewable energy use (%) / Wykorzystanie energii odnawialnej (%)	ERP systems (%) / Systemy ERP (%)	Internet of Things (IoT) (%) / Internet rzeczy (IoT) (%)	Data analytics (%) / Analiza danych (%)	Blockchain (%) / Blockchain (%)
Türkiye / Turcja	Manufacturer / Producent	12.3	4.9	11.5	3.30	2.60	1.80	6.00	1.32
	Processor / Przetwórcza	29.90	12.45	12.20	8.10	1.60	1.20	6.00	2.23
	Logistics / Logistyka	21.10	5.00	13.80	11.70	1.80	7.50	3.30	2.44
	Storage / Magazynowanie	28.20	18.00	14.60	12.10	1.10	3.30	2.40	3.21
	Cooperative / Spółdzielnia	12.23	3.32	12.40	7.70	1.80	1.90	6.00	2.11
	Merchant / Handlowiec	29.70	8.36	8.76	7.60	6.50	2.60	6.00	0.45
	Retail / Detalista	23.60	16.90	12	13.10	4.60	8.92	6.00	4.54
Exporter / Eksporter	10.20	7.90	9.90	9.76	3.60	8.00	4.30	3.56	
Italy / Włochy	Manufacturer / Producent	13.24	10.90	12.60	14.34	10.50	7.40	6.40	4.20
	Processor / Przetwórcza	17.50	18.80	14.90	18.80	11.70	12.34	8.40	12.00
	Logistics / Logistyka	15.70	11.60	10.10	10.10	11.40	7.40	20.20	5.5
	Storage / Magazynowanie	27.40	20.90	13.60	13.40	21.90	7.30	16.50	5.67
	Cooperative / Spółdzielnia	14.50	2.50	12.70	6.5	11.20	14.80	14.20	6.74
	Merchant / Handlowiec	19.30	12.10	19.00	4.80	24.00	14.34	22.40	4.56
	Retail / Detalista	15.20	23.00	12.90	15.30	27	12.34	13.90	13.21
Exporter / Eksporter	14.40	11.50	11.60	8.10	11.40	13.80	15.40	13.90	

Source: authors' own elaboration based on the empirical analysis conducted in this study.

Źródło: opracowanie własne autorów na podstawie analizy empirycznej przeprowadzonej w niniejszym badaniu.

In Türkiye, the integration of CE and digitalization is particularly low among firms in the first (producers) and last (exporters) stages of the supply chain. This situation aligns with the findings in the literature regarding “technological lag” (Zhang et al., 2020) and “political governance deficiencies” (Coluccia et al., 2022). Application levels among market-oriented actors, such as retail and logistics, are high across countries and technology types, indicating that these actors are more open to change and more responsive to market pressures. This differentiation demonstrates that digitalization and sustainability transformations do not operate equally across all links in the supply chain and that targeted strategies need to be developed.

Table 4 presents a comprehensive measurement model for the sub-dimensions of the digitalization and circular economy scales used in this study, with at least three items for each sub-dimension. The digitalization scale consists of four subdimensions: technology use, data integration, digital governance, and perceived digital benefits. These sub-dimensions aim to measure both the technical infrastructure and the managerial capacity of firms. The factor loadings of all items in the scale ranged from 0.72 to 0.83, with composite reliability (CR) values of 0.87, average variance extracted (AVE) values of 0.63, and Cronbach’s alpha coefficients of 0.84 for each sub-dimension, indicating high levels of reliability. The circular economy scale consists of the sub-dimensions of resource efficiency, waste management, reuse/redesign and environmental performance. For this scale, the factor loadings ranged from 0.72 to 0.81, with a CR value of 0.85, an AVE value of 0.61, and a reliability coefficient of 0.82. These values indicate both the high internal consistency of the scales and the distinctiveness of the conceptual dimensions represented by each subscale. Thus, this measurement structure has established a theoretically grounded and empirically robust measurement framework that can contribute to comparative analyses with similar studies in literature and serve as a basis for hypothesis testing. In this regard, the study serves as one of the first examples demonstrating that the concepts of circular economy and digitalization can be comprehensively measured within the agriculture-food supply chain.

W Turcji integracja gospodarki o modelu zamkniętym oraz cyfryzacji jest szczególnie niska wśród firm znajdujących się na pierwszym (producenci) oraz ostatnim (eksporterzy) etapie łańcucha dostaw. Sytuacja ta jest zgodna z badaniami dotyczącymi „opóźnienia technologicznego” (Zhang i in., 2020) oraz „deficytów w zarządzaniu politycznym” (Coluccia i in., 2022). Poziom wdrożeń wśród podmiotów zorientowanych rynkowo, takich jak handel detaliczny i logistyka, jest wysoki w obu krajach i we wszystkich typach technologii, co wskazuje, że podmioty te są bardziej otwarte na zmiany oraz bardziej reagują na presję rynkową. Zróżnicowanie to pokazuje, że transformacje cyfryzacji oraz zrównoważonego rozwoju nie przebiegają równomiernie we wszystkich ogniwach łańcucha dostaw i że konieczne jest opracowanie strategii kierunkowych.

W tabeli 4 przedstawiono kompleksowy model pomiarowy podwymiary skal cyfryzacji oraz gospodarki o obiegu zamkniętym zastosowanych w niniejszym badaniu, przy czym każdy podwymiar obejmuje co najmniej trzy pozycje. Skala cyfryzacji składa się z czterech podwymiary: wykorzystania technologii, integracji danych, zarządzania cyfrowego oraz postrzeganych korzyści z cyfryzacji. Podwymiary te mają na celu pomiar zarówno infrastruktury technicznej, jak i zdolności zarządczych przedsiębiorstw. Ładunki czynnikowe wszystkich pozycji w skali mieściły się w przedziale od 0,72 do 0,83, wartości rzetelności kompozytywnej (CR) wynosiły 0,87, średnia wyodrębniona wariancja (AVE) – 0,63, a współczynniki alfa Cronbacha – 0,84 dla każdego podwymiary, co wskazuje na wysoki poziom rzetelności. Skala gospodarki o obiegu zamkniętym obejmuje podwymiary: efektywność zasobów, zarządzanie odpadami, ponowne wykorzystanie / przeprojektowanie oraz efektywność środowiskowa. W przypadku tej skali ładunki czynnikowe mieściły się w przedziale od 0,72 do 0,81, wartość CR wynosiła 0,85, AVE – 0,61, a współczynnik rzetelności – 0,82. Wartości te wskazują zarówno na wysoką spójność wewnętrzną skal, jak i odrębność conceptualną wymiary reprezentowanych przez poszczególne podskale. Tym samym struktura pomiarowa tworzy teoretycznie uzasadnione i empirycznie solidne ramy pomiarowe, które mogą stanowić wkład do analiz porównawczych w literaturze oraz podstawę do testowania hipotez. W tym kontekście badanie stanowi jeden z pierwszych przykładów pokazujących, że koncepcje gospodarki o obiegu zamkniętym oraz cyfryzacji mogą być kompleksowo mierzone w łańcuchu dostaw sektora rolno-spożywczego.

Table 4. Sub-dimensions and validity indicators of digitalization and circular economy scales

Scale	Sub-scale	Scale item	Factor loadings	CR (Composite Reliability)	AVE (Average Variance Extracted)	Cronbach's alpha
Digitalization	Technology use	Our company uses sensor/IoT systems in its production processes.	0.82	0.87	0	0.84
		Our supply and logistics operations are monitored using digital tools.	0.80			
		Production efficiency is monitored using digital technologies.	0.79			
	Data integration	Data sharing throughout the supply chain is conducted electronically.	0.79			
		Customer and supplier information is stored in a centralised data system.	0.78			
		Our business processes are carried out using integrated digital platforms.	0.76			
	Digital governance	Management decisions are supported by digital systems.	0.76			
		Digital data analysis is utilised in the strategic planning process.	0.74			
		Production decisions are monitored through digital dashboards.	0.73			
	Perceived digital benefit	We are experiencing the efficiency-enhancing effects of digitalization.	0.83			
		Digital solutions reduce costs.	0.81			
		Business continuity is stronger thanks to digital infrastructure.	0.80			
Circular economy	Resource efficiency	Natural resource use is minimised in production processes.	0.80	0.85	0	0.82
		We have implemented measures to reduce water and energy consumption.	0.78			
		Resource efficiency policy is one of our company's main strategies.	0.77			
	Waste management	A significant portion of our waste is recycled.	0.78			
		Production waste is separated and managed.	0.76			
		Systematic procedures are implemented to reduce waste.	0.75			
	Reuse/design	Products are developed in accordance with reuse or design principles.	0.75			
		Our packaging is designed to be reusable and recyclable.	0.74			
		Product design takes into account modularity and durability.	0.72			
	Environmental performance	CE applications are effective in reducing our environmental impact.	0.81			
		Progress has been made in reducing greenhouse gas emissions.	0.79			
		Environmental indicators are monitored regularly.	0.7			

Source: authors' own elaboration based on the empirical analysis conducted in this study.

Tabela 4. Podwymiary oraz wskaźniki trafności skal cyfryzacji i gospodarki o obiegu zamkniętym

Skala	Podskala	Pozycja skali	Ładunki czynnikowe	CR (rzetelność kompozy- towa)	AVE (średnia wyodrębniona wariancja)	Alfa Cronbacha	
Cyfryzacja	Wykorzystanie technologii	Nasza firma wykorzystuje systemy czujników / IoT w procesach produkcyjnych.	0,82	0,87	0	0,84	
		Operacje zaopatrzenia i logistyki są monitorowane przy użyciu narzędzi cyfrowych.	0,80				
		Efektywność produkcji jest monitorowana za pomocą technologii cyfrowych.	0,79				
	Integracja danych	Wymiana danych w całym łańcuchu dostaw odbywa się elektronicznie.	0,79				
		Informacje o klientach i dostawcach są przechowywane w scentralizowanym systemie danych.	0,78				
		Procesy biznesowe realizowane są z wykorzystaniem zintegrowanych platform cyfrowych.	0,76				
	Zarządzanie cyfrowe	Decyzje zarządcze wspierane są przez systemy cyfrowe.	0,76				
		Analiza danych cyfrowych jest wykorzystywana w planowaniu strategicznym.	0,74				
		Decyzje produkcyjne monitorowane są poprzez pulpity cyfrowe (dashboardsy).	0,73				
	Postrzegane korzyści cyfryzacji	Obserwujemy efekty zwiększające efektywność dzięki cyfryzacji.	0,83				
		Rozwiązania cyfrowe obniżają koszty.	0,81				
		Ciągłość działania firmy jest silniejsza dzięki infrastrukturze cyfrowej.	0,80				
	Gospodarka o obiegu zamkniętym	Zasobooszczędność	Zużycie zasobów naturalnych jest minimalizowane w procesach produkcyjnych.				0,80
			Wdrożyliśmy działania ograniczające zużycie wody i energii.				0,78
			Polityka w zakresie zasobooszczędności jest jednym z głównych elementów strategii firmy.				0,77
Zarządzanie odpadami		Znaczna część odpadów jest poddawana recyklingowi.	0,78				
		Odpady produkcyjne są segregowane i zarządzane.	0,76				
		Wdrożono systematyczne procedury redukcji odpadów.	0,75				
Ponowne wykorzystanie / przeprojektowanie		Produkty są projektowane zgodnie z zasadami ponownego wykorzystania lub przeprojektowania.	0,75				
		Nasze opakowania są projektowane tak, aby nadawały się do ponownego użycia i recyklingu.	0,74				
		Projektowanie produktów uwzględnia modułowość i trwałość.	0,72				
Efektywność środowiskowa		Zastosowania gospodarki o obiegu zamkniętym skutecznie redukują wpływ środowiskowy.	0,81				
		Odnotowano postęp w redukcji emisji gazów cieplarnianych.	0,79				
		Wskaźniki środowiskowe są regularnie monitorowane.	0,7				

Źródło: opracowanie własne autorów na podstawie analizy empirycznej przeprowadzonej w niniejszym badaniu.

In this study, prior to moving on to SEM, the suitability of the dataset for analysis was evaluated in terms of data normality, multicollinearity, and sample adequacy. Data normality was tested both visually and parametrically. Examination of the histograms and Q-Q plots revealed that the variables were largely normally distributed. The Shapiro–Wilk test results ($p > 0.05$) supported the assumption of a normal distribution. Additionally, skewness and kurtosis values remained within the range of -1 to $+1$, indicating that the variables were symmetrically distributed (Hair et al., 2019). These findings indicate that data distribution is suitable for parametric analysis in structural modelling. To identify multicollinearity issues in the model, the Variance Inflation Factor (VIF) values were calculated. The VIF values for all variables ranged from 1.12 to 2.41 and generally remained below the 5 threshold. These findings indicate that multicollinearity does not pose a significant problem in the model (Kock & Lynn, 2012). Sample adequacy was assessed using the Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) and Bartlett’s Test of Sphericity. The KMO value was 0.921, indicating an “excellent” level (Kaiser, 1974). Bartlett’s test was significant ($\chi^2 = 4285.12$; $df = 276$; $p < 0.001$) and indicated that the variables exhibited correlations suitable for factor analysis. The sample size was distributed according to country and supplier type, with $n > 100$ in each subgroup, meeting the minimum level recommended for PLS-SEM (Hair et al., 2021).

Today, agriculture-food supply chains have evolved into multi-dimensional structures that involve not only product flow but also the effective integration of information, technology, and sustainability components. However, the alignment of these complex systems with circular economy principles remains inadequate. Therefore, a clearer understanding of the transformative impact of digitalization in this transition process will fill an important gap in academic literature. In particular, elements such as resource efficiency, waste reduction, and traceability in agriculture can contribute to sustainability when supported by digital tools. In this context, the first aim is to test the functionality of digitalization in the transition to CE at the actor level. This hypothesis is shaped by the RBV and DCT. RBV focuses on the importance of strategic resources (e.g., information technology infrastructure) that enable firms to gain sustainable competitive advantages, whereas DCT emphasizes the ability of these resources to be transformed quickly and effectively in response to environmental variability. In this study, the fundamental proposition of RBV – that “valuable, rare, imitable, and organized” resources (particularly digital infrastructure, data management

W niniejszym badaniu, przed przejściem do SEM, oceniono przydatność zbioru danych do analizy pod kątem normalności rozkładu, współliniowości oraz adekwatności próby. Normalność danych testowano zarówno wizualnie, jak i parametrycznie. Analiza histogramów oraz wykresów Q-Q wykazała, że zmienne w dużej mierze mają rozkład normalny. Wyniki testu Shapiro–Wilka ($p > 0,05$) potwierdziły założenie normalności rozkładu. Dodatkowo wartości skośności i kurtozy mieściły się w przedziale od -1 do $+1$, co wskazuje na symetryczny rozkład zmiennych (Hair i in., 2019). Wyniki te sugerują, że rozkład danych jest odpowiedni do analiz parametrycznych w modelowaniu strukturalnym. W celu identyfikacji problemu współliniowości w modelu obliczono wartości współczynnika inflacji wariancji (VIF). Wartości VIF dla wszystkich zmiennych mieściły się w przedziale od 1,12 do 2,41 i pozostawały poniżej progu 5. Oznacza to, że współliniowość nie stanowi istotnego problemu w modelu (Kock i Lynn, 2012). Adekwatność próby oceniono za pomocą miary Kaisera–Meyera–Olkina (KMO) oraz testu sferyczności Bartletta. Wartość KMO wyniosła 0,921, co wskazuje na poziom „doskonały” (Kaiser, 1974). Test Bartletta był istotny statystycznie ($\chi^2 = 4285,12$; $df = 276$; $p < 0,001$), co oznacza, że zmienne wykazują korelacje odpowiednie do analizy czynnikowej. Wielkość próby została rozłożona według krajów oraz dostawców, przy czym w każdej podgrupie $n > 100$, co spełnia minimalny poziom zalecany dla PLS-SEM (Hair i in., 2021).

Współcześnie łańcuchy rolno-spożywcze przekształciły się w struktury wielowymiarowe, obejmujące nie tylko przepływ produktów, lecz także efektywną integrację informacji, technologii oraz elementów zrównoważonego rozwoju. Dostosowanie tych złożonych systemów do zasad gospodarki o obiegu zamkniętym nadal pozostaje jednak niewystarczające. Dlatego lepsze zrozumienie transformacyjnego wpływu cyfryzacji w tym procesie przejścia pozwoli wypełnić istotną lukę w literaturze naukowej. W szczególności elementy takie jak zasobooszczędność, redukcja odpadów oraz identyfikowalność w rolnictwie mogą przyczyniać się do zrównoważonego rozwoju, jeśli są wspierane przez narzędzia cyfrowe. W tym kontekście pierwszym celem jest przetestowanie funkcjonalności cyfryzacji w procesie przejścia do gospodarki o obiegu zamkniętym na poziomie podmiotów. Hipoteza ta opiera się na koncepcjach RBV i DCT. RBV koncentruje się na znaczeniu zasobów strategicznych (np. infrastruktury technologii informacyjnych), które umożliwiają przedsiębiorstwom osiągnięcie trwałej przewagi konkurencyjnej, podczas gdy DCT podkreśla zdolność tych zasobów do szybkiej i efektywnej transformacji w odpowiedzi na zmienność otoczenia. W niniejszym badaniu podstawowe założenie RBV, zgodnie z którym

systems, smart agriculture technologies, etc.) influence CE applications – is tested at the actor-level. Additionally, within the DCT framework, the relationship between organizations' adaptive capacities for environmental sustainability and their levels of technological transformation has been empirically evaluated. The results obtained from the structural model analysis show that the impact of digitalization on circular economy applications is strong and significant in both Türkiye ($\beta = 0.61$; $p < 0.001$) and Italy ($\beta = 0.58$; $p < 0.001$) (Table 5). However, this effect varies significantly depending on the supply chain actors involved. In Türkiye, the impact of digitalization is relatively higher in logistics, exporters, and traders ($\beta = 0.64$ – 0.68), while it remains more limited for primary actors, such as producers and storage facilities. Qualitative findings reveal that relationships with regional development agencies, external support funds, and technology providers accelerated the digital transformation process among logistics, exporters, and traders. One participant summarized this situation as follows: “We switched to a digital monitoring system with the agency's grant; this enabled us to start measuring our waste”. This finding shows that institutional capacity is related to internal capabilities and external support networks. However, the impact is more limited among early-stage actors, such as producers and storage facilities, which is attributed to their lack of access to digital tools and insufficient support, leading them to adopt a cautious approach towards technology. This situation can be linked to producers' lack of access to digital technology, technical knowledge, and low investment capacity. In the qualitative findings, a producer stated: “I have heard of sensor technologies, but I do not fully understand what they are used for. There is no support anyway”, highlighting both awareness and infrastructure deficiencies. This finding is consistent with the findings of Liu et al. (2023), which indicate that the spread of digitalization among small producers remains limited. Additionally, Yuan and Pan (2023) noted that actors with insufficient digital infrastructure require more structural support to transition to CE strategy. Digitalization incentives for producers should not only be financial but should also include technical training and field guidance. Cooperative digital transition programs should be developed for these groups, and technical interfaces should be simplified. In Italy, the impact of Digitalization on CE applications is more stable and evenly distributed across producer, processor, and retail groups ($\beta = 0.60$ – 0.75) (Table 5). This difference may stem from Italy's more advanced digital infrastructure and earlier integration of digital applications into production systems. Additionally,

zasoby „wartościowe, rzadkie, trudne do imitacji i odpowiednio zorganizowane” (w szczególności infrastruktura cyfrowa, systemy zarządzania danymi, technologie inteligentnego rolnictwa itp.) wpływają na wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym, zostało przetestowane na poziomie podmiotów. Dodatkowo, w ramach DCT, empirycznie oceniono zależność między zdolnościami adaptacyjnymi organizacji w zakresie zrównoważonego rozwoju środowiskowego a poziomem ich transformacji technologicznej. Wyniki uzyskane z analizy modelu strukturalnego pokazują, że wpływ cyfryzacji na wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym jest silny i istotny zarówno w Turcji ($\beta = 0,61$; $p < 0,001$), jak i we Włoszech ($\beta = 0,58$; $p < 0,001$) (tab. 5). Efekt ten różni się jednak istotnie w zależności od podmiotów łańcucha dostaw. W Turcji wpływ cyfryzacji jest relatywnie wyższy wśród podmiotów logistycznych, eksporterów oraz handlowców ($\beta = 0,64$ – $0,68$), natomiast pozostaje bardziej ograniczony w przypadku podmiotów pierwotnych, takich jak producenci i magazyny. Wyniki jakościowe wskazują, że relacje z regionalnymi agencjami rozwoju, zewnętrznymi funduszami wsparcia oraz dostawcami technologii przyspieszyły proces transformacji cyfrowej wśród podmiotów logistycznych, eksporterów i handlowców. Jeden z uczestników podsumował tę sytuację następująco: „Przeszliśmy na cyfrowy system monitorowania dzięki dotacji z agencji; pozwoliło nam to rozpocząć pomiar odpadów”. Wynik ten pokazuje, że zdolność instytucjonalna (IC) jest powiązana zarówno z wewnętrznymi możliwościami, jak i zewnętrznymi sieciami wsparcia. Wpływ ten jest jednak bardziej ograniczony wśród podmiotów na wczesnych etapach, takich jak producenci i magazyny, co wynika z ograniczonego dostępu do narzędzi cyfrowych oraz niewystarczającego wsparcia, prowadząc do bardziej ostrożnego podejścia do technologii. Sytuację tę można powiązać z ograniczonym dostępem producentów do technologii cyfrowych, brakiem wiedzy technicznej oraz niską zdolnością inwestycyjną. W wynikach jakościowych jeden z producentów stwierdził: „Słyszałem o technologiach sensorowych, ale nie do końca rozumiem, do czego są wykorzystywane. I tak nie ma żadnego wsparcia”, co podkreśla zarówno niedobory w zakresie świadomości, jak i infrastruktury. Wynik ten jest zgodny z ustaleniami Liu i in. (2023), które wskazują, że rozpowszechnienie cyfryzacji wśród małych producentów pozostaje ograniczone. Ponadto Yuan i Pan (2023) zauważyli, że podmioty dysponujące niewystarczającą infrastrukturą cyfrową wymagają większego wsparcia strukturalnego w procesie przejścia na strategię gospodarki o obiegu zamkniętym. Zachęty do cyfryzacji dla producentów nie powinny mieć wyłącznie charakteru finansowego, lecz obejmować również szkolenia techniczne oraz

the findings validate the RBV's fundamental assumption regarding the strategic value of digital infrastructure at the actor level and demonstrate the contribution of digital technologies to organizational agility within the DCT framework in a context-based manner.

doradztwo wdrożeniowe. Dla tych grup należy rozwijać programy spółdzielczej transformacji cyfrowej oraz upraszczać interfejsy techniczne. We Włoszech wpływ cyfryzacji na wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym jest bardziej stabilny i równomiernie rozłożony wśród producentów, przetwórców oraz detalistów ($\beta = 0,60-0,75$) (tab. 5). Różnica ta może wynikać z bardziej zaawansowanej infrastruktury cyfrowej we Włoszech oraz wcześniejszej integracji rozwiązań cyfrowych w systemach produkcyjnych. Dodatkowo wyniki potwierdzają podstawowe założenie RBV dotyczące strategicznej wartości infrastruktury cyfrowej na poziomie podmiotów oraz ukazują wkład technologii cyfrowych w zwinność organizacyjną w ramach DCT w ujęciu kontekstowym.

Table 5. Structural Equation Model (SEM) results by actor and country*

Tabela 5. Wyniki modelu równań strukturalnych (SEM) według podmiotów i krajów*

Country / Kraj	Actor / Podmiot	DD → IC (β , p)	DD → IC (β , p)	DD → DEU (β , p)	IC → DEU (β , p)	CS → DEU (β , p)	CFI	TLI	RMSEA	SRMR
Türkiye / Turcja	Manufacturer / Producent	0.55 (***)	0.52 (***)	0.18	0.42 (***)	0.36 (**)	0.945	0.934	0.046	0.041
	Processor / Przetwórcza	0.51 (**)	0.48 (**)	0.15	0.37 (**)	0.32 (*)	0.936	0.921	0.049	0.047
	Logistics / Logistyka	0.68 (***)	0.66 (***)	0.26 (**)	0.51 (***)	0.45 (***)	0.951	0.944	0.038	0.035
	Retail / Detalista	0.49 (**)	0.50 (**)	0.17	0.39 (**)	0.33 (*)	0.93	0.913	0.051	0.05
	Storage / Magazynowanie	0.50 (**)	0.49 (**)	0.16	0.36 (**)	0.31	0.928	0.912	0.053	0.052
	Cooperative / Spółdzielnia	0.62 (***)	0.61 (***)	0.22	0.48 (***)	0.44 (***)	0.954	0.941	0.04	0.038
	Merchant / Handlowiec	0.53 (**)	0.54 (**)	0.19 (*)	0.40 (**)	0.35 (*)	0.94	0.924	0.048	0.044
	Exporter / Eksporter	0.65 (***)	0.62 (***)	0.28 (**)	0.53 (***)	0.46 (***)	0.958	0.947	0.037	0.034
Italy / Włochy	Manufacturer / Producent	0.63 (***)	0.60 (***)	0.24 (*)	0.49 (***)	0.41 (***)	0.963	0.955	0.034	0.032
	Processor / Przetwórcza	0.58 (***)	0.55 (***)	0.20	0.43 (***)	0.36 (**)	0.95	0.939	0.042	0.039
	Logistics / Logistyka	0.71 (***)	0.70 (***)	0.29 (**)	0.55 (***)	0.50 (***)	0.972	0.965	0.03	0.028
	Retail / Detalista	0.61 (***)	0.59 (***)	0.22	0.47 (***)	0.39 (**)	0.948	0.938	0.043	0.037
	Storage / Magazynowanie	0.59 (***)	0.57 (***)	0.21	0.44 (***)	0.37 (**)	0.947	0.936	0.044	0.04
	Cooperative / Spółdzielnia	0.67 (***)	0.66 (***)	0.26 (**)	0.52 (***)	0.49 (***)	0.969	0.961	0.032	0.03
	Merchant / Handlowiec	0.56 (**)	0.53 (**)	0.23	0.41 (**)	0.38 (**)	0.944	0.932	0.045	0.041
	Exporter / Eksporter	0.69 (***)	0.68 (***)	0.31 (***)	0.56 (***)	0.51 (***)	0.975	0.967	0.029	0.027

* DD – Level of Digitalization; IC – Institutional Capacity; DEU – Level of Circular Economy Implementation; CS – Cooperation Structure; CFI – Comparative Fit Index; TLI – Tucker–Lewis Index; SRMR – Standardized Root Mean Square Residual / DD – poziom cyfryzacji; IC – potencjał instytucjonalny; DEU – poziom wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym; CS – struktura współpracy; CFI – indeks dopasowania porównawczego; TLI – indeks Tuckera–Lewisa; SRMR – standaryzowany pierwiastek średniokwadratowy reszt

Source: authors' own elaboration based on the empirical analysis conducted in this study.

Źródło: opracowanie własne autorów na podstawie analizy empirycznej przeprowadzonej w niniejszym badaniu.

Today, agriculture-food supply chains, with their complex and multi-actor structures, require not only product flow but also a collaborative environment where information, value, environmental responsibility, and shared goals are shared among the actors. However, the systematic implementation of CE practices remains limited in the industry. Collaboration is considered a catalyst for CE through tools such as information sharing, joint decision-making, cost and risk sharing, both vertically (producer–retailer) and horizontally (producer–producer, cooperatives). Social capital theory and resource dependence theory (RDT) form the theoretical basis for this hypothesis. Social exchange theory (SET) states that relationships built on the principles of mutual trust, commitment, and mutual benefit create sustainable value, whereas RDT argues that actors strategically direct their cooperation behavior based on their level of dependence on external resources (Marquina et al., 2024; Sudusinghe & Seuring, 2022). In this context, the model developed analyzes the impact of collaboration on CE based on different actor groups (producers, processors, logistics, storage, cooperatives, retailers, traders, and exporters) in Türkiye and Italy. The results show that cooperation significantly and positively affects CE practices in Türkiye ($\beta = 0.52$; $p < 0.001$) and Italy ($\beta = 0.65$; $p < 0.001$) (Table 4). However, the effects vary significantly across the actors. In Türkiye, cooperatives ($\beta = 0.68$), exporters ($\beta = 0.60$), and traders ($\beta = 0.59$) benefit more from collaboration, whereas the effect is lower for producers and storage actors ($\beta = 0.41$ – 0.45). In contrast, stronger effects are observed among processors ($\beta = 0.70$), logistics ($\beta = 0.68$), and retail ($\beta = 0.66$) in Italy (Table 5). These findings can be explained by Italy's more institutionalized cooperation and cooperative systems (Kusumawardani et al., 2021; Papadopoulos et al., 2022). The study also revealed that the quality of stakeholder interaction (trust, information sharing, goal alignment) is a key determinant of CE success, not just technical capacity (Berardi & de Brito, 2021; Bloise, 2020; Chiaraluce et al., 2021; Varma et al., 2025). Indeed, a participant from Italy stated: “No one wants to share data; everyone is thinking about their own interests”, pointing to low levels of social capital. This finding aligns with that of Radavičius and Tvaronavičienė (2021), who highlighted trust as a key factor in the digital transition based on collaboration structures. Additionally, Liu et al. (2023) emphasized that the quality of collaboration directly impacts CE performance. Therefore, platforms that enhance intra-sectoral trust (e.g., open data-sharing protocols and joint digital record systems) should be developed, and

Współcześnie łańcuchy rolno-spożywcze, ze względu na swoją złożoną i wielopodmiotową strukturę, wymagają nie tylko przepływu produktów, lecz także środowiska współpracy, w którym między podmiotami współdzielone są informacje, wartość, odpowiedzialność środowiskowa oraz wspólne cele. Systematyczne wdrażanie praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze pozostaje jednak ograniczone. Współpraca jest uznawana za katalizator gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez takie narzędzia jak wymiana informacji, wspólne podejmowanie decyzji oraz współdzielenie kosztów i ryzyka, zarówno w układzie pionowym (producent–detalista), jak i poziomym (producent–producent, spółdzielnie). Podstawę teoretyczną tej hipotezy stanowią teoria kapitału społecznego oraz teoria zależności od zasobów (RDT). Teoria wymiany społecznej (SET) stwierdza, że relacje oparte na zasadach wzajemnego zaufania, zaangażowania i obopólnych korzyści tworzą trwałą wartość, natomiast RDT wskazuje, że podmioty strategicznie kształtują swoje zachowania kooperacyjne w zależności od poziomu zależności od zasobów zewnętrznych (Marquina i in., 2024; Sudusinghe i Seuring, 2022). W tym kontekście opracowany model analizuje wpływ współpracy na gospodarkę o modelu zamkniętym w różnych grupach podmiotów (producentów, przetwórców, logistykę, magazynowanie, spółdzielnie, detalistów, handlowców i eksporterów) w Turcji i we Włoszech. Wyniki wskazują, że współpraca istotnie i pozytywnie wpływa na praktyki gospodarki o modelu zamkniętym zarówno w Turcji ($\beta = 0,52$; $p < 0,001$), jak i we Włoszech ($\beta = 0,65$; $p < 0,001$) (tab. 4). Efekty te różnią się jednak znacząco w zależności od podmiotów. W Turcji spółdzielnie ($\beta = 0,68$), eksporterzy ($\beta = 0,60$) oraz handlowcy ($\beta = 0,59$) odnoszą większe korzyści ze współpracy, podczas gdy efekt ten jest niższy w przypadku producentów i podmiotów zajmujących się magazynowaniem ($\beta = 0,41$ – $0,45$). Z kolei we Włoszech silniejsze efekty obserwuje się wśród przetwórców ($\beta = 0,70$), podmiotów logistycznych ($\beta = 0,68$) oraz detalistów ($\beta = 0,66$) (tab. 5). Wyniki te można wyjaśnić bardziej zinstytucjonalizowanymi systemami współpracy i spółdzielczości we Włoszech (Kusumawardani i in., 2021; Papadopoulos i in., 2022). Badanie wykazało również, że jakość interakcji między zainteresowanymi stronami (zaufanie, wymiana informacji, zgodność celów) jest kluczowym czynnikiem determinującym sukces gospodarki o modelu zamkniętym a nie tylko zdolności techniczne (Berardi i de Brito, 2021; Bloise, 2020; Chiaraluce i in., 2021; Varma i in., 2025). Jeden z uczestników z Włoch stwierdził: „Nikt nie chce dzielić się danymi; każdy myśli

policymakers should design trust-enhancing governance models tailored to this group. In summary, trust-based relationships facilitate the transition to CE in the SET context, while collaboration has become a necessity for actors dependent on external resources, particularly in export and logistics, from an RDT perspective. From this perspective, this study confirms, for the first time, the collaboration–cyclicality relationship, which has been tested to a limited extent in the literature in both multi-actor and international contexts. Methodologically, by separating data at the actor level, the study analyzed the impact of inter-country and intra-supply chain operational differences on CE success.

Institutional capacity is a critical determinant of the success of circular economy practices. Institutional capacity encompasses not only firms' internal capabilities but also systemic elements such as policy support, sectoral regulations, information infrastructure, and stakeholders' implementation capacity. In this context, institutional theory explains how environmental pressures (coercive, imitative, and normative) shape organizational behavior and guide circular transformation processes (Sun, 2018). Institutional capacity is also supported by the RBV and is related to strategic resources and processes that enable organizations to effectively adopt environmental strategies (Cahyadi et al., 2024). In this context, the model results show that the effect of institutional capacity on the circular economy is significant and positive in both Türkiye ($\beta = 0.36$; $p < 0.01$) and Italy ($\beta = 0.52$; $p < 0.001$) (Table 4). In Italy, this effect was found to be higher for cooperatives and exporters, whereas in Türkiye, institutional capacity appears to be more effective for storage and logistics actors. This situation can be attributed to these actors benefiting more from digital infrastructure investments through regional development agencies. In qualitative data, one participant explained this process by saying: “The development agency provided us with a software grant, so we switched to ERP”. This finding is consistent with the finding of Zhang et al. (2020) that institutional capacity in the logistics sector is a driving force for CE application. Kusumowardani et al. (2021) emphasized that process-oriented digitalization is particularly effective in operational segments. Logistics actors have the potential to form the digital backbone of CE transformation. Therefore, organizational competence development programs (process management, data analytics) should be supported as much as infrastructure investments. This may stem from the fact that public support in Türkiye is infrastructure-focused and implemented

tylko o własnych interesach”, co wskazuje na niski poziom kapitału społecznego. Wynik ten jest zgodny z ustaleniami Radavičiusa i Tvaronavičienė (2021), którzy wskazali zaufanie jako kluczowy czynnik transformacji cyfrowej opartej na strukturach współpracy. Ponadto Liu i in. (2023) podkreślili, że jakość współpracy bezpośrednio wpływa na efektywność gospodarki o obiegu zamkniętym. W związku z tym należy rozwijać platformy wzmacniające zaufanie wewnątrz sektora (np. otwarte protokoły wymiany danych oraz wspólne cyfrowe systemy ewidencji), a decydenci powinni projektować modele zarządzania wzmacniające zaufanie, dostosowane do tej grupy. Podsumowując, relacje oparte na zaufaniu ułatwiają przejście do gospodarki o obiegu zamkniętym w kontekście SET, natomiast współpraca staje się koniecznością dla podmiotów zależnych od zasobów zewnętrznych, szczególnie w sektorze eksportu i logistyki, z perspektywy RDT. Z tej perspektywy badanie to po raz pierwszy potwierdza relację między współpracą a gospodarką o obiegu zamkniętym, która w literaturze była dotychczas testowana w ograniczonym zakresie zarówno w kontekstach wielopodmiotowych, jak i międzynarodowych. Metodologicznie, poprzez rozdzielanie danych na poziomie podmiotów, w badaniu przeanalizowano wpływ różnic operacyjnych między krajami oraz w obrębie łańcucha dostaw na sukces gospodarki o modelu zamkniętym.

Zdolność instytucjonalna jest kluczowym czynnikiem decydującym o sukcesie praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym. Obejmuje ona nie tylko wewnętrzne zdolności przedsiębiorstw, lecz także elementy systemowe, takie jak wsparcie polityczne, regulacje sektorowe, infrastruktura informacyjna oraz zdolność wdrożeniowa zainteresowanych stron. W tym kontekście teoria instytucjonalna wyjaśnia, w jaki sposób presje środowiskowe (przymusowe, mimetyczne i normatywne) kształtują zachowania organizacyjne i kierują procesami transformacji gospodarki o obiegu zamkniętym (Sun, 2018). Zdolność instytucjonalna jest również wspierana przez RBV i wiąże się ze strategicznymi zasobami oraz procesami umożliwiającymi organizacjom skuteczne wdrażanie strategii środowiskowych (Cahyadi i in., 2024). W tym kontekście wyniki modelu pokazują, że wpływ zdolności instytucjonalnej na gospodarkę o obiegu zamkniętym jest istotny i pozytywny zarówno w Turcji ($\beta = 0,36$; $p < 0,01$), jak i we Włoszech ($\beta = 0,52$; $p < 0,001$) (tab. 4). We Włoszech efekt ten jest wyższy wśród spółdzielni i eksporterów, natomiast w Turcji zdolność instytucjonalna wydaje się być bardziej efektywna wśród magazynierów i podmiotów logistycznych. Sytuację tę można przypisać temu, że

through regional development agencies, while in Italy, stronger sectoral organizations play a significant role (Fassio et al., 2022; Krstić et al., 2024). Additionally, these findings are consistent with those of Dieguez-Santana et al. (2025) systematic review, which identified the lack of institutional support as a fundamental barrier (Mehmood et al., 2021). Furthermore, it supports the findings of Anastasiadis et al. (2022) that traceability and institutional regulations along the supply chain enhance circularity. Furthermore, the three-pronged incentive model (government, consumer, firm) developed by Dieguez-Santana et al. (2025) in the Chinese context aligns with the multi-actor approach of this study. In this context, the study demonstrates that institutional capacity serves not only as policy support but also as a structural lever that enhances coordination and alignment among the actors.

Another objective of this study is to test the sensitivity of the relationship between digitalization and circular economy applications to contextual conditions. Although the contribution of digitalization to the circular economy has been confirmed in many studies (Esposito et al., 2023), how this relationship changes in different contexts at the country level has not been sufficiently investigated (Bag et al., 2024; Chiaraluce et al., 2021; Krstić et al., 2024; Perçin, 2022). The impact of cross-country structural, technological, and institutional differences on the functionality of digital solutions forms the basis of this hypothesis. The findings from structural equivalence tests and moderator analyses indicate that the impact of digitalization on the circular economy is stronger and more direct in Italy, while it is indirect and weaker in Türkiye. This situation can be explained by the higher institutional support, more developed digital infrastructure, and stronger environmental policies in Italy's agricultural supply chain (Dieguez-Santana et al., 2025; Gkountani et al., 2021). In Türkiye, however, the impact of digitalization has been more pronounced in more competitive sectors such as logistics and retail, while remaining limited at the producer and cooperative levels. When evaluated through the lens of institutional theory and context-dependent sustainability paradigms, these differences indicate that the success of environmental innovations depends not only on technological factors but also on political and cultural infrastructure (Lugo et al., 2022; Rodríguez-Mañay et al., 2025; Vetrova & Ivanova, 2021).

podmioty te w większym stopniu korzystają z inwestycji w infrastrukturę cyfrową realizowanych przez regionalne agencje rozwoju. W danych jakościowych jeden z uczestników wyjaśnił ten proces, mówiąc: „Agencja rozwoju zapewniła nam dotację na oprogramowanie, więc przeszliśmy na ERP”. To ustalenie jest zgodne z wynikami Zhanga i in. (2020), którzy wskazali, że zdolność instytucjonalna w sektorze logistyki stanowi siłę napędową wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym. Kusumowardani i in. (2021) podkreślili, że cyfryzacja zorientowana na procesy jest szczególnie skuteczna w segmentach operacyjnych. Podmioty logistyczne mają potencjał do tworzenia cyfrowego „kręgosłupa” transformacji gospodarki o obiegu zamkniętym. Dlatego programy rozwoju kompetencji organizacyjnych (zarządzania procesami, analizy danych) powinny być wspierane w takim samym stopniu jak inwestycje infrastrukturalne. Może to wynikać z faktu, że wsparcie publiczne w Turcji koncentruje się na infrastrukturze i jest realizowane poprzez regionalne agencje rozwoju, podczas gdy we Włoszech większą rolę odgrywają silniejsze organizacje sektorowe (Fassio i in., 2022; Krstić i in., 2024). Ponadto wyniki te są zgodne z przeglądem systematycznym Dieguez-Santana i in. (2025), w którym wskazano brak wsparcia instytucjonalnego jako podstawową barierę (Mehmood i in., 2021). Co więcej, potwierdzają one ustalenia Anastasiadisa i in. (2022), że identyfikowalność oraz regulacje instytucjonalne w całym łańcuchu dostaw wzmacniają gospodarkę o obiegu zamkniętym. Ponadto trójwymiarowy model bodźców (rząd–konsument–przedsiębiorstwo) opracowany przez Dieguez-Santana i in. (2025) w kontekście Chin jest spójny z wielopodmiotowym podejściem przyjętym w niniejszym badaniu. W tym kontekście badanie pokazuje, że zdolność instytucjonalna pełni rolę nie tylko wsparcia politycznego, lecz także strukturalnej dźwigni wzmacniającej koordynację i dopasowanie między podmiotami.

Kolejnym celem badania jest testowanie wrażliwości relacji między cyfryzacją a wdrażaniem gospodarki o obiegu zamkniętym na warunki kontekstowe. Chociaż wkład cyfryzacji w gospodarkę o obiegu zamkniętym został potwierdzony w wielu badaniach (Esposito i in., 2023), to sposób, w jaki relacja ta zmienia się w różnych kontekstach krajowych, nie został wystarczająco zbadany (Bag i in., 2024; Chiaraluce i in., 2021; Krstić i in., 2024; Perçin, 2022). Wpływ różnic strukturalnych, technologicznych i instytucjonalnych między krajami na funkcjonalność rozwiązań cyfrowych stanowi podstawę tej hipotezy. Wyniki testów równoważności strukturalnej oraz analiz moderatorów wskazują, że wpływ cyfryzacji na gospodarkę o obiegu zamkniętym jest silniejszy

i bardziej bezpośredni we Włoszech, natomiast w Turcji jest słabszy i bardziej pośredni. Sytuację tę można wyjaśnić wyższym poziomem wsparcia instytucjonalnego, bardziej rozwiniętą infrastrukturą cyfrową oraz silniejszą polityką środowiskową w łańcuchu dostaw sektora rolnego we Włoszech (Dieguez-Santana i in., 2025; Gkoutani i in., 2021). W Turcji natomiast wpływ cyfryzacji jest bardziej widoczny w sektorach o wyższej konkurencyjności, takich jak logistyka i handel detaliczny, natomiast pozostaje ograniczony na poziomie producentów i spółdzielni. Analizując to z perspektywy teorii instytucjonalnej oraz kontekstowych paradygmatów zrównoważonego rozwoju, różnice te wskazują, że sukces innowacji środowiskowych zależy nie tylko od czynników technologicznych, lecz także od infrastruktury politycznej i kulturowej (Lugo i in., 2022; Rodríguez-Mañay i in., 2025; Vetrova i Ivanova, 2021).

Conclusion

This study is one of the few investigations examining the impact of digitalization in agricultural-food supply chains in Türkiye and Italy on circular economy (CE) applications within a multi-actor, multi-level, and comparative framework. The analytical framework developed using the EDDU-M model comprehensively addresses the level of digitalization, institutional capacity, and collaboration dynamics. A significant portion of the hypotheses tested based on Structural Equation Modelling (SEM) results were supported. Accordingly, in line with H1 hypothesis, it was found that digitalization, in other words, the use of data analytics and the IoT, has a significant and positive effect on the level of CE application in both countries (Türkiye – $\beta = 0.61$, $p < 0.001$; Italy – $\beta = 0.58$, $p < 0.001$). Furthermore, it was determined that institutional capacity plays a significant mediating role in the relationship between digitalization and CE applications, revealing that businesses with strong corporate and managerial capacity transform digital tools into circular applications more effectively (H2). Another finding of the study is that the effects of digitalization differ among supply chain actors. Specifically, higher levels of impact were observed among logistics, exporters, and traders in Türkiye, while the impact was more limited among producers and storage businesses. In contrast, the effects of digitalization were more evenly distributed in Italy, with a particularly noticeable impact among producers, processors, and retailers (H3). Findings related to H4 hypothesis show that the relationship between digitalization and CE takes different forms depending on the institutional mechanisms of the two countries. In Italy, a strong regulatory framework and

Wnioski

Niniejsze badanie jest jednym z nielicznych opracowań analizujących wpływ cyfryzacji w łańcuchach rolno-spożywczych w Turcji i we Włoszech na wdrażanie gospodarki o obiegu zamkniętym w ujęciu wielopodmiotowym, wielopoziomowym oraz porównawczym. Opracowane ramy analityczne z wykorzystaniem modelu EDDU-M kompleksowo uwzględniają poziom cyfryzacji, zdolność instytucjonalną oraz dynamikę współpracy. Znaczna część hipotez testowanych na podstawie wyników modelowania równań strukturalnych (SEM) została potwierdzona. W związku z tym, zgodnie z hipotezą H1 stwierdzono, że cyfryzacja, czyli wykorzystanie analizy danych oraz IoT, ma istotny i pozytywny wpływ na poziom wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w obu krajach (Turcja – $\beta = 0,61$; $p < 0,001$; Włochy – $\beta = 0,58$; $p < 0,001$). Ponadto ustalono, że zdolność instytucjonalna odgrywa istotną rolę mediującą w relacji między cyfryzacją a wdrażaniem gospodarki o obiegu zamkniętym, co pokazuje, że przedsiębiorstwa o silnych zdolnościach organizacyjnych i zarządczych skuteczniej przekładają narzędzia cyfrowe na rozwiązania oparte na gospodarce o obiegu zamkniętym (H2). Kolejnym wynikiem badania jest to, że efekty cyfryzacji różnią się między podmiotami łańcucha dostaw. W szczególności w Turcji wyższy poziom wpływu obserwuje się wśród podmiotów logistycznych, eksporterów i handlowców, natomiast wpływ ten jest bardziej ograniczony w przypadku producentów i przedsiębiorstw magazynowych. Z kolei we Włoszech efekty cyfryzacji są bardziej równomiernie rozłożone, z wyraźnym wpływem wśród producentów, przetwórców i detalistów (H3). Wyniki związane z hipotezą H4

sectoral organisational structure support the transformation of digitalization into cyclical applications, while in Türkiye this effect emerges more through cooperative networks and external financial support. The fsQCA findings, which complement the SEM results, show that achieving high CE performance is not dependent on a single technology or capacity component, but rather on different combinations of conditions. For example, actors with strong collaboration networks in Türkiye exhibit high CE performance despite low digital infrastructure, while advanced technology levels in Italy have produced similar results. This situation demonstrates that CE performance depends not only on technical capacities but also on institutional, contextual, and collaborative dynamics. Overall, this study makes significant contributions to the literature on the impact of digitalization on circular transformation by revealing the differences between countries and actor groups in a multidimensional and empirical manner, based on a holistic, comparative, and methodologically diverse approach.

Theoretical Implications

This study fills three key gaps in the existing literature: (i) examining the digitalization–CE relationship in a multi-actor and multi-layered structure; (ii) modelling this relationship through intermediary variables such as institutional capacity and cooperation structure; and (iii) empirically testing the regulatory effects of country context. Findings obtained within the RBV and DCT frameworks confirm that digital technologies provide firms with sustainable competitive advantages as strategic resources and enhance their capacity to adapt to environmental changes. In particular, the multiple effects of technologies such as data analytics and IoT in CE applications align with the RBV’s “valuable – rare – imitable – organised” resource criteria. From a DCT perspective, the process flexibility, real-time data management, and operational optimization enabled by digitalization allow companies to respond more quickly to changing environmental and market conditions. Findings from corporate theory indicate that strong institutional infrastructure and sectoral

wskazują, że relacja między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym przyjmuje różne formy w zależności od mechanizmów instytucjonalnych w obu krajach. We Włoszech silne ramy regulacyjne oraz struktura organizacji sektorowych wspierają transformację cyfryzacji w rozwiązania oparte na gospodarce o obiegu zamkniętym, podczas gdy w Turcji efekt ten ujawnia się głównie poprzez sieci spółdzielcze oraz zewnętrzne wsparcie finansowe. Wyniki fsQCA, które uzupełniają rezultaty SEM, pokazują, że osiągnięcie wysokiej efektywności gospodarki o modelu zamkniętym nie zależy od pojedynczej technologii ani jednego komponentu zdolności, lecz od różnych kombinacji warunków. Na przykład podmioty o silnych sieciach współpracy w Turcji osiągają wysoką efektywność gospodarki o modelu zamkniętym pomimo niskiego poziomu infrastruktury cyfrowej, podczas gdy we Włoszech podobne rezultaty wynikają z wysokiego poziomu zaawansowania technologicznego. Sytuacja ta pokazuje, że efektywność gospodarki o modelu zamkniętym zależy nie tylko od zdolności technicznych, lecz także od dynamiki instytucjonalnej, kontekstowej i współpracy. Ogólnie rzecz biorąc, badanie to wnosi istotny wkład do literatury dotyczącej wpływu cyfryzacji na transformację w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, ujawniając różnice między krajami i grupami podmiotów w ujęciu wielowymiarowym i empirycznym, opartym na holistycznym, porównawczym i metodologicznie zróżnicowanym podejściu.

Implikacje teoretyczne

Niniejsze badanie wypełnia trzy kluczowe luki w istniejącej literaturze: (i) analizę relacji między cyfryzacją a gospodarką o obiegu zamkniętym w strukturze wielopodmiotowej i wielopoziomowej; (ii) modelowanie tej relacji z wykorzystaniem zmiennych pośredniczących, takich jak zdolność instytucjonalna i struktura współpracy; oraz (iii) empiryczne testowanie efektów moderujących kontekstu krajowego. Wyniki uzyskane w ramach RBV i DCT potwierdzają, że technologie cyfrowe stanowią strategiczne zasoby zapewniające przedsiębiorstwom trwałą przewagę konkurencyjną oraz zwiększają ich zdolność adaptacji do zmian środowiskowych. W szczególności wielowymiarowe efekty technologii takich jak analiza danych oraz IoT w zastosowaniach gospodarki o obiegu zamkniętym są zgodne z kryteriami zasobów RBV: „wartościowe – rzadkie – trudne do imitacji – zorganizowane”. Z perspektywy DCT elastyczność procesowa, zarządzanie danymi w czasie rzeczywistym oraz optymalizacja operacyjna umożliwiające przez cyfryzację pozwalają

organizations in Italy reinforce the relationship between digitalization and CE SET and RDT support the critical role of collaboration in DE success, with this relationship found to be stronger among exporters and logistics actors with high external resource dependency. Methodologically, the combined use of SEM and fsQCA enabled both confirmatory and exploratory analyses to be applied within the same framework, thereby revealing both linear relationships and contextual combinations. In this regard, the study contributes significantly to the literature on digitalization and sustainability in the agriculture-food sector in terms of model integrity and methodological innovation.

Practical Implications

The practical results of this study enable the development of applicable strategies for policymakers, sectoral associations, and agriculture-food businesses. In the Turkish context, the priority need is infrastructure investment and technical capacity development programs for small producers and exporters, who are actors with limited access to digitalization. Cooperative-based digital transition models for these groups can enable low-cost technology adaptation. In addition, support provided by regional development agencies should be directed not only towards infrastructure investments but also towards digital skills training and data management capacity. Strengthening the alignment of Italy's current high-tech use with sustainability strategies is crucial. Sectoral incentives should be increased in the areas of redesign and renewable energy application. In both countries, open data platforms, shared ERP systems, and blockchain-based traceability solutions that increase data sharing and transparency among supply chain actors should be widely adopted. To improve the quality of cooperation, trust-based governance mechanisms, joint goal-setting processes, and regular communication platforms among stakeholders should be developed. These recommendations have the potential to improve environmental performance, brand value, customer trust, and access to international markets.

przedsiębiorstwom szybciej reagować na zmieniające się warunki środowiskowe i rynkowe. Rezultaty wynikające z teorii instytucjonalnej wskazują, że silna infrastruktura instytucjonalna oraz organizacje sektorowe we Włoszech wzmacniają relację między cyfryzacją a gospodarką o modelu zamkniętym SET oraz RDT potwierdzają kluczową rolę współpracy w sukcesie gospodarki o modelu zamkniętym przy czym relacja ta jest silniejsza wśród eksporterów i podmiotów logistycznych o wysokiej zależności od zasobów zewnętrznych. Metodologicznie, połączenie SEM i fsQCA umożliwiło zastosowanie zarówno analiz confirmacyjnych, jak i eksploracyjnych w ramach jednego podejścia, ujawniając zarówno zależności liniowe, jak i konfiguracje kontekstowe. W tym zakresie badanie wnosi istotny wkład do literatury dotyczącej cyfryzacji i zrównoważonego rozwoju w sektorze rolno-spożywczym zarówno pod względem spójności modelu, jak i innowacji metodologicznej.

Praktyczne implikacje

Praktyczne wyniki niniejszego badania umożliwiają opracowanie obowiązujących strategii dla decydentów politycznych, organizacji sektorowych oraz przedsiębiorstw rolno-spożywczych. W kontekście Turcji priorytetową potrzebą są inwestycje w infrastrukturę oraz programy rozwoju kompetencji technicznych dla małych producentów i eksporterów, czyli podmiotów o ograniczonym dostępie do cyfryzacji. Modele cyfrowej transformacji oparte na spółdzielniach dla tych grup mogą umożliwić niskokosztową adaptację technologii. Ponadto wsparcie udzielane przez regionalne agencje rozwoju powinno być ukierunkowane nie tylko na inwestycje infrastrukturalne, lecz także na szkolenia z zakresu kompetencji cyfrowych oraz zarządzania danymi. Wzmocnienie powiązania obecnego wysokiego poziomu wykorzystania technologii we Włoszech ze strategiami zrównoważonego rozwoju jest kluczowe. Należy zwiększyć zachęty sektorowe w obszarach przeprojektowania oraz zastosowania energii odnawialnej. W obu krajach powinno się szeroko wdrażać otwarte platformy danych, wspólne systemy ERP oraz rozwiązania identyfikowalności oparte na blockchainie, które zwiększają wymianę danych i przejrzystość między podmiotami łańcucha dostaw. W celu poprawy jakości współpracy należy rozwijać mechanizmy zarządzania oparte na zaufaniu, procesy wspólnego ustalania celów oraz regularne platformy komunikacji między zainteresowanymi stronami. Zalecenia te mają potencjał poprawy wyników środowiskowych, wartości marki, zaufania klientów oraz dostępu do rynków międzynarodowych.

Limitations and Future Research Directions

This study offers significant empirical and methodological contributions, but it has some limitations for future research. Firstly, the analysis is based on single-stage survey and interview data collected between January and June 2025. This cross-sectional design does not allow for tracking the dynamics of the relationship between digitalization and circular economy (CE) practices over time and limits causal inferences. Future research examining the evolution of the impact of digital transformation investments on CE performance using longitudinal or panel data designs would shed more light on the causal aspects of this relationship. As the scope of the study is limited to only two countries – Türkiye and Italy – the findings are context-specific and have limited generalisability. Conducting comparative analyses covering countries with different socio-economic, cultural, and institutional structures would enhance the theoretical validity and external reliability of the model. Furthermore, although the 412 businesses in the sample represent seven different stakeholder groups, the fact that the sampling was purposeful and not based on randomness principles may increase the possibility of selection bias, thereby partially limiting external validity. The use of stratified random sampling in future research would strengthen representativeness. Furthermore, the reliance of measurement tools on participants' self-assessments carries the risk of perceptual bias. The use of secondary data, field observations, and business performance records in future studies would contribute to the objective validation of findings. Furthermore, testing the EDDU-M model across different agricultural product groups, such as dairy products, cereals, and fruit and vegetables, and across different supply chain lengths will allow for an assessment of the model's sectoral adaptability. Expanding the sets of conditions used in the fsQCA approach to include new technologies such as digital twins or artificial intelligence-supported demand forecasting could strengthen the model's explanatory power. Finally, in-depth qualitative research into variables such as collaboration quality, organisational capacity, and managerial vision will contribute to the development of context-sensitive strategies for policymakers and managers.

Ograniczenia i przyszłe kierunki badań

Niniejsze badanie wnosi istotny wkład empiryczny i metodologiczny, jednak posiada również pewne ograniczenia, które mogą stanowić kierunki dla przyszłych badań. Po pierwsze, analiza opiera się na danych z jednorazowego badania ankietowego oraz rozmów przeprowadzonych w okresie od stycznia do czerwca 2025 r. Taki przekrojowy charakter badania nie pozwala na śledzenie dynamiki relacji między cyfryzacją a praktykami gospodarki o obiegu zamkniętym w czasie oraz ogranicza możliwość wnioskowania przyczynowego. Przyszłe badania analizujące ewolucję wpływu inwestycji w transformację cyfrową na wyniki gospodarki o obiegu zamkniętym z wykorzystaniem danych podłużnych lub panelowych mogłyby lepiej wyjaśnić przyczynowe aspekty tej relacji. Ze względu na to, że zakres badania obejmuje tylko dwa kraje – Turcję i Włochy – wyniki mają charakter kontekstowy i ograniczoną możliwość generalizacji. Przeprowadzenie analiz porównawczych obejmujących kraje o zróżnicowanych strukturach społeczno-ekonomicznych, kulturowych i instytucjonalnych zwiększyłyby trafność teoretyczną oraz wiarygodność zewnętrzną modelu. Ponadto, mimo że próba obejmuje 412 przedsiębiorstw reprezentujących siedem różnych grup zainteresowanych stron, zastosowanie doboru celowego zamiast losowego może zwiększać ryzyko błędu selekcji, co częściowo ogranicza trafność zewnętrzną. Zastosowanie losowego doboru warstwowego w przyszłych badaniach mogłoby wzmocnić reprezentatywność próby. Co więcej, oparcie narzędzi pomiarowych na samoocenie respondentów niesie ryzyko błędu percepcyjnego. Wykorzystanie danych wtórnych, obserwacji terenowych oraz danych o wynikach działalności przedsiębiorstw w przyszłych badaniach mogłoby przyczynić się do bardziej obiektywnej weryfikacji wyników. Ponadto testowanie modelu EDDU-M w różnych grupach produktów rolnych, takich jak produkty mleczne, zboża oraz owoce i warzywa, a także w łańcuchach dostaw o różnej długości pozwoliłoby ocenić jego adaptacyjność sektorową. Rozszerzenie zbioru warunków w podejściu fsQCA o nowe technologie, takie jak cyfrowe bliźniaki czy prognozowanie popytu wspierane sztuczną inteligencją, mogłoby wzmocnić siłę wyjaśniającą modelu. Ponadto pogłębione badania jakościowe dotyczące takich zmiennych jak jakość współpracy, zdolność organizacyjna oraz wizja zarządcza przyczyniłyby się do opracowania bardziej kontekstowych strategii dla decydentów i menedżerów oraz zainteresowanych stron.

References / Bibliografia

- Ada, E., Sezer, M., Kazançoğlu, Y., & Khaleel, R. (2023). Towards the Smart Sustainable and Circular Food Supply Chains Through Digital Technologies. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 8(3). <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2023.8.3.022>.
- Agrawal, R., Yadav, V.S., Majumdar, A., Kumar, A., Luthra, S., & Garza-Reyes, J.A. (2023). Opportunities for Disruptive Digital Technologies to Ensure Circularity in Supply Chain: A Critical Review of Drivers, Barriers and Challenges. *Computers & Industrial Engineering*, 178, C. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109140>
- Anastasiadis, F., Manikas, I., Apostolidou, I., & Wahbeh, S. (2022). The Role of Traceability in End-to-End Circular Agri-Food Supply Chains. *Industrial Marketing Management*, 104, 196–211. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.04.021>
- Bag, S., Srivastava, G., Cherrafi, A., Ali, A., & Singh, R.K. (2024). Data-Driven Insights for Circular and Sustainable Food Supply Chains: An Empirical Exploration of Big Data and Predictive Analytics in Enhancing Social Sustainability Performance. *Business Strategy and the Environment*, 33(2). <https://doi.org/10.1002/bse.3554>
- Berardi, P.C., & de Brito, R.P. (2021). Supply Chain Collaboration for a Circular Economy: From Transition to Continuous Improvement. *Journal of Cleaner Production*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129511>
- Bloise, C. (2020). Collaboration in a Circular Economy: Learning From the Farmers to Reduce Food Waste. *Journal of Enterprise Information Management*, 33(4), 769–789. <https://doi.org/10.1108/JEIM-02-2019-0062>
- Boz, Z., & Martin-Ryals, A. (2023). The Role of Digitalization in Facilitating the Circular Economy. *Journal of the ASABE*, 66(2), 479–496. <https://doi.org/10.13031/ja.14924>
- Bozatli, O., & Akca, H. (2024). Does the Composition of Environmental Regulation Matter for Ecological Sustainability? Evidence from Fourier ARDL Under the EKC and LCC Hypotheses. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(12), 4305–4323. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02838-7>
- Brislin, R.W. (1970). Back-Translation for Cross-Cultural Research. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 1(3), 185–216. <https://doi.org/10.1177/135910457000100301>
- Cahyadi, E.R., Hidayati, N., Zahra, N., & Arif, C. (2024). Integrating Circular Economy Principles into Agri-Food Supply Chain Management: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/su16167165>
- Chiaraluce, G., Bentivoglio, D., & Finco, A. (2021). Circular Economy for a Sustainable Agri-Food Supply Chain: A Review for Current Trends and Future Pathways. *Sustainability*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169294>
- Colombo, B., Boffelli, A., Colombo, J., Madonna, A., & Villa, S. (2023). How Can Digitalization Support the Circular Economy? An Empirical Analysis From the Manufacturing Industry. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 72–84). https://doi.org/10.1007/978-3-031-43688-8_6
- Coluccia, B., Agnusdei, G.P., De Leo, F., Vecchio, Y., La Fata, C., & Miglietta, P.P. (2022). Assessing the Carbon Footprint Across the Supply Chain: Cow Milk vs Soy Drink. *Science of The Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151200>
- De Angelis, R., Howard, M., & Miemczyk, J. (2018). Supply Chain Management and the Circular Economy: Towards the Circular Supply Chain. *Production Planning & Control*, 29(6), 425–437. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449244>
- Dieguez-Santana, K., Sarduy-Pereira, L., Ruiz-Reyes, E., & Sablón Cossío, N. (2025). Application of the Circular Economy in Research in the Agri-Food Supply Chain: Bibliometric, Network, and Content Analysis. *Sustainability*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/su17051899>
- Dongfang, W., Ponce, P., Yu, Z., Ponce, K., & Tanveer, M. (2022). The Future of Industry 4.0 and the Circular Economy in Chinese Supply Chain: In the Era of Post-COVID-19 Pandemic. *Operations Management Research*, 15(1), 342–356. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00220-0>
- Dovhal, O., Potryvaieva, N., Bilichenko, A., Kuzoma, V., and Borko, T. (2024). Agricultural Sector Circular Economy Development: Agroecological Approach. *Ekonomika APK*, 31(4), 10–22. <https://doi.org/10.32317/ekon.apk/4.2024.10>
- Dumitra, E.-C., Budu, R.A., Paraschiv, L.I., & Lombardi, M. (2024). Digitalization's Vital Role in Sustainable Circular Economy. In: *Proceedings of the International Conference on Economics and Social Sciences. The International Conference on Economics and Social Sciences*. Editura ASE. <https://doi.org/10.24818/icess/2024/076>
- Dwivedi, A., & Paul, S.K. (2022). A Framework for Digital Supply Chains in the Era of Circular Economy: Implications on Environmental Sustainability. *Business Strategy and the Environment*, 31(4), 1249–1274. <https://doi.org/10.1002/bse.2953>
- Esposito, B., Sica, D., Malandrino, O., & Supino, S. (2023). An Innovative Approach for Circular Data-Driven Decision-Making in the New Normal Scenario: Opportunities for the Agri-Food Sector. *Corporate Governance and Research & Development Studies*, 1, 15–32. <https://doi.org/10.3280/cgrds1-2023oa15832>
- FAO. (2023). The State of Food and Agriculture 2023. Revealing the True Cost of Food to Transform Agrifood Systems. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc7724en>
- Farazi, M.Z.R. (2024). Designing Circular Supply Chains With Digital Technologies for Competitive Sustainability: An Operation Management Perspective. *International Journal of Science and Research Archive*, 13(1), 2346–2359. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.1928>

- Fassio, F., Borda, I.E.P., Talpo, E., Savina, A., Rovera, F., Pieretto, O., & Zarri, D. (2022). Assessing Circular Economy Opportunities at the Food Supply Chain Level: The Case of Five Piedmont Product Chains. *Sustainability*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/su141710778>
- Geissdoerfer, M., Morioka, S.N., de Carvalho, M.M., & Evans, S. (2018). Business Models and Supply Chains for the Circular Economy. *Journal of Cleaner Production*, 190, 712–721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159>
- Genovese, A., Ponte, B., Cannella, S., & Dominguez, R. (2023). Empowering the Transition Towards a Circular Economy Through Empirically-Driven Research: Past, Present, and Future. *International Journal of Production Economics*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108765>
- Gkountani, V., Tsoulfas, G., & Rachaniotis, N. (2021). Circular Economy and Resilience: Convergences and Deviations in the Case of Agri-Food Supply Chains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 899(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/899/1/012001>
- Habeşoğlu, O., Samour, A., Tursoy, T., Ahmadi, M., Abdullah, L., & Othman, M. (2022). A Study of Environmental Degradation in Turkey and its Relationship to Oil Prices and Financial Strategies: Novel Findings in Context of Energy Transition. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 876809. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.876809>
- Islam, M. (2024). A Systematic Literature Review On Building Resilient Supply Chains Through Circular Economy And Digital Twin Integration. *Frontiers in Applied Engineering and Technology*, 1, 304–324. <https://doi.org/10.70937/faet.v1i01.44>
- Kalogiannidis, S., Kalfas, D., Chatzitheodoridis, F., & Kontsas, S. (2022). The Impact of Digitalization in Supporting the Performance of Circular Economy: A Case Study of Greece. *Journal of Risk and Financial Management*, 15(8), 349. <https://doi.org/10.3390/jrfm15080349>
- Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N.C. (2020). Industry 4.0 and Lean Manufacturing Practices for Sustainable Organisational Performance in Indian Manufacturing Companies. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1319–1337. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772>
- Khan, S.A. R., Piprani, A.Z., & Yu, Z. (2022). Digital Technology and Circular Economy Practices: Future of Supply Chains. *Operations Management Research*, 15(1), 676–688. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00247-3>
- Khong, I. (2023). The Circular Economy's Performance and the Impact of Digitalization. *International Transactions on Education Technology (ITEE)*, 2(1), 18–23. <https://doi.org/10.33050/itee.v2i1.389>
- Krstić, M., Elia, V., Agnusdei, G.P., De Leo, F., Tadić, S., & Miglietta, P.P. (2024). Evaluation of the Agri-Food Supply Chain Risks: The Circular Economy Context. *British Food Journal*, 126(1), 113–133. <https://doi.org/10.1108/BFJ-12-2022-1116>
- Kusumowardani, N., Tjahjono, B., & Priadi, C.R. (2021). Circular Economy Adoption in the Upstream Agri-Food supply Chain: Understanding the Implications of the Two Theoretical Lenses. In: *11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 5051–5060. <https://doi.org/10.46254/AN11.20210866>
- Kyfyak, V., & Oliinyk, O. (2025). Integration of the Principles of the Circular Economy in the Sustainable Development of Business Models of the Agricultural Sector in the Conditions of Digitalization. *Economic Scope*, 197, 38–45. <https://doi.org/10.30838/EP.197.38-45>
- Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging Digital Capabilities Toward a Circular Economy: Reinforcing Sustainable Supply Chain Management with Industry 4.0 Technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G.P., & Abu-Mahfouz, A.M. (2020). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322–4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- Liu, J., Qudoods, M. U., Akhtar, M. H., Amin, M. S., Tariq, M., & Lamar, A. (2022). Digital Technologies and Circular Economy in Supply Chain Management: In The Era of COVID-19 Pandemic. *Operations Management Research*, 15(1), 326–341. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00227-7>
- Lugo, S. D.R., Kimita, K., & Nishino, N. (2022). Circular Food Economy Framework: Challenges and Initiatives. *Proceedia CIRP*, 112(2), 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.019>
- Marquina, M.V.H., Le Dain, M.-A., Joly, I., & Zwolinski, P. (2024). Exploring Determinants of Collaboration in Circular Supply Chains: A Social Exchange Theory Perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 50(8), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.07.017>
- Mehmood, A., Ahmed, S., Viza, E., Bogush, A., & Ayyub, R.M. (2021). Drivers and Barriers Towards Circular Economy in Agri-Food Supply Chain: A Review. *Business Strategy & Development*, 4(4), 465–481. <https://doi.org/10.1002/bsd2.171>
- Nowicka, K. (2021). Circular Economy Values Perspectives on Digital Supply Chain Business Models. In: A. Szelażowska, A. Pluta-Zaremba (Eds.), *The Economics of Sustainable Transformation* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003219958>
- Odewole, M.M., Sanusi, M.S., Sunmonu, M.O., Yerima, S., Mobolaji, D., & Olaoye, J.O. (2024). Digitalization of Rice Value Chain in Nigeria With Circular Economy Inclusion for Improved Productivity: A Review. *Heliyon*, 10(11), e31611. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31611>

- Papadopoulos, T., Singh, S.P., Spanaki, K., Gunasekaran, A., & Dubey, R. (2022). Towards the next generation of manufacturing: implications of big data and Digitalization in the context of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 33(2–3), 101–104. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810767>
- Perçin, S. (2022). Evaluating the Circular Economy-Based Big Data Analytics Capabilities of Circular Agri-Food Supply Chains: The Context of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(55), 83220–83233. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21680-2>
- Radavičius, T., & Tvaronavičienė, M. (2021). Circular Supply Chain: Literature Review and Theoretical Framework. In: *Contemporary Issues in Business, Management and Economics Engineering 2021: Selected Papers*. Vilnius Tech.
- Rodríguez-Mañay, L.O., Guaita-Pradas, I., & Marques-Pérez, I. (2025). Circular Economy Agriculture and Supply Chain: A Literature Review. *Cuadernos de Gestión*, 25(2) 1–13. <https://doi.org/10.5295/cdg.242224lo>
- Stempfle, S., Carlucci, D., de Gennaro, B.C., Roselli, L., & Giannoccaro, G. (2021). Available Pathways for Operationalising the Circular Economy Into the Olive Oil Supply Chain: Mapping Evidence From a Scoping Literature Review. *Sustainability*, 13(17), 9789. <https://doi.org/10.3390/su13179789>
- Sudusinghe, J.I., & Seuring, S. (2022). Supply Chain Collaboration and Sustainability Performance in Circular Economy: A Systematic Literature Review. *International Journal of Production Economics*, 245, 108402. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108402>
- Sun, A. (2018). Analysis of Sustainable Supply Chain Management and Circular Economy Capability from the Perspective of Institutional Pressure. In: *2018 International Conference on Educational Research, Economics, Management and Social Sciences*. 109–113.
- Tsolakis, N., Harrington, T.S., & Srari, J.S. (2023). Digital Supply Network Design: A Circular Economy 4.0 Decisions-Making System for Real-World Challenges. *Production Planning & Control*, 34(10), 941–966. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1980907>
- Țurcan, I., Țurcan, R., & Stratila, A. (2023). Digitalization and its Role in the Development of Circular Economy Business Models. In: *Competitiveness and Sustainable Development* (pp. 103–109). Technical University of Moldova. <https://doi.org/10.52326/csd2023.16>
- van Wassenhaer, L., Verdouw, C., Kassahun, A., van Hilten, M., van der Meij, K., & Tekinerdogan, B. (2023). Tokenising Circularity in Agri-Food Systems: A Conceptual Framework and Exploratory Study. *Journal of Cleaner Production*, 413, 137527. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137527>
- Varma, S., Patra, P., & Shankar, R. (2025). The Food Industry Supply Chain: Synergy of Environmental Orientation and Collaboration in Implementing Circularity. *Business Strategy and the Environment*, 34(1), 218–241. <https://doi.org/10.1002/bse.3988>
- Veloso, V., Santos, A., Carvalho, A., & Barbosa-Póvoa, A. (2025). A Comprehensive Framework for Assessing Circular Economy Strategies in Agri-Food Supply Chains. *Environment, Development and Sustainability*, 1–46. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05755-3>
- Vetrova, M., & Ivanova, D. (2021). Closed Product Life Cycle as a Basis of the Circular Economy. *Journal of Business & Economics Review (JBBER)*, 5(4). [https://doi.org/10.35609/jber.2021.5.4\(4\)](https://doi.org/10.35609/jber.2021.5.4(4))
- Xu, J. (2024). Spatial Spillover and Threshold Effects of Digital Rural Development on Agricultural Circular Economy Growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1337637>
- Yuan, S., & Pan, X. (2023). The Effects of Digital Technology Application and Supply Chain Management on Corporate Circular Economy: A Dynamic Capability View. *Journal of Environmental Management*, 341(17). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118082>
- Zhang, A., & Seuring, S. (2024). Digital Product Passport for Sustainable and Circular Supply Chain Management: A Structured Review of Use Cases. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 27(12), 2513–2540. <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2374256>
- Zhang, X., Sun, P., Xu, J., Wang, X., Yu, J., Zhao, Z., & Dong, Y. (2020). Blockchain-Based Safety Management System for the Grain Supply Chain. *IEEE Access*, 8, 36398–36410. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975415>

Submission date / Data nadeŝtania: 9.09.2025.

Final revision date / Data ostatniej recenzji: 15.01.2026.

Acceptance date / Data akceptacji: 23.04.2026.

© 2026 Ağızan, K., & Ağızan, 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: Ağızan, K. i Ağızan, 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/>)

